



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

SIMULACIONES NUMÉRICAS APLICADAS A ELEMENTOS SOMETIDOS A FLUJOS EN CANALES ABIERTOS: VERTEDEROS

Alumno: Ángel Aguilera Redondo

Tutor 1: María Victoria Ortega Garrido

Tutor 2: Mario Miró Barnés

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2022

Índice.

1. Resumen.	9
2. Objetivos.	10
3. Antecedentes.	11
4. Introducción.	12
4.1. Introducción a canales hidráulicos abiertos.	12
4.1.1. Definición.	12
4.1.2. Tipos de canales.	12
4.1.3. Características geométrico-hidráulicas de los canales.	13
4.1.4. Parámetro que afectan al movimiento de nuestro fluido.	14
4.1.5. Flujo Permanente en canales, Movimiento Uniforme.	17
4.1.6. Flujo Permanente en canales, Movimiento No-Uniforme.	19
4.1.6.1. Conservación de la masa.	19
4.1.6.2. Conservación de la cantidad de movimiento.	20
4.2. Introducción a vertederos hidráulicos.	22
4.2.1. Definición.	22
4.2.2. Funciones de los vertederos.	22
4.2.3. Partes de un vertedero.	22
4.2.4. Clasificación de los vertederos.	23
4.2.4.1. Clasificación por geometría.	23
4.2.4.2. Clasificación por espesor de la pared.	24
4.2.4.3. Clasificación por longitud de la cresta.	24
5. Vvertederos de Pared Delgada de Sección Rectangular.	24
• Fórmula de Francis.	30
• Fórmula de Bazin ampliada por Hégly.	30
• Fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos.	31
• Fórmula de Kindsvater-Carter.	32
6. Vvertederos de Pared Delgada de Sección Triangular.	34
• Fórmula de L. Cruz Coke.	36
• Fórmula de Thomson.	37
• Fórmula de Thomson - Horace King.	38
• Fórmula de Thomson – Barnes.	38
• Fórmula de Thomson – Raymond Boucher.	38
• Fórmula de Thomson – James Barr.	38
• Fórmula de Thomson – Hégly.	39
• Fórmula Raymond Boucher – Cone.	39
• Fórmula Gourley – Crimp.	39
• Fórmula Heyndrick.	39
7. Vvertederos de Pared Gruesa.	41
7.1. Tipos de Vvertedero de Cresta Ancha.	41
7.2. Partes de un Vvertedero de Borde Ancho.	41
7.3. Características intrínsecas de un Vvertedero de Pared Gruesa.	42
8. Conclusión sobre la caracterización de los vertederos.	44

9. Metodología experimental de los distintos ensayos.	45
9.1. Materiales.	45
9.2. Métodos seguidos durante el ensayo de vertederos.	51
9.2.1. Hipótesis en los ensayos.	51
9.2.2. Método de medición del ensayo de vertederos.	53
9.2.3. Método de simulación mediante software de CFD.	54
10. Discusión de los resultados obtenidos experimentalmente y mediante simulación.	75
10.1. Resultados Obtenidos para el Vertedero Rectangular.	75
10.1.1. Medidas obtenidas para el Vertedero Rectangular a una frecuencia de bomba de 20 Hz.	75
10.1.2. Medidas obtenidas para el Vertedero Rectangular a una frecuencia de bomba de 30 Hz.	81
10.2. Resultados Obtenidos para el Vertedero Triangular.	87
10.2.1. Medidas obtenidas para el Vertedero Triangular a una frecuencia de bomba de 20 Hz.	87
10.2.2. Medidas obtenidas para el Vertedero Triangular a una frecuencia de bomba de 30 Hz.	93
10.3. Resultados Obtenidos para el Vertedero de Pared Gruesa.	99
10.3.1. Medidas obtenidas para el Vertedero de Pared Gruesa a una frecuencia de bomba de 20 Hz.	99
10.3.2. Medidas obtenidas para el Vertedero de Pared Gruesa a una frecuencia de bomba de 30 Hz.	105
11. Conclusiones.	111
12. Referencias Bibliográficas.	113

Índice de Ilustraciones.

<i>Ilustración 1: Tipos de canales dependiendo de su geometría.</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 2: Sección transversal de un canal cualquiera.</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 3: Sección de un canal en movimiento uniforme.....</i>	<i>17</i>
<i>Ilustración 4: Esquema de los tipos de medición del nivel del agua y su pequeña diferencia cuando el ángulo es muy pequeño</i>	<i>20</i>
<i>Ilustración 6: Esquema de los tipos de vertederos existentes</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 7: Esquema del vertido de un fluido en un vertedero de pared delgada de sección rectangular.....</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 8: Esquema del Transcurso de un fluido en un vertedero de pared delgada de sección rectangular.....</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 9: Esquema frontal de un vertedero de pared delgada de sección triangular.</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 10: Tipos de vertederos de cresta ancha.</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 11: Esquema de un Vertedero de Cresta Ancha.....</i>	<i>41</i>

Índice Fotografías.

<i>Fotografía 1: Canal hidráulico del laboratorio de la E.P.S.L.....</i>	<i>45</i>
<i>Fotografía 2: Bomba acoplada al canal del laboratorio de la E.P.S.L.</i>	<i>46</i>
<i>Fotografía 3: Cuadro de control de la Bomba del canal del laboratorio de la E.P.S.L.</i>	<i>46</i>
<i>Fotografía 4: Unidad de control de la Bomba del canal del laboratorio de la E.P.S.L.</i>	<i>47</i>
<i>Fotografía 5: Tubo de Pitot.....</i>	<i>47</i>
<i>Fotografía 6: Tubos piezométricos acoplados al tubo de Pitot.</i>	<i>48</i>
<i>Fotografía 7: Vertedero de pared delgada de sección rectangular.....</i>	<i>48</i>
<i>Fotografía 8: Vertedero de pared delgada de sección triangular.</i>	<i>49</i>
<i>Fotografía 8: Vertedero de pared gruesa de sección rectangular.</i>	<i>49</i>
<i>Fotografía 9: Caja de herramientas.</i>	<i>50</i>
<i>Fotografía 10: PC y Smartphone.</i>	<i>50</i>
<i>Fotografía 11: Vertedero de pared estrecha de sección Rectangular en Reposo en el canal del laboratorio de la E.P.S.L.</i>	<i>53</i>
<i>Fotografía 12: Vertedero de pared estrecha de sección Triangular a Frecuencia de bomba de 20Hz en el canal del laboratorio de la E.P.S.L.....</i>	<i>54</i>
<i>Fotografía 13: Planimetría de la pared del Vertedero de pared estrecha de sección Rectangular realizada en Autodesk Inventor.</i>	<i>55</i>
<i>Fotografía 14: Extrusión de la pared del Vertedero de pared estrecha de sección Rectangular realizado en Autodesk Inventor</i>	<i>55</i>
<i>Fotografía 15: Exportación de caso a archivo.stl realizado en Autodesk Inventor....</i>	<i>56</i>
<i>Fotografía 16: Pantalla de inicio del software Simflow</i>	<i>56</i>
<i>Fotografía 17: Pantalla de trabajo y exportación del modelo a Simflow.....</i>	<i>57</i>
<i>Fotografía 18: Pantalla de cotas del modelo a Simflow.</i>	<i>57</i>
<i>Fotografía 19: Primeros pasos al mallado de nuestro modelo en Simflow.....</i>	<i>58</i>
<i>Fotografía 20: Condiciones del mallado de nuestro modelo en Simflow.....</i>	<i>58</i>
<i>Fotografía 21: Punto de mallado de nuestro modelo en Simflow.</i>	<i>59</i>
<i>Fotografía 22: Malla creada para el Vertedero de Pared Rectangular en Simflow..</i>	<i>60</i>
<i>Fotografía 23: Malla creada para el Vertedero Triangular en Simflow.....</i>	<i>60</i>
<i>Fotografía 24: Malla creada para el Vertedero de pared Gruesa en Simflow.....</i>	<i>61</i>
<i>Fotografía 25: Elección de solucionador adecuado en Simflow.....</i>	<i>61</i>

<i>Fotografía 26: Elección de un modelo de turbulencia adecuado en Simflow.</i>	<i>62</i>
<i>Fotografía 27: Elección de las condiciones inlet en Simflow.....</i>	<i>63</i>
<i>Fotografía 28: Elección de las condiciones outlet en Simflow.....</i>	<i>63</i>
<i>Fotografía 29: Elección de las condiciones de las paredes laterales en Simflow.</i>	<i>64</i>
<i>Fotografía 30: Elección de las condiciones top en Simflow.</i>	<i>65</i>
<i>Fotografía 31: Elección de las condiciones bottom en Simflow.....</i>	<i>65</i>
<i>Fotografía 32: Elección de las condiciones del vertedero en Simflow.</i>	<i>66</i>
<i>Fotografía 33: Elección de las condiciones de la fase Alpha del resto de partes que no son la parte top en Simflow.</i>	<i>66</i>
<i>Fotografía 34: Creación del fluido a estudiar sobre nuestra malla en Simflow.....</i>	<i>67</i>
<i>Fotografía 33: Caracterización de los fluidos que recorren el mallado en Simflow. .</i>	<i>67</i>
<i>Fotografía 34: Caracterización del agua que recorre el mallado en Simflow.</i>	<i>68</i>
<i>Fotografía 35: Creación del plano de nuestro fluido y caracterización de la simulación en Simflow.</i>	<i>68</i>
<i>Fotografía 36: Gráfica de residuales para el caso de 20 Hz en Simflow.</i>	<i>69</i>
<i>Fotografía 37: Plano de la Energía a lo largo del mallado en Simflow.</i>	<i>69</i>
<i>Fotografía 38: Plano Alpha a lo largo del mallado en Simflow.....</i>	<i>70</i>
<i>Fotografía 39: Plano de la densidad a lo largo del mallado en Simflow.</i>	<i>70</i>
<i>Fotografía 40: Elección de software de Post-Procesado en Simflow.</i>	<i>71</i>
<i>Fotografía 41: Malla cargada para su Post-Procesado en Paraview.....</i>	<i>71</i>
<i>Fotografía 42: Primera fase del clip en Paraview.....</i>	<i>72</i>
<i>Fotografía 43: Clip terminado en Paraview.....</i>	<i>72</i>
<i>Fotografía 44: Clip del video ya terminado en su último momento de tiempo en Paraview.....</i>	<i>73</i>
<i>Fotografía 45: Plano longitudinal de velocidad.....</i>	<i>73</i>
<i>Fotografía 46: Gráfica de velocidad de nuestro caso en Paraview.</i>	<i>74</i>
<i>Fotografía 47: Punto en el plano para mostrar la velocidad puntual en aguas abajo mediante Paraview.....</i>	<i>74</i>
<i>Fotografía 48: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.</i>	<i>77</i>
<i>Fotografía 49: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.</i>	<i>78</i>
<i>Fotografía 50: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 20 Hz.....</i>	<i>78</i>
<i>Fotografía 51: Ensayo en Simflow de la velocidad U al caudal pertinente a 20 Hz. .</i>	<i>79</i>
<i>Fotografía 52: Ensayo en Simflow de la fase alpha al caudal pertinente a 20 Hz.....</i>	<i>79</i>
<i>Fotografía 53: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 20 Hz.</i>	<i>80</i>

Fotografía 54: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L	82
Fotografía 55: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L.	83
Fotografía 56: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 30 Hz.....	83
Fotografía 57: Ensayo en Simflow de la velocidad U al caudal pertinente a 20 Hz. .	84
Fotografía 58: Ensayo en Simflow de la fase alpha al caudal pertinente a 30 Hz.....	84
Fotografía 59: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 30 Hz.	85
Fotografía 60: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.	89
Fotografía 61: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.	89
Fotografía 62: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 20 Hz.....	89
Fotografía 63: Ensayo en Simflow de la energía U al caudal pertinente a 20 Hz.	90
Fotografía 64: Ensayo en Simflow de la fase Alpha al caudal pertinente a 20 Hz. ...	90
Fotografía 65: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 20 Hz.	91
Fotografía 66: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L.	94
Fotografía 67: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L.	95
Fotografía 68: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 30 Hz.....	95
Fotografía 69: Ensayo en Simflow de la velocidad U al caudal pertinente a 30 Hz. .	96
Fotografía 70: Ensayo en Simflow de la fase Alpha al caudal pertinente a 30 Hz. ...	96
Fotografía 71: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 30 Hz.	97
Fotografía 72: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.	101
Fotografía 73: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.	101
Fotografía 74: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 20 Hz.....	101
Fotografía 75: Ensayo en Simflow de la velocidad U al caudal pertinente a 20 Hz.	102
Fotografía 76: Ensayo en Simflow de la fase Alpha al caudal pertinente a 20 Hz. .	103
Fotografía 77: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 20 Hz.	103
Fotografía 78: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L.	106
Fotografía 79: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L.	107
Fotografía 80: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 30 Hz.....	107
Fotografía 81: Ensayo en Simflow de la energía U al caudal pertinente a 30 Hz. ..	108
Fotografía 82: Ensayo en Simflow de la fase Alpha al caudal pertinente a 30 Hz. .	108
Fotografía 83: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 30 Hz.	109

Índice de Tablas.

<i>Tabla 1: Tabla de coeficientes en vertederos triangulares de pared delgada según Coke en la cual viene señalado el caso de estudio.</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 2: Datos experimentales para el vertedero de pared rectangular a 20 Hz.</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 3: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared rectangular a 20 Hz.</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 4: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 20Hz... </i>	<i>76</i>
<i>Tabla 5: Datos experimentales para el vertedero de pared rectangular a 30 Hz.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 6: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared rectangular a 30 Hz.</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 7: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 30Hz... </i>	<i>82</i>
<i>Tabla 8: Datos experimentales para el vertedero de pared triangular a 20 Hz.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 9: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared triangular a 20 Hz.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 10: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 20Hz.. </i>	<i>88</i>
<i>Tabla 11: Datos experimentales para el vertedero de pared triangular a 30 Hz.</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 12: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared triangular a 30 Hz.</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 13: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 30Hz.. </i>	<i>94</i>
<i>Tabla 14: Datos experimentales para el vertedero de pared gruesa 20 Hz.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 15: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared gruesa 20 Hz.</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 16: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 20Hz. </i>	<i>100</i>
<i>Tabla 17: Datos experimentales para el vertedero de pared triangular a 30 Hz.</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 18: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared triangular a 30 Hz.</i>	<i>105</i>
<i>Tabla 19: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 30Hz. </i>	<i>106</i>

Índice Gráficas.

<i>Gráfica 1: Gráfica Profundidad de flujo – Energía Específica.....</i>	<i>16</i>
<i>Gráfica 2: Gráfica empírica de Kindsvater-Carter para el cálculo de K_b en función de b/R.</i>	<i>32</i>
<i>Gráfica 3: Gráfica empírica de Kindsvater-Carter para el cálculo de C_e en función de h/P.</i>	<i>33</i>
<i>Gráfica 3: Gráfica de coeficientes de descarga en vertederos triangulares de pared delgada.</i>	<i>36</i>
<i>Gráfica 4: Perfil de Velocidades Vertical</i>	<i>52</i>
<i>Gráfica 5: Perfil de Velocidades Horizontal.....</i>	<i>52</i>
<i>Gráfica 6: Gráfica de Paraview velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 20Hz.</i>	<i>77</i>
<i>Gráfica 7: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 20 Hz.</i>	<i>80</i>
<i>Gráfica 8: Gráfica de Paraview velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 20Hz.</i>	<i>82</i>
<i>Gráfica 9: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 30 Hz.</i>	<i>86</i>
<i>Gráfica 10: Gráfica de Paraview de velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 20Hz</i>	<i>88</i>
<i>Gráfica 11: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 20 Hz.</i>	<i>92</i>
<i>Gráfica 12: Gráfica de Paraview de velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 30Hz.</i>	<i>94</i>
<i>Gráfica 13: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 30 Hz.</i>	<i>98</i>
<i>Gráfica 14: Gráfica de Paraview de velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 20Hz</i>	<i>100</i>
<i>Gráfica 15: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 20 Hz.</i>	<i>104</i>
<i>Gráfica 16: Gráfica de Paraview de velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 30Hz</i>	<i>106</i>
<i>Gráfica 17: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 30 Hz.</i>	<i>110</i>

1. Resumen.

En la actualidad, todas las empresas antes de invertir en el desarrollo de un producto o servicio hay un equipo especializado en el diseño y la simulación del mismo para comprobar la viabilidad a modo de reducir gastos para tener mayor competitividad en el mercado.

Por lo cual, en este documento se va presentar un proyecto de estudio de la comparativa entre ensayos de manera experimental con distintos tipos de vertedero en un canal hidráulico abierto, más concretamente, estudiando velocidad y caudal de estos, frente al estudio computacional de estos mismos, con diseños fieles al real para obtener, dentro de lo posible, un diseño que genere y simule lo estudiado en el canal de manera manual para poder tener una comparación fidedigna.

Además, se detallarán las ecuaciones empíricas para la obtención de caudal y coeficiente de descarga, así como los inconvenientes acaecidos durante los ensayos de los vertederos y las posibles soluciones en la realización de las mediciones y caracterizaciones en cada uno de estos.

2. Objetivos.

El objetivo de esta memoria es la medición y comparación de los datos obtenidos de manera experimental de los vertederos en el canal del laboratorio de la escuela superior de Linares con los datos obtenidos de forma teórica a través de un ordenador con un software de simulación de CFD.

- Los objetivos principales presentes en esta memoria son los siguientes:
- Estudiar teoría sobre el flujo en canales abiertos.
- Realizar un estudio de la velocidad del flujo en canales abiertos.
- Estudiar distintos elementos y sus geometrías presentes habitualmente en canales.
- Elegir software adecuado para la simulación computacional de flujos (CFD).
- Estudiar modelos numéricos apropiados para los ensayos a realizar.
- Comparar resultados teóricos y experimentales obtenidos.

3. Antecedentes.

Los vertederos hidráulicos son elementos complejos e importantes utilizados en labores de distribución de agua, redes de saneamientos, sistemas de evacuación de aguas residuales o en sistemas de control de aguas pluviales. Estos permiten controlar y medir niveles ya sea en embalses, canales o depósitos y también permiten derivar caudales o elevarlos.

Como veremos posteriormente, existen de diversas geometrías y se clasifican por esta especificación.

Cada vez es más frecuente su instalación ya sea en corrientes naturales o artificiales. El problema a priori surge en qué tipo de vertedero usar ya que se debe caracterizar de manera correcta tanto el vertedero a emplear como el canal de destino en el cual albergará el vertedero.

Numerosos estudios experimentales pretenden evaluar la capacidad hidráulica de estos dispositivos en canales de lámina libre. Como veremos posteriormente, numerosos científicos trataron de caracterizar estos vertederos bajo la forma clásica por experiencias empíricas de los ensayos de hidráulica. Hoy en día estos resultados se obtienen de una manera más fiel, simple, rápida y fidedigna a través de software de CFD.

4. Introducción.

4.1. Introducción a canales hidráulicos abiertos.

4.1.1. Definición.

Un canal es un conducto natural o artificial, el cual presenta una superficie libre expuesta a la presión atmosférica, por donde un líquido puede discurrir solo con la acción de esta misma presión por el cambio en la elevación del terreno.

$$\frac{dP}{dl} = \frac{dp}{dl} + \frac{d(pgz)}{dl}$$

Por lo que podemos decir que el movimiento de nuestro fluido se genera gracias a las fuerzas másicas, en concreto, la gravedad.

4.1.2. Tipos de canales.

Los canales hidráulicos los podemos clasificar en 2 tipos según su construcción. Pueden ser Naturales o Artificiales.

Los canales naturales: Arroyos, ríos, torrentes...

Los canales artificiales: canales de riego, suministro, evacuación de aguas residuales o pluviales, de navegación y de drenaje.

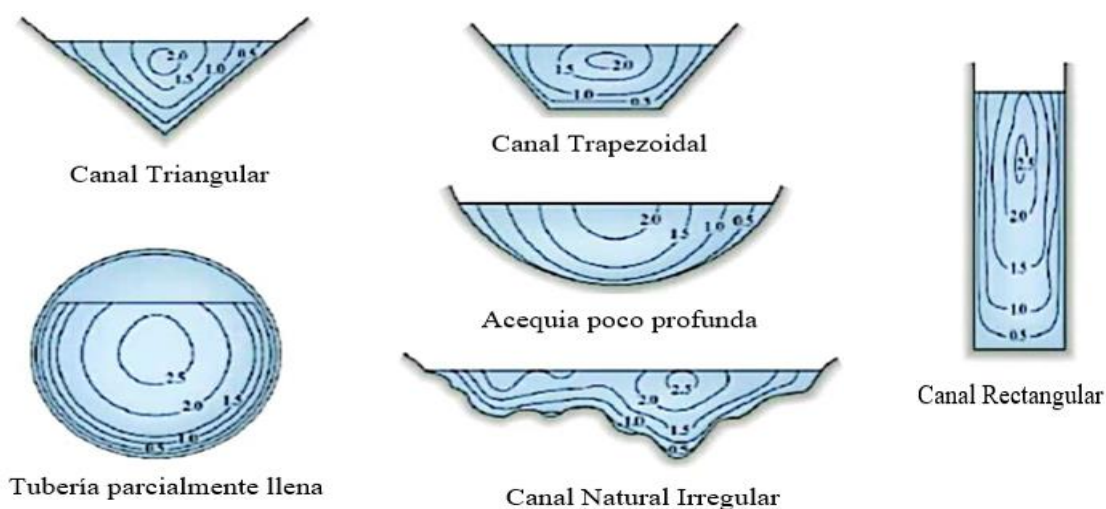


Ilustración 1: Tipos de canales dependiendo de su geometría.

4.1.3. Características geométrico-hidráulicas de los canales.

Dichas características nos permiten diferenciar los distintos tipos de canal partiendo de los elementos que los constituyen diferenciando sus parámetros hidráulicos y formas del canal.

En nuestro caso es nuestro *tramo de canal es Rectangular*, por lo que podemos decir que es un tramo prismático porque es de traza rectilínea y de pendiente longitudinal constante del cual también permanecen invariables sus características de sección y dimensiones.

- Las características esenciales de un canal son 3 partes:
- La solera que es la parte del fondo del canal.
- El margen que es el ancho entre paredes laterales del canal.
- La coronación que es la parte más alta del canal.
- La sección transversal de un canal está compuesta por:

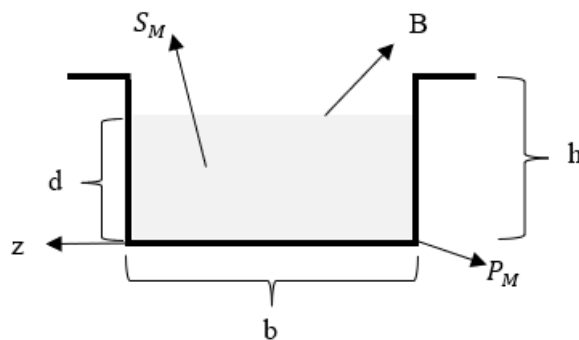


Ilustración 2: Sección transversal de un canal cualquiera.

- S_M = Sección mojada: Sección dentro del canal ocupada por el agua.
- P_M = Perímetro mojado: Perímetro dentro del canal de la sección que está tocando el agua.
- R_h = Radio Hidráulico: Relación entre la sección mojada y el perímetro mojado el cual este sirve para medir el efecto de forma del canal.
- $R_h = \frac{S_M}{P_M}$
- b = Anchura de la base o margen: Distancia transversal entre las dos paredes del canal.
- B = Anchura de la superficie libre: Distancia transversal de la sección del canal medido a nivel de la superficie.

- D = Profundidad Hidráulica: Relación entre la sección mojada y el ancho de la superficie libre.
- $D = \frac{S_M}{B}$
- h = Altura del canal: Distancia entre el fondo hasta coronar el canal.
- d = Calado de la sección mojada: Distancia entre la solera hasta la cota mayor de sección mojada.
- z = Talud: Inclinação de las paredes de la sección transversal.

4.1.4. Parámetro que afectan al movimiento de nuestro fluido.

Los flujos de lámina libre por naturaleza, en la aplicación práctica suelen ser siempre turbulentos y en régimen totalmente rugoso. El cálculo de la viscosidad es muy importante ya que gracias a él podemos definir el *número de Reynolds*.

Este lo podemos definir como el parámetro adimensional que se utiliza para dictaminar que tipo de flujo tiene un fluido.

$$Re = \frac{R_H * U}{\nu} = \frac{\rho * V * y_h}{\mu}$$

Dónde:

Re: Número de Reynolds.

ρ : Densidad del fluido.

R_H : Radio hidráulico.

y_h : Longitud característica.

U: Velocidad media del flujo.

V: Velocidad del fluido.

ν : Viscosidad cinemática.

μ : Viscosidad dinámica

Gracias a este parámetro, podemos determinar en qué régimen estamos teniendo en cuenta estos límites:

- | | |
|---------------------|-----------------|
| • Flujo laminar: | Re < 500 |
| • Transición: | 500 < Re < 1000 |
| • Flujo turbulento: | Re > 1000 |

Otro parámetro que influye sobre un fluido es el efecto de la *tensión superficial*, aunque en mi caso, comparándolo con el calado, esta es muy pequeña siendo despreciable. El parámetro que estudia esta tensión es el **número de Weber**.

Este lo podemos definir como el parámetro adimensional que se utiliza para relacionar la inercia con la tensión superficial entre dos flujos multifásicos.

$$We = \frac{\rho * V^2 * y_h}{\sigma}$$

Dónde:

We: Número de Weber. σ : Tensión superficial. y_h : Longitud característica.

V: Velocidad del fluido. ρ : Densidad del fluido.

Otro parámetro que influye sobre un fluido en un canal abierto es el de la *energía específica*. Esta la podemos definir como la energía del peso del agua por sección, medida desde la solera del canal, por lo que esta variará a lo largo del canal dependiendo de las irregularidades que haya en el mismo. Para poder calcular este parámetro necesitaremos el calado, la velocidad en la sección o el caudal, que este debe ser constante a lo largo del canal. Por lo que con lo citado anteriormente podemos discernir entre dos tipos de energía específica dependiendo de los parámetros introducidos.

Será *energía específica experimental* a la calculada con los datos de velocidad o será *energía específica teórica* si es calculada con datos de caudal.

$$E_e = \frac{V^2}{2 * g} + y \text{ (m)}$$

$$E_t = \frac{Q^2}{2 * g * y} + y \text{ (m)}$$

Dónde:

E_e : Energía específica experimental.

E_t : Energía específica teórica.

g: Factor de la gravedad.

V: Velocidad del fluido.

y: Calado.

Q: Caudal.

Otro parámetro que influye sobre un fluido es el efecto de la gravedad frente a las fuerzas de inercia y la velocidad de onda. El parámetro que relaciona todo esto es el *número de Froude*.

Este lo podemos definir como el parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de inercia frente a las fuerzas de gravedad en un *flujo de lámina libre*.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * y_h}}$$

Dónde:

Fr: Número de Froude.

y_h : Longitud característica.

V: Velocidad del fluido.

g: Factor de la gravedad.

Se definen para un $Fr=1$ una Velocidad crítica (V_c) y una profundidad crítica y_c para poder dictaminar estos límites:

Régimen lento o Subcrítico: $Fr < 1; V < V_c$

Régimen crítico: $Fr = 1; V = V_c$

Régimen rápido o Supercrítico: $Fr > 1; V > V_c$

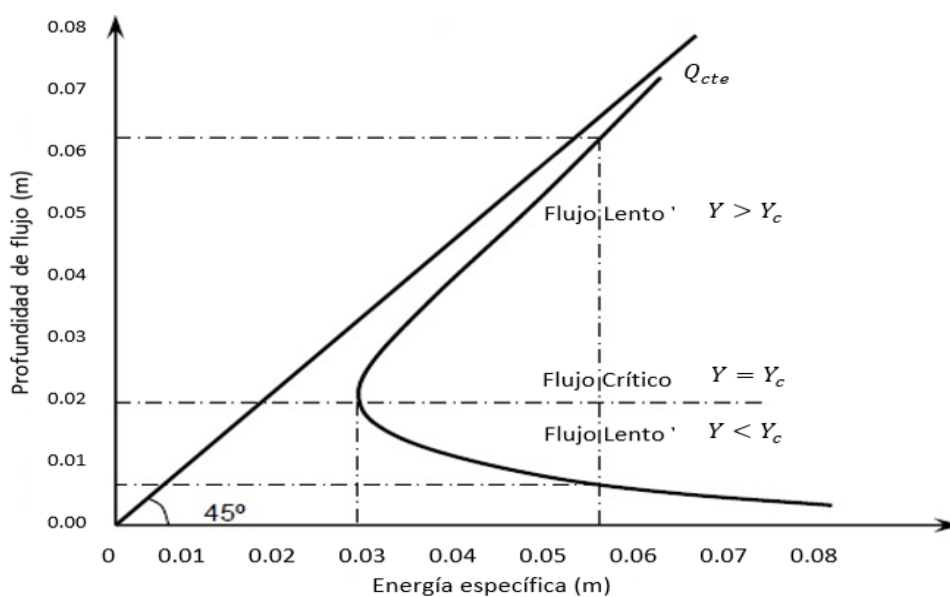
Las principales diferencias entre *Subcrítico* y *Supercrítico* son:

En un flujo subcrítico, las ondas superficiales remontan el flujo y en un flujo supercrítico no lo remontan.

En un flujo subcrítico está controlado desde aguas abajo en cambio en un flujo supercrítico están controladas agua arriba.

En un flujo subcrítico tanto en la zona de aguas arriba como en la zona de aguas abajo están en conexión hidráulica en cambio en un flujo supercrítico no lo están.

En relación con lo comentado anteriormente sobre la energía específica, esta tiene un valor distinto dependiendo la sección a estudiar, por lo que, para un mismo valor de energía y caudal, se pueden obtener los distintos regímenes como se muestra a continuación:



Gráfica 1: Gráfica Profundidad de flujo – Energía Específica.

4.1.5. Flujo Permanente en canales, Movimiento Uniforme.

Dicho parámetro es aplicable a un canal abierto, aunque se aplica dicho movimiento en conductos. Para ello tendremos que tener en cuenta los parámetros anteriormente citados. Particularizando a nuestro caso, la ecuación de equilibrio obtenida entre las fuerzas de fricción producidas por la rugosidad y las debidas al gradiente de presión reducida sería:

$$\sigma_p = -r_h \frac{dP}{dl} \quad (Ec. 1)$$

El valor de la presión reducida será el que tenga en la superficie libre ya que esta, no varía transversalmente en la sección. Dicho valor será entonces la presión atmosférica o manométrica cuyo valor será cero para un canal como el de la siguiente ilustración.

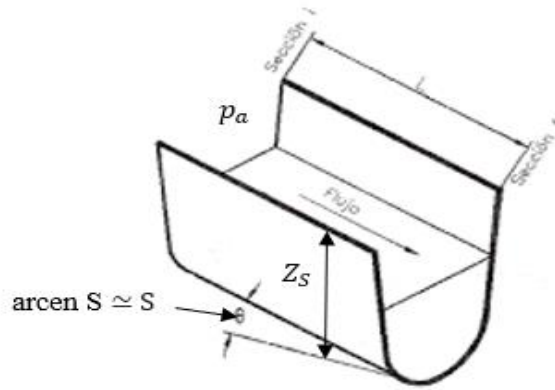


Ilustración 3: Sección de un canal en movimiento uniforme.

$$P = p_a + \rho g z_s \quad (Ec. 2)$$

$$-\frac{dP}{dl} = \rho g \left(-\frac{dz_s}{dl} \right) = \rho g S$$

Siendo S, el seno del ángulo θ , que corresponde a la *inclinación de la superficie libre* respecto al plano horizontal siendo este un ángulo tan pequeño que el valor de su seno y su tangente resulta aproximadamente el valor del ángulo y z_s la cota de la superficie libre.

La hipótesis de movimiento uniforme, al igual que en conductos, nos demanda que todas las secciones rectas normales al movimiento sean iguales, por lo que las paredes del

canal y la superficie libre deben formar un cilindro recto o las líneas contenidas en la superficie libre, paralelas a la dirección del movimiento, deben ser paralelas a las paredes del canal.

Por lo que, por estas razones, S , es también es el *ángulo de inclinación del canal* respecto a la horizontal o la pendiente del canal.

$$\sigma_p = \rho g R_h S \quad (Ec. 3)$$

Y teniendo en cuenta la definición de λ referente a las pérdidas de carga:

$$C_f = \frac{\lambda}{4} = \frac{\sigma_p}{\frac{1}{2}\rho U_m^2} = \frac{2u^2}{U_m^2} \quad (Ec. 4)$$

Sustituimos el esfuerzo cortante σ_p por la velocidad media:

$$U_m = \sqrt{\frac{8gR_h S}{\lambda}} \quad (Ec. 5)$$

Sustituyendo la variable λ de esta resultante por la Ecuación de Manning:

$$U_m = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (Ec. 6)$$

$$n = \frac{\text{Tiempo}}{\text{Longitud}^{1/3}}$$

Por lo que podemos decir de las ecuaciones anteriores el valor de λ será:

$$\lambda = \frac{8gn^2}{R_h^{1/3}} \quad (Ec. 7)$$

Teniendo en cuenta la característica geométrica del Radio Hidráulico (Área mojada// Perímetro mojado), $R_h = \frac{S_M}{P_M}$ el caudal que circula por el canal nos quedaría:

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (Ec. 8)$$

4.1.6. Flujo Permanente en canales, Movimiento No-Uniforme.

Para este caso la velocidad y el nivel del agua respecto a la solera cambian a lo largo del recorrido y por este motivo, la superficie libre de agua deja de ser paralela a las paredes del canal. Para este caso, las ecuaciones que rigen el movimiento, son las de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento.

4.1.6.1. Conservación de la masa.

Expresa la continuidad de que un volumen de líquido que entra por una sección es el mismo que sale por otra sección:

$$\frac{d}{dl}(Av) = 0 \rightarrow Q = Av = \text{constante} \text{ (Ec. 9)}$$

Para este caso, v representa la *velocidad de variación* que puede variar el caudal de un fluido mientras este transcurre de una sección a otra. Anteriormente la habíamos citado como U_m .

El área A puede variar dependiendo del nivel de agua del canal o por variar la forma de la sección del canal a lo largo de su recorrido. Estas dos razones $A(h, l)$ definen esta ecuación respecto a la anterior:

$$v \frac{dA}{dl} + v \frac{dA}{dh} * \frac{dh}{dl} + A \frac{dv}{dl} = 0 \text{ (Ec. 10)}$$

Como en nuestro caso en el laboratorio, el canal tiene forma constante de forma rectangular ($A=hb$ siendo b la base de nuestro canal) a lo largo de todo su recorrido, el primer sumando es cero.

$$v \frac{dh}{dl} + h \frac{dv}{dl} = 0 \text{ (Ec. 11)}$$

$vh = q = \frac{Q}{b} = \text{constante}$ siendo q el caudal por unidad de anchura del canal.

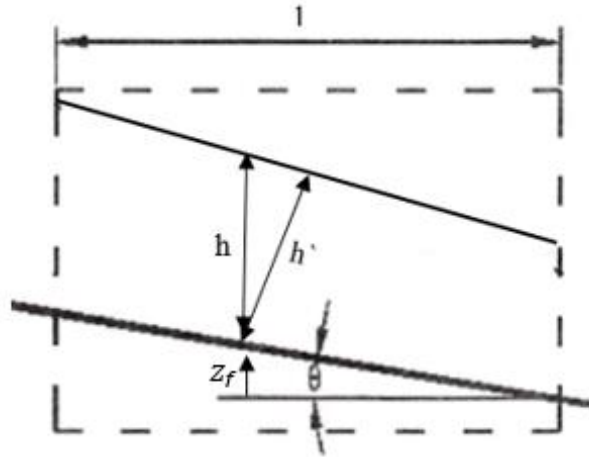


Ilustración 4: Esquema de los tipos de medición del nivel del agua y su pequeña diferencia cuando el ángulo es muy pequeño

4.1.6.2. Conservación de la cantidad de movimiento.

Particularizando la ecuación anteriormente citada para conductos con *Flujo permanente* en canales con *movimiento uniforme*.

$$v \frac{dv}{dl} + \frac{dP}{\rho dl} = -\frac{\sigma_p}{\rho R_h} \quad (Ec. 12)$$

La *presión reducida* se calcula en la superficie libre de agua:

$$P = p_a + \rho g z_s = p_a + \rho g(h + z_f) \quad (Ec. 13)$$

Siendo esta vez z_s y z_f las cotas de la superficie libre y del fondo respecto al origen arbitrario de z respectivamente, como se ve en la ilustración anterior. La solera del canal es el punto donde el perímetro tiene la cota mínima por cada sección recta. Como suponemos una pendiente muy pequeña del canal, existe la relación entre la h dibujada en la anterior ilustración:

$$h' = h \left(1 - \frac{S^2}{2} + \dots \right) = h + O(S^2) \quad (Ec. 14)$$

Midiendo h según la vertical, se retiene en el tratamiento los términos de orden S , por lo que sustituyendo en las dos ecuaciones anteriores a esta se obtiene:

$$\frac{d}{dl} \left(\frac{v^2}{2} + gh \right) = gS - \frac{\sigma_p}{\rho R_h} \quad (Ec. 15)$$

Donde

$$S = -\frac{dz_f}{dl} \quad (Ec. 16)$$

Es la pendiente del canal, dato geométrico mostrado en la anterior ilustración en función de l si la inclinación no cambia definiendo el parámetro:

$$S_f = \frac{\sigma_p}{g\rho R_h} \quad (Ec. 17)$$

Este está asociado a la fricción de las paredes por la rugosidad de las mismas y coincide con S en movimiento uniforme. Unificando las tres ecuaciones anteriores obtendremos:

$$\frac{d}{dl} \left(\frac{v^2}{2} + gh \right) = g(s - S_f) \quad (Ec. 18)$$

Siendo nulo el primer miembro referido al movimiento uniforme nos quedaría:

$$\sigma_p = \rho g R_h S \quad (Ec. 19)$$

Por lo que observamos que coincide con la anteriormente citada para el Flujo Permanente en canales con Movimiento Uniforme. Podríamos continuar desglosando esta ecuación introduciendo variables como la rugosidad del canal y los distintos tipos de materiales y fluidos, pero como el ensayo de vertedero es un mismo canal con un mismo fluido conocido (agua), procederemos a introducir los vertederos hidráulicos.

4.2. Introducción a vertederos hidráulicos.

4.2.1. Definición.

Un vertedero hidráulico o aliviadero es una estructura hidráulica que actúa como obstáculo de pared regular colocado de manera perpendicular a un flujo de lámina libre.

El flujo que pasa a través de este, como hemos dicho previamente, tiene como principal motor de movimiento, la fuerza de gravedad.

4.2.2. Funciones de los vertederos.

Los vertederos tienen como principales ventajas:

- Controlar el nivel de agua de canales, embalses, pantanos, depósitos...
- Precisar el gasto de agua.
- Aforar y medir los pequeños caudales de conductos libre y cursos de agua.
- Alivian crecientes o derivan caudales.
- No se obstruyen por materiales que floten en el fluido.
- La construcción de este es sencilla.

4.2.3. Partes de un vertedero.

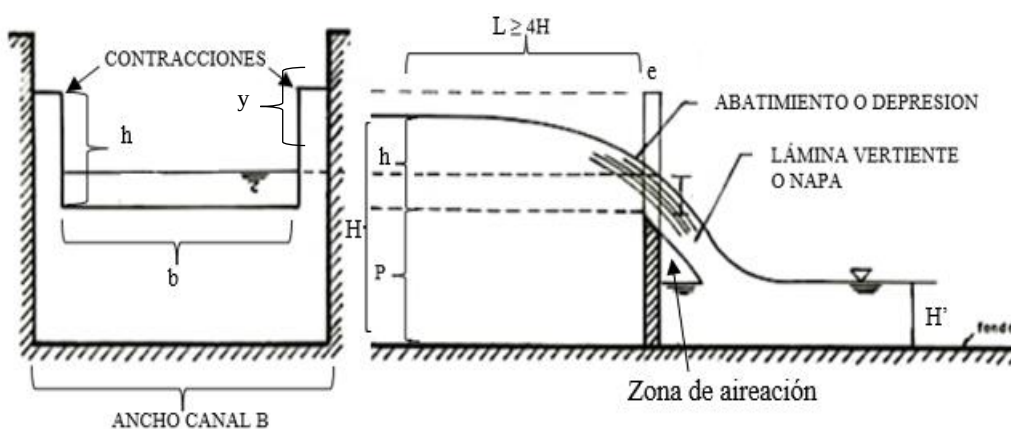


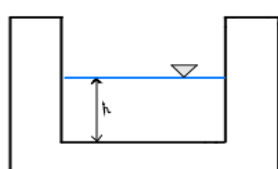
Ilustración 5: Esquema de las partes de un vertedero

- b = Cresta: Longitud del borde superior del vertedero.
- h = Carga: Es la altura de fluido que pasa por encima de la cresta del vertedero.
- y = Superficie libre: Altura delimitada desde la lámina de agua hasta coronar.
- B = Ancho del canal: Longitud perpendicular respecto al flujo del vertedero. En algunos casos, este parámetro puede ser igual al ancho del canal de acceso.
- Contracciones: Son los bordes que constituyen el vertedero.
- P = Umbral del vertedero: Altura del vertedero desde la solera hasta la cresta.
- L = Distancia del medidor: Distancia mínima para la colocación de nuestro medidor de niveles
- e = Espesor del vertedero: Espesor de nuestro vertedero.
- H y H' = Espesor de la lámina de agua, aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

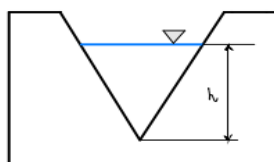
4.2.4. Clasificación de los vertederos.

4.2.4.1. Clasificación por geometría.

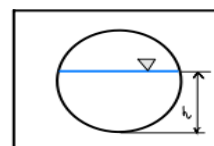
Los vertederos hidráulicos los podemos clasificar dependiendo su forma, tenemos: Vertederos triangulares, rectangulares, trapezoidales, circulares y parabólicos.



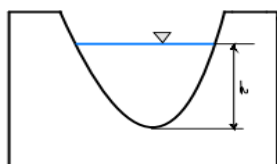
Rectangular



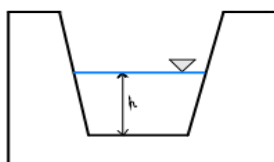
Triangular



Circular



Parabólico



Trapezoidal

Ilustración 6: Esquema de los tipos de vertederos existentes

4.2.4.2. Clasificación por espesor de la pared.

Existen dos tipos de vertedero según el espesor de la pared del umbral del vertedero:

- Vertederos de pared delgada: con un espesor $e \leq 0.66H$
- Vertederos de pared gruesa: con un espesor $e > 0.66H$

4.2.4.3. Clasificación por longitud de la cresta.

Existen dos tipos de vertedero según la longitud de la cresta del vertedero:

- Vertederos sin contracciones laterales: $L = B$
- Vertederos con contracciones laterales: $L < B$

En este documento nos centraremos en los vertederos de pared delgada de sección rectangular y triangular y también en el vertedero de pared gruesa.

5. Vertederos de Pared Delgada de Sección Rectangular.

Los vertederos de pared delgada o de cresta delgada son aquellos los cuales están contruidos por una lámina de pequeño espesor, ya sea una hoja de metal u otro material para que el paso del fluido por dicha cresta transcurra con libertad según se lo permita la carga sobre el umbral de este vertedero. El acceso al vertedero debe tener algún tipo de canal para evitar turbulencias ya que la corriente de fluido que llegue a este vertedero de pared aguda debe estar calmada y ser de forma lenta.

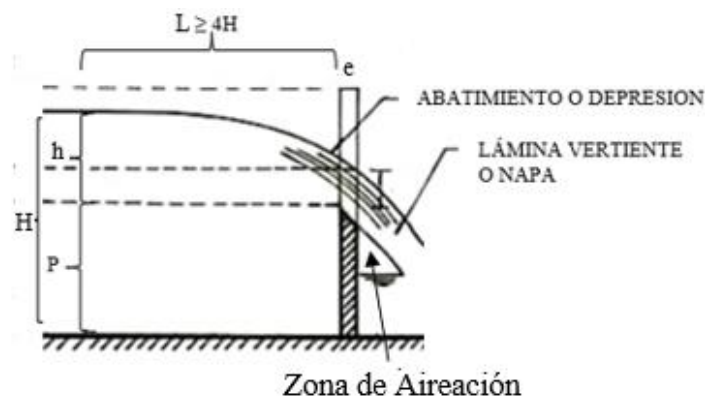


Ilustración 7: Esquema del vertido de un fluido en un vertedero de pared delgada de sección rectangular.

Para medir la altura de la carga (h) descrita sobre la cresta, para que nuestra lectura sea fidedigna, la mediremos posteriormente a una distancia mayor o igual a cuatro veces la altura de nuestra lámina o calado del fluido aguas arriba para que esta no se vea afectada por la curva de descenso del agua producida por el aliviadero a medida que esta se aproxima a él.

Para poder definir el caudal que pasa por el aliviadero de pared delgada, existe múltiples fórmulas empíricas, como la Fórmula de Francis, la Fórmula de Bazin ampliada por Hégly, la Fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos, la Fórmula de Kindsvater-Carter o la Fórmula de Rehbock. Todas estas fórmulas, se basan en el principio de la continuidad de Bernoulli que será citado a continuación, para el cálculo de caudal y del coeficiente de descarga, por lo que podemos decir, que todas las fórmulas citadas tienen en común estas hipótesis:

- La presión a la que está el fluido es la atmosférica.
- Los efectos producidos por la tensión superficial y por la viscosidad del líquido son despreciables.
- El flujo es uniforme aguas arriba y la presión varía de manera lineal con la profundidad.
- La superficie libre es paralela al fondo del canal y las partículas se desplazan de manera horizontal

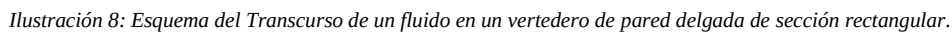
La fórmula general de descarga de los vertederos rectangulares es:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d b h^{\frac{3}{2}} \quad (Ec. 20)$$

Donde

- Q: Caudal en m^3/s
- b: Longitud del vertedero en m
- h: Carga sobre el vertedero en m
- C_d : Coeficiente de descarga

Para hallar dicha expresión consideramos una corriente que transcurre a través de un vertedero rectangular como el mostrado a continuación:


$$Q_0 = Q_1 \quad (Ec.21)$$

$$z_0 + \frac{p_0}{\gamma} + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g}$$

$$h + \frac{p_{atm}}{\gamma} + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g} = (h - y) + \frac{p_{atm}}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} \quad (Ec.22)$$
$$\alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = y + \alpha_0 \frac{v_0^2}{2g} \quad (Ec.23)$$

Por lo que se define este coeficiente Coriolis como la relación que hay entre la energía cinética que lleva el flujo en el tramo de una sección y la energía cinética media en la mismo tramo de sección

Por lo que a través de la fórmula:

$$1 + \eta = \beta = \int \frac{v^2 dA}{AV^2} \quad (Ec. 24)$$

Se dedujo que $\alpha = 1 + 3\eta$ resultaba el valor de α de $1.08 \approx 1$ (Dicho valor será muy importante para nuestra posterior simulación). Esto se debe que se aproxime a la unidad ya que generalmente en flujos turbulentos y uniforme, este coeficiente se considerará la unidad en secciones transversales de alineación recta y tamaño regular.

Teniendo en cuenta el *coeficiente de Coriolis* y sabiendo que la velocidad varía en los distintos puntos de la sección transversal, reajustaremos la integral para que el resultado esté expresado en términos de velocidad media la cual representa la relación entre la energía real y la que se obtendrá considerando una distribución uniforme de velocidades.

v es la *velocidad de aproximación* del fluido a una distancia superior a $4H$ aguas arriba.

Normalmente, v_0 es nula ya que es muy pequeña comparada con v_1 por lo que en tal caso podemos decir que la distribución de velocidades será uniforme.

$$v_1 = \sqrt{2gy + v_0^2} \quad (Ec. 25)$$

Por lo que, aplicando la *Ecuación de Bernoulli* para la conservación de la masa, el caudal teórico que pasa sobre la cresta, $dA = bdy$ es:

$$dQ_t = v_1 dA = \sqrt{2gy + v_0^2} bdy \quad (Ec. 26)$$

$$Q_t = \int_0^h \sqrt{2gy + v_0^2} bdy$$

Para hallar nuestro *caudal real*, necesitaremos introducir un *coeficiente de descarga* C_d , el cual corrige el error de despreciar las pérdidas de carga del flujo y el efecto de las contracciones de las líneas de corriente cuando se acercan al vertedero como la lámina que se vierte por la cresta del mismo.

Dicho coeficiente es un adimensional de valor inferior a la unidad (dato primordial para la comparación posterior de los datos obtenidos de manera experimental frente los obtenidos de manera teórica), y es una función que engloba las variables de viscosidad, de rugosidad de las paredes, de la tensión superficial del líquido, de la forma del vertedero y de la relación de canal de acceso.

Por lo que el *caudal real* sería:

$$Q = C_d Q_t \text{ (Ec. 27)}$$

$$Q = C_d b \int_0^h \sqrt{2gy + v_0^2} dy$$

Sabiendo:

$$u = 2gy + v_0^2 ; \quad du = 2gy ; \quad dy = \frac{du}{2g}$$

Sustituimos:

$$Q = C_d b \int_{v_0^2}^{2gh+v_0^2} \left(\frac{u^{\frac{1}{2}}}{2g} \right) du \text{ (Ec. 27)}$$

$$Q = C_d \left(\frac{b}{2g} \right) \left[\frac{u^{\frac{3}{2}}}{3/2} \right]_{v_0^2}^{2gh+v_0^2}$$

$$Q = \frac{2}{3} C_d \left(\frac{b}{2g} \right) \left[\sqrt{(2gy + v_0^2)^3} - \sqrt{(v_0^2)^3} \right]$$

Dividiendo entre 2g dentro de las dos raíces, se obtiene:

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \left[\sqrt{\frac{(2gy+v_0^2)^3}{(2g)^2}} - \sqrt{\frac{(v_0^2)^3}{(2g)^2}} \right] \text{ (Ec. 28)}$$

Y ahora multiplicando en las raíces y dividiendo por 2g resulta:

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \left[\sqrt{\frac{2g(2gy+v_0^2)^3}{2g(2g)^2}} - \sqrt{\frac{2g(v_0^2)^3}{2g(2g)^2}} \right] \text{ (Ec. 29)}$$

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \left[\sqrt{\frac{2g(2gy + v_0^2)^3}{2g}} \sqrt{2g} - \sqrt{\frac{2g(v_0^2)^3}{2g}} \sqrt{2g} \right]$$

$$Q = \frac{2}{3} C_d b \sqrt{2g} \left[\sqrt{\left(h + \frac{v_0^2}{2g}\right)^3} - \sqrt{\left(\frac{v_0^2}{2g}\right)^3} \right]$$

Como v_0 depende del caudal Q que es lo que se desea medir, y como hemos dicho antes, esta velocidad es tan pequeña que la podemos considerar nula, nuestra expresión se reduce a la citada como fórmula general de descarga de los vertederos rectangulares:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d b h^{\frac{3}{2}} \quad (Ec. 20)$$

Particularizando el vertedero del laboratorio, este viene con dos contracciones laterales ya que este recorta el espacio b por lo que transcurrirá por la cresta un menor caudal debido al motivo citado.

Por lo que dice la *ecuación de Francis* que citaremos posteriormente, la longitud b efectiva que la llamaremos b_{real} es igual a $(N/10) h$, donde N es el número de contracciones laterales que tiene el vertedero a estudiar.

Por lo que particularizando la fórmula con nuestro vertedero sería:

$$b_{real} = b - \frac{2h}{10} \quad (Ec. 30)$$

Por lo tanto, reemplazando la b por la b_{real} obtendríamos:

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d \left(b - \frac{2h}{10}\right) h^{\frac{3}{2}} \quad (Ec. 31)$$

Para hallar este coeficiente de descarga, como citamos al principio, numerosos científicos crearon sus propias ecuaciones empíricas para calcular el caudal en función al coeficiente de descarga dentro de unos límites:

- **Fórmula de Francis.**

La Fórmula de Francis toma en cuenta la velocidad de aproximación v_0 permite calcular casos con contracciones laterales.

El coeficiente de descarga C_d es aproximadamente 1.84 y es calculado teniendo en cuenta las contracciones laterales N.

$$C_d = 0.623 \left[\left(1 - \frac{N}{10} \right) \frac{h}{b} \right] \left[\sqrt{\left(1 + \frac{v_0^2}{2hg} \right)^3} - \sqrt{\left(\frac{v_0^2}{2hg} \right)^3} \right] \approx 1.84$$

Las Condiciones límites son:

- Longitud del vertedero: $L=3.05\text{m}$
- Carga sobre el vertedero: $0.18 \leq H \leq 0.58\text{m}$
- Altura del umbral: $0.6 \leq P \leq 1.5\text{m}$
- $b \geq 3h$

La Fórmula de Francis es:

$$Q = 1.84 \left(L - \frac{Nh}{10} \right) \left[\sqrt{\left(h + \frac{v_0^2}{2g} \right)^3} - \sqrt{\left(\frac{v_0^2}{2g} \right)^3} \right]$$

Si no hay contracciones esta queda como:

$$Q = 1.84 L h^{3/2}$$

- **Fórmula de Bazin ampliada por Hégly.**

La Fórmula de Bazin-Hegly parte de la ecuación general de descarga de vertederos rectangulares, para la que un vertedero con contracciones laterales el valor de C_d es:

$$C_d = \left(0.6075 + 0.045 \frac{B-b}{B} + \frac{0.00405}{h} \right) \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+P} \right)^2 \right]$$

Las Condiciones límites son:

- Longitud del vertedero: $0.5 \leq b \leq 2\text{m}$
- Carga sobre el vertedero: $0.1 \leq H \leq 0.6\text{m}$
- Altura del umbral: $0.2 \leq P \leq 2\text{m}$

• ***Fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos.***

La Fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos parte de la ecuación general de descarga de vertederos rectangulares, para esta fórmula hay dos coeficientes según existan contracciones o no. El coeficiente de descarga C_d es para un vertedero con contracciones:

$$C_d = \left(0.578 + 0.037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3.615 - 3 \left(\frac{b}{B} \right)^2}{1000h + 1.6} \right) \left[1 + 0.5 \frac{b}{B} \left(\frac{h}{h+P} \right)^2 \right]$$

Las Condiciones límites son:

- Longitud del vertedero: $b \geq 0.3B \text{ m}$
- Carga sobre el vertedero: $\frac{0.025}{b/B} \leq h \leq 0.8\text{m}$
- Altura del umbral: $P \geq 0.3B$
- $\frac{h}{P} \leq 1$

El coeficiente de descarga C_d es para un vertedero sin contracciones:

$$C_d = 0.615 \left(1 + \frac{1}{1000h + 1.6} \right) \left[1 + 0.5 \left(\frac{h}{h+P} \right)^2 \right]$$

Las Condiciones límites son:

- Carga sobre el vertedero: $0.025 \leq h \leq 0.8\text{m}$
- Altura del umbral: $P \geq 0.3 \text{ m}$
- $\frac{h}{p} \leq 1$

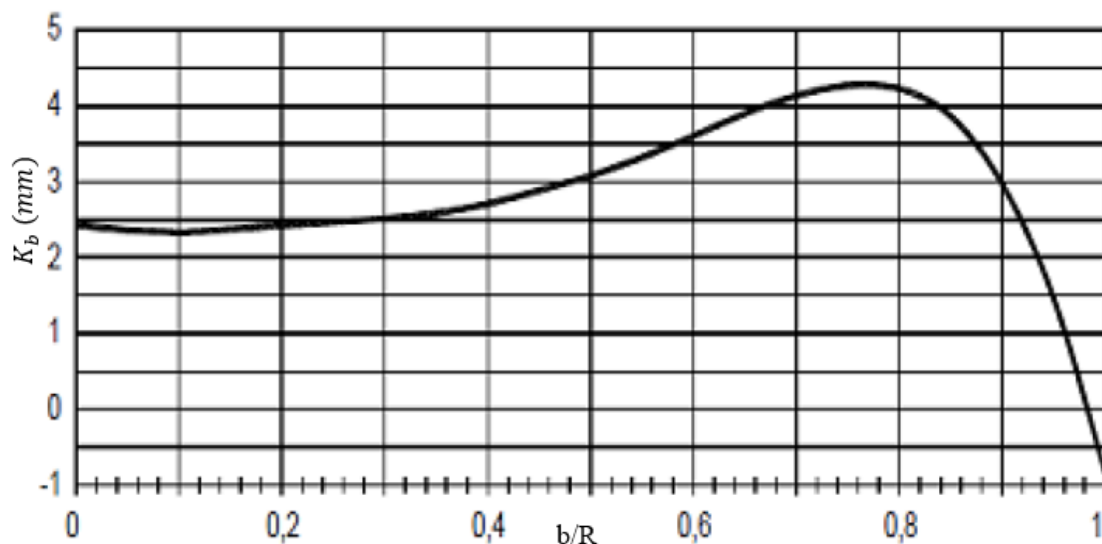
- **Fórmula de Kindsvater-Carter.**

La Fórmula de Kindsvater-Carter es la que mayor precisión tiene para cualquier tipo de vertedero rectangular.

Su formulación es:

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} (b + K_b) (h + K_h)^{3/2}$$

Siendo C_e el coeficiente de descarga C_d intrínseco hallado en la grafica $C_e/(h/P)$ que veremos posteriormente y $K_h=0.001\text{m}$ que es un valor que se añade a la carga para formar la carga efectiva y como se puede apreciar, en esta fórmula usa el valor de la longitud efectiva, que es la suma de la longitud del vertedero más un valor K_b obtenido de manera experimental en la gráfica siguiente:

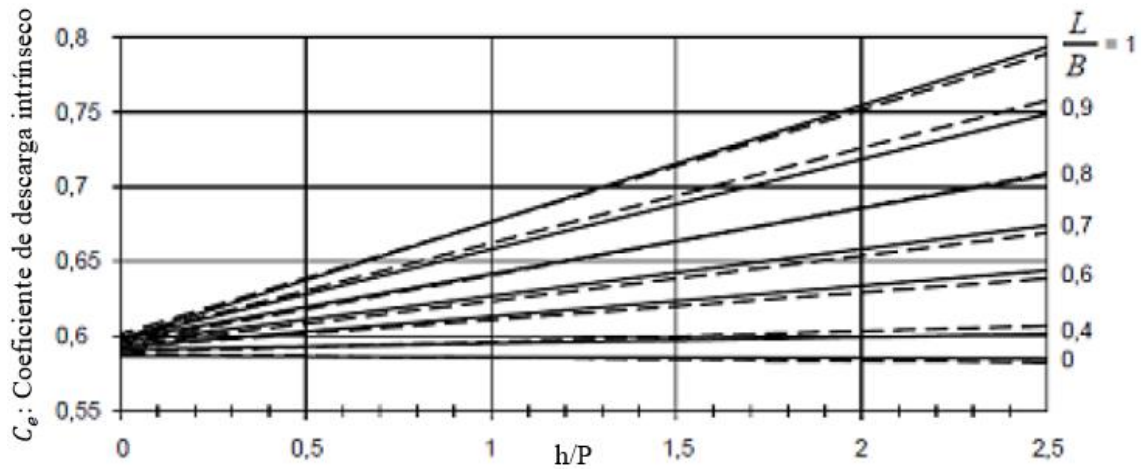


Gráfica 2: Gráfica empírica de Kindsvater-Carter para el cálculo de K_b en función de b/R .

Las Condiciones límites para la aplicación correcta de esta fórmula son:

- Longitud del vertedero y ancho del canal debe ser superior a 15 cm.
- Carga sobre el vertedero se debe medir a una distancia igual a 4 o 5 veces la máxima carga y esta debe ser superior a 3cm.
- Altura del umbral: $P > 10\text{cm}$
- La cresta debe de ser de 1 o 2 mm de espesor: $\frac{h}{p} \leq 2.5$

Si no hay contracciones, es decir, $b=B$, se debe cumplir la condición $B-b \geq 0.2\text{m}$, si no el caso contrario el cálculo del coeficiente de descarga intrínseco C_e se hallará:



Gráfica 3: Gráfica empírica de Kindsvater-Carter para el cálculo de C_e en función de h/P .

Podemos decir que el coeficiente de descarga C_d es:

$$C_d = 0.562 + \frac{10 \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{2h}{f} \right)^2 \right) \right]^{-1}}{R^{0.45}}$$

Siendo R el número de Reynolds y f la distancia entre las dos paredes de contracción del vertedero.

Conociendo ya todos los límites de aplicación para el cálculo del coeficiente de descarga de todas las ecuaciones para vertederos rectangulares de pared fina, escogimos el de Francis ya que cumple dentro de los límites y por la simplicidad de cálculo del mismo.

6. Vertederos de Pared Delgada de Sección Triangular.

Los vertederos de pared delgada de sección triangular se usan para medir pequeños caudales, ya que estos, son más precisos que los vertederos de pared delgada de sección rectangular.

Esto se debe a que, para un mismo caudal en un canal, los valores de escotadura h son mayores en los vertederos de pared delgada de sección triangular que en los de sección rectangular.

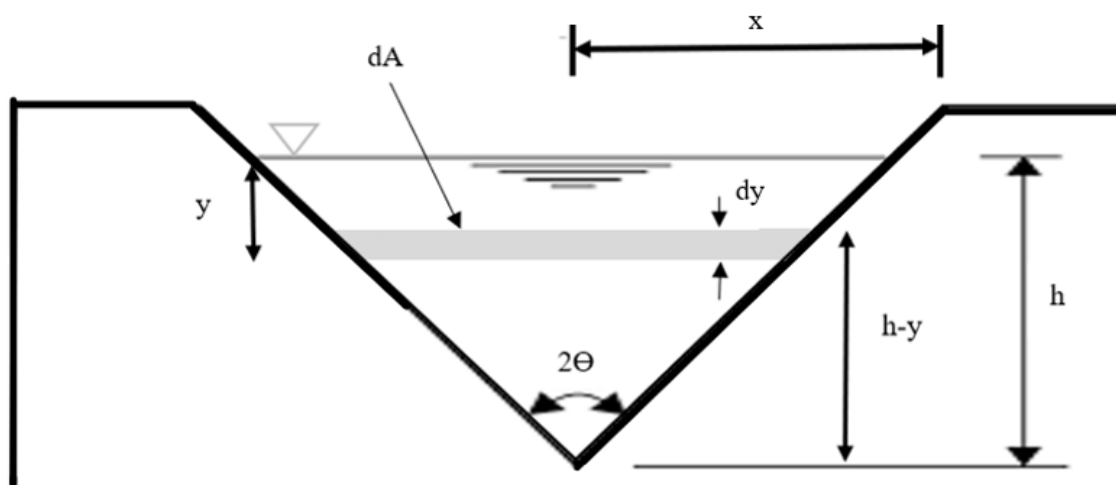


Ilustración 9: Esquema frontal de un vertedero de pared delgada de sección triangular.

Los *vertederos de pared delgada* de sección triangular tienen forma de V. Por esta razón se les llama V-Notch. En la parte de aguas arriba, estos vertederos son muy sensibles a la rugosidad del medio característico y para cargas pequeñas también influyen la viscosidad y la capilaridad.

El *coeficiente de descarga* de estos vertederos se puede hallar mediante estudios experimentales y numéricos. Los elementos que le influyen son el ángulo del vertedero y la carga.

Para que este sea un vertedero triangular debe cumplir la relación siguiente: $B \geq 5h$

Considerando la anterior ilustración donde se encuentra esquematizado un flujo a través de la geometría de nuestro vertedero triangular de ángulo Θ , como hicimos anteriormente en el vertedero rectangular (Ec.25), despreciando la velocidad de aproximación v_0 en nuestra ecuación de la velocidad teórica del flujo, sobre la cresta resulta:

$$v_1 = \sqrt{2gy} \quad (\text{Ec. 32})$$

Por lo que el flujo de descarga elemental a través del diferencial del área es:

$$dQ = v_1 dA = \sqrt{2gy} dA \quad (\text{Ec. 33})$$

Siendo el área de la figura: $dA = 2x dy$ con un ángulo: $\tan(\theta/2) = \frac{x}{h-y}$

Lo que resulta:

$$dA = 2(h-y)\tan(\theta/2)(h-y)dy$$

Sustituyendo esto último en (Ec.33) resulta:

$$dQ = 2\sqrt{2gy} (h-y)\tan(\theta/2)(h-y)dy$$

$$dQ = 2\sqrt{2gy} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) y^{1/2} dy \quad (\text{Ec. 34})$$

Por lo que, para calcular el caudal teórico, partimos de la (Ec.34) y sería:

$$Q_t = \int dQ = 2\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \int_0^h (h-y) y^{1/2} dy \quad (\text{Ec. 35})$$

$$Q_t = 2\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\int_0^h y^{1/2} dy - \int_0^h y^{3/2} dy \right)$$

$$Q_t = 2\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(2y^{3/2} \frac{h}{3} \Big|_0^h - y^{5/2} \frac{2}{5} \Big|_0^h \right)$$

$$Q_t = 2\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\frac{2}{3} h^{5/2} - \frac{2}{5} h^{5/2} \right)$$

$$Q_t = 2\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(\frac{4}{15} h^{5/2} \right)$$

Por lo que el Caudal Teórico resulta:

$$Q_t = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{5/2} \quad (\text{Ec. 35})$$

La Ecuación General del Caudal Real se obtiene al multiplicar el Caudal Teórico por el coeficiente de descarga, C_d quedando:

$$Q = C_d Q_t$$

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{5/2} \quad (\text{Ec. 36})$$

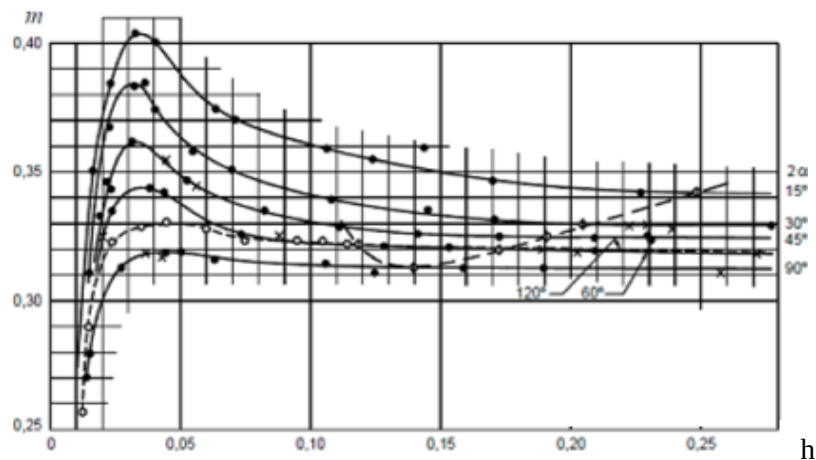
Para hallar este coeficiente de descarga, como citamos al principio, numerosos científicos crearon sus propias ecuaciones empíricas para calcular el caudal en función al coeficiente de descarga dentro de unos límites:

- **Fórmula de L. Cruz Coke.**

La Fórmula de L. Cruz Coke es el resultado empírico del estudio, en un laboratorio, de un flujo en vertederos triangulares de diferentes ángulos Θ : 15°, 30°, 45°, 60°, 90° y 120°.

El coeficiente de descarga C_d está definido por: $C_d = \frac{15}{8} m$

Se determinó para estudios para errores no superiores al 5%



Gráfica 3: Gráfica de coeficientes de descarga en vertederos triangulares de pared delgada.

En la ilustración anterior, se observa de manera clara que, para los distintos ángulos de los vertederos triangulares, el coeficiente m aumenta cuando la carga h aumenta. Como se puede apreciar, al final por cada valor de carga que se llega a alcanzar, el valor de m permanece constante. Estos valores casi constantes para cada coeficiente de cada vertedero, son recopilados a modo de resumen en la tabla siguiente:

Ángulo 2Θ	15°	30°	45°	60°	90°	120°
$h>$	0.25	0.205	0.185	0.17	0.14	0.12
m	0.343	0.33	0.325	0.32	0.313	0.322
C_d	0.643	0.619	0.609	0.6	0.587	0.604
K	0.2	0.392	0.596	0.818	1.386	2.471

Tabla 1: Tabla de coeficientes en vertederos triangulares de pared delgada según Coke en la cual viene señalado el caso de estudio.

- **Fórmula de Thomson.**

La Fórmula de Thomson es el resultado empírico del estudio, en un laboratorio, de un flujo en vertederos triangulares de $\Theta = 90^\circ$ de ángulo y cuyo límite de carga es $0.05 \leq h \leq 0.25\text{m}$.

El coeficiente de descarga C_d está definido por: $C_d = 0.593$

Partiendo de la ecuación del caudal (Ec.36)

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\Theta}{2}\right) h^{5/2} \quad (\text{Ec. 36})$$

$$Q = \frac{8}{15} 0.593 \sqrt{2g} \tan\left(\frac{90}{2}\right) h^{5/2}$$

Por lo que simplificando la fórmula anterior nos queda:

$$Q = 1.4h^{5/2}$$

- ***Fórmula de Thomson - Horace King.***

Posteriormente, un estudio de la Universidad de Michigan por el profesor Horace King, investigó sobre la fórmula de Thomson el cual obtuvo:

$$Q = 1.34h^{2.47}$$

- ***Fórmula de Thomson – Barnes.***

Basándose Barnes en las mediciones de Thomson, Barnes amplió por experimentación la fórmula de Thomson de manera que la carga alcanzo h=30cm., por lo que presentó la fórmula siguiente:

$$Q = 1.37h^{2.48}$$

- ***Fórmula de Thomson – Raymond Boucher.***

Basándose Raymond Boucher en las mediciones de Thomson posteriormente, un estudio de la Escuela Politécnica de Montreal por este profesor, investigó sobre la fórmula de Thomson el cual obtuvo:

$$Q = 1.3424h^{2.48}$$

- ***Fórmula de Thomson – James Barr.***

Amplio por experimentación la fórmula de Thomson de manera que el coeficiente de descarga es válido para cargas $0.05 < h < 0.25m$; $B \geq 8h$.

$$C_d = \frac{0.0087}{h^2} + 0.565$$

- ***Fórmula de Thomson – Hégly.***

Amplio por experimentación la fórmula de Thomson – James Barr de manera que en coeficiente de descarga es válido para cargas $0.1 < h < 0.5\text{m}$.

$$C_d = 0.5812 + \frac{0.00375}{h} \left(1 + \left(\frac{h^2}{B(h+P)} \right)^2 \right)$$

- ***Fórmula Raymond Boucher – Cone.***

Dicha fórmula obtenida por el profesor Raymond Boucher fue confirmada por Mr. Cone que también propuso las siguientes fórmulas para los distintos ángulos de Θ citados a continuación:

- Para $\Theta = 60^\circ$

$$Q = 0.7725h^{2.47}$$

- Para $\Theta = 30^\circ$

$$Q = 0.3564h^{2.45}$$

- ***Fórmula Gourley – Crimp.***

Propusieron la siguiente fórmula para los distintos ángulos de Θ : 45° , 60° y 90° .

$$Q = 1.32 \tan\left(\frac{\Theta}{2}\right) h^{2.48}$$

- ***Fórmula Heyndrick.***

Propuso la siguiente fórmula para el coeficiente de descarga, válida para cargas normales y un ángulo Θ de 60° .

$$C_d = (0.5775 + 0.214h^{1.25}) \left(1 + \left(\frac{h^2}{B(h + P)} \right)^2 \right)$$

Los vertederos de pared delgada de sección triangular, dicha pared es muy sensible a cualquier cambio en la rugosidad de estas, lo cual, estas ecuaciones son aplicables a vertederos de pared delgada de sección triangular y lisa. Ni que decir tiene que las fórmulas donde solo se halla el coeficiente de descarga, este es aplicable siempre a la Ecuación General del Caudal Real.

7. Vertederos de Pared Gruesa.

Los vertederos de pared gruesa o de cresta ancha son los utilizados principalmente para controlar el nivel en los ríos o canales de gradiente suave, ya que en estos sitios puede resultar difícil la instalación de un vertedero de pared delgada, los cuales requieren un rebose libre de aguas abajo, ya que los vertederos de pared gruesa pueden funcionar parcialmente sumergidos. El vertedero es de descarga libre por lo que las condiciones de aguas abajo no le influyen.

Estas estructuras también pueden ser calibradas y usadas como estructuras de medición de caudal. Estas estructuras se usan por lo fuertes que son y pueden manejar grandes caudales.

7.1. Tipos de Vertedero de Cresta Ancha.

Generalmente hay tres tipos: Los rectangulares, los de bordes redondeados y los triangulares.

Nosotros nos concentraremos en el rectangular ya que ha sido el objeto de estudio en el laboratorio.

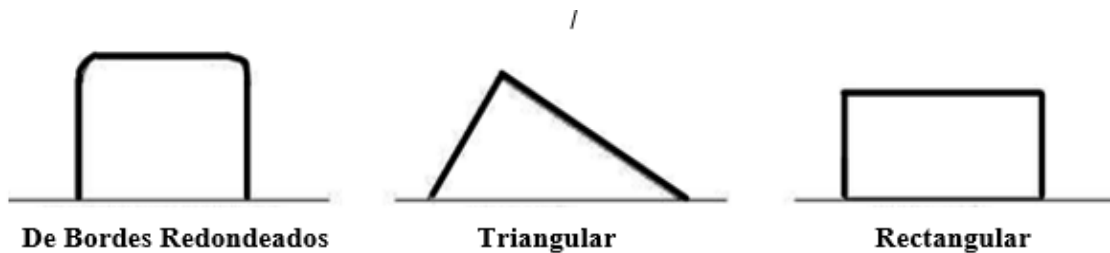


Ilustración 10: Tipos de vertederos de cresta ancha.

7.2. Partes de un Vertedero de Borde Ancho.

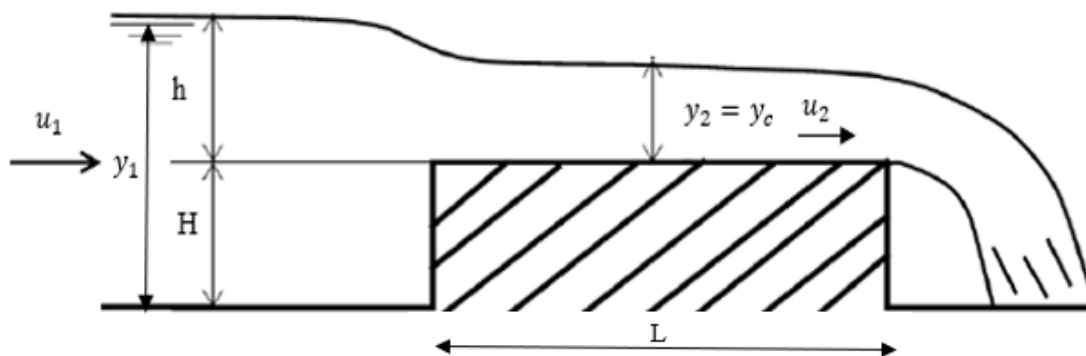


Ilustración 11: Esquema de un Vertedero de Cresta Ancha.

- L = Espesor del vertedero: Espesor de nuestro vertedero.
- h = Carga: Es la altura de fluido que pasa por encima de la cresta del vertedero.
- H = Umbral del vertedero: Altura del vertedero desde la solera hasta la cresta.
- y_1, y_2 = Espesor de la lámina de agua, aguas arriba y aguas abajo respectivamente.
- u_1, u_2 = Energía del flujo de la lámina, aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

7.3. Características intrínsecas de un Vertedero de Pared Gruesa.

Para que un vertedero de pared gruesa se comporte como tal, es necesario que se cumpla esta relación: $L > 3h$

Si no se cumple esta relación, el vertedero podría ser de pared delgada. La longitud máxima de L debe estar alrededor de $15h$.

Normalmente, la relación entre H/L está entre los límites de $0.08 < H/L < 0.5$.

En la ilustración 15, se puede ver el perfil del flujo que atraviesa a un vertedero de pared gruesa, suponiendo que no hay fricción y tampoco hay pérdidas de carga y que el número de Coriolis se aproxima a la unidad como en los vertederos anteriores, podemos igualar el flujo que hay aguas arriba del vertedero con el flujo que atraviesa la cresta del vertedero.

$$y_1 + \frac{u_1^2}{2g} = H + y_2 + \frac{u_2^2}{2g} = \frac{3}{2}y_2 + H \quad (Ec. 36)$$

$$H + h + \frac{u_2^2}{2g} = \frac{3}{2}y_2 + H$$

$$u_2 = \sqrt{2g \left(h + \frac{u_1^2}{2g} - y_c \right)}$$

Considerando que el flujo aguas arriba es subcrítico ($Fr < 1$), por lo que el flujo que se desarrolla en la cresta de nuestro vertedero es crítico, sabemos esto porque la velocidad del flujo al final de la cresta aumenta de forma que se produce un flujo supercrítico ($Fr > 1$) ya que, como hemos dicho al principio, estos vertederos se caracterizan por ser de descarga libre.

Si el flujo sobre el vertedero es crítico ($y_2 = y_c$), significa que la energía que pasa por la cresta es mínima (aproximadamente cero).

$$y_c = y_2 = \frac{2}{3} \left(h + \frac{u_1^2}{2g} \right) \quad (Ec. 37)$$

Tratándose nuestro vertedero del laboratorio de un vertedero rectangular, el ancho es B por lo que entonces la descarga teórica queda:

$$Q = B y_2 u_2 = B \frac{2}{3} \left(h + \frac{u_1^2}{2g} \right) \left[\sqrt{2g \left(h + \frac{u_1^2}{2g} - y_c \right)} \right] \quad (Ec. 38)$$

De donde podemos obtener:

$$Q = \sqrt{g} B y_2^{\frac{2}{3}} = 3.13 B y_2^{\frac{2}{3}} \quad (Ec. 39)$$

Expresada en función de la energía de aguas arriba:

$$Q = \sqrt{2g} \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{3}{2}} B \left(h + \frac{u_1^2}{2g} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (Ec. 40)$$

Si la Energía de entrada es 0, ($u_1 = 0$), la descarga teórica quedaría:

$$Q = \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} B (h)^{\frac{3}{2}} \quad (Ec. 41)$$

Reducida queda:

$$Q = 1.7 B (h)^{\frac{3}{2}}$$

La descarga real se obtiene introduciendo en la ecuación (Ec.41) con un coeficiente de descarga C_D . Se obtiene de las ecuaciones anteriormente citadas de la fórmula de la Sociedad Suiza de Ingenieros y Arquitectos y de la fórmula de Bazin ampliada por Hégly.

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{2g} B C_D (h)^{\frac{3}{2}}$$

Reducida queda:

$$Q = 1.7 B C_D (h)^{\frac{3}{2}}$$

8. Conclusión sobre la caracterización de los vertederos.

Llegando al final de la caracterización de los tipos de vertedero ensayados en el laboratorio de la escuela politécnica superior de Linares, he presentado las nociones principales sobre los canales y presentado los vertederos a estudio, podemos decir que visto queda el gran número de fórmulas de obtención de caudal en función de la carga sobre el vertedero y del gran número de fórmulas de coeficientes de descarga, no sabemos realmente que formulación usar, ya que todas son fruto de ensayos empíricos. Algunas fórmulas caracterizan bien los vertederos, pero tienen limitaciones en cuanto a tamaño. Para la realización de los cálculos nos hemos basado siempre en las fórmulas generales de cada tipo de vertedero.

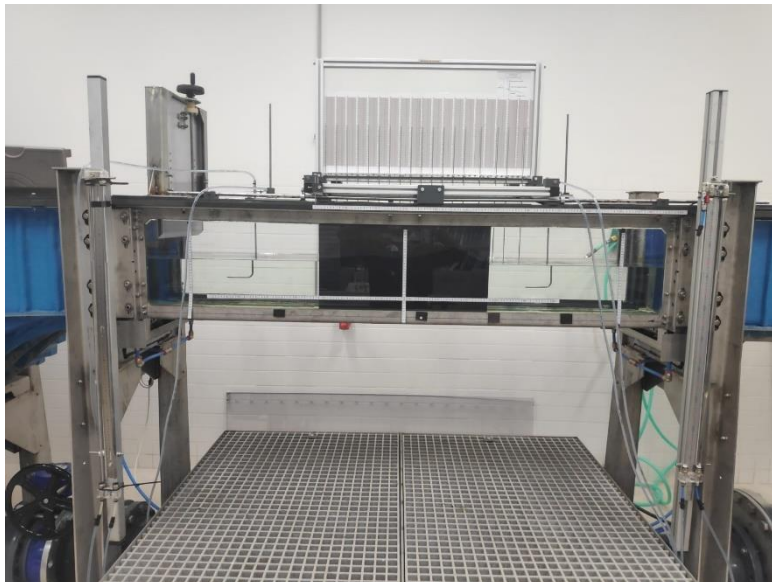
Ante todo, esto citado precedentemente, si podemos decir, que, para caracterizar y modelizar perfectamente el comportamiento de nuestros vertederos del laboratorio, es necesario un análisis experimental o bien, un análisis computacional mediante un software de CFD.

9. Metodología experimental de los distintos ensayos.

9.1. Materiales.

Para la realización del estudio experimental de nuestro trabajo necesitaremos:

- Canal Hidráulico: Canal de la Escuela Politécnica Superior de Linares, con unas dimensiones de ensayo de 40 cm de ancho por 40 cm de altura por 180 cm de largo aproximadamente. En dicho canal viene instalado una bomba para la impulsión del agua con un aporte neumático para evitar la cavitación de la misma y tomas de suministro de agua de la red pública y desagüe. Para la obtención de alturas de calado de agua, como se ve en la imagen, hay repartido por la geometría del canal, cintas métricas para facilitar la obtención de medidas.



Fotografía 1: Canal hidráulico del laboratorio de la E.P.S.L.

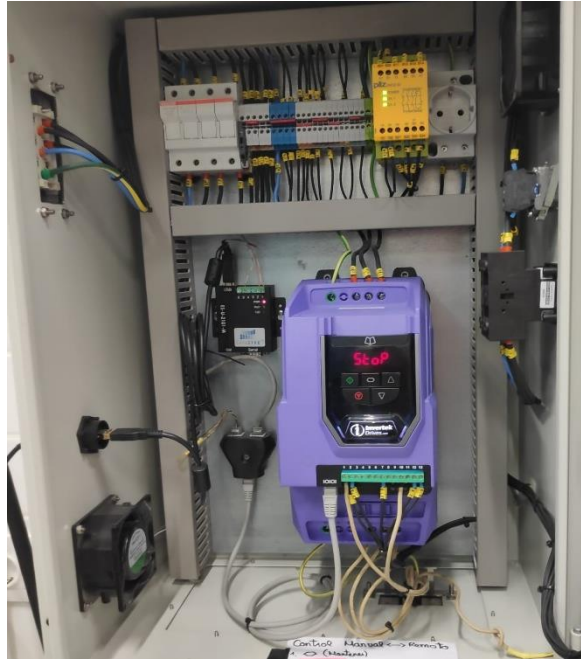


Fotografía 2: Bomba acoplada al canal del laboratorio de la E.P.S.L.

- Cuadro de control: Unidad utilizada para puesta en marcha de la bomba y regulación de la frecuencia de la misma.

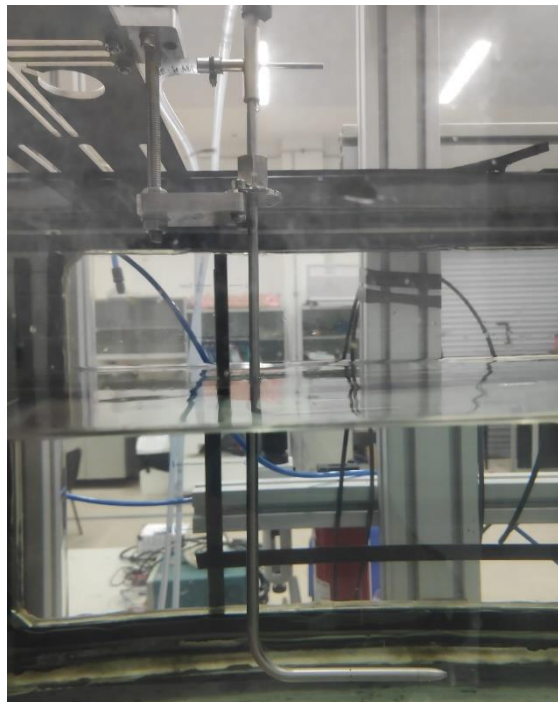


Fotografía 3: Cuadro de control de la Bomba del canal del laboratorio de la E.P.S.L.



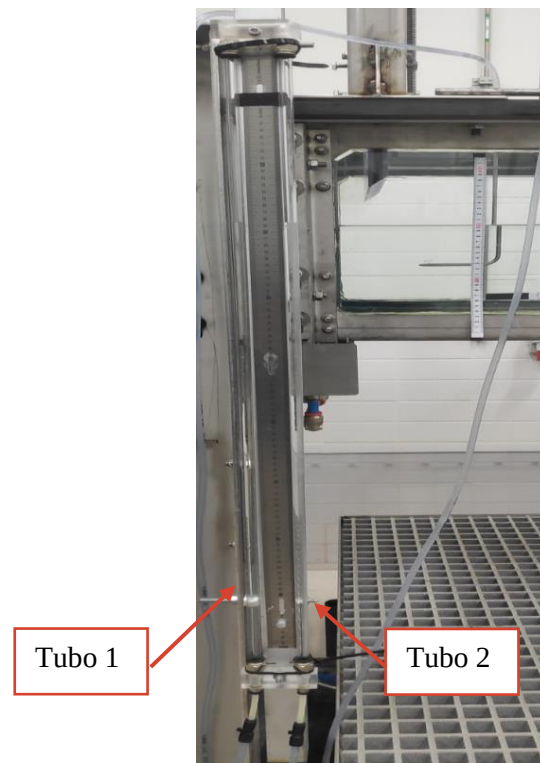
Fotografía 4: Unidad de control de la Bomba del canal del laboratorio de la E.P.S.L.

- Tubo de Pitot: Dispositivo empleado para medir la velocidad del flujo del agua en la zona de ensayo. En sus extremos viene acoplados unas mangueras las cuales sirven para su purga y acople al tubo piezométrico.



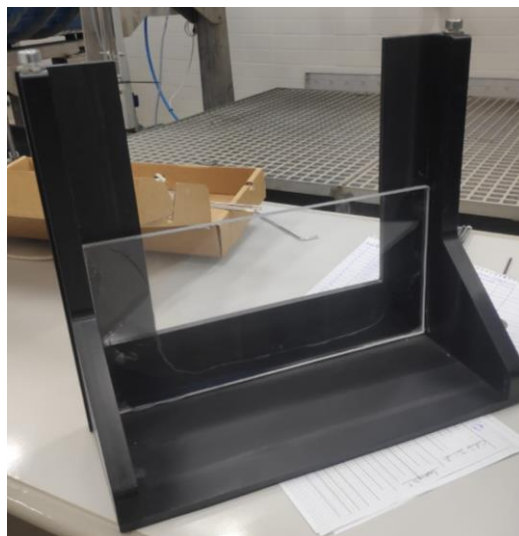
Fotografía 5: Tubo de Pitot.

- Tubos piezométricos: Tubos conectados al Pitot para la obtención del flujo mediante la diferencia de alturas captadas por el Pitot. Para observar estas diferencias de alturas, como se ve en la imagen, hay una regla acoplada para ver las diferencias de alturas.



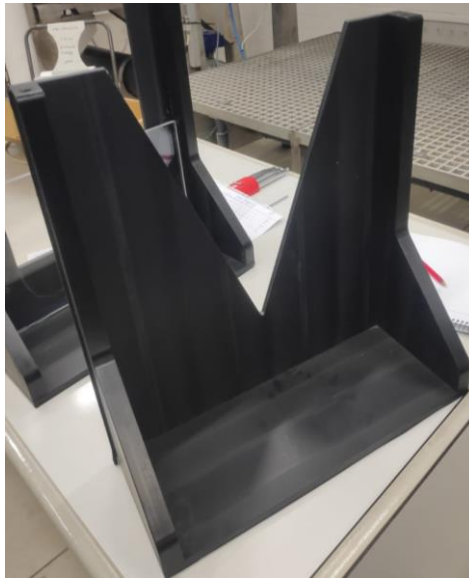
Fotografía 6: Tubos piezométricos acoplados al tubo de Pitot.

- Vertedero de pared delgada de sección Rectangular: Obstáculo a ensayar.



Fotografía 7: Vertedero de pared delgada de sección rectangular.

- Vertedero de pared delgada de sección Triangular: Obstáculo a ensayar.



Fotografía 8: Vertedero de pared delgada de sección triangular.

- Vertedero de pared Gruesa de sección rectangular: Obstáculo a ensayar.



Fotografía 8: Vertedero de pared gruesa de sección rectangular.

- Caja de Herramientas y tornillería: En ella se encuentra todo tipo de utillaje necesario para fijar los vertederos al canal.



Fotografía 9: Caja de herramientas.

- PC y Smartphone: Ordenador portátil Gamer de alto rendimiento para la realización del análisis computacional de CFD y smartphone para la recopilación de datos visuales.



Fotografía 10: PC y Smartphone.

9.2. Métodos seguidos durante el ensayo de vertederos.

Los métodos seguidos tanto en el ensayo experimental como en el computacional, serán descritos a continuación, así como las incidencias ocurridas durante el proceso de experimentación.

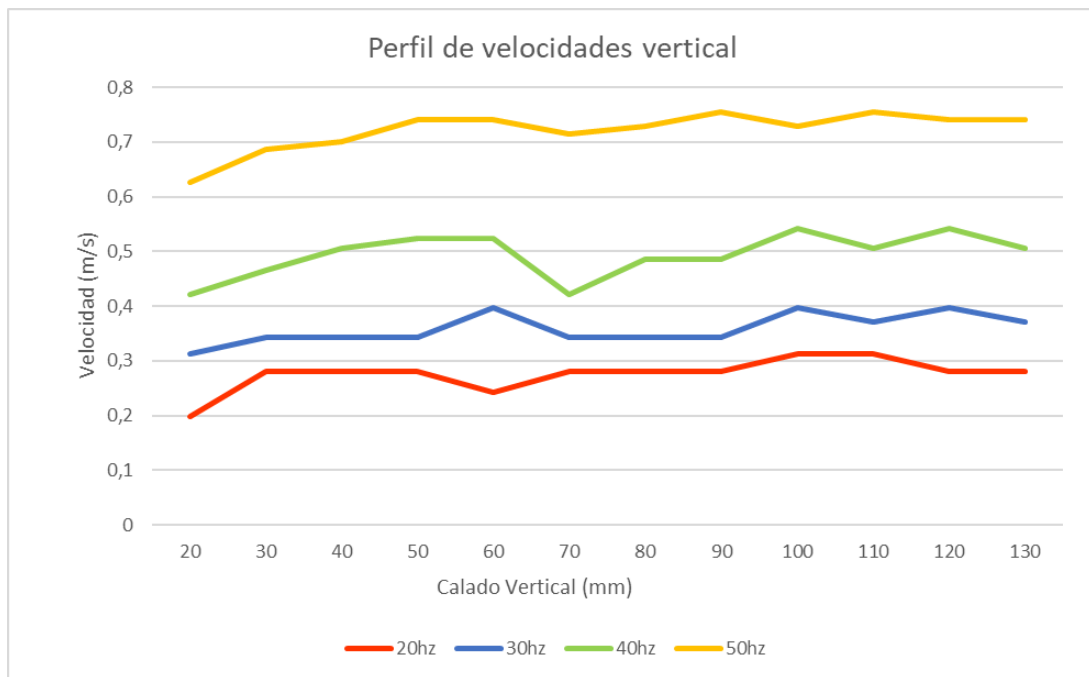
9.2.1. Hipótesis en los ensayos.

Las hipótesis consideradas para la realización de los distintos ensayos han sido:

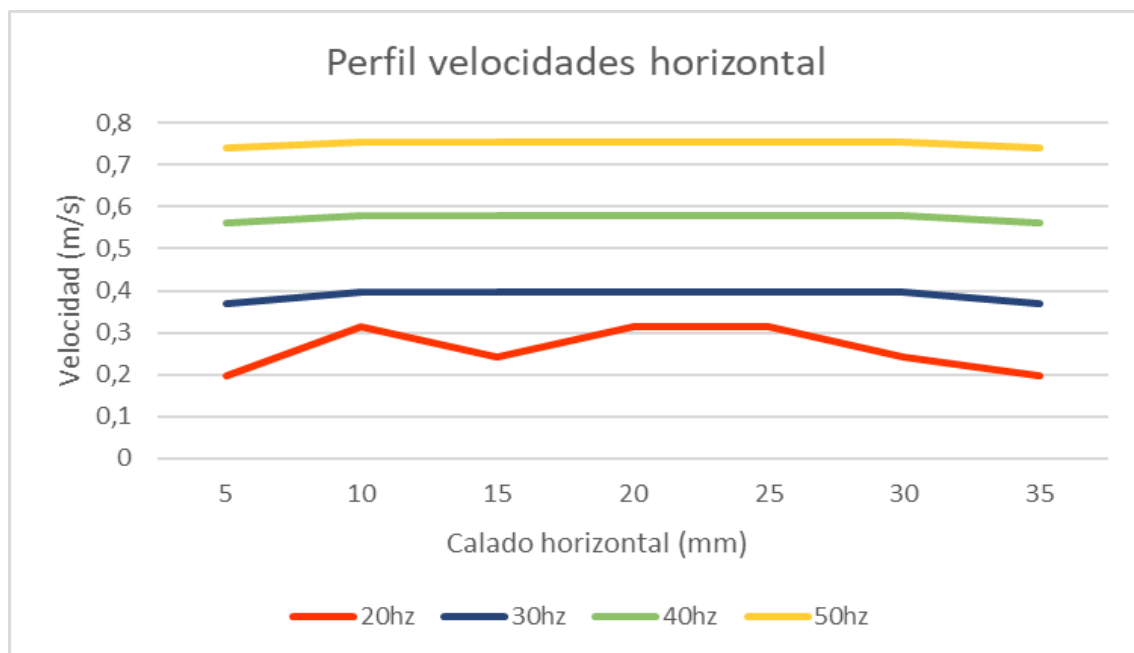
Flujo Unidireccional: Consideramos que el flujo va en una sola dirección de manera constante y que en las paredes no hay desplazamiento, es decir, velocidad nula.

Caudal constante: Consideramos que el caudal es constante a lo largo del canal por lo que damos por hecho la Ecuación de Bernoulli de la continuidad (como veremos posteriormente en los cálculos, esto no se cumple ya que hay pérdidas por los sellos de los vertederos, por la rugosidad de las paredes y por la alta frecuencia de la bomba a modo de cavitación dentro de ella).

Para caracterizar estas hipótesis, se ha realizado un conjunto de mediciones previas para justificar que el caudal es constante, tanto en aguas arriba como en aguas abajo como en el centro del canal de manera longitudinal y transversal a un calado fijo, en mi caso, de 205mm, para obtener un perfil de velocidades a distintas frecuencias variando de 10 en 10Hz comenzando de 20Hz hasta 50Hz y variando la altura para el caso longitudinal y variando la cota de anchura para el caso transversal.



Gráfica 4: Perfil de Velocidades Vertical



Gráfica 5: Perfil de Velocidades Horizontal.

Como podemos ver en las gráficas 1 y 2, todas las frecuencias prácticamente tienden a la uniformidad en los perfiles de velocidad. También podemos apreciar que, para calados bajos, la velocidad decrece de manera considerable siendo así al contrario para

calados altos, por lo que, viendo esta tendencia, podemos afirmar la hipótesis de no deslizamiento en las inmediaciones de las paredes. Volver a decir que el calado natural del canal era de 205 mm, pero solo se pudo hacer mediciones verticales hasta 130mm ya que las olas del agua hacia que el Pitot quedara al descubierto, por lo que se introducía aire lo cual falsea las medidas experimentales de velocidad.

9.2.2.Método de medición del ensayo de vertederos.

El método para ensayar tanto para los dos vertederos de pared delgada (Rectangular y Triangular) como para el de pared gruesa, ha sido el mismo.

- Primer paso: Se introduce los tubos de Pitot pertinentes para el cálculo de velocidad. En mi caso para los vertederos de pared estrecha solo podía introducir el Pitot de aguas arriba porque durante la simulación, al bajar tanto la lámina de agua, el Pitot introducido en aguas abajo falseaba la lectura por que se le introducía aire, en cambio, para el vertedero de pared gruesa si podía hacer la lectura con dos pitots, uno en aguas arriba y otro en aguas abajo.
- Segundo paso: Una vez introducido los Pitot pertinentes, se purgan y se comprueba que estén correctos.
- Tercer paso: Introducimos nuestro vertedero en el canal del laboratorio en la zona de ensayo y anotamos la posición exacta donde hemos emplazado nuestro vertedero y lo atornillamos al mismo si se puede. Medimos calado inicial en estado de reposo de la bomba.



Fotografía 11: Vertedero de pared estrecha de sección Rectangular en Reposo en el canal del laboratorio de la E.P.S.L.

- Cuarto paso: Una vez introducido y anotado lo citado anteriormente, encendemos el cuerpo neumático y posteriormente la bomba a la frecuencia deseada para el ensayo en cuestión (se ha ensayado los tres casos a las frecuencias de 20Hz, 30Hz, 40Hz y 50Hz). Dicha selección de frecuencia solo depende únicamente en que la bomba no pierda potencia durante el ensayo.



Fotografía 12: Vertedero de pared estrecha de sección Triangular a Frecuencia de bomba de 20Hz en el canal del laboratorio de la E.P.S.L.

- Quinto paso: Anotamos las mediciones de velocidad dadas por nuestro Pitot a través de nuestros tubos piezométricos mientras el flujo se mantiene constante en nuestro ensayo a la frecuencia deseada.
- Sexto paso: Se recogen todos estos datos en una tabla Excel para hacer los cálculos pertinentes para luego así poder compararlos con nuestro ensayo computacional.

9.2.3. Método de simulación mediante software de CFD.

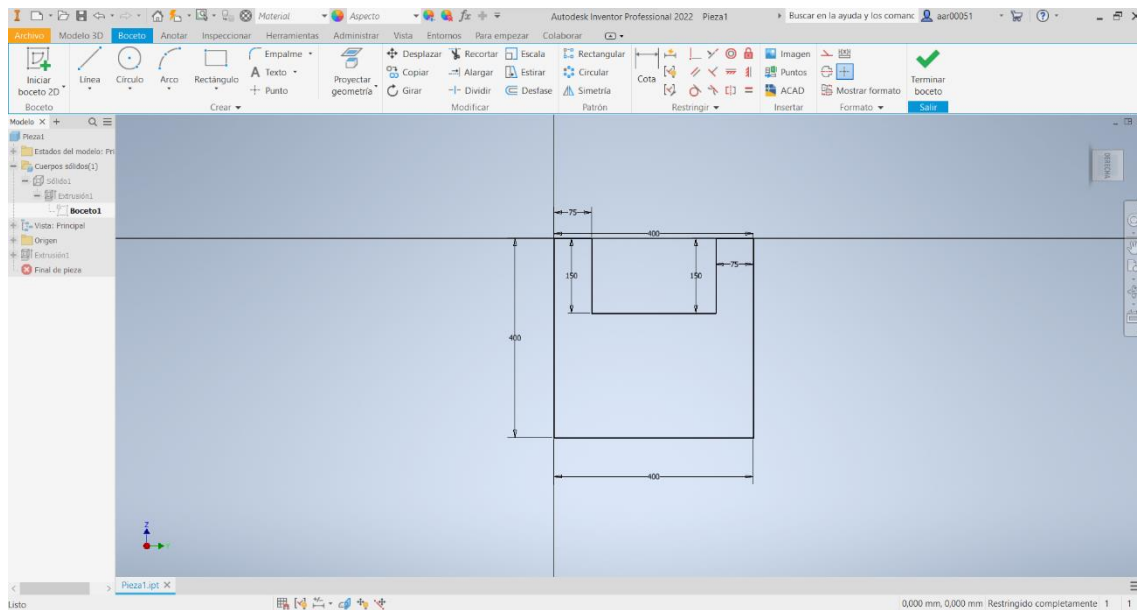
Para la simulación de nuestros vertederos mediante software de CFD se va a explicar el método necesario para la creación de una maya fidedigna a nuestros modelos reales utilizados en el laboratorio en las mismas condiciones de este.

El modelo ha sido creado mediante un software de modelado 3D llamado *Autodesk Inventor Professional 2022*. Para la creación de la malla y su posterior simulación, el software de CFD empleado ha sido *Simflow 4.0*. Para su posterior post-procesado, el software de CFD utilizado ha sido *Paraview*.

La utilización de estos softwares ha sido por la comodidad que ofrecen al trabajar con ellos con una interfaz muy intuitiva y exactitud en la labor encomendada.

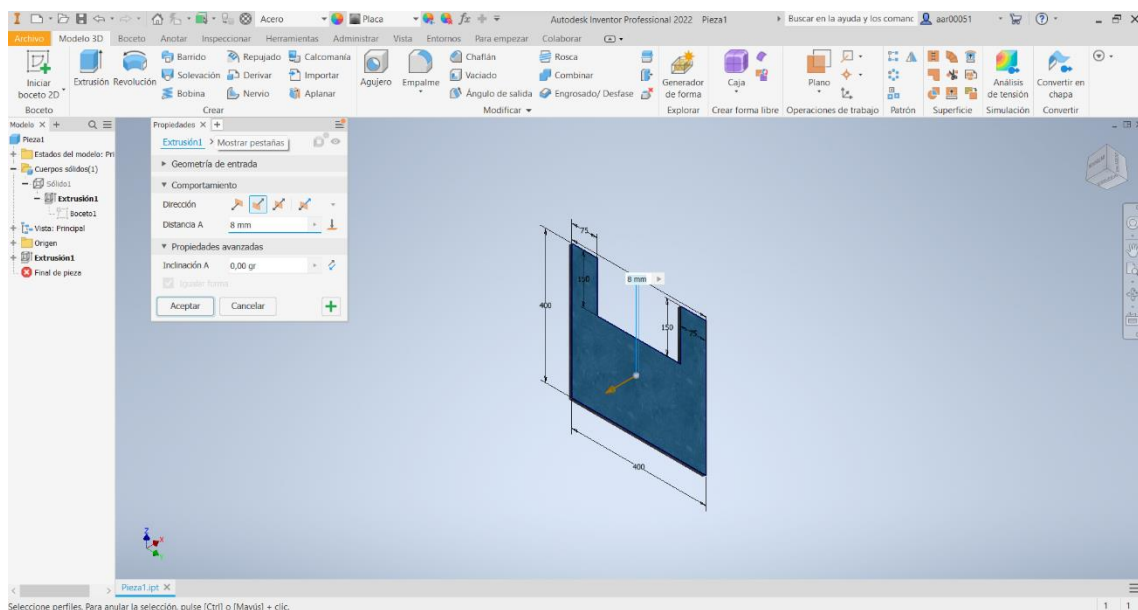
Para la realización de las simulaciones, los tres vertederos a estudiados se han realizado de la misma manera, solo se ha cambiado el nivel de refinamiento de la malla debido a la geometría ya que, depende significativamente la complejidad de la misma.

- Primer paso: A través del software de modelado 3D Autodesk Inventor Professional 2022, hemos comenzado dibujando en 2D la pared de nuestro vertedero.



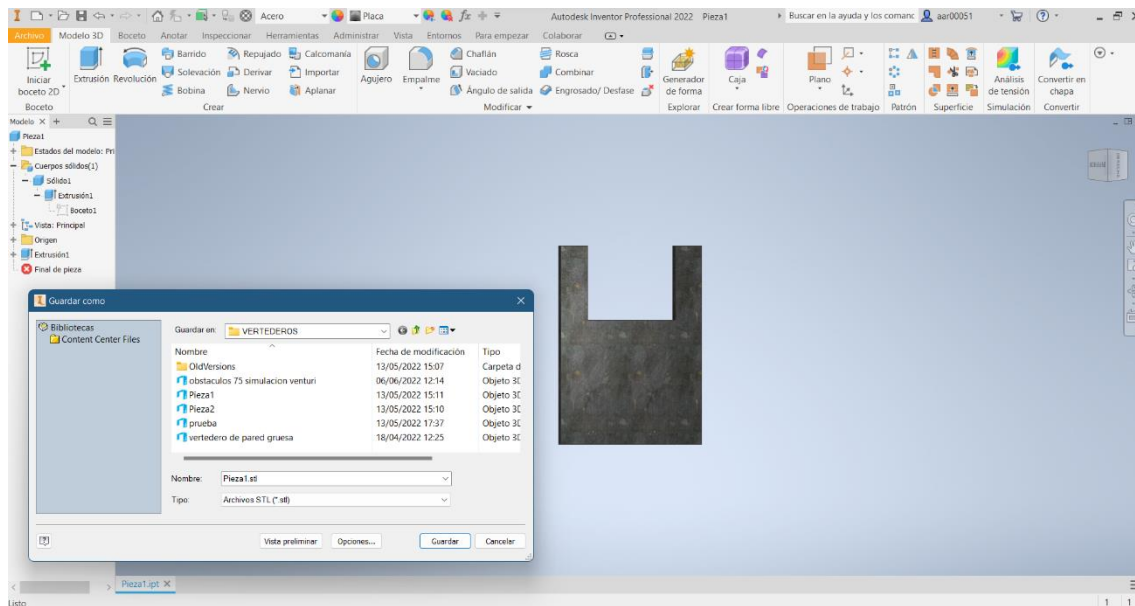
Fotografía 13: Planimetría de la pared del Vertedero de pared estrecha de sección Rectangular realizada en Autodesk Inventor.

Posteriormente, dicha figura se extruirá por un valor de 8mm que corresponde con el grosor de la pared de nuestro vertedero en cuestión.



Fotografía 14: Extrusión de la pared del Vertedero de pared estrecha de sección Rectangular realizado en Autodesk Inventor.

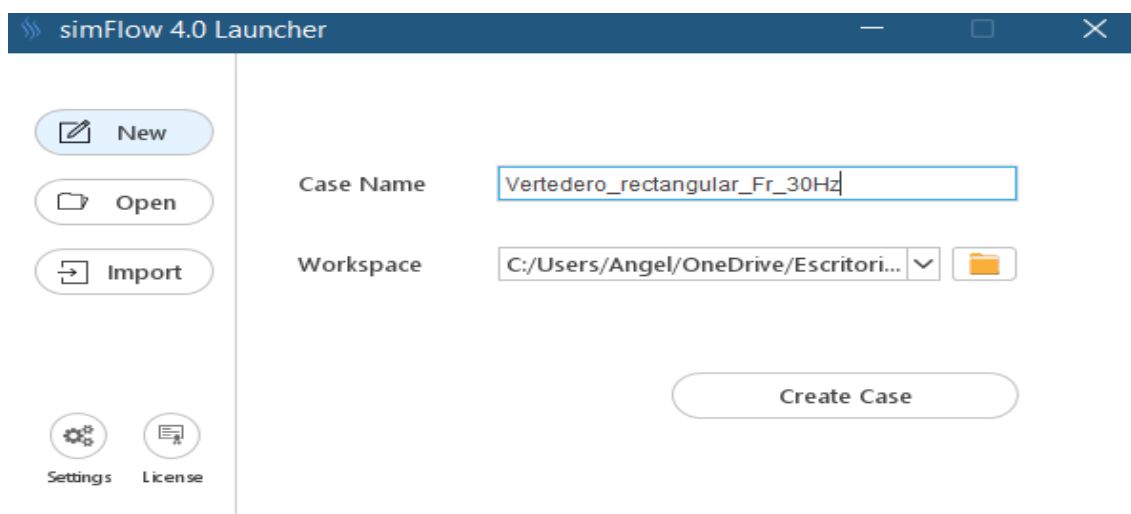
Una vez acabada la pieza, para que nuestro software de CFD Simflow, en cuestión, pueda leerla, este archivo se debe exportar como formato .stl.



Fotografía 15: Exportación de caso a archivo.stl realizado en Autodesk Inventor.

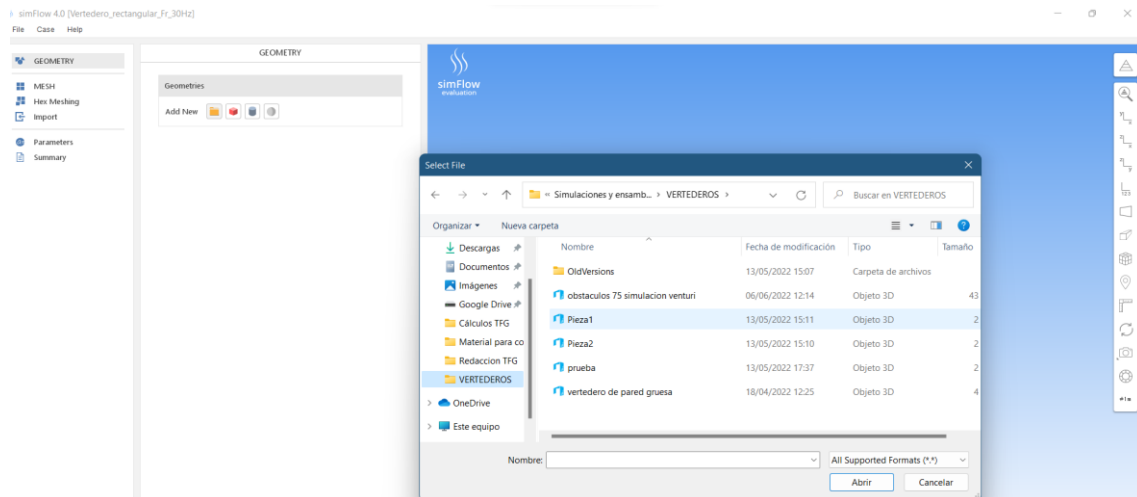
Hemos realizado solo la pared del vertedero ya que es la parte de contacto con el flujo aguas arriba y la que va a condicionar el comportamiento del flujo. Dibujar el vertedero totalmente completo es inútil ya que al estar limitada la versión no profesional de Simflow a 20000 nodos, estaríamos cargando el peso de la malla inútilmente.

- Segundo paso: una vez creada nuestra pieza en formato. stl, abrimos Simflow y nos dispondremos a crear un caso para simular nuestra pieza. Comenzaremos introduciendo un nombre cualquiera para poder identificar de manera intuitiva el caso a examinar y seguidamente, pulsaremos en “create case” para empezar con la creación de nuestra simulación y creación del mallado.



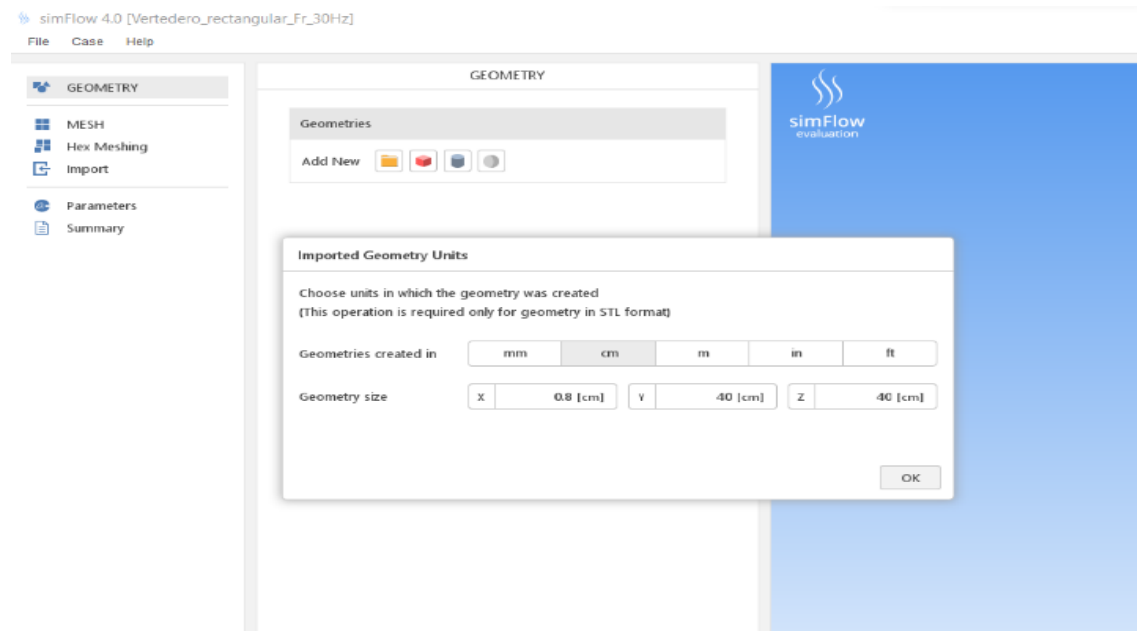
Fotografía 16: Pantalla de inicio del software Simflow

Después, una vez realizado lo anterior, no aparecerá la interfaz de trabajo de Simflow, en la cual comenzaremos pulsando sobre la carpeta de color naranja marcada en la imagen de a continuación. Para poder exportar nuestro modelo, elegimos nuestro modelo dentro del directorio donde se haya guardado el modelo en cuestión y pulsamos en abrir.



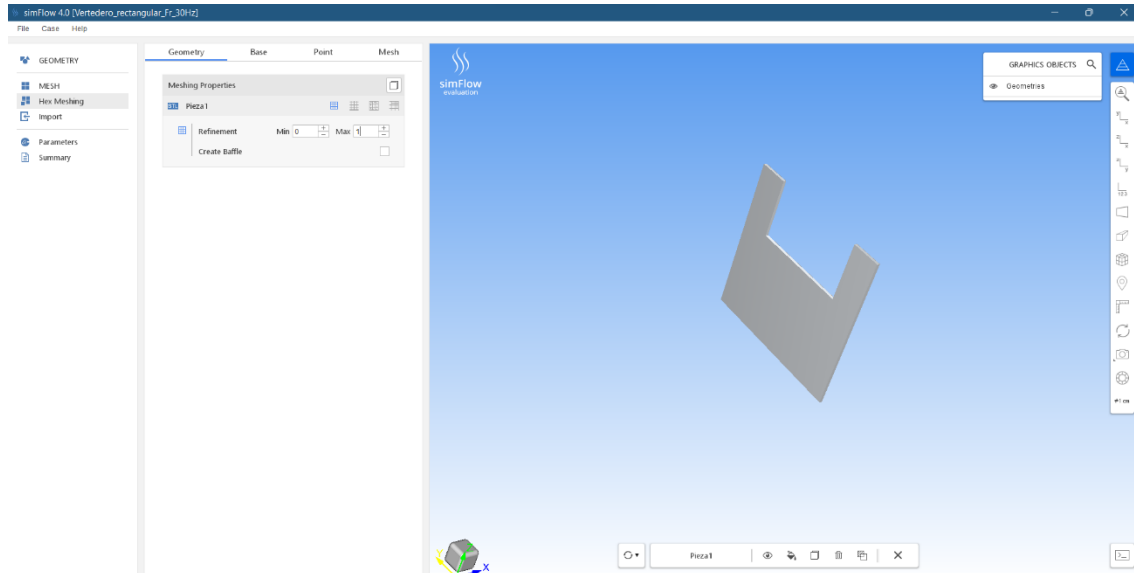
Fotografía 17: Pantalla de trabajo y exportación del modelo a Simflow

Continuadamente, nos saltara una pantalla mostrada a continuación donde debemos pinchar en que unidad van las cotas de nuestro modelo.



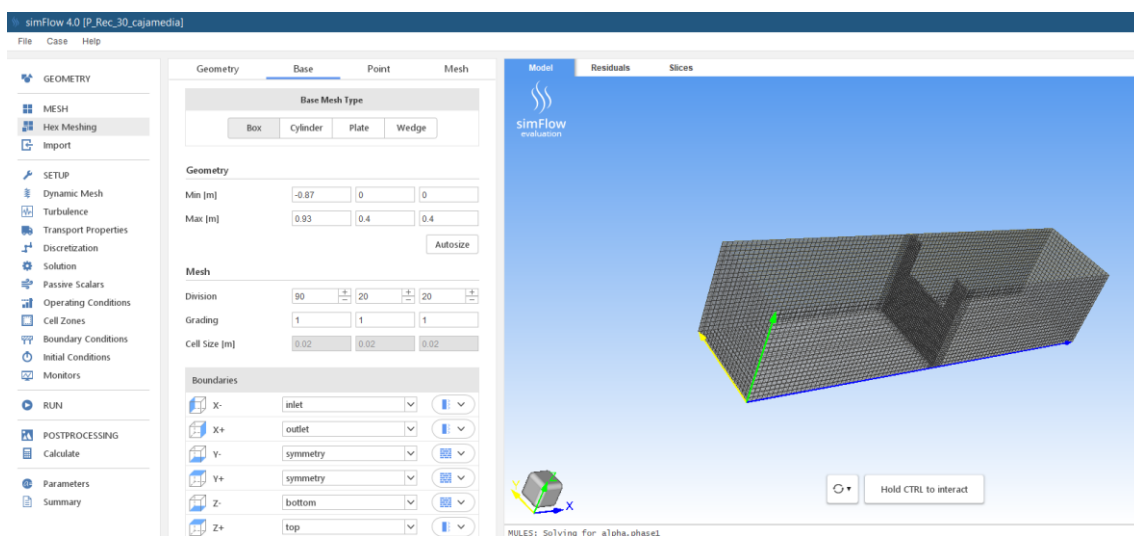
Fotografía 18: Pantalla de cotas del modelo a Simflow.

Una vez importada nuestro modelo, chequearemos el mismo si está totalmente cerrada y posteriormente comenzaremos a crear nuestra malla pulsando en “Hex Meshing” después en el dibujo del cuadrado mallado de color azul. Al pulsar aquí nos saldrá un desplegable donde le daremos un refinamiento. En nuestro caso rectangular, este refinamiento será de 1 para que la geometría después en el mallado, salga perfectamente.



Fotografía 19: Primeros pasos al mallado de nuestro modelo en Simflow.

Continuadamente, pulsando en ese apartado en la sección base, procederemos a realizar nuestra malla.



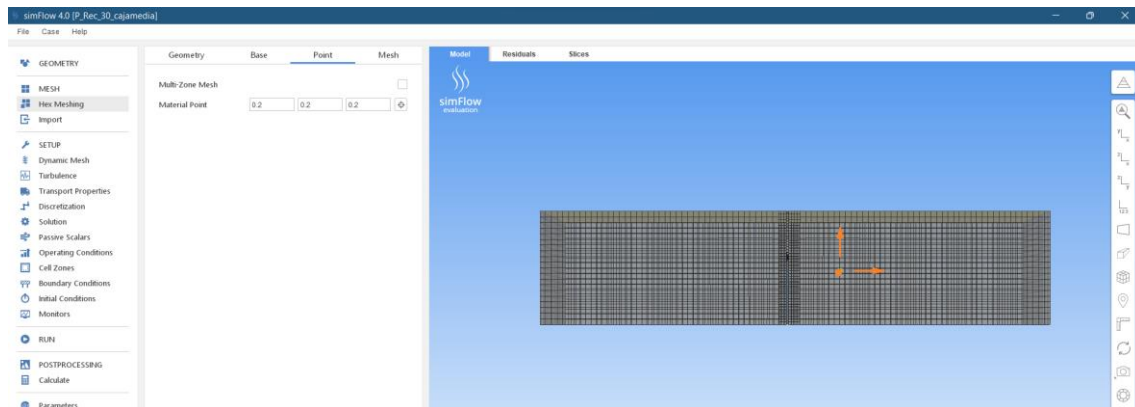
Fotografía 20: Condiciones del mallado de nuestro modelo en Simflow.

Como podemos apreciar, el tipo de malla que vamos a crear realmente es un rectángulo ya que el canal tiene esa forma. Pulsamos en la pestaña “Box” e introducimos las cotas mostradas en la imagen ya que son las cotas de nuestro canal y la posición real donde se simuló nuestro vertedero en la vida real.

Continuadamente, en la división del mallado, la condición primordial es que esta sea lo más equitativa posible, por lo que hemos introducido esos valores ya que la división será lo suficiente refinada para tener una malla bastante fina.

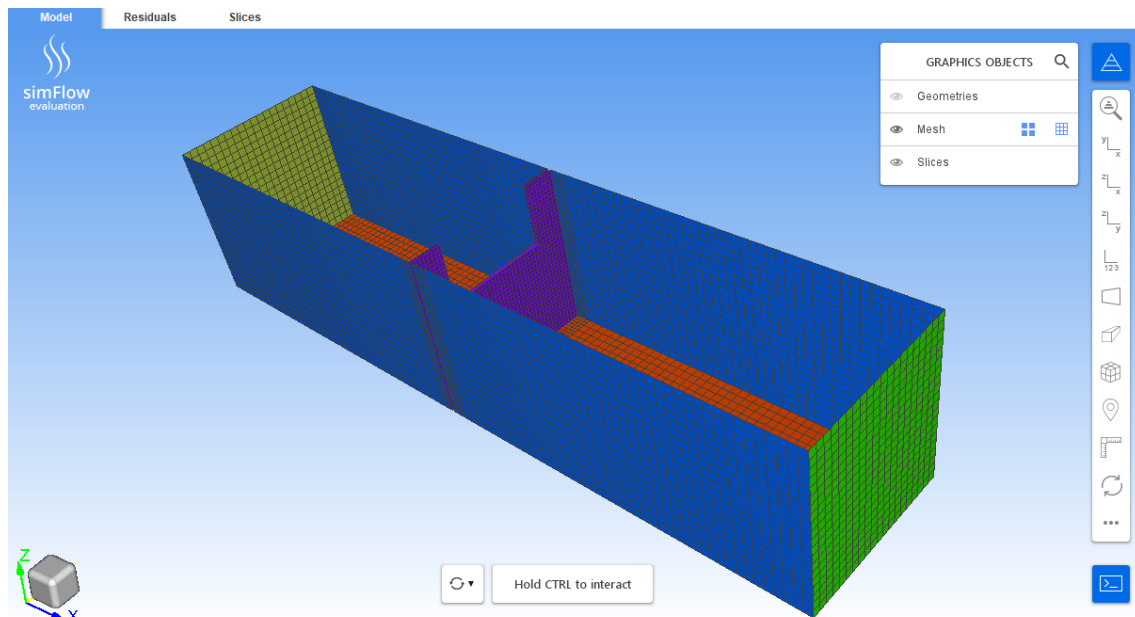
Después, ajustaremos las cotas de nuestro rectángulo, indicando lo que es cada cara de nuestro rectángulo respecto a nuestro canal del laboratorio.

Seguidamente, pulsaremos la pestaña “Point” en la cual podremos introducir un punto dentro de la malla para que le demos una referencia al programa de lo que tiene que mallar.



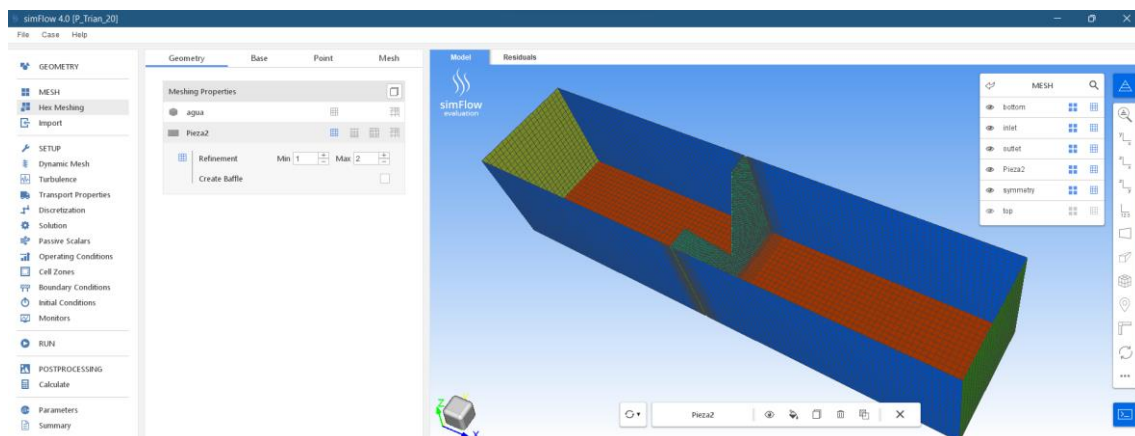
Fotografía 21: Punto de mallado de nuestro modelo en Simflow.

En la pestaña de “Mesh” pulsaremos sobre esta variable para que nos genere una malla. Nos saldrá algo parecido a la imagen siguiente, lo cual, para ver su interior, pulsaremos en el “ojo” del apartado “top” de la derecha para desactivar el techo de nuestro rectángulo para poder ver así el interior.



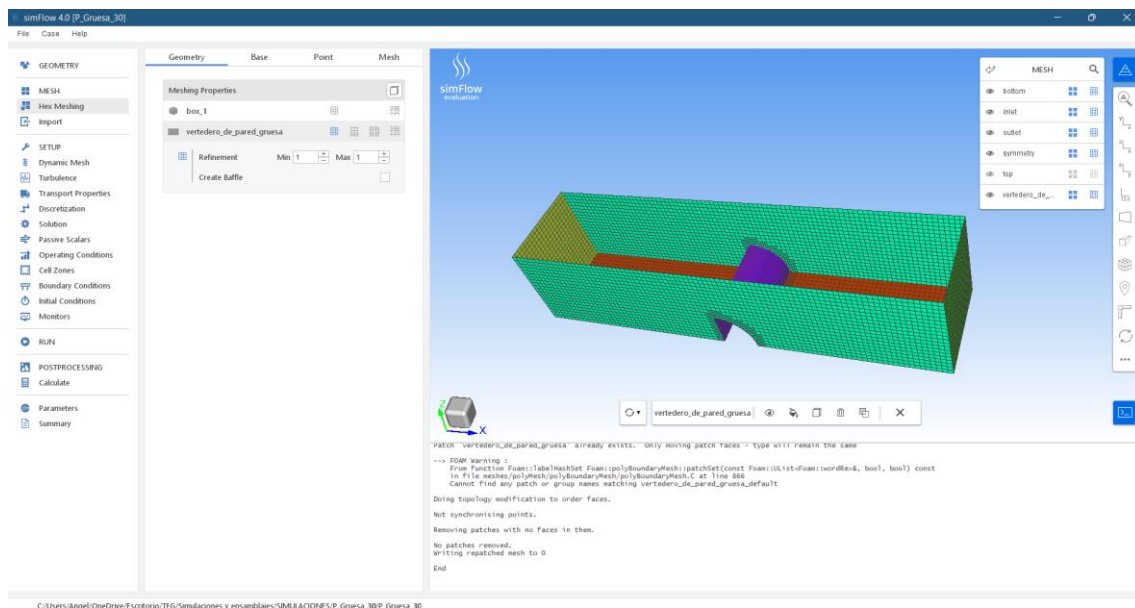
Fotografía 22: Malla creada para el Vertedero de Pared Rectangular en Simflow.

Para el caso del vertedero Triangular, para que la malla salga de las mismas condiciones que la anterior, el refinamiento ha sido superior imponiéndole al programa que el máximo de refinamiento sea de 2 y el mínimo de 1.



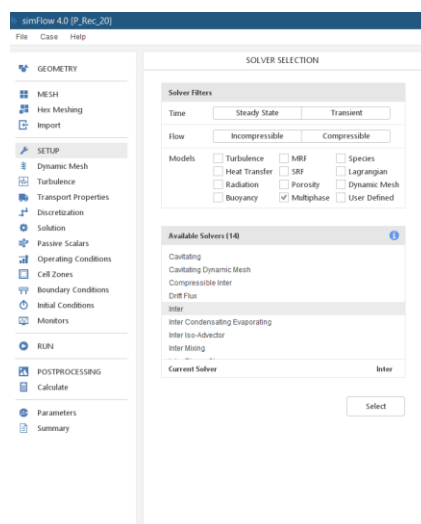
Fotografía 23: Malla creada para el Vertedero Triangular en Simflow.

Para el caso del vertedero de pared Gruesa, para que la malla salga de las mismas condiciones que la anterior, el refinamiento ha sido superior imponiéndole al programa que el máximo de refinamiento sea de 2 y el mínimo de 1.



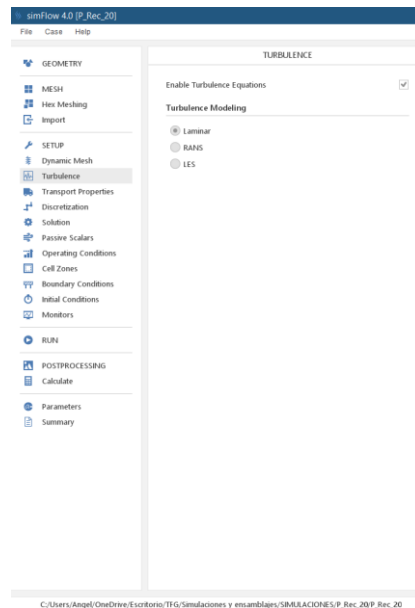
Fotografía 24: Malla creada para el Vertedero de pared Gruesa en Simflow.

Una vez creada nuestra malla, empezaremos a crear nuestro solucionador de nuestro caso pulsando la pestaña “setup” y seguidamente pulsando las condiciones más adecuadas a las condiciones de nuestro modelo el cual es un modelo “Multiphase” con un solucionador “Inter”. Hemos elegido estas variables para que nuestro caso porque es un flujo transitorio e incompresible para dos fluidos (aire y agua) isotérmicos e inmiscibles. Este solucionador admite también modelos de flotabilidad, turbulencia y transferencia de calor.



Fotografía 25: Elección de solucionador adecuado en Simflow.

Continuadamente, en la pestaña “Turbulence”, el modelo de turbulencia para este caso es Laminar ya que nos encontramos ante un fluido laminar.



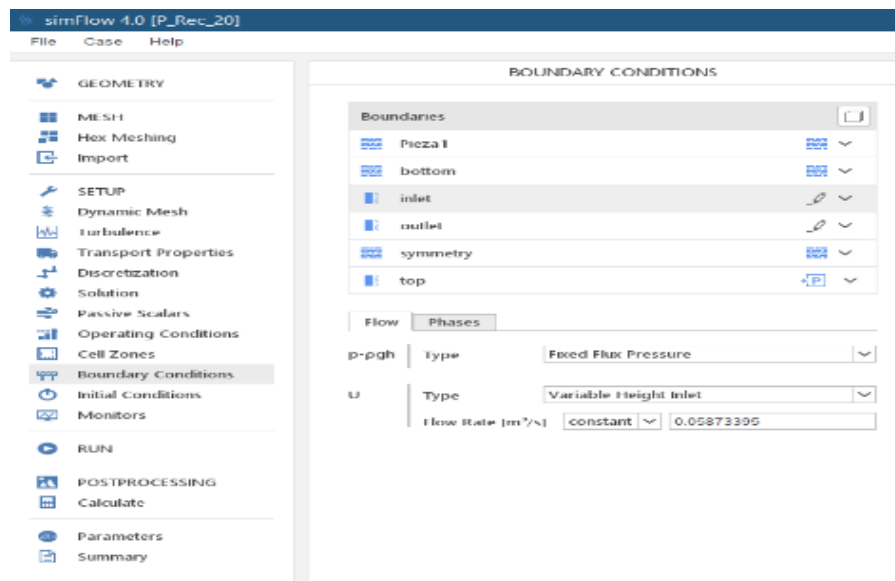
Fotografía 26: Elección de un modelo de turbulencia adecuado en Simflow.

Una vez realizado todos estos pasos anteriores, introduciremos nuestras condiciones de contorno de nuestro estudio en la sección “Boundary Conditions”. Empezaremos con la entrada de nuestra malla “inlet”.

Este apartado es el más importante para nuestra simulación ya que, para las distintas frecuencias estudiadas en nuestros casos en el canal del laboratorio, hemos calculado los caudales que recorren por estos vertederos aguas arriba para poder introducirlas en el software para que podamos ver los resultados obtenidos tanto en el flujo de descarga del vertedero como en el caudal de salida, y así, poder compararlos con los reales.

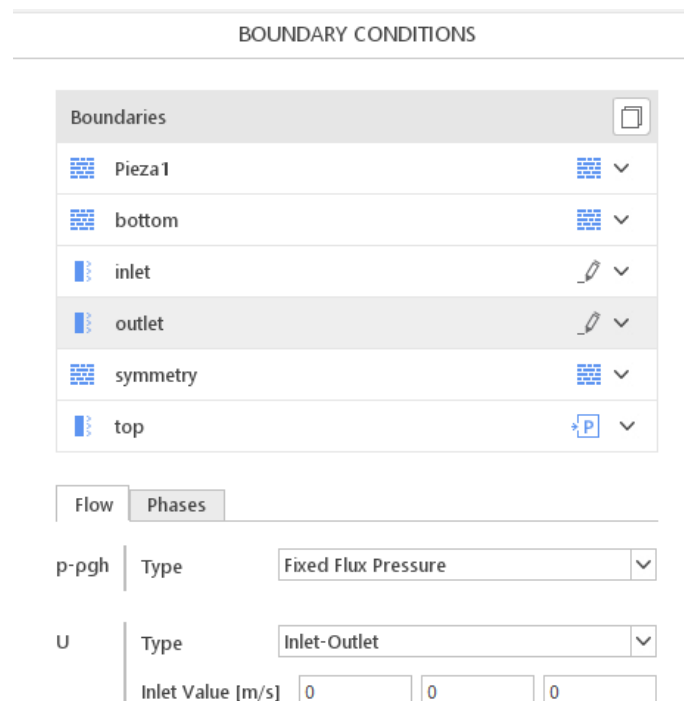
Por esta razón, como se muestra en la imagen, para las *condiciones de entrada* le fijamos el caudal de entrada igual al calculado en el laboratorio suministrado por la bomba del mismo, el cual nos valdrá como referencia para poder hacer una comparación fidedigna. Como también sabemos, el flujo suministrado por la bomba, su condición es que es fijo, constante y a presión fija.

En este apartado introduciremos las condiciones mostradas en las imágenes para las distintas partes en función a nuestro ensayo experimental realizado:



Fotografía 27: Elección de las condiciones inlet en Simflow.

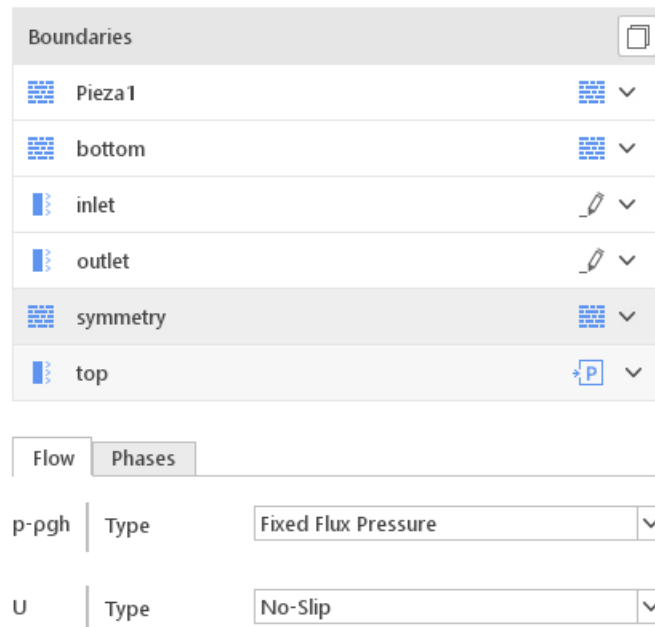
Para las *condiciones de salida*, sabemos que nuestro flujo a presión fija en función de la entrada. Por estos motivos hemos elegido estas variables en la fotografía de a continuación.



Fotografía 28: Elección de las condiciones outlet en Simflow.

Para las *condiciones de las paredes laterales*, como sabemos que son simétricas, nuestro flujo a través de ellas será como en el resto del canal, a presión fija y como hipótesis tomamos que no desliza ya que las paredes tienen rugosidad.

Por estos motivos hemos elegido estas variables en la fotografía de a continuación.

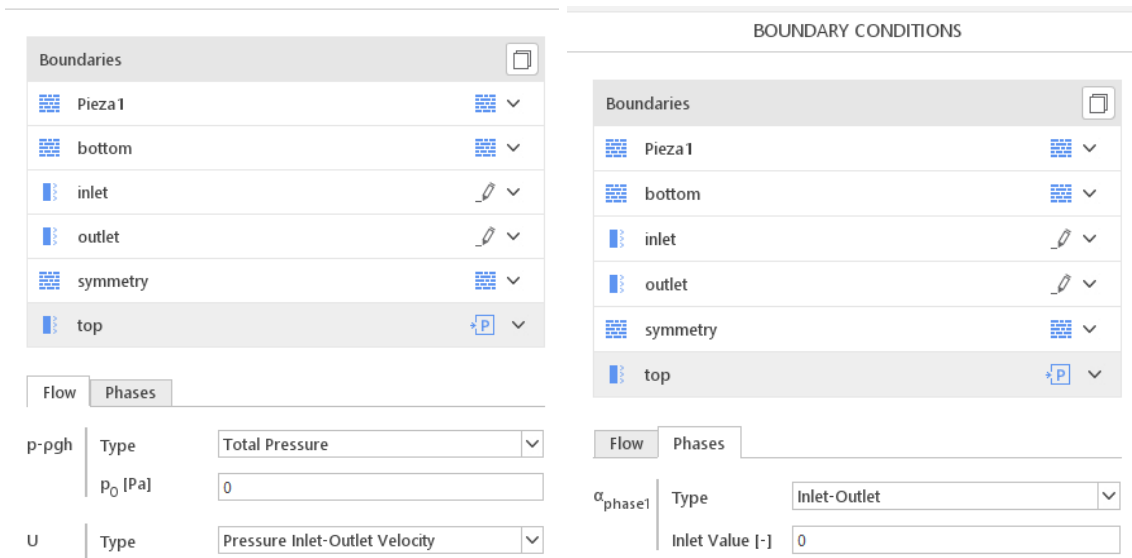


Fotografía 29: Elección de las condiciones de las paredes laterales en Simflow.

Para las *condiciones de la parte superior* del mallado, sabemos que esta parte, en la vida real, está al aire libre porque es un canal abierto, por lo que podemos decir, el flujo estará a presión atmosférica.

Teniendo en cuenta esta razón, sabemos que la velocidad del agua impuesta por la bomba de manera constante en función con el número de Coriolis, α (resultado obtenido en nuestro ensayo experimental), viene dado en función de la velocidad entrada impuesta ya que fue calculada de manera experimental respecto a la salida que será calculada por el software y posteriormente comparada con los datos obtenidos de manera experimental.

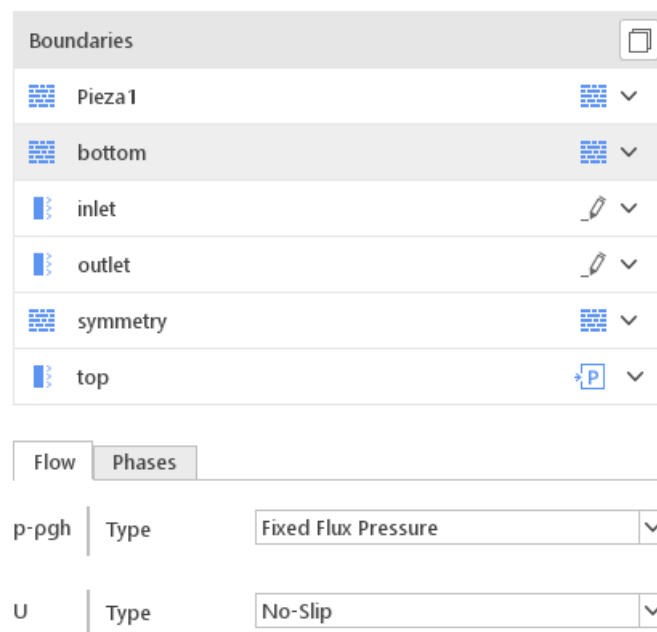
Por estos motivos, en la fotografía de a continuación, hemos elegido estas variables.



Fotografía 30: Elección de las condiciones top en Simflow.

Para la *condición del suelo* del canal, igual que para las condiciones de las paredes laterales, nuestro flujo a través de este será como en el resto del canal, a presión fija y como hipótesis tomamos que no desliza ya que el suelo tiene rugosidad.

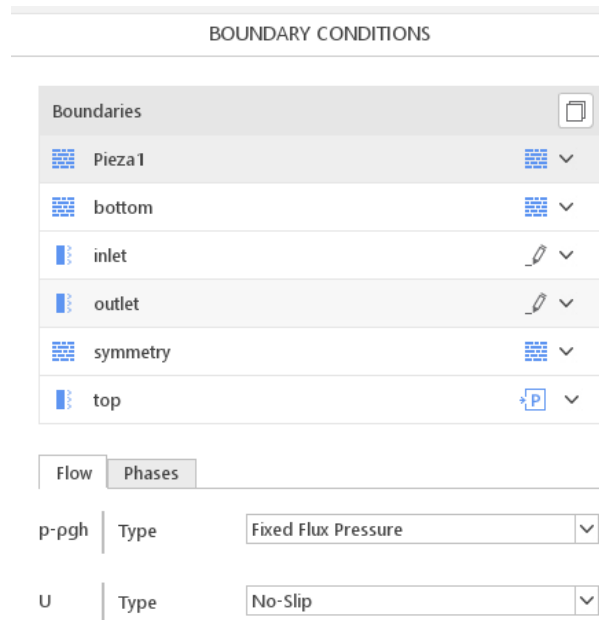
Por estos motivos hemos elegido estas variables en la fotografía de a continuación:



Fotografía 31: Elección de las condiciones bottom en Simflow.

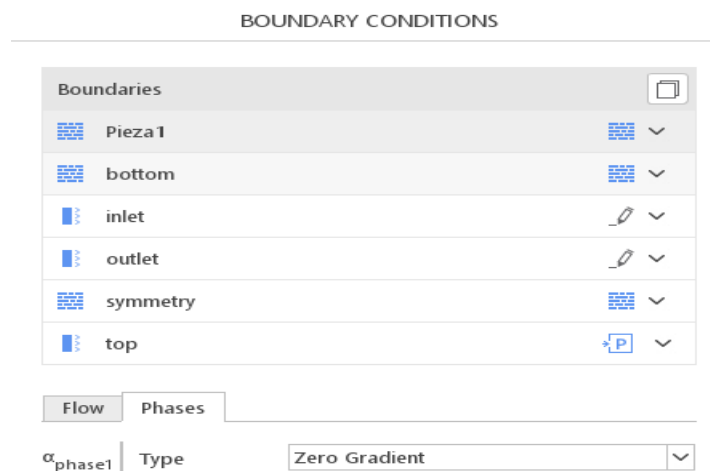
Para la condición del vertedero del canal, igual que para las condiciones de las paredes laterales y el suelo, nuestro flujo a través de este será como en el resto del canal, a presión fija y como hipótesis tomamos que no desliza ya que el actúa como un obstáculo al flujo.

Por estos motivos hemos elegido estas variables en la fotografía de a continuación.



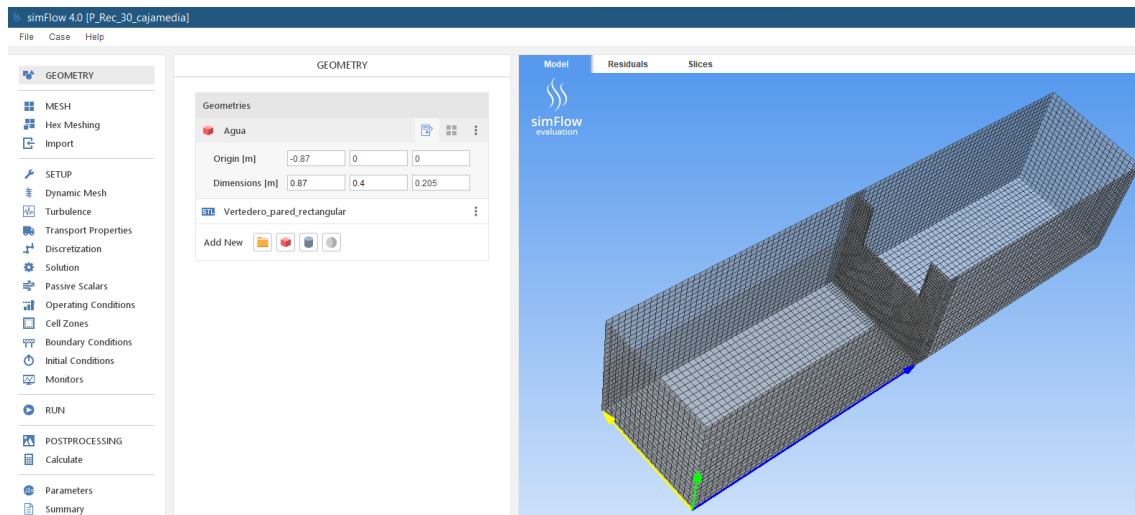
Fotografía 32: Elección de las condiciones del vertedero en Simflow.

Para todas las partes excepto la parte superior “top”, en la pestaña “Phases”, el número de Coriolis tendrá un gradiente cero. Esto se debe a que viene impuesto a continuación en la pestaña “Transport Properties” ya que sabemos que se aproxima a la unidad porque estamos haciendo un ensayo en un canal abierto.



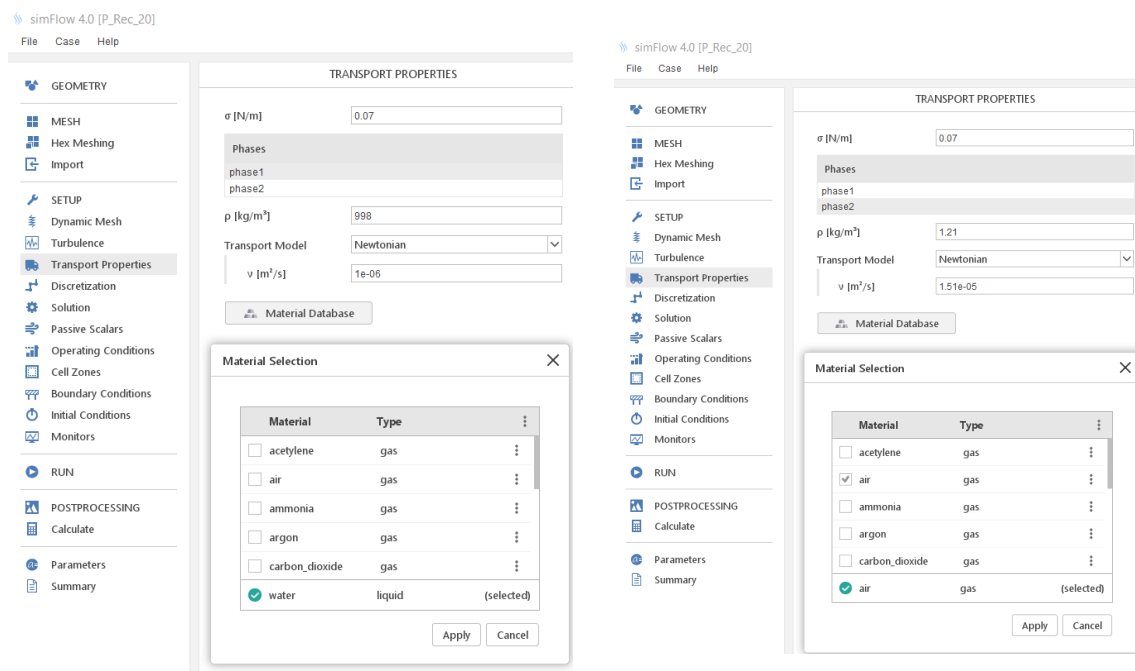
Fotografía 33: Elección de las condiciones de la fase Alpha del resto de partes que no son la parte top en Simflow.

- **Tercer paso:** Una vez creada nuestra malla, crearemos y caracterizaremos el fluido el cual atravesará nuestra malla. Para ello crearemos una caja en la pestaña “Geometry” en la cual pincharemos sobre la caja roja y en el desplegable de cotas, introduciremos las cotas correspondientes que hay en la imagen siguiente que corresponden a las cotas que habría del fluido aguas arriba teniendo en cuenta el calado del agua del ensayo del laboratorio.



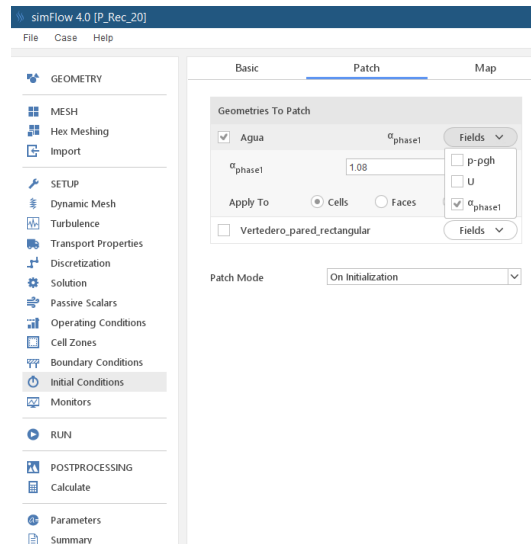
Fotografía 34: Creación del fluido a estudiar sobre nuestra malla en Simflow.

Continuadamente, en la pestaña “Transport Properties” le vamos a reseñar, al programa, los dos fluidos que atraviesan nuestra malla.



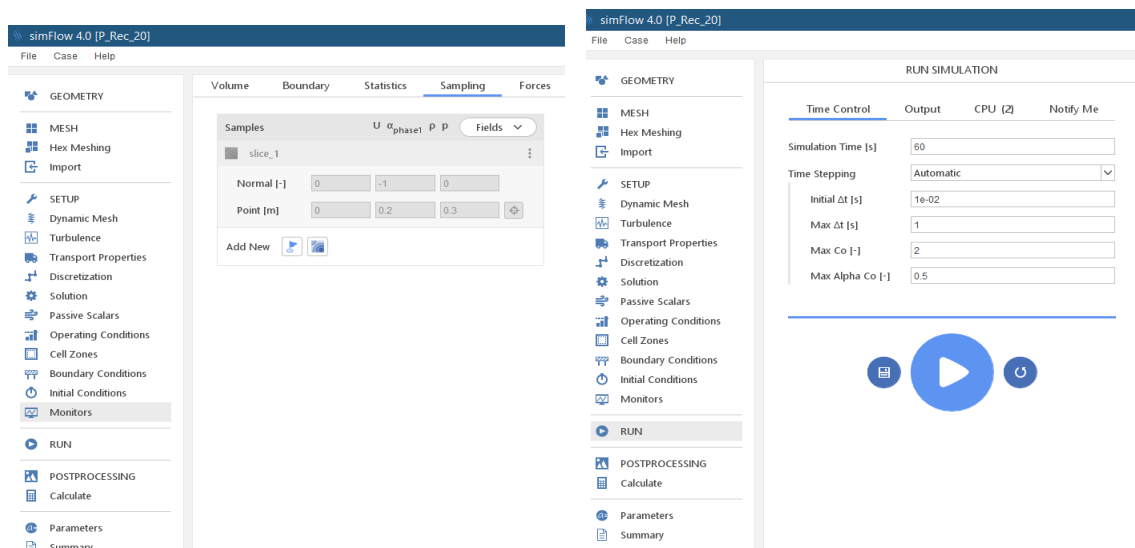
Fotografía 33: Caracterización de los fluidos que recorren el mallado en Simflow.

Una vez caracterizado los dos tipos de fluidos que hay en nuestra malla, vamos a caracterizar el movimiento del fluido a través del Número de Coriolis presentado y calculado anteriormente. Para ello, nos iremos a la pestaña “Initial Condition” y pinchar en el apartado “fields” de nuestra caja creada como “Agua”. Clicaremos sobre Alpha pase 1 ya que es la variable del número de Coriolis, el cual, en nuestro caso, al ser un canal abierto, su valor es aproximadamente la unidad, pero el valor exacto sería 1.08.



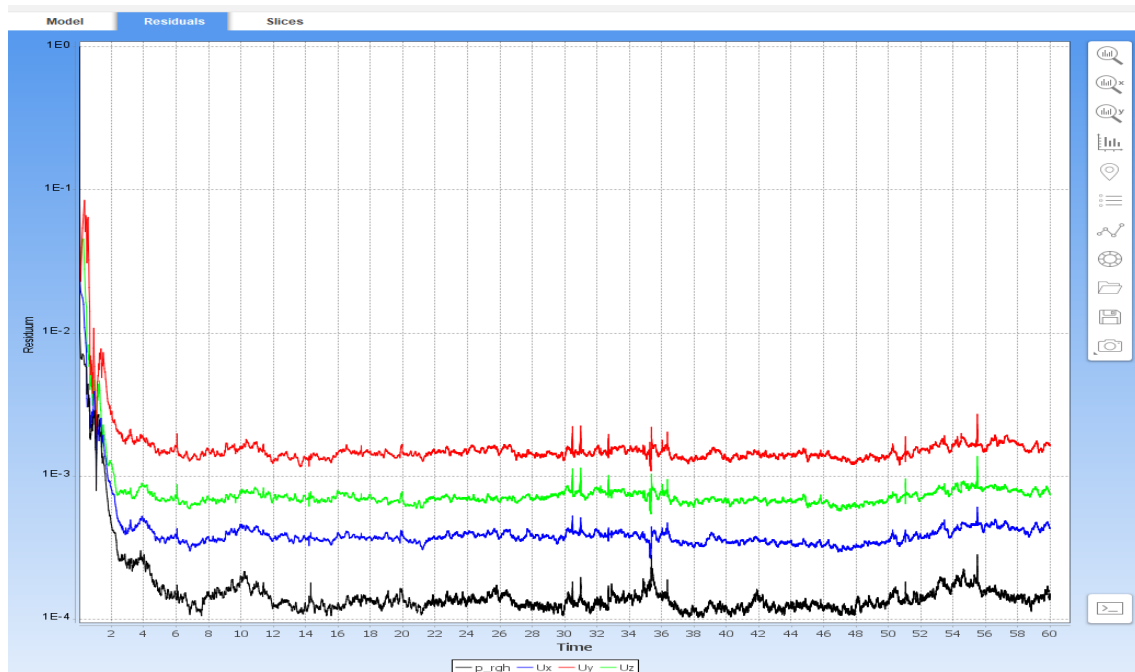
Fotografía 34: Caracterización del agua que recorre el mallado en Simflow.

- Cuarto paso: Una vez caracterizado nuestro caso, vamos a correr nuestra malla para poder recopilar los resultados de nuestro caso. No antes sin crear un plano medio longitudinal a nuestra malla para poder recopilar los datos obtenidos cuando recorre el agua por nuestra malla y también crear un video de lo que realizaría el agua sobre nuestra malla.

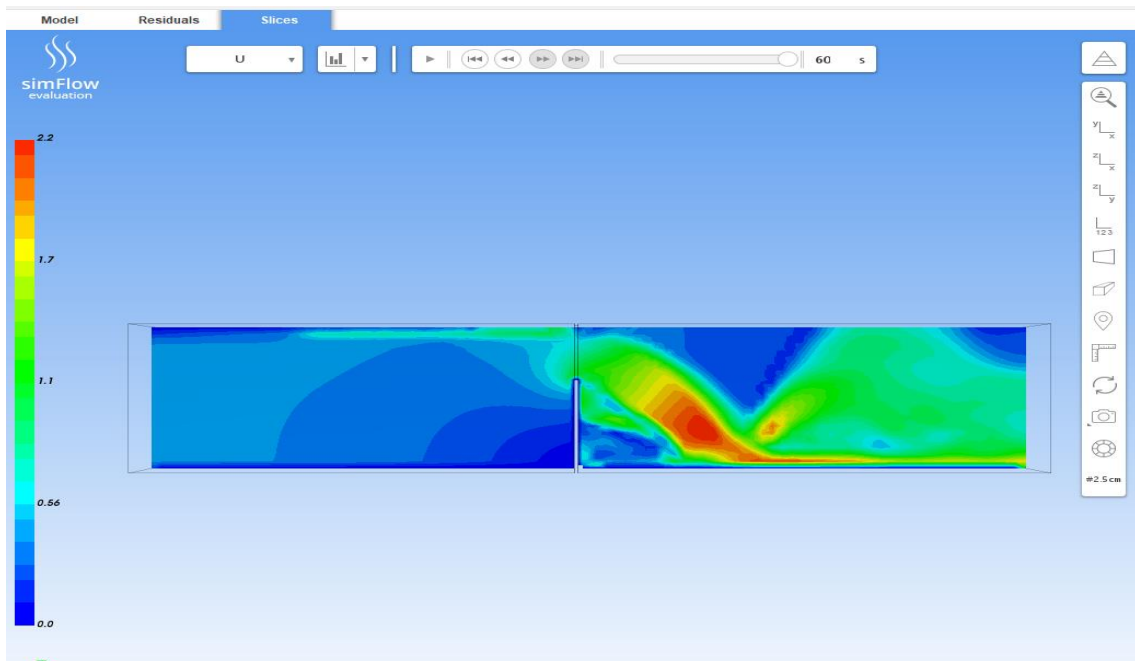


Fotografía 35: Creación del plano de nuestro fluido y caracterización de la simulación en Simflow.

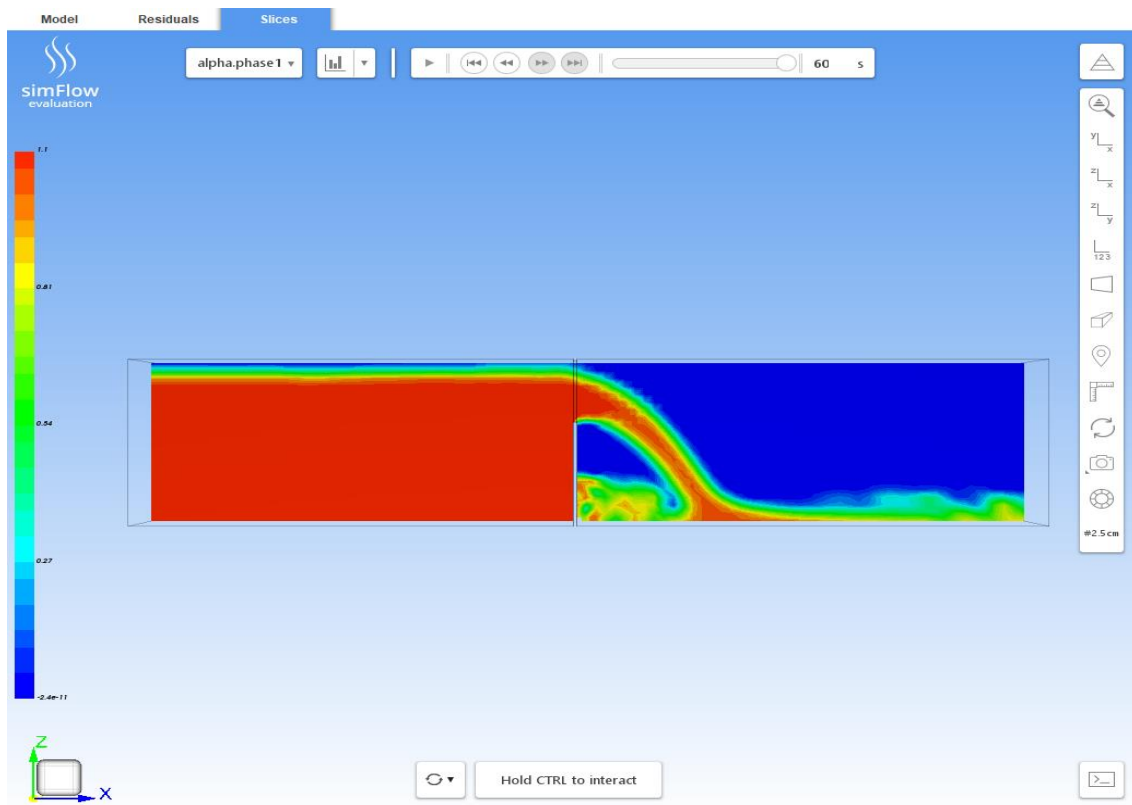
Una vez que ha simulado nuestro caso, nos resultará una gráfica de residuales y un video del comportamiento durante el tiempo establecido en la fotografía anterior donde muestra tanto el movimiento como los valores obtenidos tanto para la velocidad, presión, Alpha y densidad. Posteriormente recopilaremos las imágenes de todos los casos en todas sus frecuencias y los compararemos con los resultados teóricos.



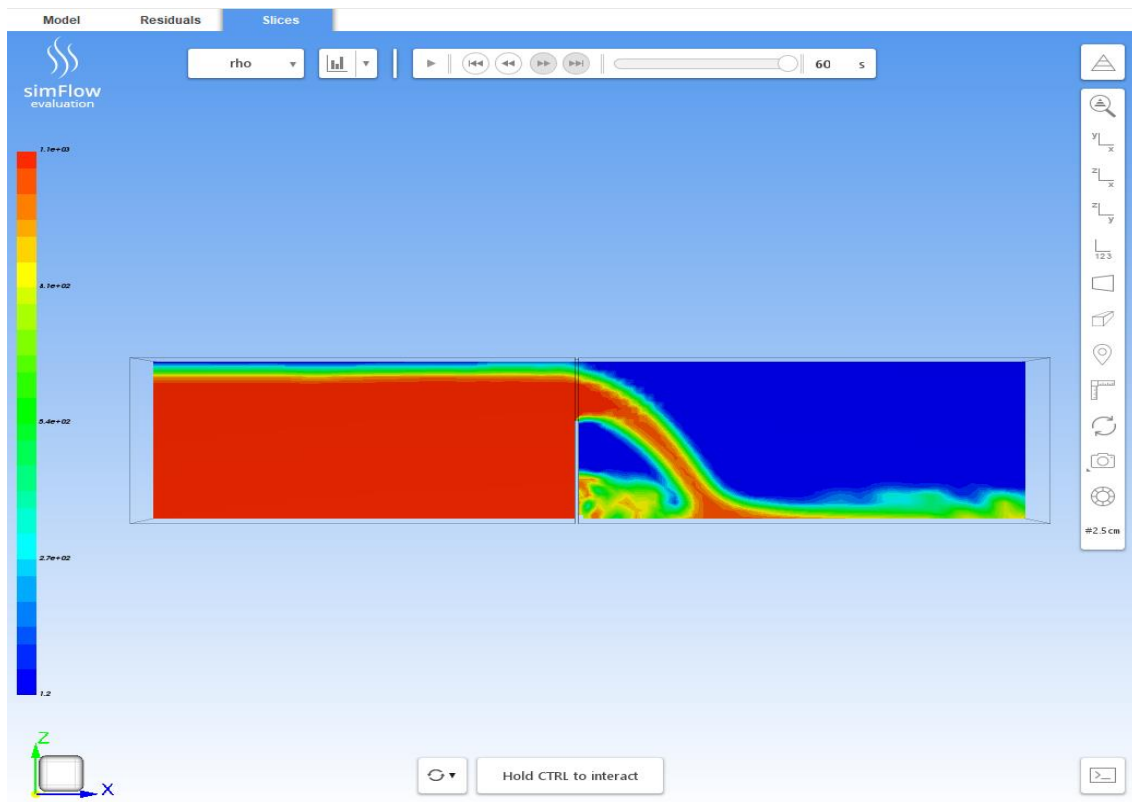
Fotografía 36: Gráfica de residuales para el caso de 20 Hz en Simflow.



Fotografía 37: Plano de la Energía a lo largo del mallado en Simflow.

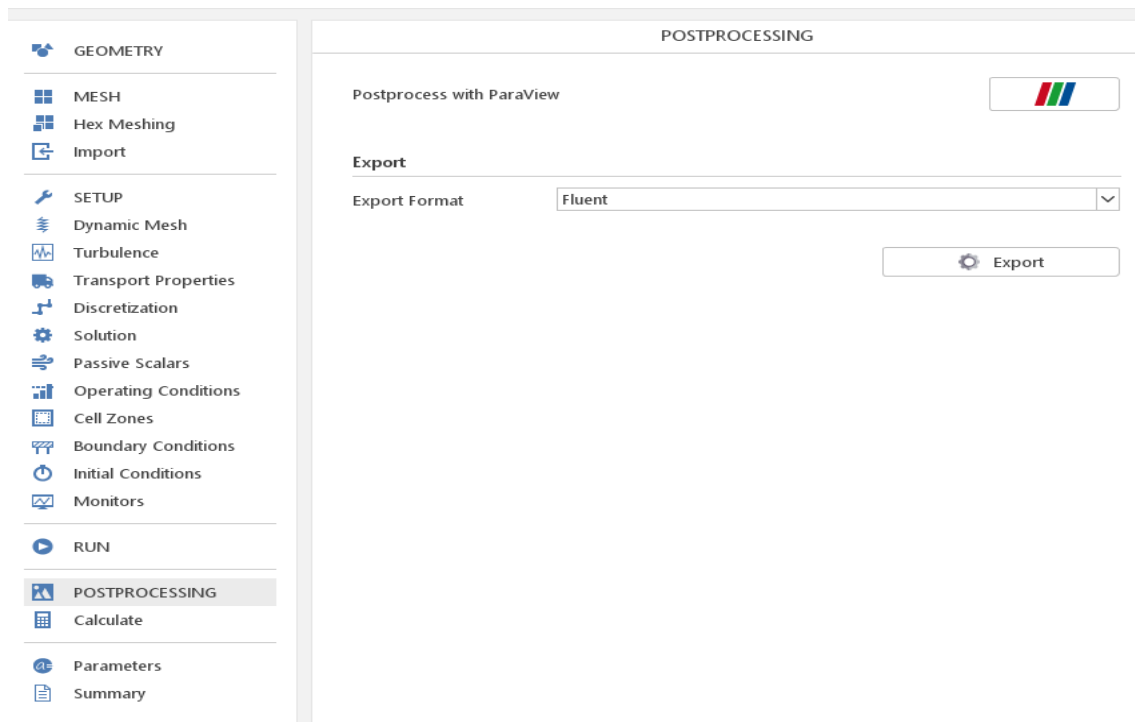


Fotografía 38: Plano Alpha a lo largo del mallado en Simflow.



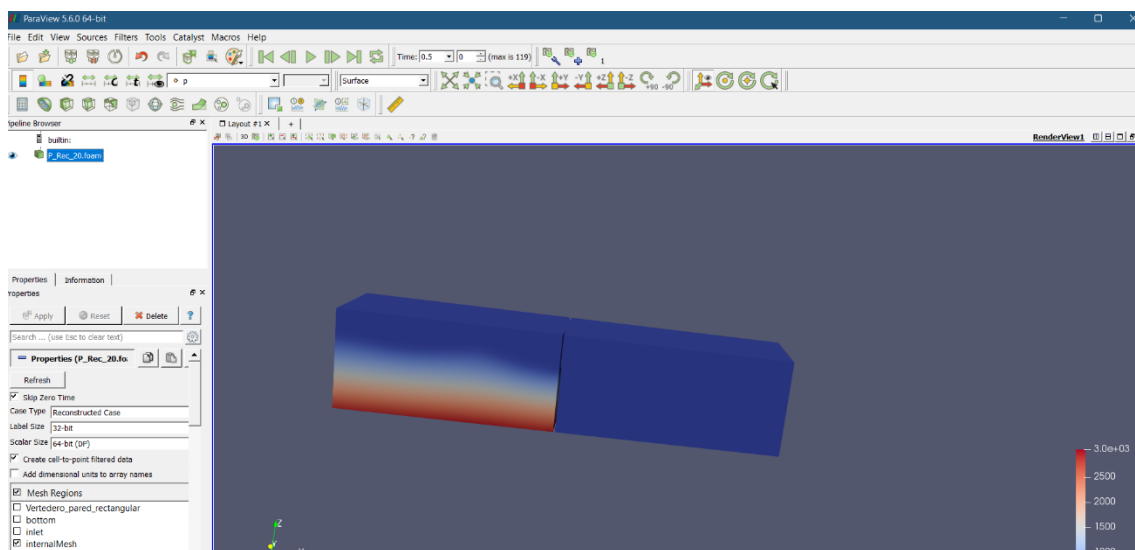
Fotografía 39: Plano de la densidad a lo largo del mallado en Simflow.

- Quinto Paso: Tras haber obtenido la simulación en Simflow, se procederá a su post-procesado para obtener el video de la descarga de agua y los valores exactos de velocidad aguas abajo, para esta labor, pulsaremos en el logo del software Paraview.



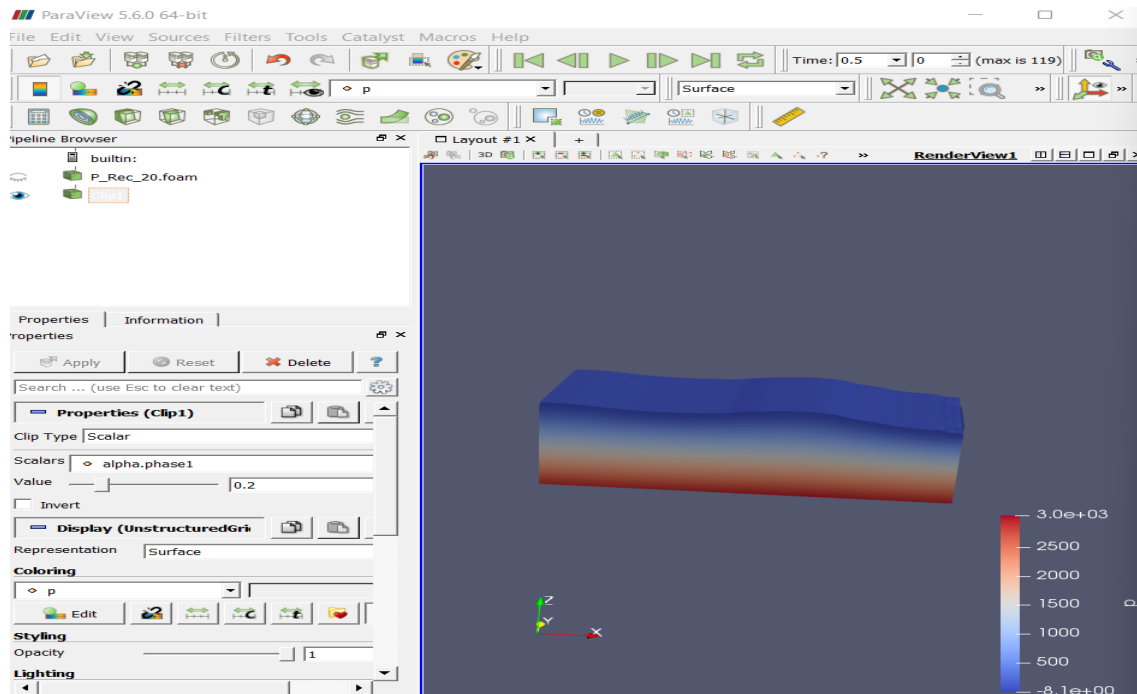
Fotografía 40: Elección de software de Post-Procesado en Simflow.

Dentro de Paraview, vamos a cargar nuestro caso, para ello, pulsaremos en la pestaña "apply" de la izquierda para poder cargar nuestra malla.



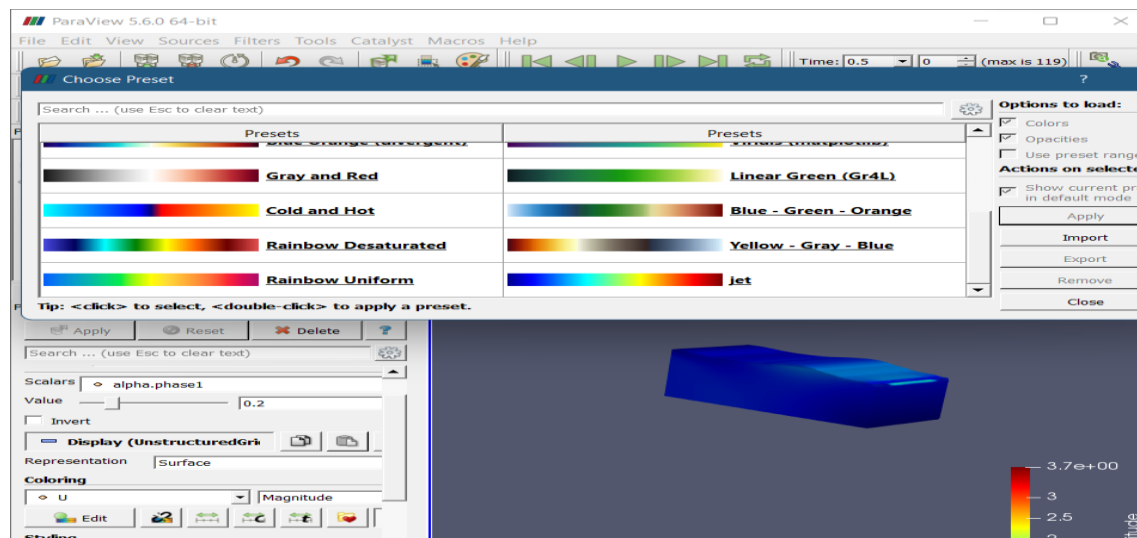
Fotografía 41: Malla cargada para su Post-Procesado en Paraview.

Seguidamente, después de haberla cargado, para crear el video, pulsaremos sobre la pestaña clip y dentro de ella, en ``clip type`` elegiremos ``scalar`` y dentro de ``scalar`` elegiremos ``alpha.phase1`` y de valor 0.2 y quitaremos la inversión antes de darle a ``apply``.



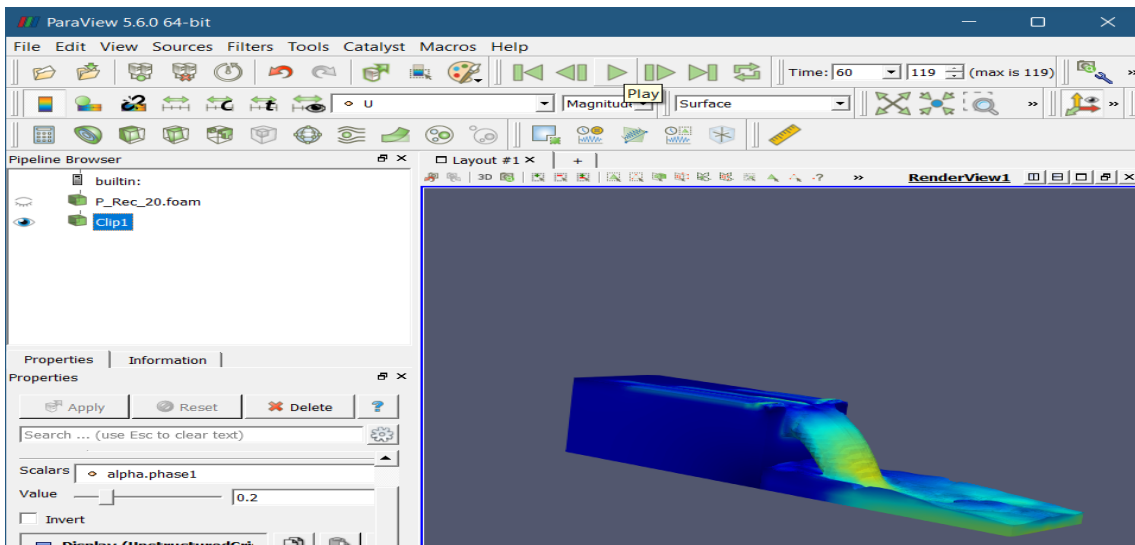
Fotografía 42: Primera fase del clip en Paraview.

Una vez aplicado, en ``coloring`` cogeremos de magnitud U que es la velocidad. Le cambiamos los colores para una representación más visual en el apartado ``choose preset`` donde elegiremos los colores ``jet``.



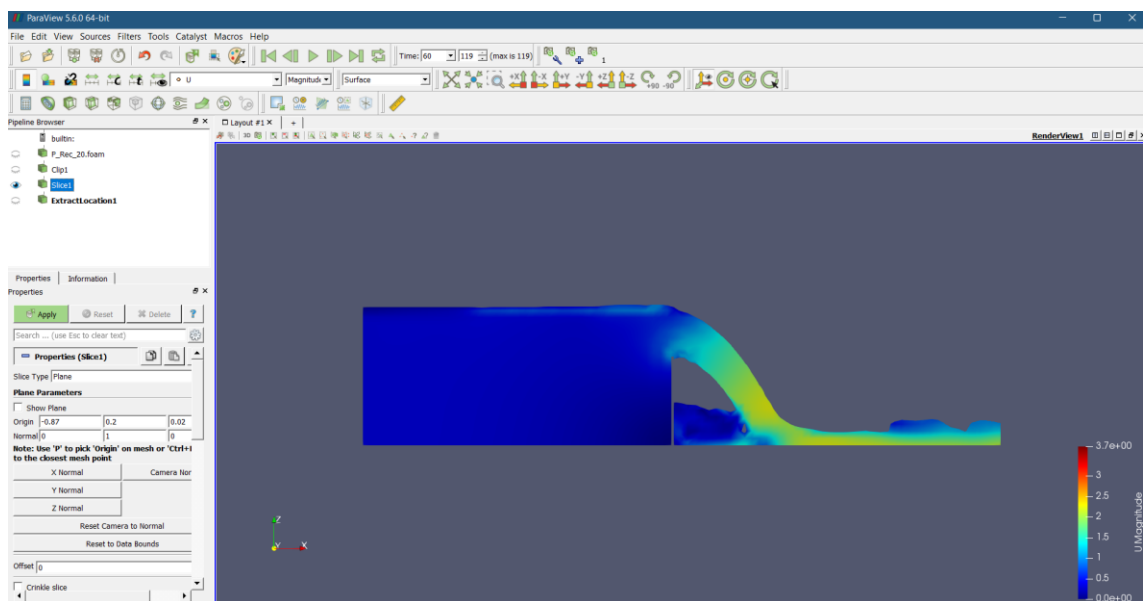
Fotografía 43: Clip terminado en Paraview.

Por último, después terminar el clip, ya podemos darle al “Play” para ver nuestro video. Para guardarlo sería en “file” y después en “save animation”.



Fotografía 44: Clip del video ya terminado en su último momento de tiempo en Paraview.

Para calcular, la velocidad que transcurre por nuestra malla, vamos a crear un plano que atraviese nuestra malla. Para ello, las cotas que elegiremos serán 0 1 0 porque las necesitamos que sea transversal y las cotas origen será desde el principio, partiendo por la mitad, y con una capa entre medias de la lámina de fluido de aguas abajo, -0.87, 0.2, 0.02.

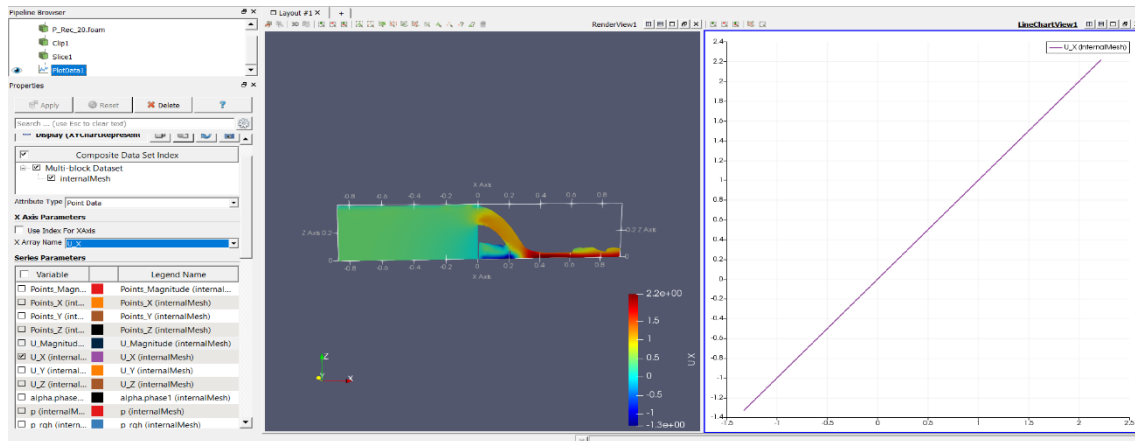


Fotografía 45: Plano longitudinal de velocidad.

Una vez creado el plano, le daremos a "Plot Data" data para crear nuestras gráficas, en mi caso, de velocidad en el eje x, para ello en "coloring" escogeremos la variable "U" que representa la velocidad y pulsaremos en aplicar.

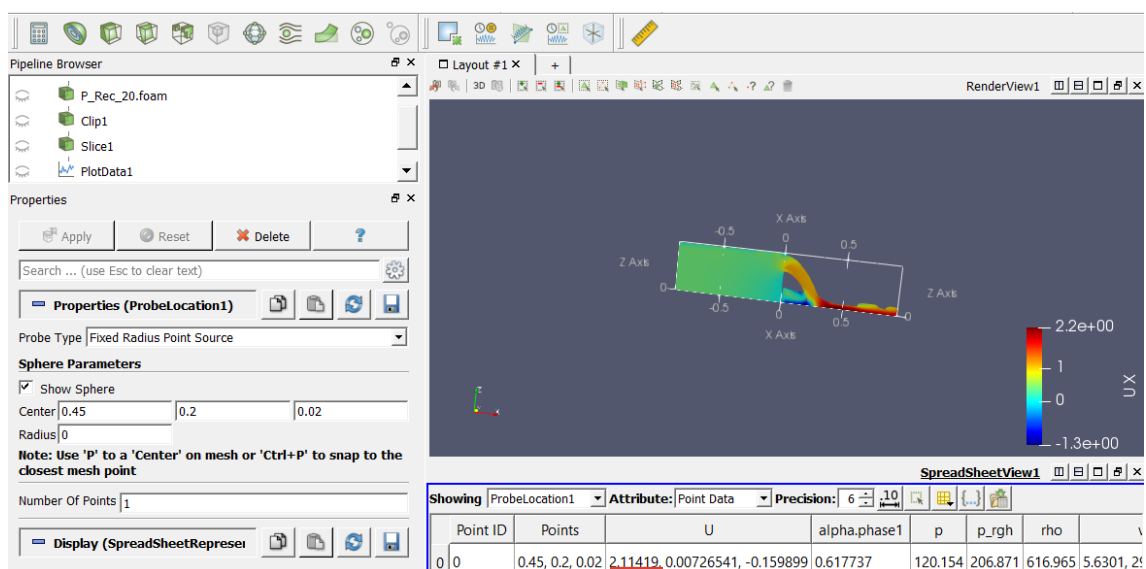
Continuadamente, en "X Axis Parameters", deseccionamos el "use index for XAXIS" para poder fijar el parámetro a graficar que es el de U_X, el cual también seleccionaremos en la pestaña variable.

Todo esto viene mostrado a continuación:



Fotografía 46: Gráfica de velocidad de nuestro caso en Paraview.

Para saber el valor de la velocidad de aguas abajo exacto, donde se encontraría nuestro Pitot de aguas abajo, en la pestaña "filters" dentro de ella en "data analysis" elegiremos "Probe location" y meteremos un punto con las mismas coordenadas que nuestro Pitot aguas abajo.



Fotografía 47: Punto en el plano para mostrar la velocidad puntual en aguas abajo mediante Paraview.

El valor de la velocidad sería el subrayado en rojo y dichas coordenadas serían, 0.45, 0.2, 0.02 que sería el punto donde se empieza a estar estabilizada la lámina de aguas abajo. Todos estos valores y gráficas las expondremos a continuación extrayendo estos datos en una tabla y las gráficas las expondremos junto a estas tablas.

10. Discusión de los resultados obtenidos experimentalmente y mediante simulación.

Una vez explicado el procedimiento de toma de datos, realizamos una tabla para estudiar estos resultados del laboratorio con los de la simulación. En dicha tabla también incluiremos los valores obtenidos en el post procesado en Paraview y recordando la relación citada anteriormente sobre el coeficiente de descarga, $C_d = \frac{Q_{real}}{Q_{teórico}} < 1$.

10.1. Resultados Obtenidos para el Vertedero Rectangular.

Los resultados obtenidos mediante experimentación y simulación para el vertedero rectangular fueron los siguientes:

10.1.1. Medidas obtenidas para el Vertedero Rectangular a una frecuencia de bomba de 20 Hz.

- Medidas Experimentales: Medidas obtenidas mediante el ensayo empírico y calculadas mediante las ecuaciones de Bernoulli mediante Excel.

	Aguas Arriba		Aguas Abajo	
Calado (mm)	296	297	29	25
Calado medio (mm)	296,5		27	
	Pitot 1 Aguas Arriba		Pitot 1 Aguas Arriba medio	
Tubo 1 (mm)	191	193	192	
Tubo 2 (mm)	189	191	190	
Velocidad Aguas Arriba (m/s)	0,19809089	0,19809089	0,198090888	
Caudal Aguas Arriba (m ³ /s)	0,0586349	0,05883299	0,058733948	
Velocidad Aguas Abajo (m/s)	2,0218932	2,35331975	2,175331421	
Caudal Aguas Abajo (m ³ /s)	0,0586349	0,05883299	0,058733948	

Tabla 2: Datos experimentales para el vertedero de pared rectangular a 20 Hz.

- Medidas calculadas mediante software de CFD: Medidas obtenidas mediante el ensayo computacional con los programas anteriormente citados.

Una vez recopilados dichos datos mostrados en las fotografías siguientes del programa, han calculados la variable de caudal y coeficiente de descarga mediante las ecuaciones de Bernoulli a través de Excel como se muestra en la tabla siguiente:

Velocidad Aguas Abajo Paraview (m/s)	2,11419	Calado Final (m)	0,052212402
Caudal Aguas Abajo Paraview (m ³ /s)	0,04415478	Coeficiente Descarga	0,750510427

Tabla 3: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared rectangular a 20 Hz.

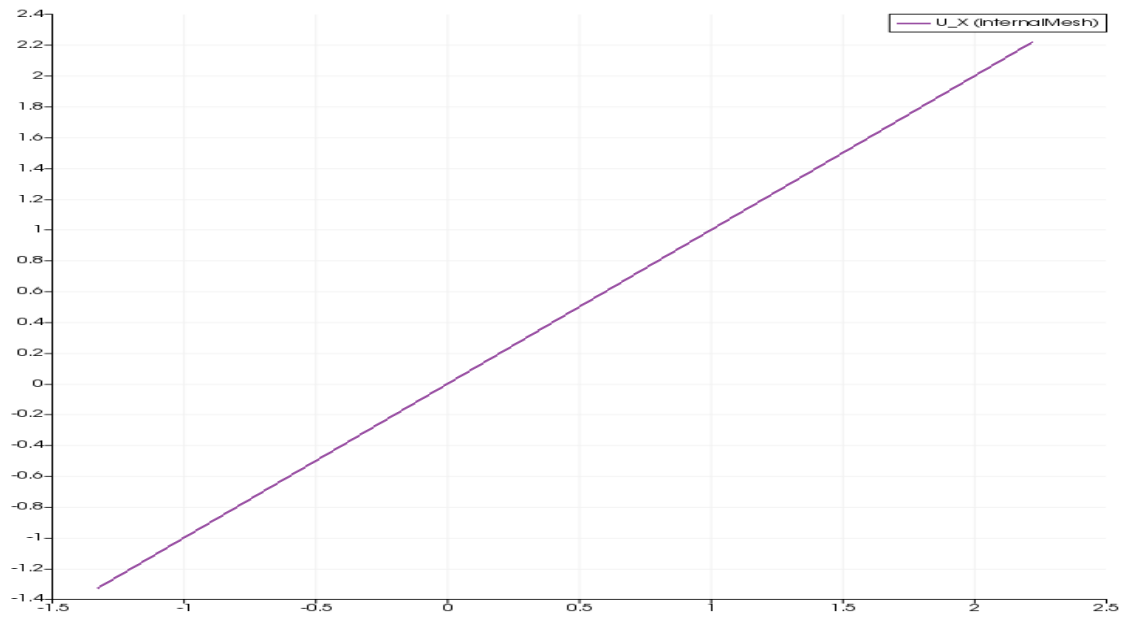
Como podemos observar en las tablas adjuntadas anteriormente, la velocidad aguas abajo calculada de manera experimental a través de la ecuación de Bernoulli de la continuidad, el resultado es similar al calculado por Paraview, ya que, haciendo la relación anteriormente citada respecto al coeficiente de descarga, este nos sale un número por debajo de la unidad.

A continuación, se mostrarán la tabla del cálculo de la velocidad mediante el software Paraview con su respectiva gráfica de velocidad.

Showing		ProbeLocation1	Attribute:	Point Data	Precision:	6	.10				
	Point ID	Points	U			alpha.phase1	p	p_rgh	rho		
0	0	0.45, 0.2, 0.02	2.11419, 0.00726541, -0.159899			0.617737	120.154	206.871	616.965		

Tabla 4: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 20Hz.

La gráfica de velocidad obtenida en Paraview en m/s frente a las coordenadas a lo largo del mallado es la siguiente:



Gráfica 6: Gráfica de Paraview velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 20Hz.

Las imágenes recopiladas durante el ensayo empírico en el laboratorio de la Escuela Superior de Linares, para poder comparar este frente al ensayo computacional son las siguientes:



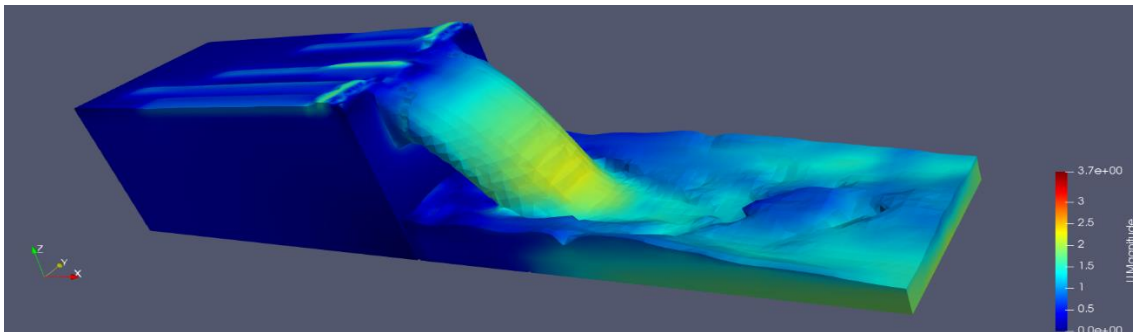
Fotografía 48: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.



Fotografía 49: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.

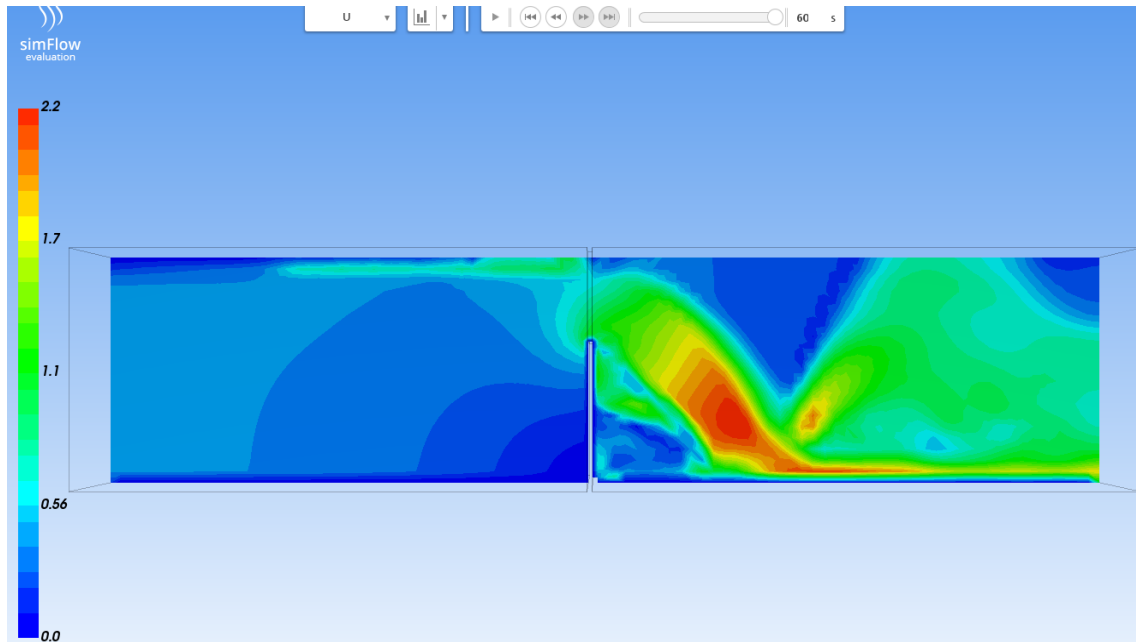
Las imágenes recopiladas durante el ensayo computacional para poder dicha comparación serán las siguientes:

- Estudio mediante Paraview de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



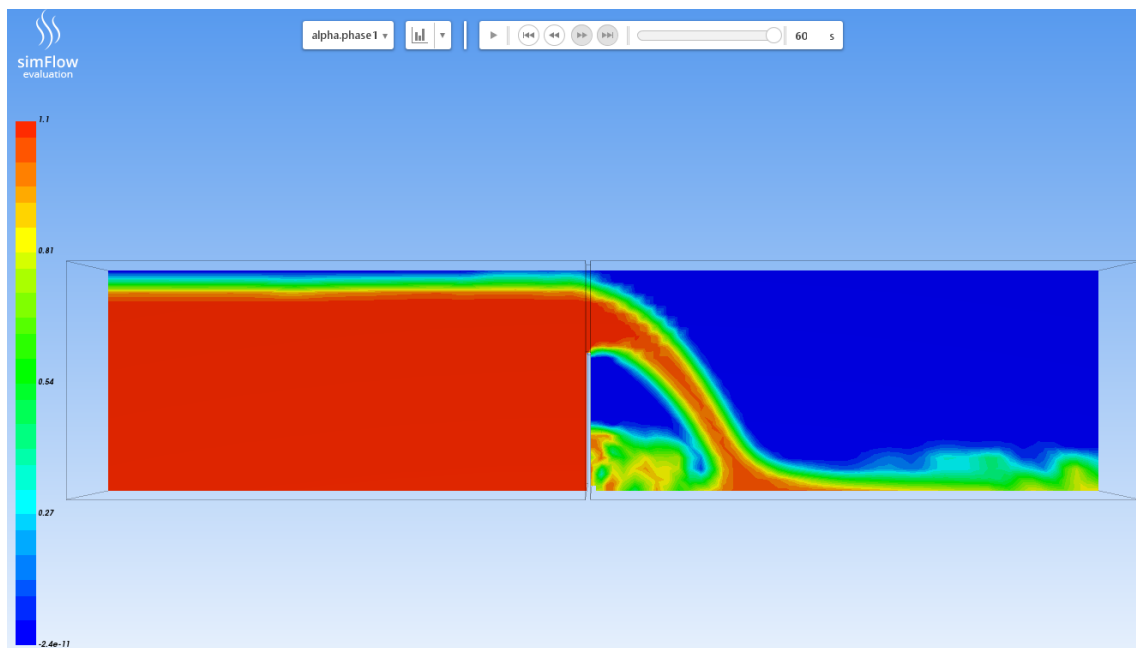
Fotografía 50: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 20 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



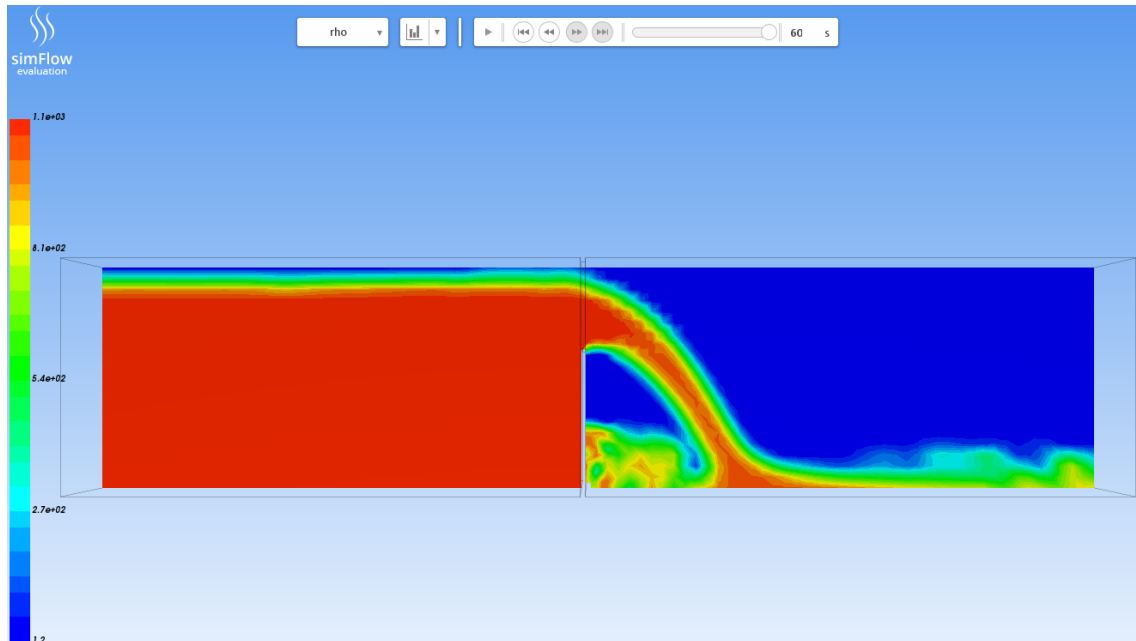
Fotografía 51: Ensayo en Simflow de la velocidad U al caudal pertinente a 20 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la α .phase referente al número de Coriolis del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



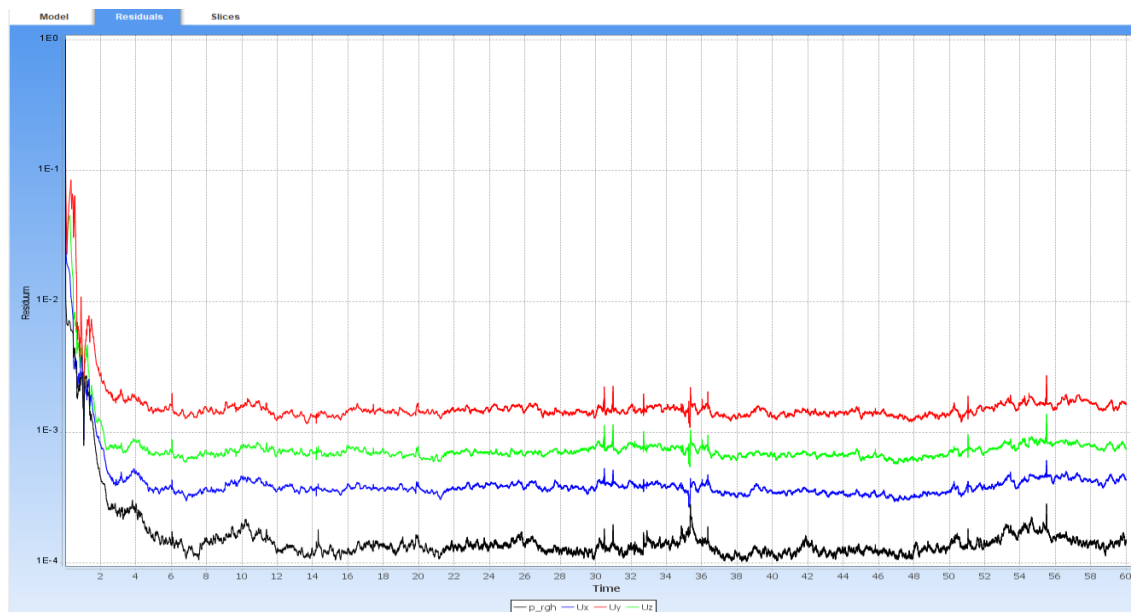
Fotografía 52: Ensayo en Simflow de la fase α al caudal pertinente a 20 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la densidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



Fotografía 53: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 20 Hz.

En la gráfica 7, podremos visualizar el transcurso del error de cálculo de las ecuaciones diferenciales respecto los distintos instantes de tiempo fijados previamente en nuestra simulación de nuestro software Simflow. Dicha resolución, como podemos apreciar por la figura que describe, es correcta ya que va reduciendo su tamaño hasta que llega a estabilizarse.



Gráfica 7: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 20 Hz.

10.1.2. Medidas obtenidas para el Vertedero Rectangular a una frecuencia de bomba de 30 Hz.

- Medidas Experimentales: Medidas obtenidas mediante el ensayo empírico y calculadas mediante las ecuaciones de Bernoulli mediante Excel.

	Aguas Arriba		Aguas Abajo	
Calado (mm)	304	303	32	31
Calado medio (mm)	303,5		31,5	
	Pitot 1 Aguas Arriba		Pitot 1 Aguas Arriba medio	
Tubo 1 (mm)	185	183	184	
Tubo 2 (mm)	182	185	183,5	
Velocidad Aguas Arriba (m/s)	0,2426108	0,19809089	0,099045444	
Caudal Aguas Arriba (m ² /s)	0,07375368	0,06002154	0,030060292	
Velocidad Aguas Abajo (m/s)	2,30480259	1,93617868	0,954294993	
Caudal Aguas Abajo (m ² /s)	0,07375368	0,06002154	0,030060292	

Tabla 5: Datos experimentales para el vertedero de pared rectangular a 30 Hz.

- Medidas calculadas mediante software de CFD: Medidas obtenidas mediante el ensayo computacional con los programas anteriormente citados.

Una vez recopilados dichos datos mostrados en las fotografías siguientes del programa, han calculados la variable de caudal y coeficiente de descarga mediante las ecuaciones de Bernoulli a través de Excel como se muestra en la tabla siguiente:

Velocidad Aguas Abajo Paraview (m/s)	1,93226	Calado Final (m)	0,0493576
Caudal Aguas Abajo Paraview (m ² /s)	0,03814869	Coeficiente Descarga	0,635583276

Tabla 6: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared rectangular a 30 Hz.

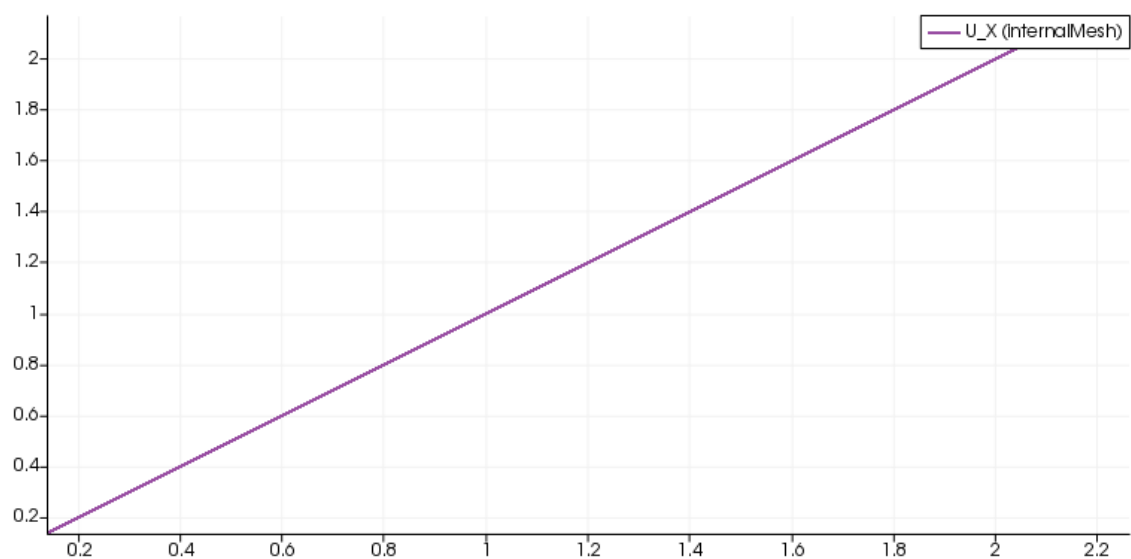
Como podemos observar en las tablas adjuntadas anteriormente, la velocidad aguas abajo calculada de manera experimental a través de la ecuación de Bernoulli de la continuidad, el resultado es similar al calculado por Paraview, ya que, haciendo la relación anteriormente citada respecto al coeficiente de descarga, este nos sale un número por debajo de la unidad.

A continuación, se mostrarán la tabla del cálculo de la velocidad mediante el software Paraview con su respectiva gráfica de velocidad.

Showing		ProbeLocation1	Attribute: Point Data	Precision: 6	10			
Point ID	Points	U	alpha.phase1	p	p_rgh	rho		
0 0	0.45, 0.2, 0.02	1.93226, -0.0114005, -0.128472	0.520192	126.202	190.843	519.732		

Tabla 7: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 30Hz.

La gráfica de velocidad obtenida en Paraview en m/s frente a las coordenadas a lo largo del mallado es la siguiente:



Gráfica 8: Gráfica de Paraview velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 20Hz.

Las imágenes recopiladas durante el ensayo empírico en el laboratorio de la Escuela Superior de Linares, para poder comparar este frente al ensayo computacional son las siguientes:



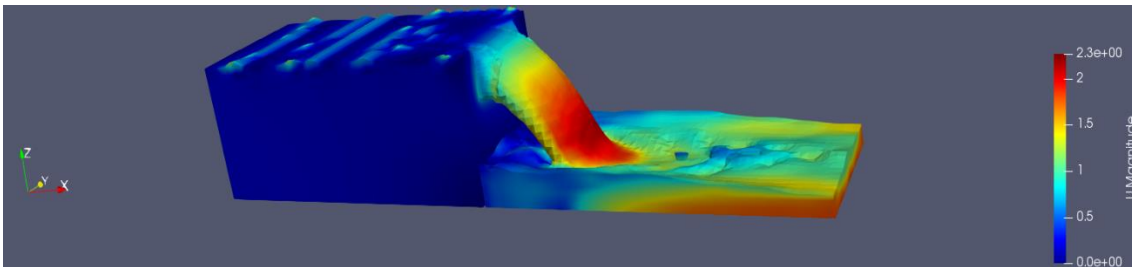
Fotografía 54: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L



Fotografía 55: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L.

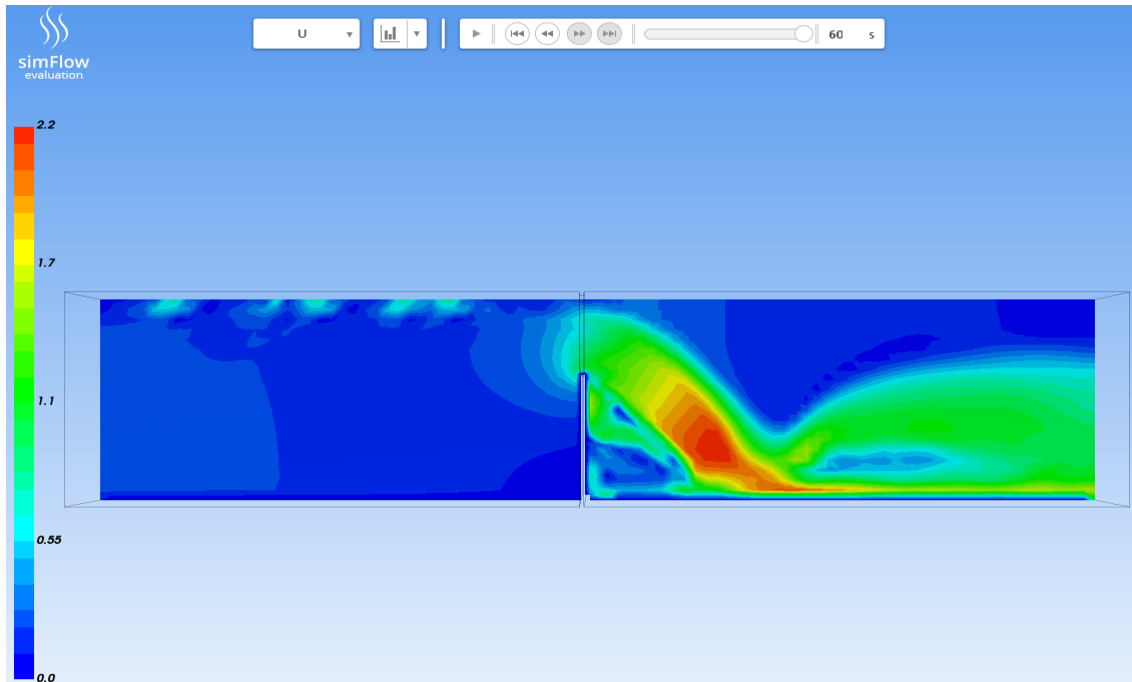
Las imágenes recopiladas durante el ensayo computacional para poder dicha comparación serán las siguientes:

- Estudio mediante Paraview de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



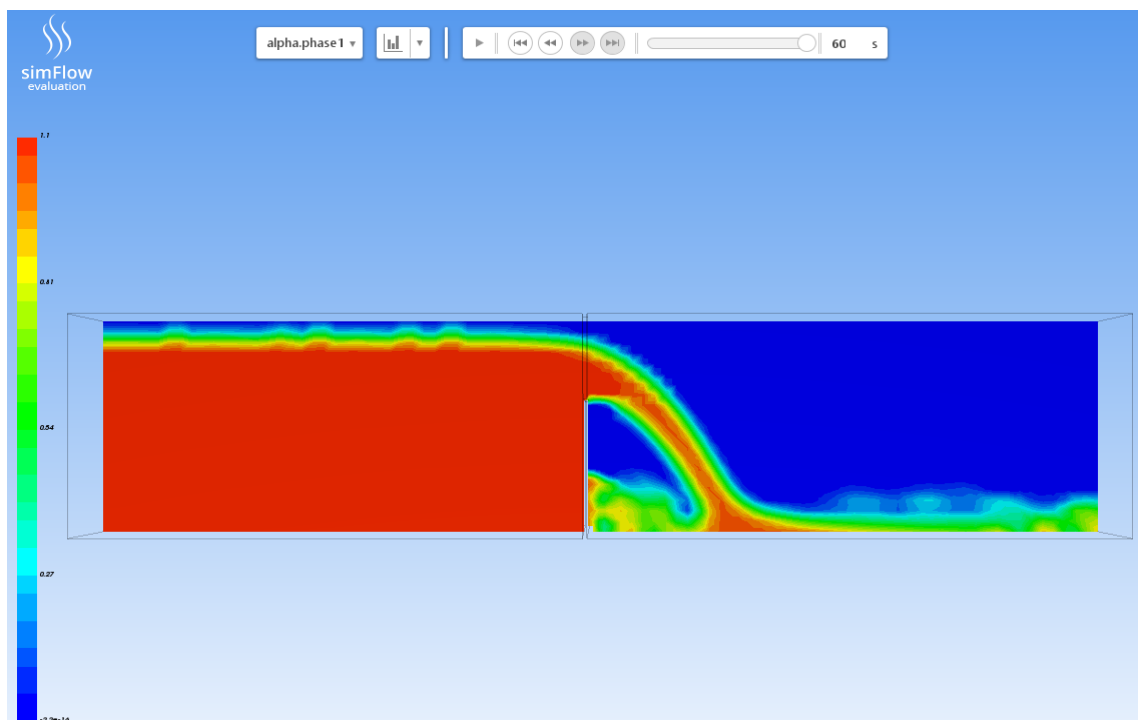
Fotografía 56: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 30 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



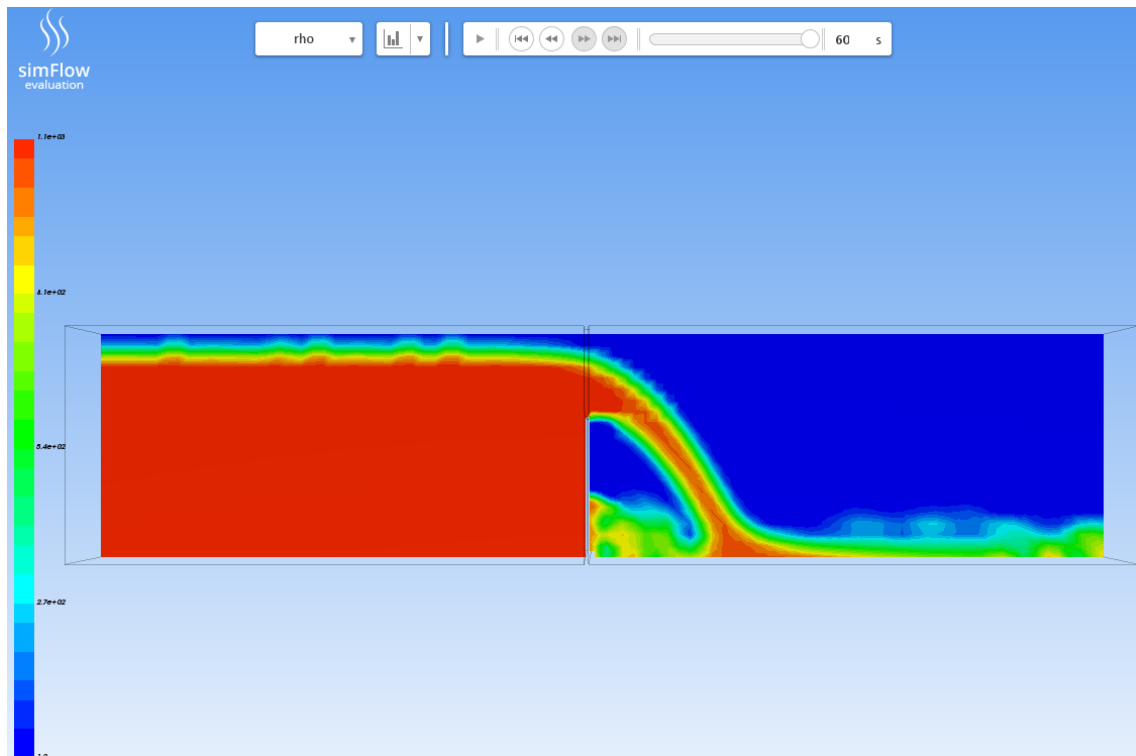
Fotografía 57: Ensayo en Simflow de la velocidad U al caudal pertinente a 20 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la α .phase referente al número de Coriolis del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



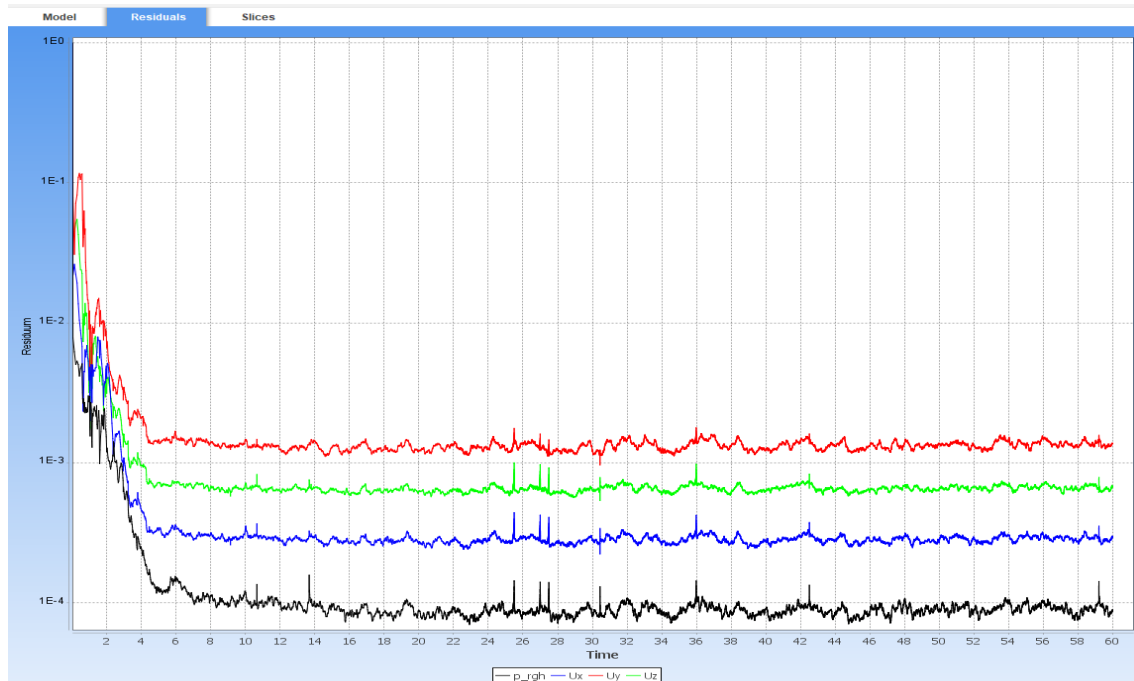
Fotografía 58: Ensayo en Simflow de la fase α al caudal pertinente a 30 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la densidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



Fotografía 59: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 30 Hz.

En la gráfica 9, podremos visualizar el transcurso de los residuales de cálculo por la iteración de cálculo de las aproximaciones de las ecuaciones diferenciales respecto los distintos instantes de tiempo fijados previamente en nuestra simulación de nuestro software Simflow. Dicha resolución, como podemos apreciar por la figura que describe, es correcta, ya que el error es enorme en los primeros instantes y este, debido transcurso de las interacciones, poco a poco se va reduciendo hasta llegar a estabilizarse.



Gráfica 9: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 30 Hz.

10.2. Resultados Obtenidos para el Vertedero Triangular.

Los resultados obtenidos mediante experimentación y simulación para el vertedero Triangular fueron los siguientes:

10.2.1. Medidas obtenidas para el Vertedero Triangular a una frecuencia de bomba de 20 Hz.

- Medidas Experimentales: Medidas obtenidas mediante el ensayo empírico y calculadas mediante las ecuaciones de Bernoulli mediante Excel.

	Aguas Arriba		Aguas Abajo	
Calado (mm)	294	294	35	36
Calado medio (mm)	294		35,5	
	Pitot 1 Aguas Arriba		Pitot 1 Aguas Arriba medio	
Tubo 1 (mm)	194	193	193,5	
Tubo 2 (mm)	192	191	191,5	
Velocidad Aguas Arriba (m/s)	0,198091	0,198091	0,198090888	
Caudal Aguas Arriba (m ² /s)	0,058239	0,058239	0,058238721	
Velocidad Aguas Abajo (m/s)	1,663963	1,617742	1,640527356	
Caudal Aguas Abajo (m ² /s)	0,058239	0,058239	0,058238721	

Tabla 8: Datos experimentales para el vertedero de pared triangular a 20 Hz.

- Medidas calculadas mediante software de CFD: Medidas obtenidas mediante el ensayo computacional con los programas anteriormente citados.

Una vez recopilados dichos datos mostrados en las fotografías siguientes del programa, han calculados la variable de caudal y coeficiente de descarga mediante las ecuaciones de Bernoulli a través de Excel como se muestra en la tabla siguiente:

Velocidad Aguas Abajo Paraview (m/s)	1,72156	Calado Final (m)	0,06529
Caudal Aguas Abajo Paraview (m ² /s)	0,04496	Coeficiente Descarga	0,771999455

Tabla 9: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared triangular a 20 Hz.

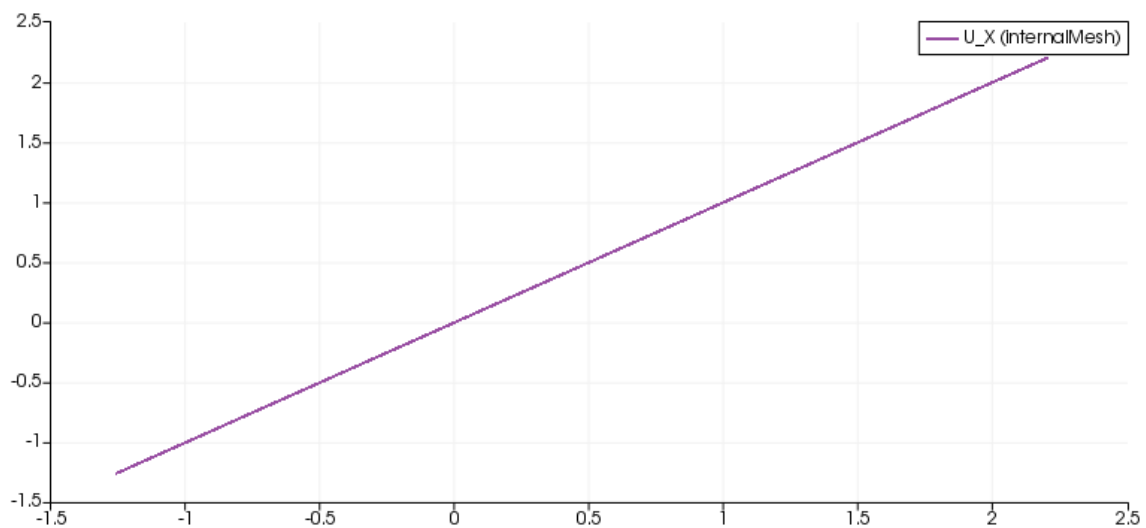
Como podemos observar en las tablas adjuntadas anteriormente, la velocidad aguas abajo calculada de manera experimental a través de la ecuación de Bernoulli de la continuidad, el resultado es similar al calculado por Paraview, ya que, haciendo la relación anteriormente citada respecto al coeficiente de descarga, este nos sale un número por debajo de la unidad.

A continuación, se mostrarán la tabla del cálculo de la velocidad mediante el software Paraview con su respectiva gráfica de velocidad.

Showing ProbeLocation1		Attribute: Point Data	Precision: 6	10				
Point ID	Points	U	alpha.phase1	p	p_rgh	rho		
0 0	0.7, 0.2, 0.02	1.72156, 0.00634406, -0.0812924	0.424007	182.486	232.82	423.856		

Tabla 10: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 20Hz.

La gráfica de velocidad obtenida en Paraview en m/s frente a las coordenadas a lo largo del mallado es la siguiente:



Gráfica 10: Gráfica de Paraview de velocidad (m/s) frente a coordenadas a lo largo de la malla del canal a 20Hz

Las imágenes recopiladas durante el ensayo empírico en el laboratorio de la Escuela Superior de Linares, para poder comparar este frente al ensayo computacional son las siguientes:



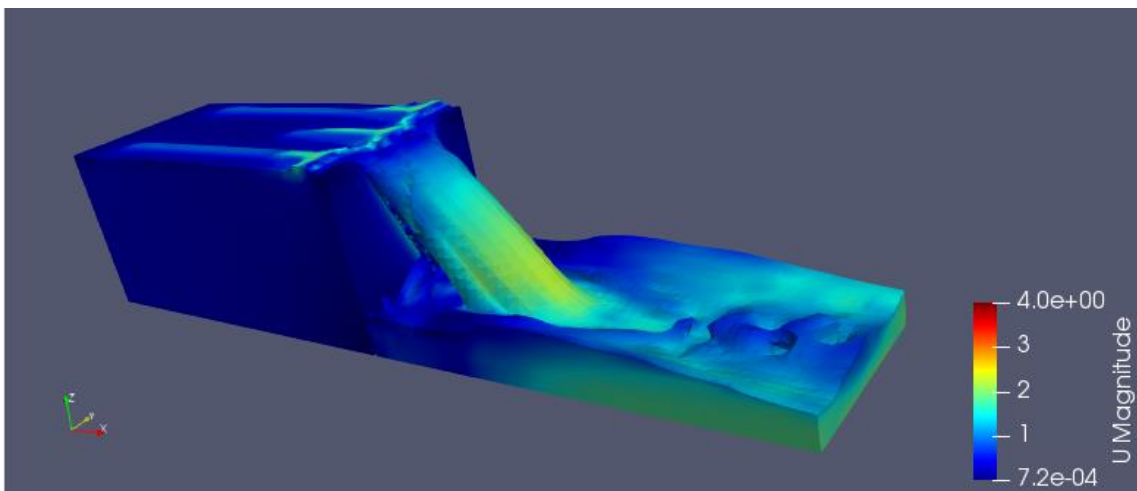
Fotografía 60: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.



Fotografía 61: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.

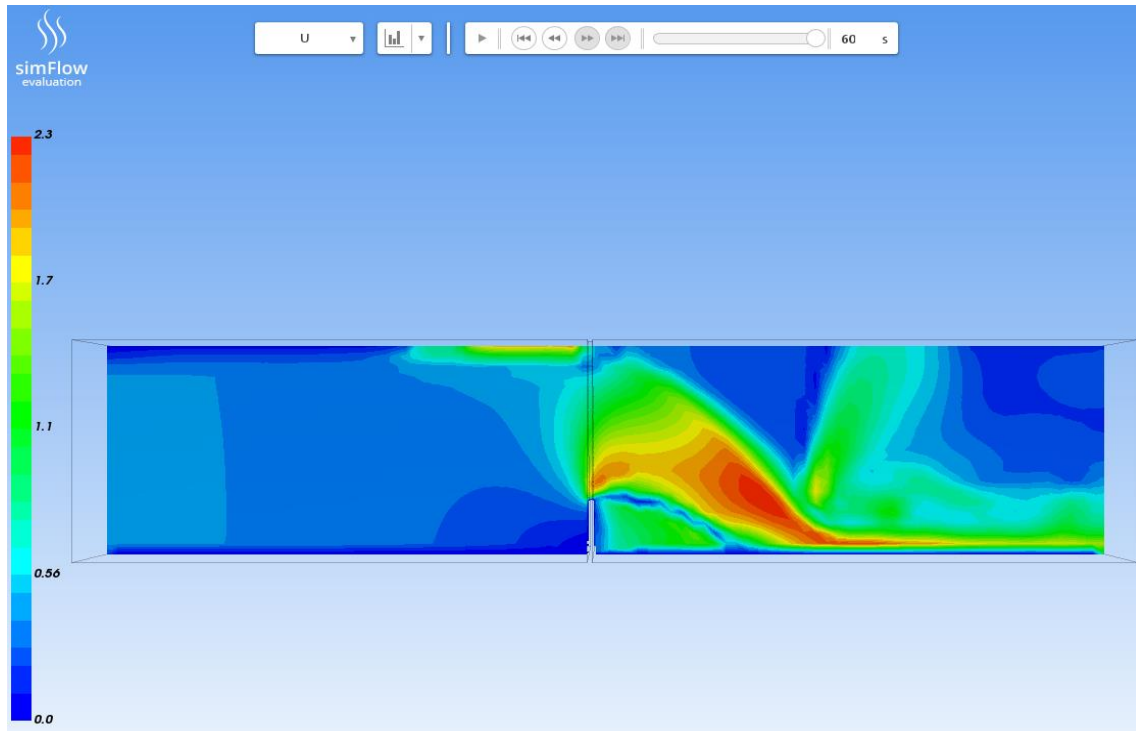
Las imágenes recopiladas durante el ensayo computacional para poder dicha comparación serán las siguientes:

- Estudio mediante Paraview de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



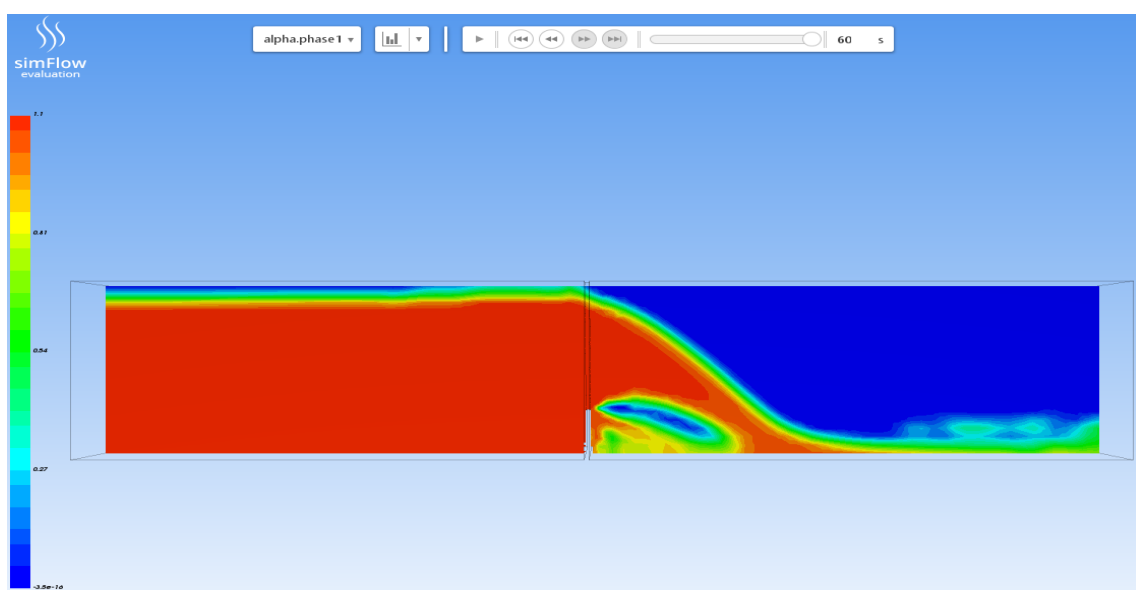
Fotografía 62: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 20 Hz

- Estudio mediante Simflow de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



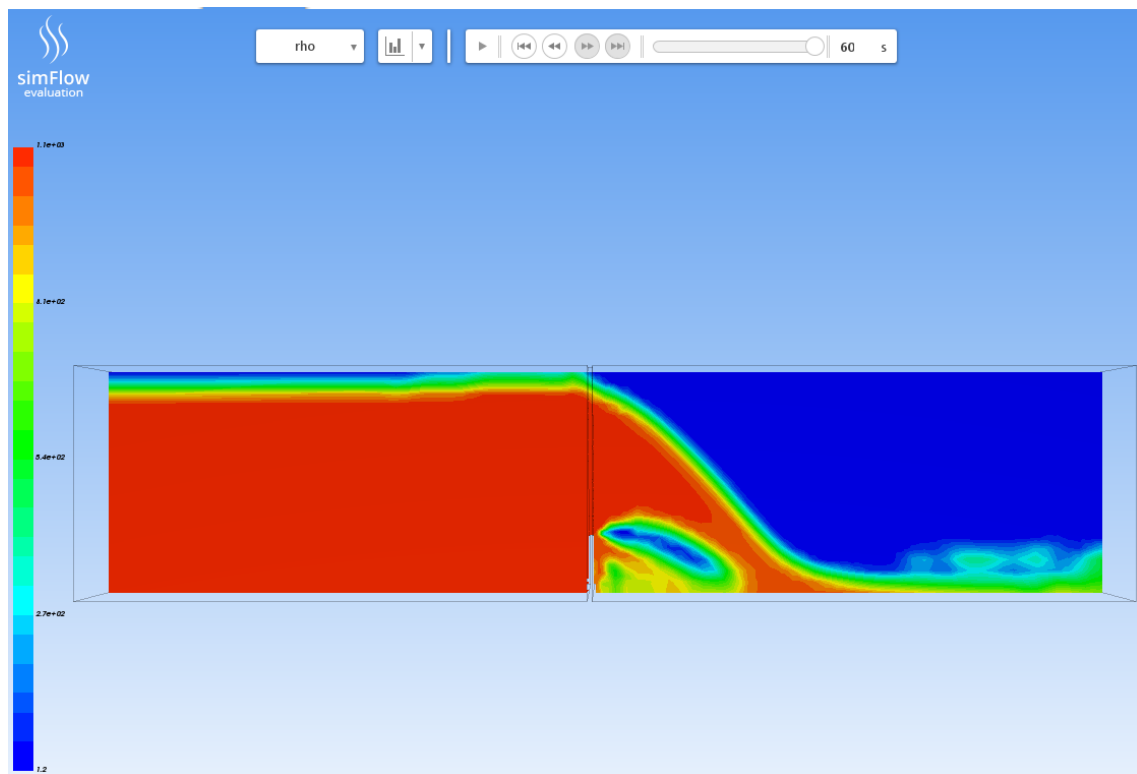
Fotografía 63: Ensayo en Simflow de la energía U al caudal pertinente a 20 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la alpha.phase referente al número de Coriolis del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



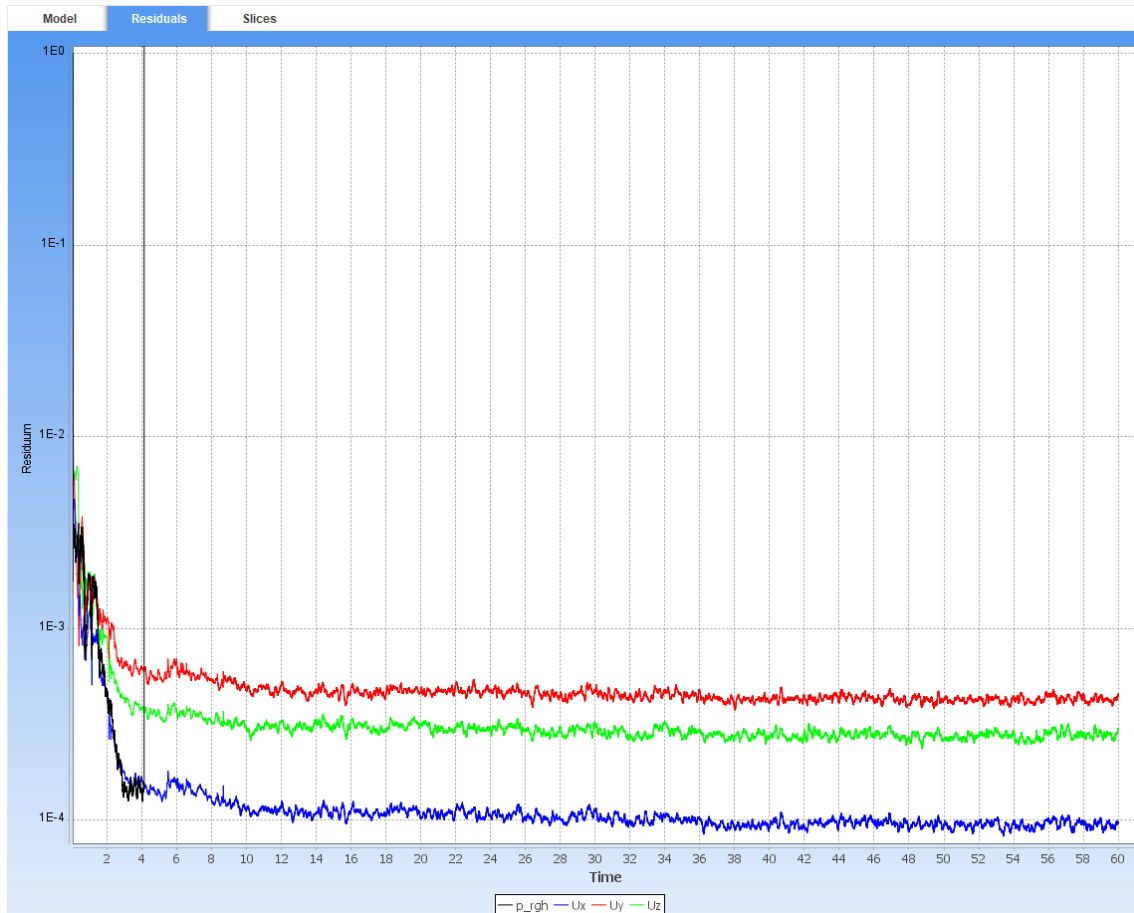
Fotografía 64: Ensayo en Simflow de la fase Alpha al caudal pertinente a 20 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la densidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



Fotografía 65: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 20 Hz.

En la gráfica 11, podremos visualizar el transcurso del error producido por la iteración de cálculo de las aproximaciones de las ecuaciones diferenciales respecto los distintos instantes de tiempo fijados previamente en nuestra simulación de nuestro software Simflow. Dicha resolución, como podemos apreciar por la figura que describe, es correcta, ya que el error es enorme en los primeros instantes y este, debido transcurso de las interacciones, poco a poco se va reduciendo hasta llegar a estabilizarse.



Gráfica 11: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 20 Hz.

10.2.2. Medidas obtenidas para el Vertedero Triangular a una frecuencia de bomba de 30 Hz.

- Medidas Experimentales: Medidas obtenidas mediante el ensayo empírico y calculadas mediante las ecuaciones de Bernoulli mediante Excel.

	Aguas Arriba		Aguas Abajo	
Calado (mm)	307	305	40	42
Calado medio (mm)	306		41	
	Pitot 1 Aguas Arriba		Pitot 1 Aguas Arriba medio	
Tubo 1 (mm)	183	183	183	
Tubo 2 (mm)	181	181	181	
Velocidad Aguas Arriba (m/s)	0,198091	0,198091	0,198090888	
Caudal Aguas Arriba (m ² /s)	0,060814	0,060418	0,060615812	
Velocidad Aguas Abajo (m/s)	1,520348	1,438517	1,478434434	
Caudal Aguas Abajo (m ² /s)	0,060814	0,060418	0,060615812	

Tabla 11: Datos experimentales para el vertedero de pared triangular a 30 Hz.

- Medidas calculadas mediante software de CFD: Medidas obtenidas mediante el ensayo computacional con los programas anteriormente citados.

Una vez recopilados dichos datos mostrados en las fotografías siguientes del programa, han calculados la variable de caudal y coeficiente de descarga mediante las ecuaciones de Bernoulli a través de Excel como se muestra en la tabla siguiente:

Velocidad Aguas Abajo Paraview (m/s)	1,93226	Calado Final (m)	0,0493576
Caudal Aguas Abajo Paraview (m ² /s)	0,038149	Coeficiente Descarga	0,631415517

Tabla 12: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared triangular a 30 Hz.

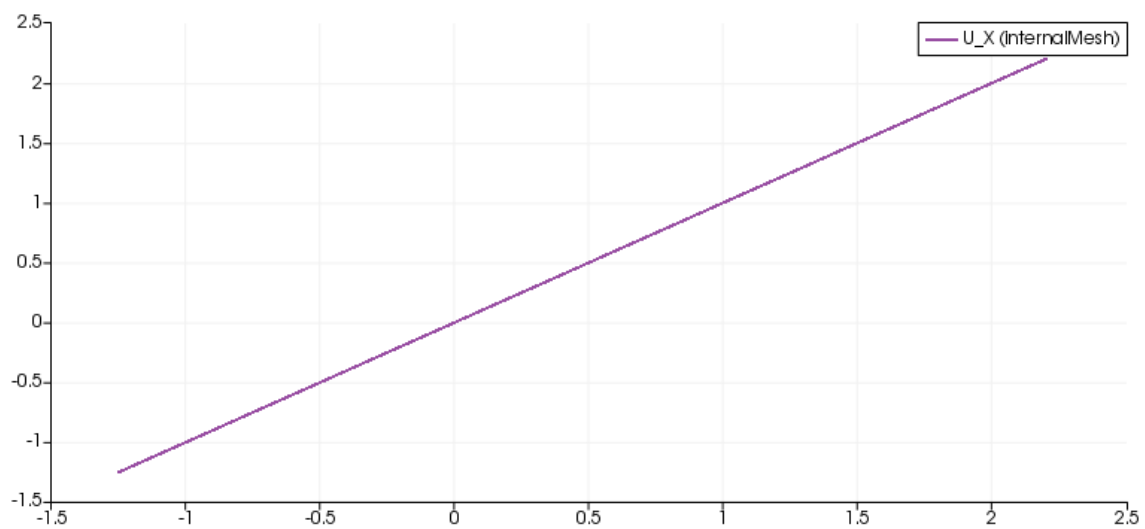
Como podemos observar en las tablas adjuntadas anteriormente, la velocidad aguas abajo calculada de manera experimental a través de la ecuación de Bernoulli de la continuidad, el resultado es similar al calculado por Paraview, ya que, haciendo la relación anteriormente citada respecto al coeficiente de descarga, este nos sale un número por debajo de la unidad.

A continuación, se mostrarán la tabla del cálculo de la velocidad mediante el software Paraview con su respectiva gráfica de velocidad.

Showing ProbeLocation1		Attribute: Point Data	Precision: 6	.10			
Point ID	Points	U	alpha.phase1	p	p_rgh	rho	
0 0	0.7, 0.2, 0.02	1.93226, -0.0114005, -0.128472	0.520192	126.202	190.843	519.732	

Tabla 13: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 30Hz.

La gráfica de velocidad obtenida en Paraview en m/s frente a las coordenadas a lo largo del mallado es la siguiente:



Gráfica 12: Gráfica de Paraview de velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 30Hz.

Las imágenes recopiladas durante el ensayo empírico en el laboratorio de la Escuela Superior de Linares, para poder comparar este frente al ensayo computacional son las siguientes:



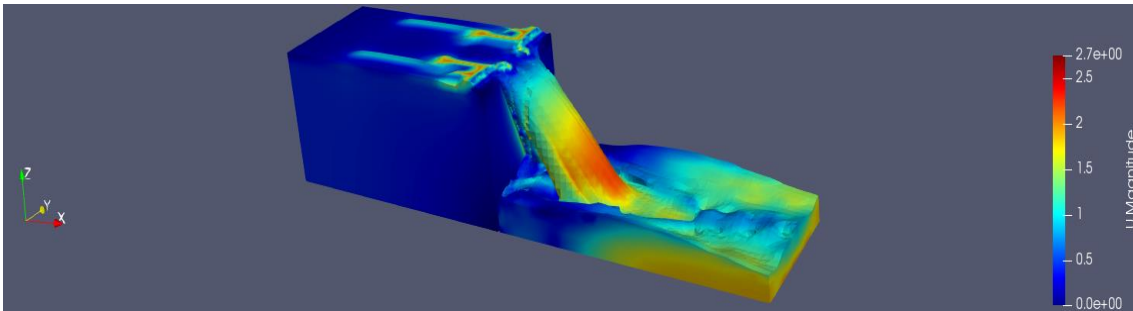
Fotografía 66: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L.



Fotografía 67: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L.

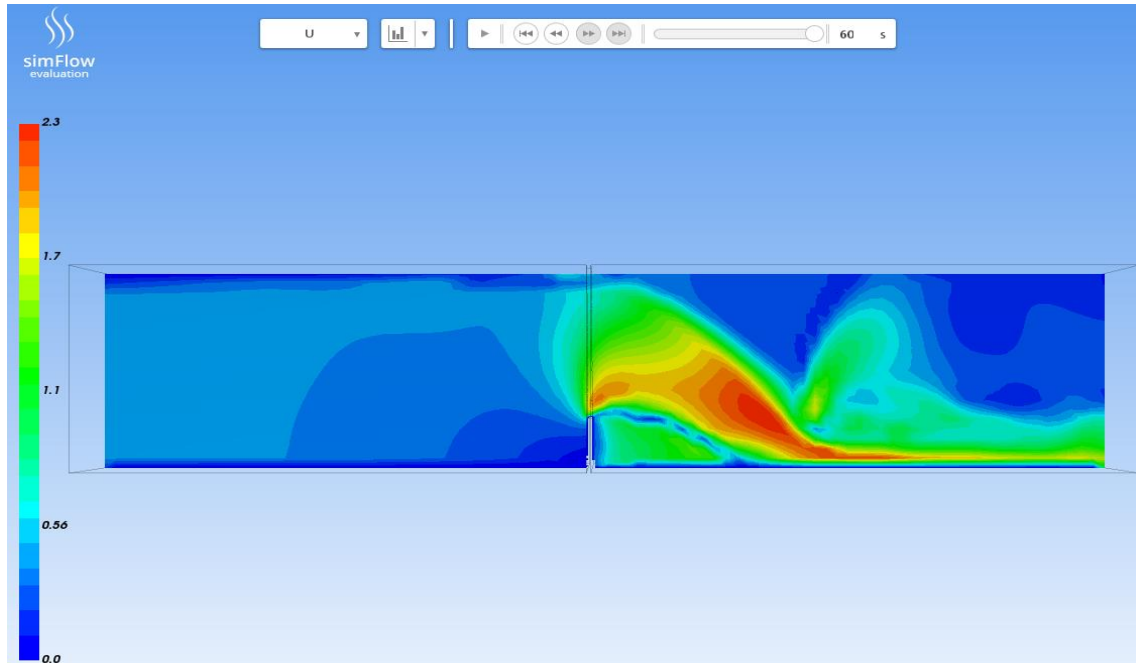
Las imágenes recopiladas durante el ensayo computacional para poder dicha comparación serán las siguientes:

- Estudio mediante Paraview de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



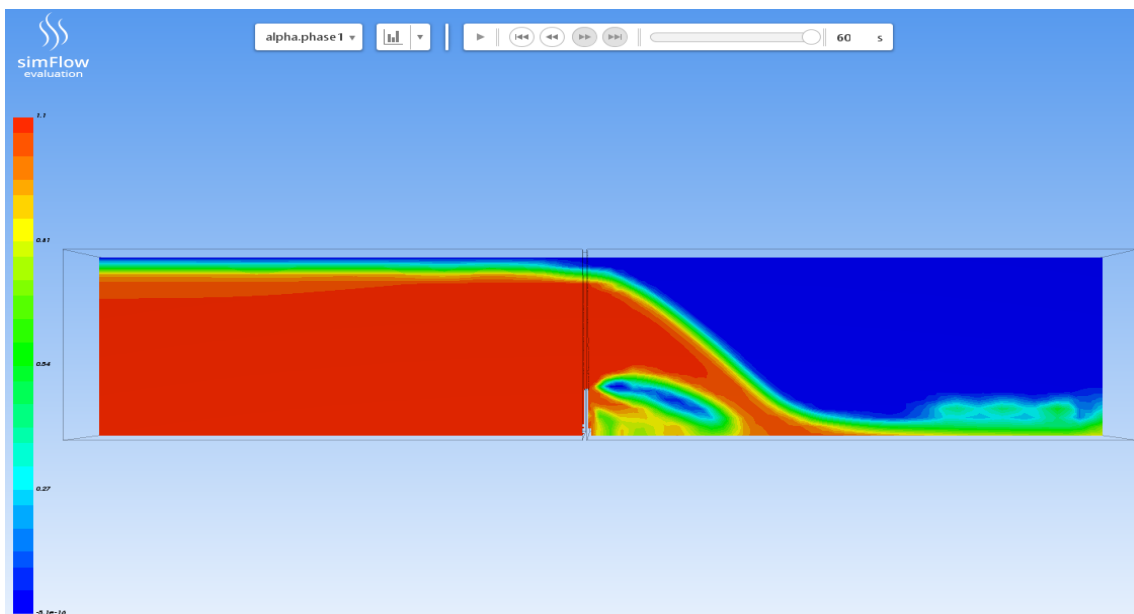
Fotografía 68: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 30 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



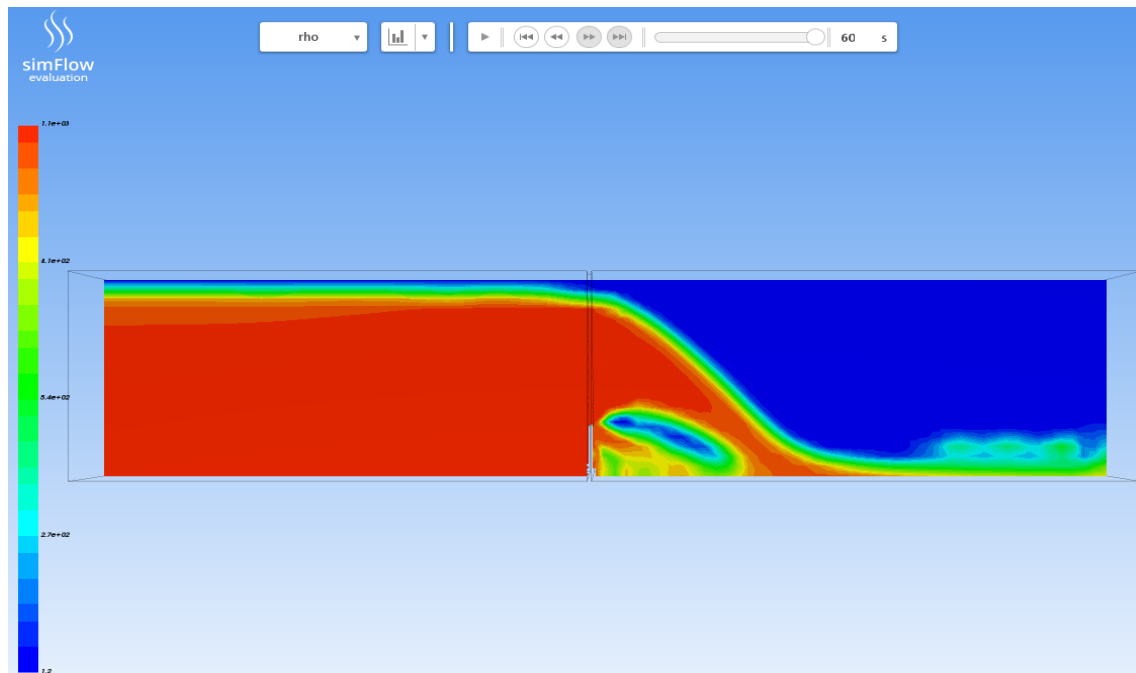
Fotografía 69: Ensayo en Simflow de la velocidad U al caudal pertinente a 30 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la α .phase referente al número de Coriolis del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



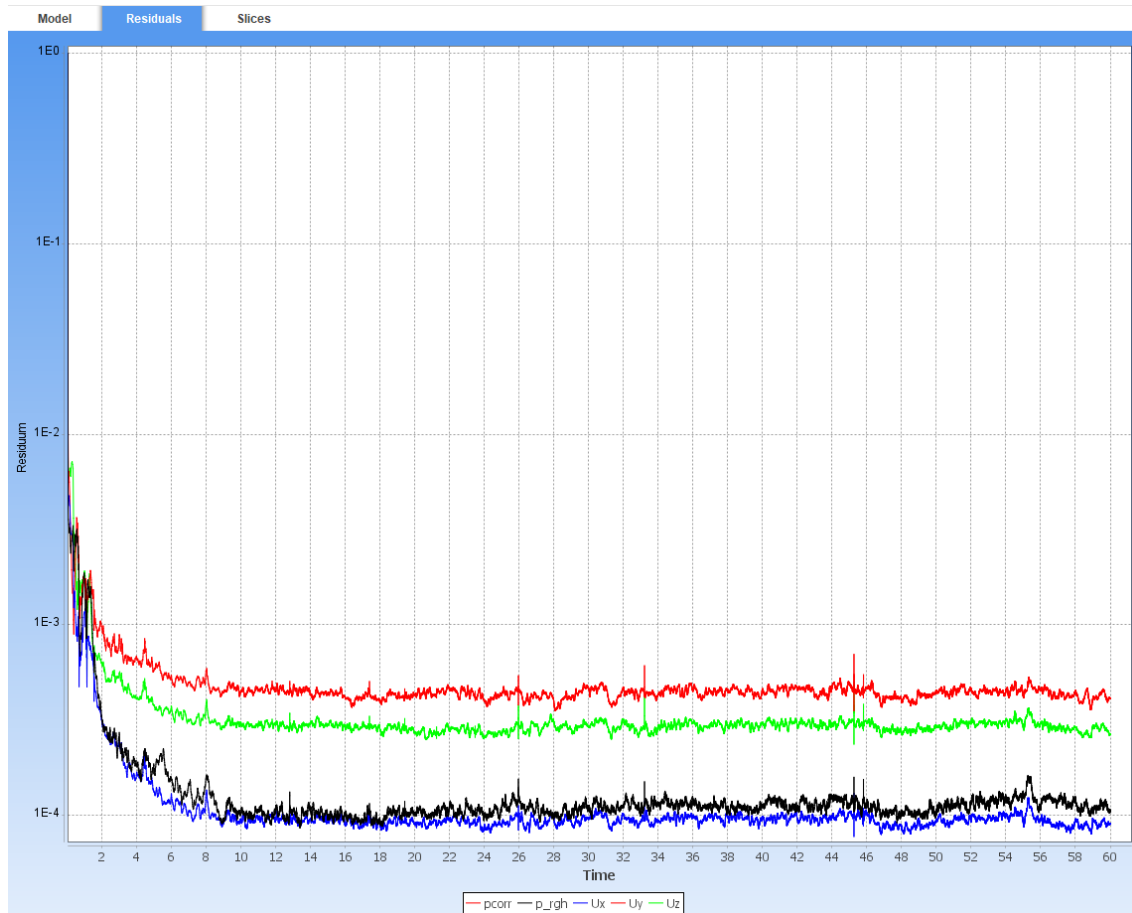
Fotografía 70: Ensayo en Simflow de la fase α al caudal pertinente a 30 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la densidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



Fotografía 71: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 30 Hz.

En la gráfica 13, podremos visualizar el transcurso del error producido por la iteración de cálculo de las aproximaciones de las ecuaciones diferenciales respecto los distintos instantes de tiempo fijados previamente en nuestra simulación de nuestro software Simflow. Dicha resolución, como podemos apreciar por la figura que describe, es correcta, ya que el error es enorme en los primeros instantes y este, debido transcurso de las interacciones, poco a poco se va reduciendo hasta llegar a estabilizarse.



Gráfica 13: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 30 Hz.

10.3. Resultados Obtenidos para el Vertedero de Pared Gruesa.

Los resultados obtenidos mediante experimentación y simulación para el vertedero de Pared Gruesa fueron los siguientes:

10.3.1. Medidas obtenidas para el Vertedero de Pared Gruesa a una frecuencia de bomba de 20 Hz.

- Medidas Experimentales: Medidas obtenidas mediante el ensayo empírico y calculadas mediante las ecuaciones de Bernoulli mediante Excel.

	Aguas Arriba			Aguas Abajo		
Calado (mm)	255	255		40	43	
Calado medio (mm)	255			41,5		
	Pitot 1 Aguas Arriba		Pitot 1 Aguas Arriba medio	Pitot 2 Aguas Abajo		Pitot 2 Aguas Abajo medio
Tubo 1 (mm)	232	233	232,5	803	799	801
Tubo 2 (mm)	226	227	226,5	618	618	618
Velocidad Aguas Arriba (m/s)	0,34310348	0,34310348	0,343103483			
Caudal Aguas Arriba (m ³ /s)	0,08749139	0,08749139	0,087491388			
Velocidad Aguas Abajo (m/s)	1,90517716	1,88446809	1,894850918			
Caudal Aguas Abajo (m ³ /s)	0,07620709	0,08103213	0,078636313			

Tabla 14: Datos experimentales para el vertedero de pared gruesa 20 Hz.

- Medidas calculadas mediante software de CFD: Medidas obtenidas mediante el ensayo computacional con los programas anteriormente citados.

Una vez recopilados dichos datos mostrados en las fotografías siguientes del programa, han calculados la variable de caudal y coeficiente de descarga mediante las ecuaciones de Bernoulli a través de Excel como se muestra en la tabla siguiente:

Calado Final (m)	0,115114853	Coeficiente Descarga	0,00018627
Velocidad Aguas Abajo Paraview (m/s)			1,96714
Caudal Aguas Abajo Paraview (m ³ /s)			0,09057881

Tabla 15: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared gruesa 20 Hz.

Como podemos observar en las tablas adjuntadas anteriormente, la velocidad aguas abajo calculada de manera experimental a través del cálculo de velocidad a través de un Pitot aguas abajo, el resultado es similar al calculado por Paraview, ya que, haciendo la

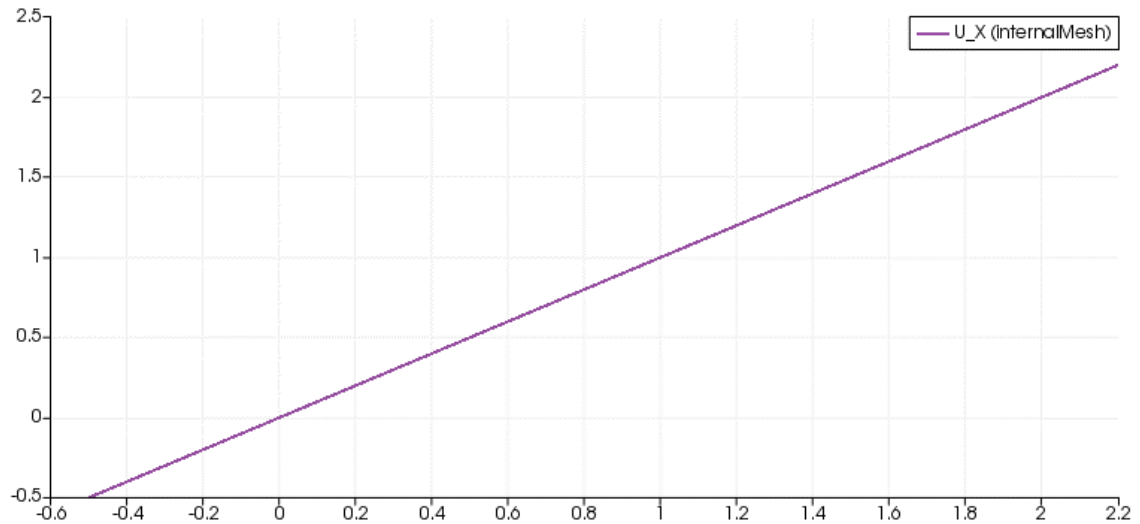
relación anteriormente citada respecto al coeficiente de descarga, este nos sale un número por debajo de la unidad.

A continuación, se mostrarán la tabla del cálculo de la velocidad mediante el software Paraview con su respectiva gráfica de velocidad.

Showing		ProbeLocation1	Attribute: Point Data	Precision: 6	.10				
	Point ID	Points	U	alpha.phase1	p	p_rgh	rho		
0	0	0.7, 0.2, 0.02	1.96714, 0.00591687, -7.84351e-5	1.05889	954.41	1161.06	1056.71		

Tabla 16: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 20Hz.

La gráfica de velocidad obtenida en Paraview en m/s frente a las coordenadas a lo largo del mallado es la siguiente:



Gráfica 14: Gráfica de Paraview de velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 20Hz

Las imágenes recopiladas durante el ensayo empírico en el laboratorio de la Escuela Superior de Linares, para poder comparar este frente al ensayo computacional son las siguientes:



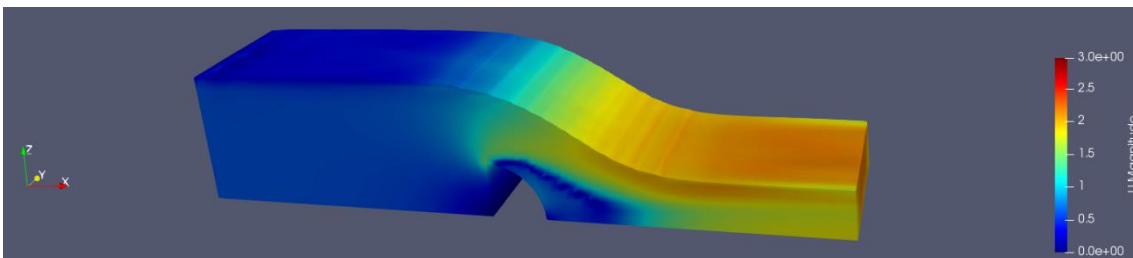
Fotografía 72: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L.



Fotografía 73: Ensayo a 20Hz en el canal de la E.P.S.L

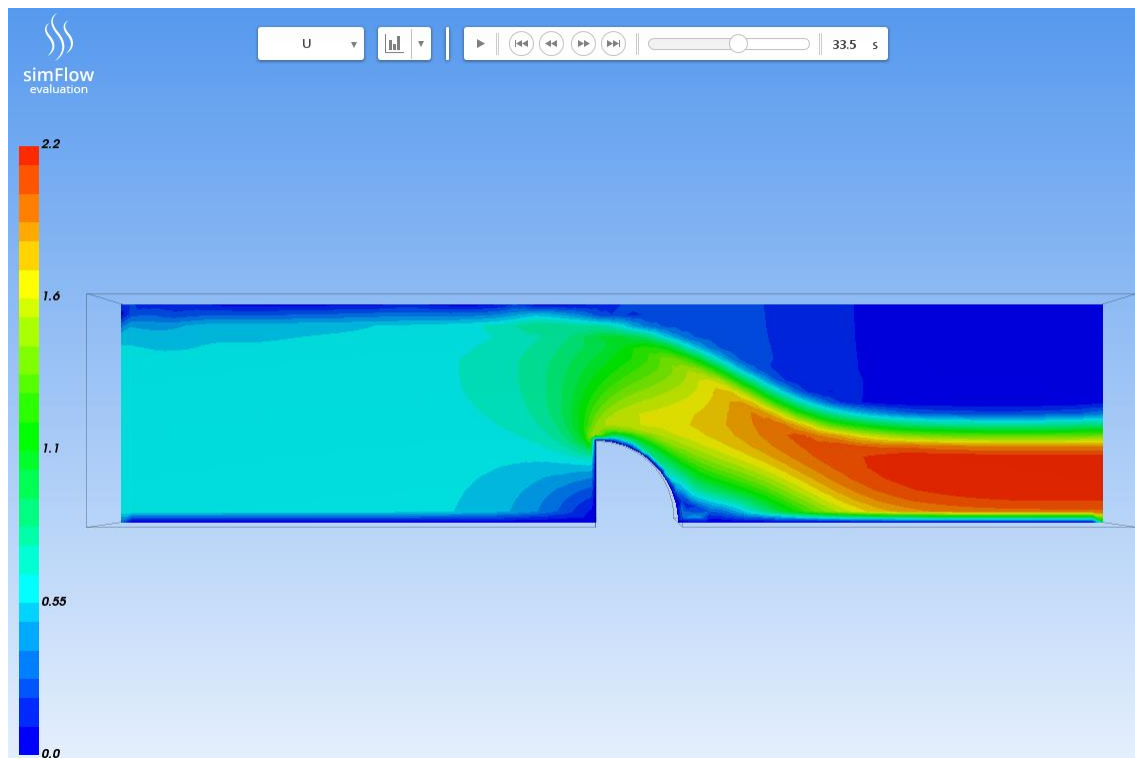
. Las imágenes recopiladas durante el ensayo computacional para poder dicha comparación serán las siguientes:

- Estudio mediante Paraview de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



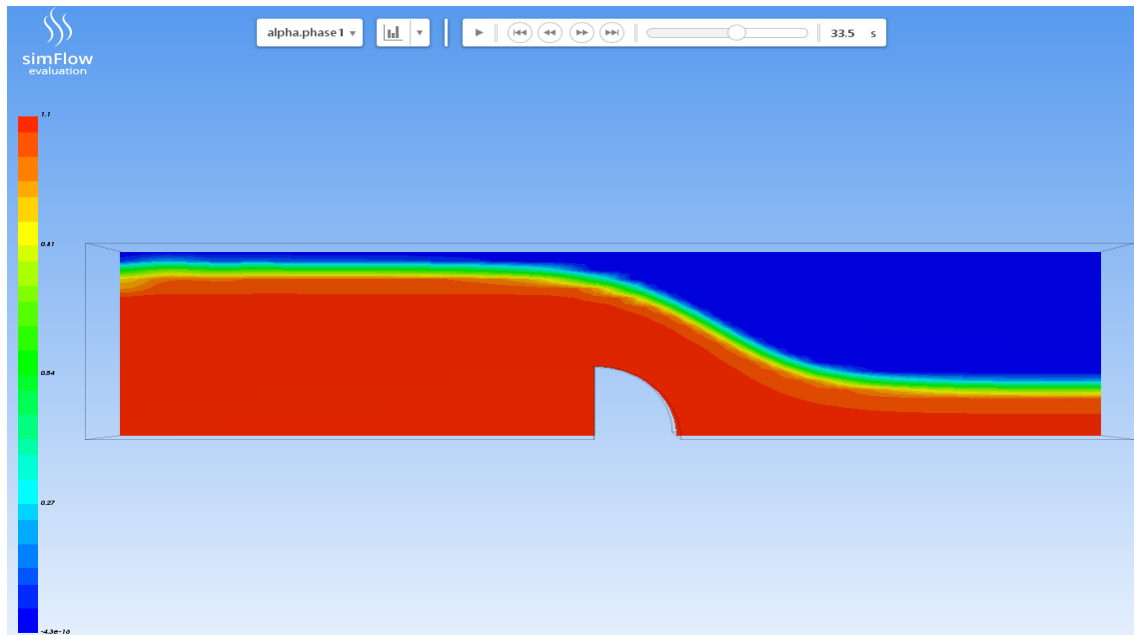
Fotografía 74: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 20 Hz

- Estudio mediante Simflow de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



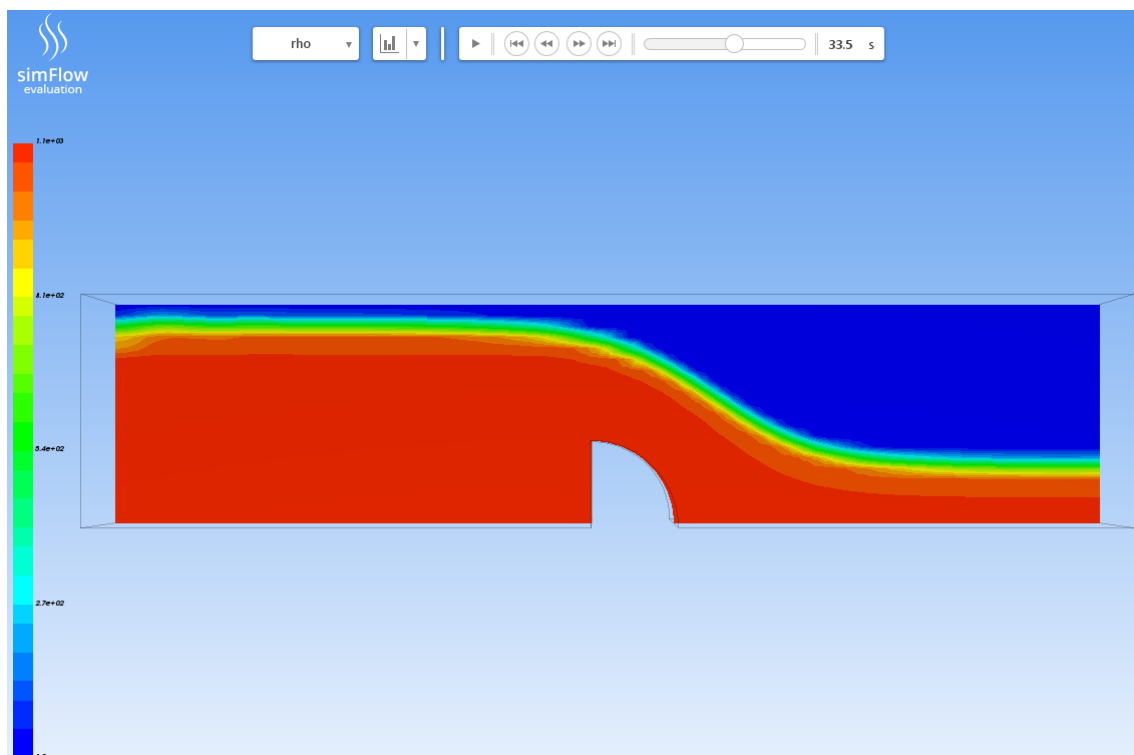
Fotografía 75: Ensayo en Simflow de la velocidad U al caudal pertinente a 20 Hz.

- . Estudio mediante Simflow de la α .phase referente al número de Coriolis del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



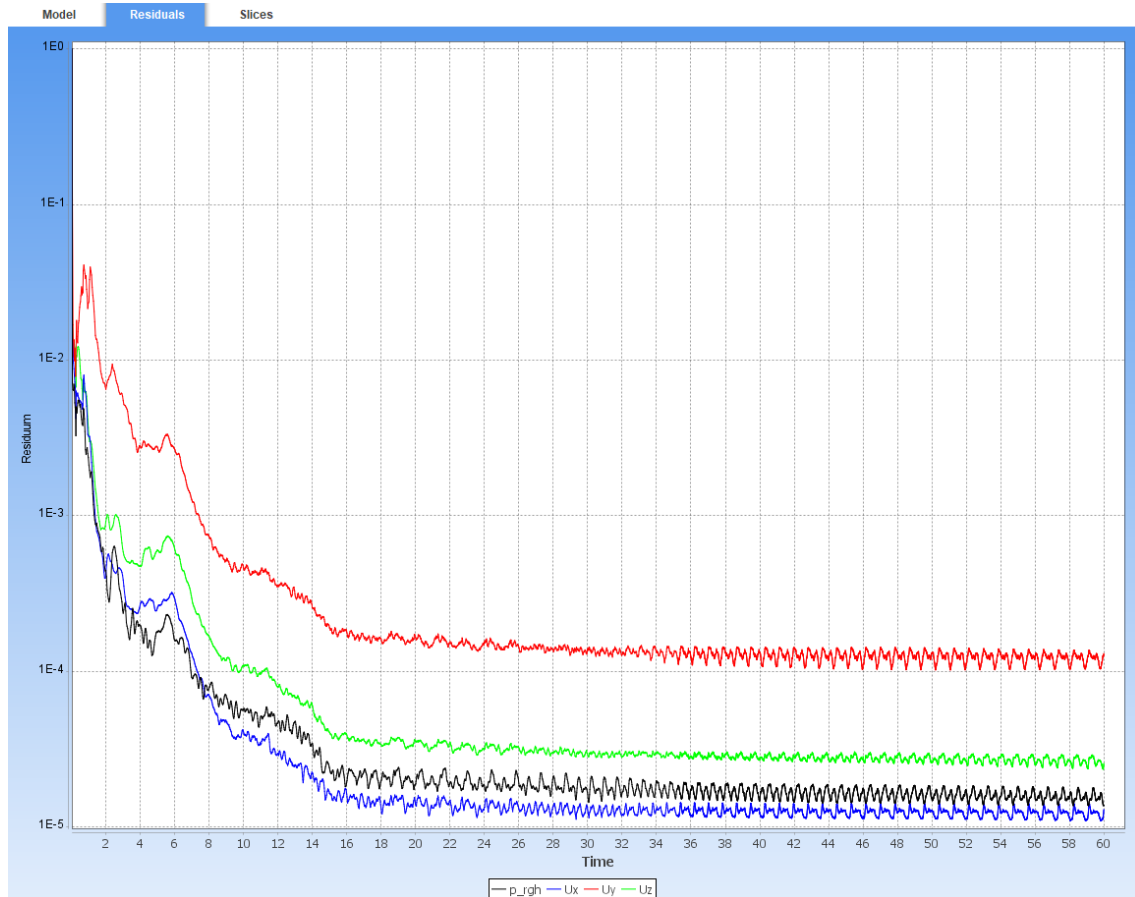
Fotografía 76: Ensayo en Simflow de la fase Alpha al caudal pertinente a 20 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la densidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



Fotografía 77: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 20 Hz.

En la gráfica 17, podremos visualizar el transcurso de los residuales de cálculo por la iteración de cálculo de las aproximaciones de las ecuaciones diferenciales respecto los distintos instantes de tiempo fijados previamente en nuestra simulación de nuestro software Simflow. Dicha resolución, como podemos apreciar por la figura que describe, es correcta, ya que el error es enorme en los primeros instantes y este, debido transcurso de las interacciones, poco a poco se va reduciendo hasta llegar a estabilizarse.



Gráfica 15: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 20 Hz.

10.3.2. Medidas obtenidas para el Vertedero de Pared Gruesa a una frecuencia de bomba de 30 Hz.

- Medidas Experimentales: Medidas obtenidas mediante el ensayo empírico y calculadas mediante las ecuaciones de Bernoulli mediante Excel.

	Aguas Arriba			Aguas Abajo		
Calado (mm)	255	251		40	45	
Calado medio (mm)	253			42,5		
	Pitot 1 Aguas Arriba	Pitot 1 Aguas Arriba medio		Pitot 2 Aguas Abajo	Pitot 2 Aguas Abajo medio	
Tubo 1 (mm)	232	229	230,5	780	778	779
Tubo 2 (mm)	224	227	225,5	621	621	621
Velocidad Aguas Arriba (m/s)	0,39618178	0,19809089	0,313209195			
Caudal Aguas Arriba (m ³ /s)	0,10102635	0,04972081	0,079241926			
Velocidad Aguas Abajo (m/s)	2,52565882	1,10490695	1,864515915			
Caudal Aguas Abajo (m ³ /s)	0,10102635	0,04972081	0,079241926			

Tabla 17: Datos experimentales para el vertedero de pared triangular a 30 Hz.

- Medidas calculadas mediante software de CFD: Medidas obtenidas mediante el ensayo computacional con los programas anteriormente citados.

Una vez recopilados dichos datos mostrados en las fotografías siguientes del programa, han calculados la variable de caudal y coeficiente de descarga mediante las ecuaciones de Bernoulli a través de Excel como se muestra en la tabla siguiente:

Calado Final (m)	0,115114853	Coeficiente Descarga	0,00018537
Velocidad Aguas Abajo Paraview (m/s)	1,91371		
Caudal Aguas Abajo Paraview (m ³ /s)	0,08811858		

Tabla 18: Tabla de datos teóricos recopilados mediante Paraview para el vertedero de pared triangular a 30 Hz.

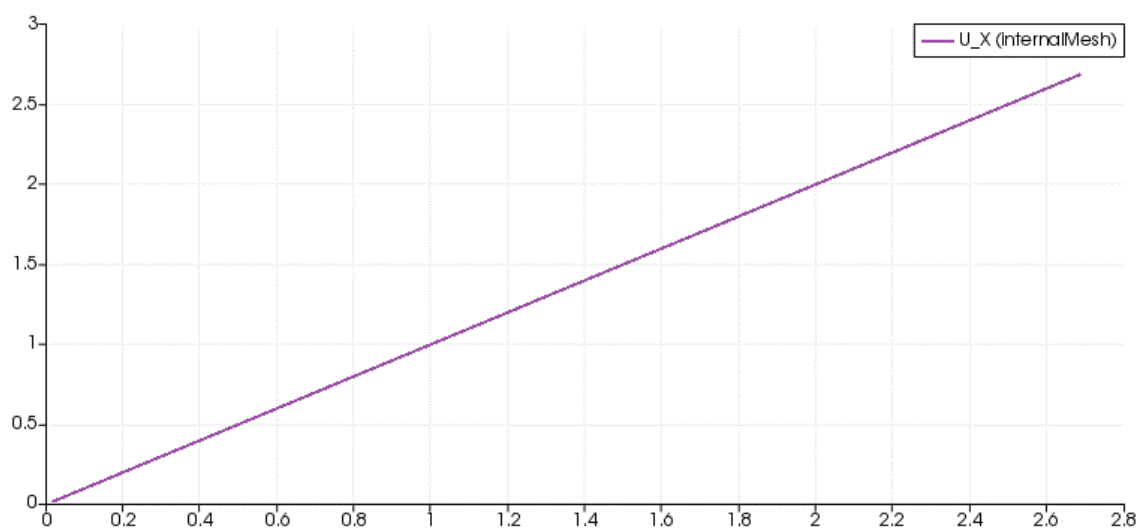
Como podemos observar en las tablas adjuntadas anteriormente, la velocidad aguas abajo calculada de manera experimental a través del cálculo de velocidad a través de un Pitot aguas abajo, el resultado es similar al calculado por Paraview, ya que, haciendo la relación anteriormente citada respecto al coeficiente de descarga, este nos sale un número por debajo de la unidad.

A continuación, se mostrarán la tabla del cálculo de la velocidad mediante el software Paraview con su respectiva gráfica de velocidad.

Showing ProbeLocation1		Attribute: Point Data	Precision: 6	.10			
Point ID	Points	U	alpha.phase1	p	p_rgh	rho	
0	0	0.7, 0.2, 0.02	1.91371, 3.68531e-5, -0.0779841	1.03787	823.983	1026.69	1035.75

Tabla 19: Tabla de la velocidad Obtenida de manera puntual en Paraview a 30Hz.

La gráfica de velocidad obtenida en Paraview en m/s frente a las coordenadas a lo largo del mallado es la siguiente:

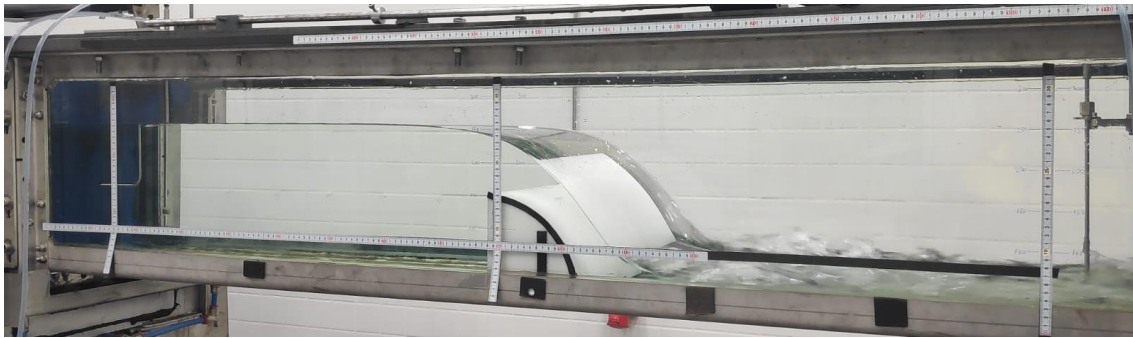


Gráfica 16: Gráfica de Paraview de velocidad (m/s) frente coordenadas a lo largo de la malla del canal a 30Hz

Las imágenes recopiladas durante el ensayo empírico en el laboratorio de la Escuela Superior de Linares, para poder comparar este frente al ensayo computacional son las siguientes:



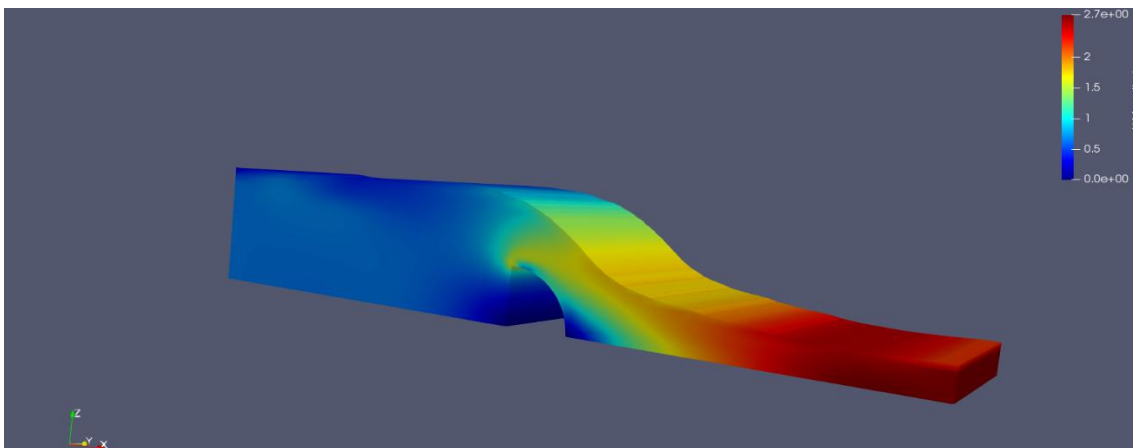
Fotografía 78: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L.



Fotografía 79: Ensayo a 30Hz en el canal de la E.P.S.L.

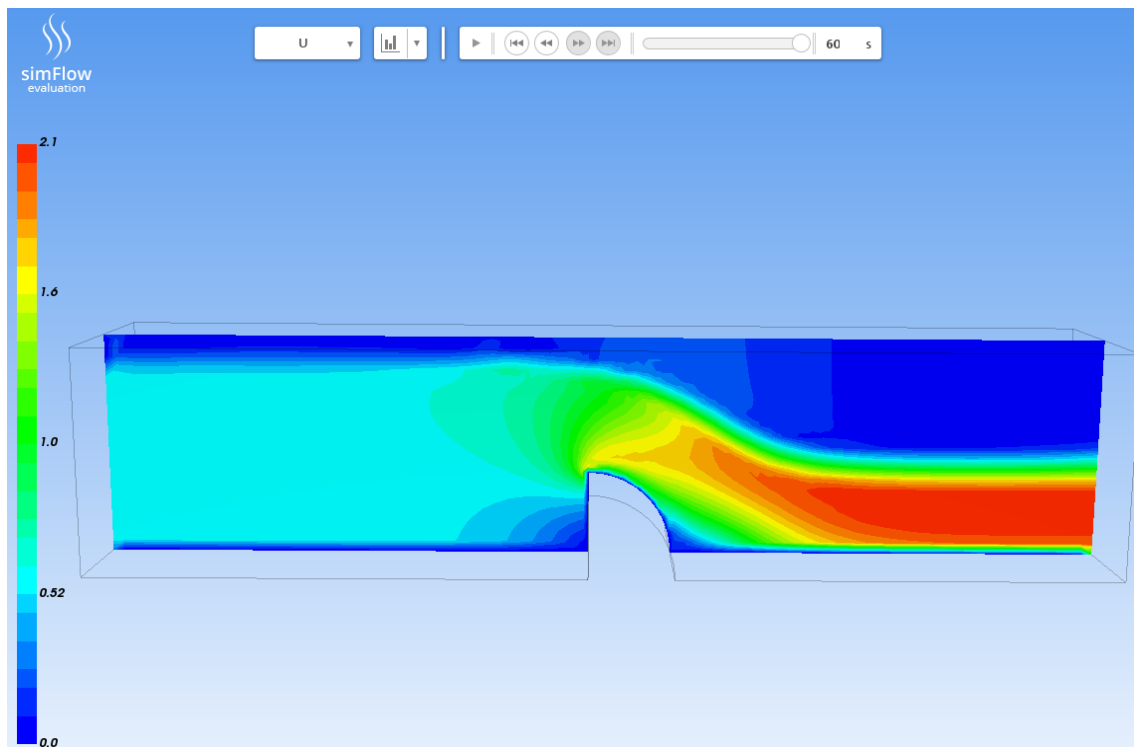
. Las imágenes recopiladas durante el ensayo computacional para poder dicha comparación serán las siguientes:

- Estudio mediante Paraview de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



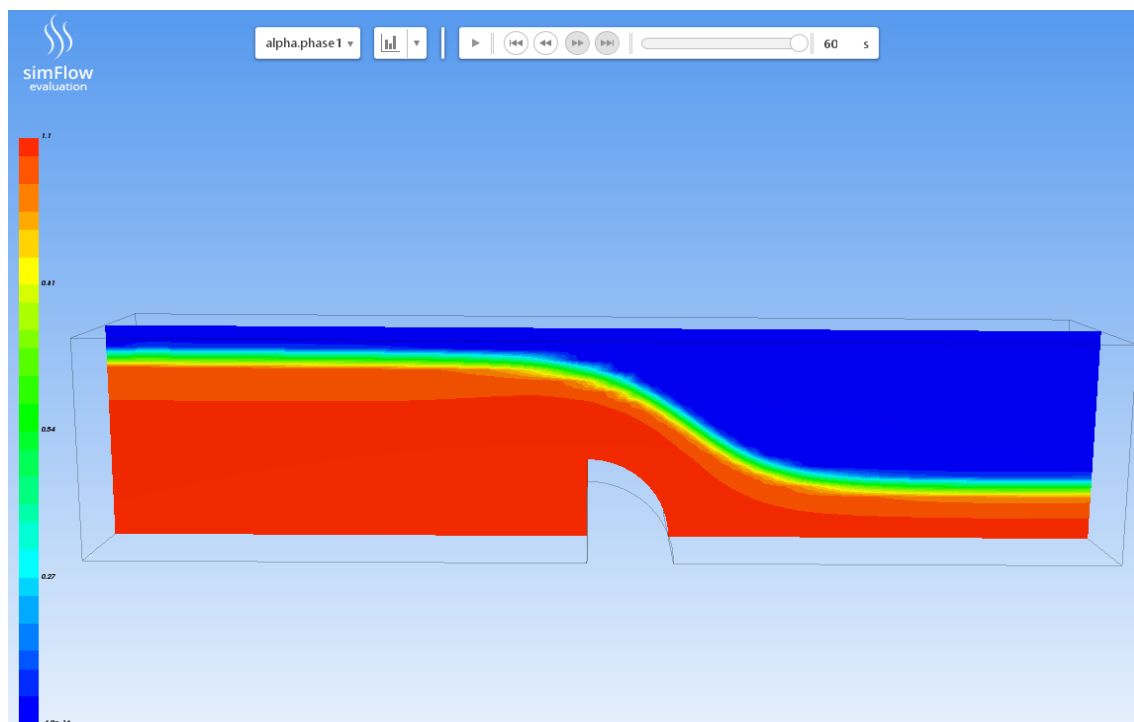
Fotografía 80: Resultado de la velocidad U obtenida en el ensayo en Paraview al caudal pertinente a 30 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la velocidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



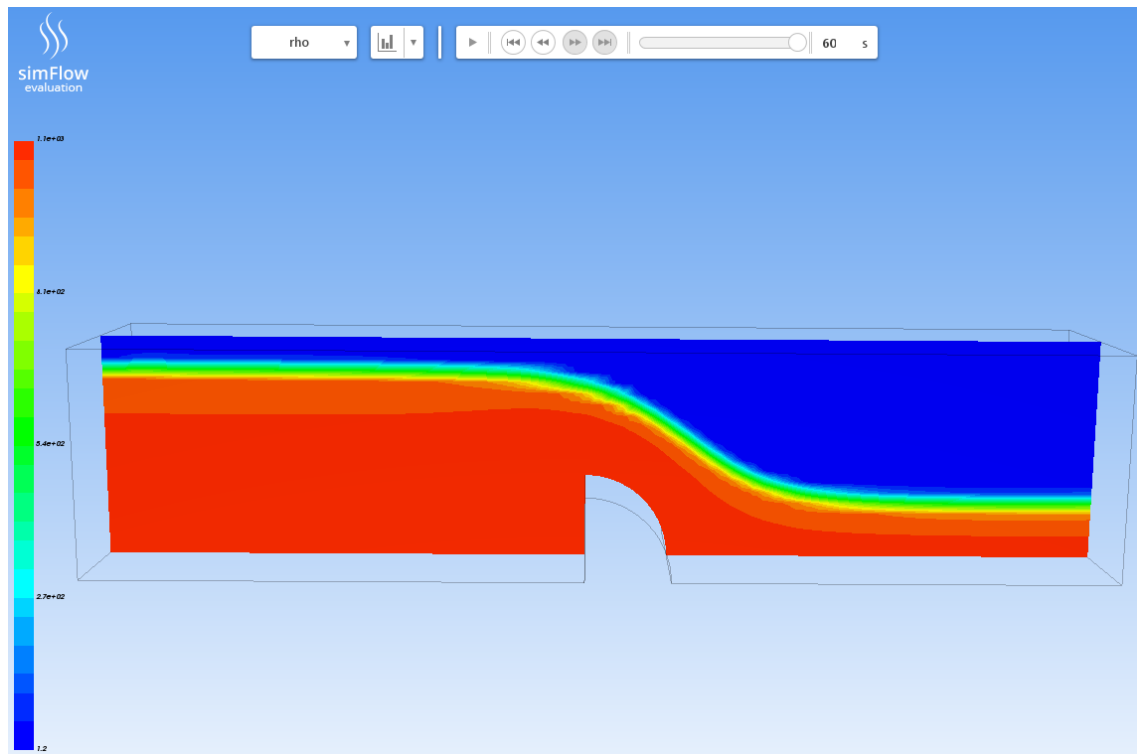
Fotografía 81: Ensayo en Simflow de la energía U al caudal pertinente a 30 Hz.

- . Estudio mediante Simflow de la α .phase referente al número de Coriolis del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



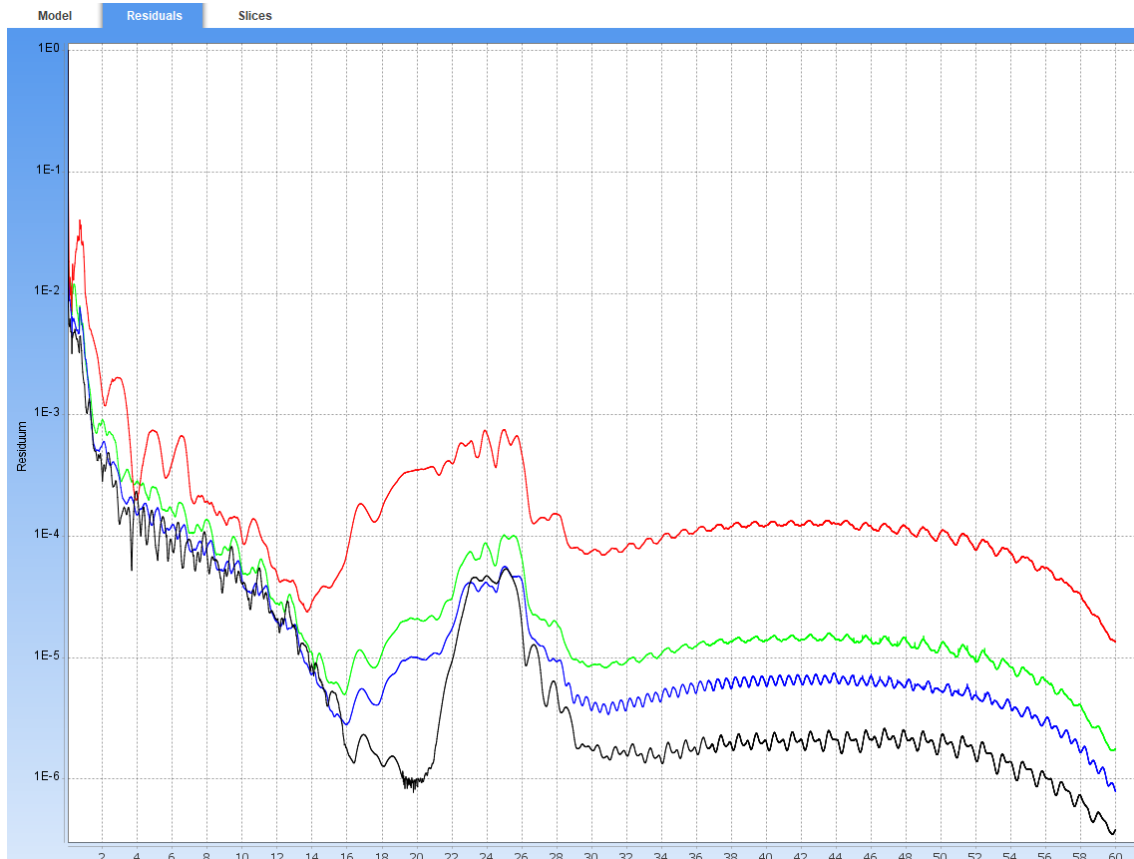
Fotografía 82: Ensayo en Simflow de la fase Alpha al caudal pertinente a 30 Hz.

- Estudio mediante Simflow de la densidad del flujo del agua a través de nuestra malla en función de las condiciones iniciales es la siguiente:



Fotografía 83: Ensayo en Simflow de rho al caudal pertinente a 30 Hz.

En la gráfica 17, podremos visualizar el transcurso del error producido por la iteración de cálculo de las aproximaciones de las ecuaciones diferenciales respecto los distintos instantes de tiempo fijados previamente en nuestra simulación de nuestro software Simflow. Dicha resolución, como podemos apreciar por la figura que describe, es correcta, ya que el error es enorme en los primeros instantes y este, debido transcurso de las interacciones, poco a poco se va reduciendo hasta llegar a estabilizarse, aunque se haya descrito una inestabilidad entre las iteraciones en los segundos de 20s a 26s, esta llega a corregirse con éxito al final de la simulación.



Gráfica 17: Gráfico de Residuales para el Ensayo en Simflow a 30 Hz.

11. Conclusiones.

Como hemos podido ver, los resultados han sido bastantes fidedignos a bajos Hz de la bomba del canal del laboratorio. Esto se debe a la posible cavitación de la misma.

A lo largo de la simulación, como se puede ver en este documento, hay multitud de variables las cuales tenemos que escoger con gran rigor ya que una mala decisión puede hacer que varíe el resultado de manera muy significativa. El mallado de la misma, gracias a la geometría y el afino de esta, hace que la variable de tener un equipo potente sea de vital importancia.

A lo largo de la experimentación, hemos tenido bastantes problemas sobre todo con los vertederos. La caracterización de los mismos es complicada por sus medidas. Además, durante la experimentación, se tuvo problemas en la sujeción de los vertederos al canal, pérdidas de estanqueidad por los bordes de los mismos ante el paso del flujo (fenómeno que no pasa en la simulación, ya que es un modelo ideal).

También hemos tenido problema en la obtención de datos ya que, las obtenciones de calado y de velocidad se hacen a través de mirar alturas sobre una regla la cual podemos tener errores de medición por el ojo humano.

Por tanto, una de las vías de mejora de este proyecto, para próximos estudios serían bajo mi rigor:

- Proporcionar al laboratorio de útiles y herramientas adecuadas para la obtención de medidas reales tanto de caudal como de velocidad con mayor precisión que el ojo humano, ya que estos datos son de vital importancia.
- Modificar las geometrías actuales de los vertederos para que estos sea más fácil de caracterizar y sean más fidedignos a las ecuaciones nombradas en este documento.
- Invertir en la versión de profesional de Simflow para tener más de 20000 nodos que es la que proporciona la versión gratis y, además, mayor rapidez ya que dejaría hacer la simulación con más de 2 CPUs.
- Invertir en ordenadores de mayor potencia para poder llevar a cabo esta labor de mejor forma

El uso de programas de modelación 3D como Autodesk Inventor, son de gran utilidad para la creación de mallado para su posterior simulación a través de Simflow, los cuales, son la perfecta forma de poner en juicio todos los conocimientos adquiridos a lo largo de nuestra carrera y como puesta en práctica, sobre todo, de las asignaturas del último año.

Para finalizar, es irrefutable que los valores obtenidos son muy próximos por lo que podemos asegurar que este método de simulación nos proporciona unos resultados fiables para poder utilizarlos en casos reales. Por lo que podemos concluir diciendo que es altamente necesario después de un ensayo físico de un modelo en cuestión, validarlo mediante simulación con software de CFDs.

12. Referencias Bibliográficas.

- Arnau Bayon-Barrachina and Petra Amparo López Jiménez. Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM.
- Liria Montañés. Canales hidráulicos. Madrid: Canales y Puertos Colegio de Ingenieros de Caminos, 2001.
- Simflow Tutorials, Learn CFD Simulations of Dam Break. <https://help.simflow.com/tutorials>.
- López Andrés, L. Manual de Hidráulica. Universidad de Alicante: Servicio de Publicaciones, 1997.
- Giles, R. Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. S.A. McGraw-Hill / Interamericana de España, 1994.
- Gutiérrez, G. E. (s.f.). Manual de hidráulica de canales.
- Vallés, P. Notas de Clase Hidráulica Avanzada, Flujo en lámina libre. Universitat Politècnica de Valencia, 2013.
- Marbello Pérez, Ramiro. Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, 2005.
- VATANKHAH, Ali R. Analytical solution for water surface profile along a side weir in a triangular channel. Flow Measurement and Instrumentation, 2012, 1 (23), 75-80.
- GHODSIAN, Masoud. Stage discharge relationships for a triangular weir. International Journal of Civil Engineering, 2004, 1 (2).
- BAUTISTA-CAPETILLO, C., et al. Discharge Coefficient Analysis for Triangular.

- Sharp-Crested Weirs Using Low-Speed Photographic Technique. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 3 (140).
- ARTURO, Rocha Felices. Canales. Tuberías e Hidráulica de Tuberías y Canales, 1997.
- Crespo Martínez, A. Mecánica de Fluidos. Madrid: Paraninfo, 2006.
- EMIROGLU, M. Emin; AGACCIOGLU, Hayrullah; KAYA, Nihat. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. Flow measurement and Instrumentation, 2011, 4 (22), 318-331.
- The ParaView Guide Community Edition Updated for ParaView version 5.6.