

Universidad Católica de Santa María

**Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y
del Ambiente**

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



“MODELAMIENTO HIDRÁULICO DE VERTEDEROS TIPO TECLA DE PIANO”

Tesis presentada por el Bachiller

Flores Arana, Sergio Manuel

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Asesor:

Ing. Rendón Dávila, Víctor Oscar

AREQUIPA – PERU

2019

FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍAS CIVIL Y DEL AMBIENTE
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

DICTAMEN DE BORRADOR DE TESIS

VISTO

EL BORRADOR DE TESIS Titulado:

Modelamiento Hidráulico de Vertederos Tipo Tecla de
Plano

Presentado por el (la) (los) Bachiller (es):

Flores Arana, Sergio Manuel

Nuestro DICTAMEN es:

SIN OBSERVACIONES

OBSERVACIONES:

Arequipa, 04 de Septiembre del 2019


COO: 1950


COO 2592


COO 1733

DEDICATORIA

A Dios:

Por poner en mí camino a todas las maravillosas personas y experiencias que conocí durante todo este proceso.

A mis padres Jesús y Giovanna:

Por ser mi mayor ejemplo, por apoyarme siempre en todos los instantes de mi vida, por brindarme la oportunidad de forjar mi educación y sobre todo por ser el constante impulso para la elaboración y finalización de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

A mi hermano Jesús, por todo el apoyo brindado. Motivándome a cada instante a seguir adelante en todo sentido y por mostrarme el ejemplo de sacrificio y perseverancia.

Al Ing. Víctor Oscar Rendón Dávila y al Ing. Percy Rucano Paucar por ser las personas que me apoyaron tanto con sus conocimientos como con sus experiencias. Por guiarme en la toma de decisiones y brindarme su amistad desde el inicio de la investigación. También agradecerles porque a través de ellos conocí a Raúl y José, personas realmente increíbles y nobles, siendo pieza importante para alcanzar este proyecto. De igual manera a la Ing. Elizabeth le agradezco por mostrar interés en mi tema, compartir sus consejos y pensamientos conmigo y darme la mano cada vez que se presentaba algún inconveniente.

RESUMEN

Es de suma importancia reconocer que en la actualidad existe una gran cantidad de posibilidades de vertederos para tomar en cuenta a la hora de construir una presa, es entendible a su vez, que la inclinación por alguna de ellos dependerá fundamentalmente del desempeño hidráulico que posea.

Los vertederos tipo tecla de piano nacen a partir de la anterior premisa, mejorando el comportamiento hidráulico tanto de los vertederos tipo laberinto como la de vertederos convencionales (vertederos de pared delgada y Creager). Esta investigación demuestra a través de pruebas experimentales y análisis numéricos el incremento en el coeficiente de descarga que ofrecen los vertederos tipo tecla de piano.

A su vez, da a conocer el comportamiento hidráulico del mismo para condiciones aguas arriba y aguas abajo del vertedero, presiones en ocho puntos distribuidas en las teclas de entrada y salida, un desarrollo en cuanto a pérdidas de carga para los modelos (PKW de 4 y 2 unidades) y un análisis comparativo y gráfico entre los mismos. Para finalizar se presentan las fórmulas recomendadas por (Machiels, Ercicum, Archambeau, Dewals, & Piroton, 2012) respecto al diseño de un prototipo.

Palabras clave: vertederos, tecla de piano, comportamiento hidráulico, presiones.

ABSTRACT

It is very important to recognize that there are currently a large number of weirs possibilities to take into account when building a dam, it is understandable, in turn, that the inclination for any of them will depend fundamentally on the hydraulic performance it has.

Piano key weirs are born from the previous premise, improving the hydraulic behavior of both labyrinth and conventional weirs (thin-walled and Creager weirs). This research demonstrates through experimental tests and numerical analysis the increase in the discharge coefficient offered by the piano key weirs.

In turn, it discloses its hydraulic behavior for upstream and downstream conditions of the weir, pressures at eight points distributed in the input and output keys, a development in terms of load losses for models (PKW of 4 and 2 units) and a comparative and graphic analysis between them. Finally, the formulas recommended by (Machiels, Erpicum, Archambeau, Dewals, & Piroton, 2012) regarding the design of a prototype are presented.

Keywords: weirs, piano key, hydraulic behavior, pressures.

ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I	1
1. GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Introducción	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo principal	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Estructura y contenido general	4
CAPÍTULO II	5
2. VERTEDEROS EN PRESAS	5
2.1 Vertederos	5
2.2 Elementos de un vertedero	6
2.2.1 Cresta	6
2.2.2 Flujo (Q)	6
2.2.2.1 Flujo en conductos cerrados y abiertos	6
2.2.2.2 Flujo unidimensional, bidimensional y tridimensional	6
2.2.2.3 Flujo permanente y no permanente	7
2.2.2.4 Flujo uniforme y variado	8
2.2.2.5 Flujo laminar y turbulento	8
2.2.2.6 Flujo subcrítico, crítico y supercrítico	9
2.2.3 Altura del vertedero (P)	10
2.2.4 Ancho del vertedero (W)	10
2.2.5 Longitud del vertedero (L)	10
2.2.6 Altura de carga (H)	10
2.3 Tipos de vertederos	11
2.3.1 Vertederos de caída libre	11
2.3.2 Cortinas vertedoras con caída rápida	12
2.3.3 Vertederos con tiro vertical	13
2.3.4 Vertederos con canal lateral	13
2.3.5 Vertederos de cimacio	15
2.3.6 Vertederos en rápida	16

2.3.7 Vertederos de túnel	17
2.3.8 Vertederos en sifón.....	18
2.3.9 Vertederos en abanico.....	19
2.3.10 Vertederos dentados	21
2.3.11 Vertederos circulares o “morning glory”	21
2.3.12 Vertederos tipo laberinto.....	22
2.4 Estimación del coeficiente de descarga	23
2.4.1 Fórmula de Francis.....	23
2.4.2 Fórmula de Bazin	24
2.4.3 Fórmula de Kindsvater y Carter	24
2.4.4 Fórmula de Rehbock	25
2.4.5 Fórmula de King	25
2.4.6 Fórmula de la sociedad suiza de ingenieros y arquitectos	26
CAPÍTULO III	27
3. VERTEDERO TIPO TECLA DE PIANO	27
3.1 Clasificación de los vertederos tipo laberinto y tecla de piano.....	27
3.1.1 Triangular	28
3.1.2 Trapezoidal.....	28
3.1.3 Rectangular	29
3.1.4 Circular	30
3.2 Geometría en planta	30
3.2.1 Horizontal	31
3.2.2 Circular	31
3.3 Partes del vertedero.....	31
3.3.1 Canal de aproximación	32
3.3.2 Perfiles de cresta.....	32
3.3.2.1 Perfiles de cresta generalmente empleados.....	33
3.3.3 Canal rápido y flujo aguas abajo.....	33
3.3.4 Elementos de disipación de energía	34
3.4 Dirección del vertido	37
3.5 Funcionamiento hidráulico	39
3.5.1 Canal de aproximación	39
3.5.2 Perfiles de cresta	39
3.6 Aplicaciones	40
3.6.1 Vertederos PKW en el mundo	41

CAPÍTULO IV	43
4. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE ESTRUCTURAS PARA LA REALIZACIÓN DEL MODELAMIENTO HIDRÁULICO	43
4.1 Metodología	43
4.2 Parámetros de diseño	44
4.3 Procedimiento de diseño	51
4.3.1 Principales tipos de PKW	52
4.3.2 Ecuaciones de diseño geométrico para vertederos PKW tipo A	54
4.3.2.1 Parámetros de entrada.....	55
4.3.2.2 Longitud desarrollada del PKW	57
4.3.2.3 Longitud desarrollada de una unidad PKW	57
4.3.2.4 Ancho de una unidad PKW	57
4.3.2.5 Ancho de las teclas de salida	57
4.3.2.6 Ancho de las teclas de entrada	57
4.3.2.7 Longitud de los muros laterales medidos desde los ejes de los ápices de entrada y salida.....	58
4.3.2.8 Ángulo de pendiente para las teclas de entrada y salida	58
4.3.2.9 Espesor de los ápices a la entrada y salida.....	58
4.3.2.10 Longitud total del PKW	58
4.3.2.11 Longitud del voladizo aguas arriba	58
4.3.2.12 Longitud del voladizo aguas abajo	58
4.3.2.13 Longitud de la base del PKW	58
4.3.2.14 Diferencia de alturas para las condiciones de entrada y salida	59
4.3.2.15 Consideraciones finales de diseño	59
4.3.3 Ecuaciones para determinar la curva de gasto	64
4.3.3.1 Kabari-Samani & Javaheri (2012).....	65
4.3.3.2 Leite Ribeiro et al. (2012)	65
4.3.3.3 Machiels (2012).....	66
4.3.4 Diseño geométrico definitivo	68
4.3.4.1 Vertederos tipo tecla de piano	68
4.4 Construcción e instalación	73
4.4.1 Descripción del canal modular	74
4.4.1.1 Estructuras propias del canal	74
4.4.1.2 Estructuras externas del canal	78

4.4.2 Construcción e instalación del sistema de vertederos tipo tecla de piano	81
4.4.2.1 Modelos PKW	82
4.4.2.2 Sistema de sensores de presión	84
4.4.2.3 Montaje sobre el canal	86
CAPÍTULO V	89
5. MODELAMIENTO DE VERTEDEROS TIPO TECLA DE PIANO	89
5.1 Medición de variables físicas	89
5.2 Datos obtenidos y calculados	90
5.2.1 Vertederos de pared delgada	90
5.2.1.1 Modelo 1: P = 10 cm	90
5.2.1.1 Modelo 2: P = 20 cm	92
5.2.2 Vertederos tipo Creager	93
5.2.2.1 Modelo 1: P = 10 cm	93
5.2.2.2 Modelo 2: P = 20 cm	95
5.2.3 Vertederos tipo tecla de piano	97
5.2.3.1 Modelo piloto: PKW de 5 unidades	97
5.2.3.2 Modelo 1: PKW de 4 unidades	99
5.2.3.3 Modelo 2: PKW de 2 unidades	108
5.3 Análisis de resultados	116
5.3.1 Curvas de gasto (H_u/Q)	116
5.3.2 Curvas de diseño para gasto ($C_{dw}/H_u/P$)	120
5.3.3 Curvas de eficiencia hidráulica	124
5.3.4 Curvas de diseño para presión ($C_{dw}/\gamma_v/P$)	126
5.3.4.1 Modelo 1 (PKW 4 unidades)	127
5.3.4.2 Modelo 2 (PKW 2 unidades)	129
5.4 Características hidráulicas	131
5.4.1 Interferencia de láminas y sumersión local	131
5.4.2 Flujo vertido	134
5.5 Diseño hidráulico y geométrico para un prototipo	135
5.5.1 Ancho de la unidad PKW (W_u)	136
5.5.2 Escala del proyecto (x)	136
5.5.3 Carga de diseño correspondiente para el modelo (H^*)	136

5.5.4 Coeficiente de descarga (C_{dw}^*) y ratio de presiones (γ_v^*/p^*)	136
5.5.5 Caudal (Q) y presiones (γ_v)	136
5.5.6 Dimensiones del vertedero en tecla de piano (X).....	137
CAPÍTULO VI	138
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
BIBLIOGRAFÍA	140



LISTADO DE FIGURAS

<i>Figura N° 1.- Flujo Cerrados y Abiertos.....</i>	<i>6</i>
<i>Figura N° 2.- Flujo bidimensional</i>	<i>7</i>
<i>Figura N° 3.- Flujo tridimensional.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura N° 4.- Flujo subcrítico, crítico y supercrítico</i>	<i>10</i>
<i>Figura N° 5.- Elementos de un vertedero.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura N° 6.- Vista en planta de un vertedero de caída libre</i>	<i>12</i>
<i>Figura N° 7.- Cortinas vertedoras con caída rápida</i>	<i>13</i>
<i>Figura N° 8.- Esquema de una captación con vertedero lateral</i>	<i>14</i>
<i>Figura N° 9.- Vertedero de la presa de los Alfilorios.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura N° 10.- Vertedero de cimacio</i>	<i>16</i>
<i>Figura N° 11.- Presa de Alqueva, Portugal</i>	<i>17</i>
<i>Figura N° 12.- Vertedero en túnel</i>	<i>18</i>
<i>Figura N° 13.- Vertedores tipo sifón.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura N° 14.- Geometría de un vertedero en abanico.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura N° 15.- Vertedero dentado en la presa de Conconully, Washington.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura N° 16.- Componentes de vertedero en pozo</i>	<i>22</i>
<i>Figura N° 17.- Vista en planta de un vertedero tipo laberinto</i>	<i>23</i>
<i>Figura N° 18.- Módulo triangular</i>	<i>28</i>
<i>Figura N° 19.- Módulo trapezoidal.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura N° 20.- Coeficiente de descarga para diversos ángulos del módulo trapezoidal</i>	<i>29</i>
<i>Figura N° 21.- Módulo Rectangular.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura N° 22.- Módulo circular</i>	<i>30</i>
<i>Figura N° 23.- Dirección horizontal</i>	<i>31</i>
<i>Figura N° 24.- Dirección circular</i>	<i>31</i>
<i>Figura N° 25.- Canal de aproximación</i>	<i>32</i>
<i>Figura N° 26.- Perfiles de cresta usados generalmente en vertederos tipo laberinto</i>	<i>33</i>
<i>Figura N° 27.- Sección transversal de un canal rápido.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura N° 28.- Pozo amortiguador.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura N° 29.- Accesorios del estanque amortiguador</i>	<i>36</i>
<i>Figura N° 30.- Trampolín como dissipador de energía.....</i>	<i>36</i>

<i>Figura N° 31.- Geometría del Trampolín</i>	<i>37</i>
<i>Figura N° 32.- Configuraciones del vertedero tipo laberinto</i>	<i>38</i>
<i>Figura N° 33.- PKW Record, Francia (2015 – 2016)</i>	<i>41</i>
<i>Figura N° 34.- Componentes de un PKW considerados en la nomenclatura.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura N° 35.- Parámetros fundamentales de un PKW – Vista 3D.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura N° 36.- Parámetros fundamentales de un PKW – Vista en planta (izquierda) y sección transversal (derecha)</i>	<i>46</i>
<i>Figura N° 37.- Detalle de la geometría de la cresta.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura N° 38.- Longitud desarrollada de un PKW (derecha) y secciones típicas de cresta (derecha).....</i>	<i>46</i>
<i>Figura N° 39.- Parámetros físicos de un PKW (sección transversal).....</i>	<i>48</i>
<i>Figura N° 40.- Espesores en la base y extremo de los voladizos – aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha).....</i>	<i>49</i>
<i>Figura N° 41.- Angulo extremo de voladizo – aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha)</i>	<i>50</i>
<i>Figura N° 42.- Parámetros del parapeto (sección transversal)</i>	<i>50</i>
<i>Figura N° 43.- Parámetro de la nariz (izquierda) y ángulo de los muros laterales (derecha)</i>	<i>51</i>
<i>Figura N° 44.- Tipos de vertederos en tecla de piano propuestos por HydroCoop..</i>	<i>53</i>
<i>Figura N° 45.- Modelo estándar para un PKW tipo A</i>	<i>54</i>
<i>Figura N° 46.- Primera solución propuesta para $\Delta P > 0$</i>	<i>59</i>
<i>Figura N° 47.- Segunda solución propuesta para $\Delta P > 0$.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura N° 48.- Tercera solución propuesta para $\Delta P > 0$.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura N° 49.- Cuarta solución propuesta para $\Delta P > 0$</i>	<i>61</i>
<i>Figura N° 50.- Primera solución propuesta para $\Delta P < 0$</i>	<i>62</i>
<i>Figura N° 51.- Segunda solución propuesta para $\Delta P < 0$.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura N° 52.- Tercera solución propuesta para $\Delta P < 0$.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura N° 53.- Cuarta solución propuesta para $\Delta P < 0$</i>	<i>63</i>
<i>Figura N° 54.- Elevación lateral a) y superior b) del Modelo piloto</i>	<i>69</i>
<i>Figura N° 55.- Elevación lateral a) y superior b) del Modelo 1.....</i>	<i>71</i>
<i>Figura N° 56.- Elevación lateral a) y superior b) del Modelo 2.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura N° 57.- Descripción del caudalímetro SonTek IQ</i>	<i>89</i>

<i>Figura N° 58.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (Pared delgada P = 10cm)</i>	<i>91</i>
<i>Figura N° 59.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (Pared delgada P = 20cm)</i>	<i>93</i>
<i>Figura N° 60.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (Creager P = 10cm).....</i>	<i>94</i>
<i>Figura N° 61.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (Creager P = 20cm).....</i>	<i>96</i>
<i>Figura N° 62.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (PKW 5 unidades).....</i>	<i>98</i>
<i>Figura N° 63.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (PKW 4 unidades).....</i>	<i>100</i>
<i>Figura N° 64.- Puntos Distribuidos (PKW 4 unidades)</i>	<i>101</i>
<i>Figura N° 65.- Curva de presión para el Sensor 1 (PKW 4 unidades)</i>	<i>103</i>
<i>Figura N° 66.- Curva de presión para el Sensor 3 (PKW 4 unidades).....</i>	<i>103</i>
<i>Figura N° 67.- Curva de presión para el Sensor 2 (PKW 4 unidades)</i>	<i>104</i>
<i>Figura N° 68.- Curva de presión para el Sensor 4 (PKW 4 unidades)</i>	<i>104</i>
<i>Figura N° 69.- Curva de presión para el Sensor 5 (PKW 4 unidades)</i>	<i>105</i>
<i>Figura N° 70.- Curva de presión para el Sensor 6 (PKW 4 unidades)</i>	<i>105</i>
<i>Figura N° 71.- Curva de presión para el Sensor 7 (PKW 4 unidades)</i>	<i>106</i>
<i>Figura N° 72.- Curva de presión para el Sensor 8 (PKW 4 unidades)</i>	<i>106</i>
<i>Figura N° 73.- Gráfico de dispersión para la carga disipada (PKW 4 unidades)....</i>	<i>107</i>
<i>Figura N° 74.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (PKW 2 unidades).....</i>	<i>109</i>
<i>Figura N° 75.- Puntos Distribuidos (PKW 2 unidades)</i>	<i>110</i>
<i>Figura N° 76.- Curva de presión para el Sensor 1 (PKW 2 unidades)</i>	<i>112</i>
<i>Figura N° 77.- Curva de presión para el Sensor 4 (PKW 2 unidades)</i>	<i>112</i>
<i>Figura N° 78.- Curva de presión para el Sensor 2 (PKW 2 unidades)</i>	<i>113</i>
<i>Figura N° 79.- Curva de presión para el Sensor 3 (PKW 2 unidades)</i>	<i>113</i>
<i>Figura N° 80.- Curva de presión para el Sensor 5 (PKW 2 unidades)</i>	<i>114</i>
<i>Figura N° 81.- Curva de presión para el Sensor 6 (PKW 2 unidades)</i>	<i>114</i>
<i>Figura N° 82.- Curva de presión para el Sensor 7 (PKW 2 unidades)</i>	<i>115</i>
<i>Figura N° 83.- Curva de presión para el Sensor 8 (PKW 2 unidades).....</i>	<i>115</i>
<i>Figura N° 84.- Gráfico de dispersión para la carga disipada (PKW 2 unidades)....</i>	<i>116</i>

<i>Figura N° 85.- Curva de gasto calculado (Modelo 1).....</i>	<i>117</i>
<i>Figura N° 86.- Curva de gasto calculada (Modelo 2).....</i>	<i>118</i>
<i>Figura N° 87.- Gráfico de dispersión para las curvas de gastos de los modelos PKW</i>	<i>119</i>
<i>Figura N° 88.- Comparativa de los resultados para los modelos PKW con las curvas experimentales de la sección 4.3.3.....</i>	<i>120</i>
<i>Figura N° 89.- Curva de diseño para gasto (PKW 5 unidades)</i>	<i>121</i>
<i>Figura N° 90.- Curva de diseño para gasto (PKW 4 unidades)</i>	<i>121</i>
<i>Figura N° 91.- Curva de diseño para gasto (PKW 2 unidades)</i>	<i>122</i>
<i>Figura N° 92.- Coeficiente de descarga vs H_u/P para los Modelos 1</i>	<i>122</i>
<i>Figura N° 93.- Coeficiente de descarga vs H_u/P para los Modelos 2</i>	<i>123</i>
<i>Figura N° 94.- Curvas de diseño de gasto para los Modelos PKW.....</i>	<i>123</i>
<i>Figura N° 95.- Reducción (%) de H_u entre los Modelos 1</i>	<i>124</i>
<i>Figura N° 96.- Reducción (%) de H_u entre los Modelos 2</i>	<i>125</i>
<i>Figura N° 97.- Incremento (%) del C_{dw} entre los Modelos 1.....</i>	<i>125</i>
<i>Figura N° 98.- Incremento (%) del C_{dw} entre los Modelos 2.....</i>	<i>126</i>
<i>Figura N° 99.- Curva de diseño para presiones (Tecla entrada – Superior, PKW 4 unidades).....</i>	<i>127</i>
<i>Figura N° 100.- Curva de diseño para presiones (Tecla entrada – Inferior, PKW 4 unidades).....</i>	<i>127</i>
<i>Figura N° 101.- Curva de diseño para presiones (Tecla salida – Centro, PKW 4 unidades).....</i>	<i>128</i>
<i>Figura N° 102.- Curva de diseño para presiones (Paredes aguas arriba – Centro, PKW 4 unidades).....</i>	<i>128</i>
<i>Figura N° 103.- Curva de diseño para presiones (Tecla entrada – Superior, PKW 2 unidades).....</i>	<i>129</i>
<i>Figura N° 104.- Curva de diseño para presiones (Tecla entrada – Inferior, PKW 2 unidades).....</i>	<i>129</i>
<i>Figura N° 105.- Curva de diseño para presiones (Tecla salida – Centro, PKW 2 unidades).....</i>	<i>130</i>
<i>Figura N° 106.- Curva de diseño para presiones (Paredes aguas arriba – Centro, PKW 2 unidades).....</i>	<i>130</i>
<i>Figura N° 107.- Interacción del flujo (PKW 4 unidades)</i>	<i>131</i>
<i>Figura N° 108.- Interacción del flujo PKW 2 unidades).....</i>	<i>132</i>

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla N° 1.- PKW alrededor del mundo</i>	42
<i>Tabla N° 2.- Nomenclatura de los parámetros de la geometría del PKW</i>	47
<i>Tabla N° 3.- Nomenclatura de los parámetros físicos para un PKW</i>	48
<i>Tabla N° 4.- Nomenclatura de los parámetros para espesores de los voladizos y ángulos en los extremos</i>	50
<i>Tabla N° 5.- Nomenclatura de los parámetros del parapeto.....</i>	51
<i>Tabla N° 6.- Nomenclatura del parámetro de la nariz y el ángulo de los muros laterales</i>	51
<i>Tabla N° 7.- Geometría de modelos PKW estudiados.....</i>	55
<i>Tabla N° 8.- Límites de aplicación para las ecuaciones de capacidad</i>	64
<i>Tabla N° 9.- Parámetros de entrada para los modelos PKW.....</i>	69
<i>Tabla N° 10.- Parámetros de salida para el Modelo piloto (5 unidades PKW).....</i>	70
<i>Tabla N° 11.- Parámetros de salida para el Modelo 1 (4 unidades PKW)</i>	71
<i>Tabla N° 12.- Parámetros de salida para el Modelo 2 (2 unidades PKW)</i>	73
<i>Tabla N° 13.- Rangos de entrada y salida en sensores de presión</i>	89
<i>Tabla N° 14.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (Pared delgada P = 10cm).....</i>	90
<i>Tabla N° 15.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (Pared delgada P = 20cm).....</i>	92
<i>Tabla N° 16.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (Creager P = 10cm).....</i>	94
<i>Tabla N° 17.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (Creager P = 20cm).....</i>	95
<i>Tabla N° 18.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (PKW 5 unidades)</i>	97
<i>Tabla N° 19.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (PKW 4 unidades)</i>	99
<i>Tabla N° 20.- Datos diferenciales de presión (PKW 4 unidades)</i>	101
<i>Tabla N° 21.- Carga disipada (PKW 4 unidades)</i>	107
<i>Tabla N° 22.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (PKW 2 unidades)</i>	108
<i>Tabla N° 23.- Datos diferenciales de presión (PKW 2 unidades)</i>	110

Tabla N° 24.- Carga disipada (PKW 2 unidades) 116



LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

<i>Fotografía N° 1.- Vista del sistema interno y externo utilizado</i>	74
<i>Fotografía N° 2.- Pozo de disipación</i>	74
<i>Fotografía N° 3.- Puntos de desagüe en el pozo de disipación</i>	75
<i>Fotografía N° 4.- Canal aguas arriba</i>	76
<i>Fotografía N° 5.- Soporte típico del canal aguas arriba</i>	76
<i>Fotografía N° 6.- Canal aguas abajo</i>	77
<i>Fotografía N° 7.- Soporte típico y extra del canal aguas abajo</i>	78
<i>Fotografía N° 8.- Bombas de 15 hp y 7 hp (de izquierda a derecha)</i>	78
<i>Fotografía N° 9.- Tuberías de succión, impulsión y llegada</i>	79
<i>Fotografía N° 10.- Piscina de almacenamiento</i>	79
<i>Fotografía N° 11.- Punto de alimentación</i>	80
<i>Fotografía N° 12.- Datalogger</i>	80
<i>Fotografía N° 13.- Sensores de presión</i>	81
<i>Fotografía N° 14.- Modelos finalizados previo a la prueba de color</i>	81
<i>Fotografía N° 15.- Corte de piezas</i>	82
<i>Fotografía N° 16.- Pulido y limpieza de piezas</i>	82
<i>Fotografía N° 17.- Soldadura de teclas independientes</i>	82
<i>Fotografía N° 18.- Soldadura del vertedero</i>	83
<i>Fotografía N° 19.- Nivelado de la base y detalle de cresta</i>	83
<i>Fotografía N° 20.- Perforación de los espacios para las mangueras</i>	83
<i>Fotografía N° 21.- Pintado del vertedero y teclas</i>	84
<i>Fotografía N° 22.- Instalación de mangueras</i>	84
<i>Fotografía N° 23.- Corte de piezas y lijado para la base de sensores</i>	85
<i>Fotografía N° 24.- Prueba de verticalidad y ajuste de sensores</i>	85
<i>Fotografía N° 25.- Calibración de sensores</i>	86
<i>Fotografía N° 26.- Instalación final de sensores</i>	86
<i>Fotografía N° 27.- Limpieza del canal</i>	86
<i>Fotografía N° 28.- Instalación de la mesa en volado del vertedero</i>	87
<i>Fotografía N° 29.- Instalación de la plancha de desnivel</i>	87
<i>Fotografía N° 30.- Armado y nivelado de la mesa para base de sensores</i>	87
<i>Fotografía N° 31.- Vista frontal y superior del vertedero en tecla de piano instalado</i>	88
<i>Fotografía N° 32.- Vistas laterales del sistema completo</i>	88

<i>Fotografía N° 33.- Vertedero de pared delgada $P = 10\text{cm}$ en funcionamiento ($Q = 91$ L/s)</i>	<i>91</i>
<i>Fotografía N° 34.- Vertedero de pared delgada $P = 20\text{cm}$ en funcionamiento ($Q = 84$ L/s)</i>	<i>93</i>
<i>Fotografía N° 35.- Vertedero Creager $P = 10\text{cm}$ en funcionamiento ($Q = 89$ L/s)....</i>	<i>95</i>
<i>Fotografía N° 36.- Vertedero Creager $P = 20\text{cm}$ en funcionamiento ($Q = 60$ L/s)....</i>	<i>96</i>
<i>Fotografía N° 37.- Vertedero PKW 5 unidades en funcionamiento ($Q = 13$ L/s)</i>	<i>98</i>
<i>Fotografía N° 38.- Vertedero PKW 4 unidades en funcionamiento ($Q = 9$ L/s)</i>	<i>100</i>
<i>Fotografía N° 39.- Vertedero PKW 2 unidades en funcionamiento ($Q = 33$ L/s)</i>	<i>109</i>
<i>Fotografía N° 40.- Tirante: 0.17m para los Modelos 1. Vertederos Creager $Q = 16$ L/s (izquierda) y PKW $Q = 40$ L/s (derecha)</i>	<i>118</i>
<i>Fotografía N° 41.- Caudal: 89 L/s para los Modelos 2. Vertederos Creager $H_u = 0.21\text{m}$ (izquierda) y PKW $H_u = 0.149\text{m}$ (derecha).....</i>	<i>119</i>
<i>Fotografía N° 42.- Interferencia de láminas para $\zeta \approx 0$ (PKW 2 unidades $Q = 10$ L/s)</i>	<i>132</i>
<i>Fotografía N° 43.- Interferencia de láminas para $\zeta \approx 0.63$ (PKW 2 unidades $Q = 37$ L/s)</i>	<i>133</i>
<i>Fotografía N° 44.- Sumersión local en el Modelo 2 ($\zeta \approx 1.04$ para $Q = 62$ L/s)</i>	<i>133</i>
<i>Fotografía N° 45.- Sumersión total en el Modelo 2 ($\zeta \approx 1.46$ para $Q = 88$ L/s)</i>	<i>134</i>
<i>Fotografía N° 46.- Flujo vertido en el Modelo piloto ($Q = 8\text{L/s}$).....</i>	<i>135</i>
<i>Fotografía N° 47.- Flujo vertido en el Modelo piloto ($Q = 75$ L/s).....</i>	<i>135</i>

CAPITULO I GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

Existen metodologías de diseño para los diferentes ciclos y para la configuración del propio canal de aproximación (dependiendo de la dirección que el aliviadero posea), de las cuales podemos destacar la investigación titulada “Aliviaderos tipo laberinto y en tecla de piano” del autor Carlos Granell Ninot, que propone un diseño y parámetros que garanticen el similar funcionamiento del modelo a escala con uno real, aplicado en ciclos de forma trapezoidal.

La tesis titulada “Estudio de la influencia de aproximaciones hidrodinámicas a los ápices de aliviaderos en laberinto, en su coeficiente de descarga” realizada en el año 2013 por Fabián Esteban Erices Sepúlveda, en la cual parte de un diseño ya propuesto, cambiando la configuración propia del canal de aproximación aguas arriba con la finalidad de comparar el comportamiento del caudal.

También se toma como referencia la tesis en Caracas titulada “Análisis de los Vertederos tipo laberinto en aliviaderos como alterativa para incrementar las capacidades útiles en embalses” cuyos autores Isaías Barnola Bustamante y Luis García Kabbabe, evaluaron y compararon los vertederos tipo laberinto con aliviaderos convencionales para aumentar la capacidad útil y reducir costos.

1.2. Introducción

Desde tiempos remotos la humanidad contaba con innumerables necesidades y a medida que la civilización se volvía más numerosa y sofisticada, éstas aumentaban. Con el fin de suplirlas se fueron creando diversas tecnologías, que aplicadas a un rubro específico lograban crear mejores condiciones para la población.

El agua como fuente vital tanto para seres humanos como para plantas y animales es hasta la actualidad una necesidad de jerarquía primaria. Por ende la captación, conducción, almacenamiento, distribución, utilización y tratamiento posterior son procesos que deben tener la mayor calidad y efectividad posible. Los primeros grupos humanos utilizaron como punto de captación los ríos, de allí que los asentamientos por lo general eran aledaños a estos.

Hace más de 5 000 años aparecieron las primeras técnicas de embalse de agua tanto para uso doméstico como agrícola (muchas de éstas usadas aún en la actualidad e inspiradas en lo que se conoce como presas naturales). Conforme el tiempo avanzó las civilizaciones se fueron acentuando en diversos territorios y construyeron diferentes sistemas para el uso del agua; sistemas conformados por presas, canales, vertederos, entre otras estructuras hidráulicas. Los vertederos nacen con la finalidad de servir como desfogue del agua de presas ya sea como necesidad de la población a la que abastece o en su defecto cuando la presa se encuentra en un nivel máximo operacional.

Hoy en día, los cambios climáticos varían las condiciones para las cuales fue diseñada la presa y esto genera un comportamiento ineficiente del vertedero. Bajo estos términos se propone la solución del vertedero tipo tecla de piano debido a su composición en ciclos, es decir, a poseer una configuración dentada logrando una mayor longitud efectiva para la evacuación del agua. La estructura del vertedero en términos geométricos puede ser alterada e implementada para lograr un mayor control de caudal vertido dependiendo no solo de las condiciones hidrológicas sino también de las características propias del canal.

1.3. Objetivos

1.3.1. *Objetivo principal*

Evaluar el comportamiento de los diferentes ciclos rectangulares en vertederos tipo tecla de piano, experimentando con diversos parámetros en éstos y estableciendo condiciones de caudal, dirección y estructuras aguas abajo, para encontrar el más eficiente en términos hidráulicos.

1.3.2. *Objetivos específicos*

- Analizar las metodologías para el diseño hidráulico de vertederos tipo tecla de piano, haciendo una comparación de sus diferencias.
- Realizar ensayos experimentales en un modelo físico a escala, utilizando características similares.
- Analizar la viabilidad de la clase de vertedero tipo tecla de piano según los parámetros hallados en los resultados.
- Experimentar con la geometría de los vertederos, el número de ciclos, entre otras disposiciones con la finalidad de comparar las diferencias que se pueden generar debido a estas variaciones.

1.4. Estructura y contenido general

- En el *Capítulo 1* (actual), se presenta la parte introductoria, el objetivo general y los objetivos específicos.
- En el *Capítulo 2*, se incluye información general relacionada a los vertederos tradicionales en presas, sus elementos y las fórmulas más comunes para determinar el coeficiente de descarga.
- En el *Capítulo 3*, está presente la descripción de los vertederos en tecla de piano como sus partes, funcionamiento hidráulico y aplicaciones.
- En el *Capítulo 4*, se menciona la metodología aplicada. También los parámetros, el procedimiento y las ecuaciones de diseño; como la descripción del canal y la construcción y montaje de las estructuras necesarias para los ensayos.
- En el *Capítulo 5*, está contemplado el modelamiento de los vertederos tipo tecla de piano; desde los equipos utilizados para la toma de datos, el procesamiento de datos, la obtención de tablas y gráficos y las consideraciones finales para el diseño.
- En el *Capítulo 6*, se establecen las conclusiones y recomendaciones obtenidas por el presente estudio.

CAPITULO II

VERTEDEROS EN PRESAS

2.1. Vertederos

Un vertedero es una estructura hidráulica que sirve para desfogar el agua situada por encima de la capacidad del almacenamiento previo y así evitar la fractura y en el peor de los casos la rotura de las mismas. Este fenómeno puede suceder tanto por una considerable alteración en la hidrología de la cuenca, debido a cambios climáticos, o por un cálculo erróneo en el caudal de diseño.

Es de suma importancia tener en cuenta el procedimiento de cálculo del caudal para una obra hidráulica; partiendo desde la veracidad de los datos iniciales hasta la comprobación de las herramientas de predicción de los datos a futuro asimismo analizar estadísticamente cuál de ellos posee una mayor aproximación a la curva de datos de entrada para la posterior elección del más óptimo. Seguidamente y de acuerdo a los requerimientos de la construcción será necesario plantear la situación más crítica para un periodo de retorno específico (en base a la vida esperada y al riesgo de falla de la estructura).

El diseño deberá garantizar el mejor funcionamiento del sistema es por esto que tanto hidráulica como estructuralmente la presa y el vertedero deberán presentar gran eficacia y sustento ya que el comportamiento del agua será variable a través de los mismos. Las velocidades del flujo aumentarán considerablemente mientras se esté más cerca del pie de la presa por ello en la mayoría de los casos será necesario considerar disipadores de energía para evitar cualquier clase de erosión.

La geometría de un vertedero es totalmente variable para cada situación, debido a que los diferentes tipos de vertederos recolectados y presentados más adelante se adaptarán y desempeñarán la función básica del vertedero; garantizando el funcionamiento de la presa. Aunque cabe resaltar que es de gran dificultad caracterizar el comportamiento hidráulico en proyectos de gran envergadura es por ello que se requiere estudios en modelos a escala para conocer a fondo las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

2.2. Elementos de un vertedero

2.2.1. Cresta

Parte superior del vertedero que va a lo largo de toda su longitud, es el punto donde inicia el vertido del fluido.

2.2.2. Flujo (Q)

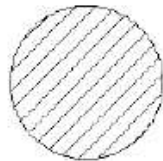
Se define al flujo como un fluido que está en movimiento y que depende de variables como por ejemplo: la densidad, gravedad, presión y velocidad; esta última genera líneas de corriente para determinados puntos en el espacio.

2.2.2.1. Flujo en conductos cerrados y abiertos

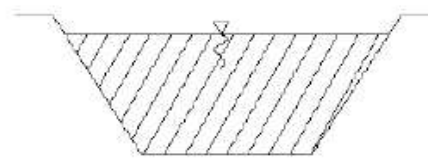
Bajo estas consideraciones se tiene flujos a presión y a presión atmosférica (Figura N° 1).

Figura N° 1.- Flujo Cerrados y Abiertos

Flujo en Tuberías
(Flujos a Presión)

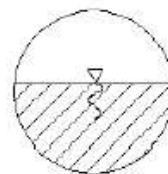


Flujo en Canales
(Flujos a Presión Atmosférica)



Flujo a Presión Atmosférica

Flujo en Alcantarillas



Fuente: (Llanque Quispe, 2012)

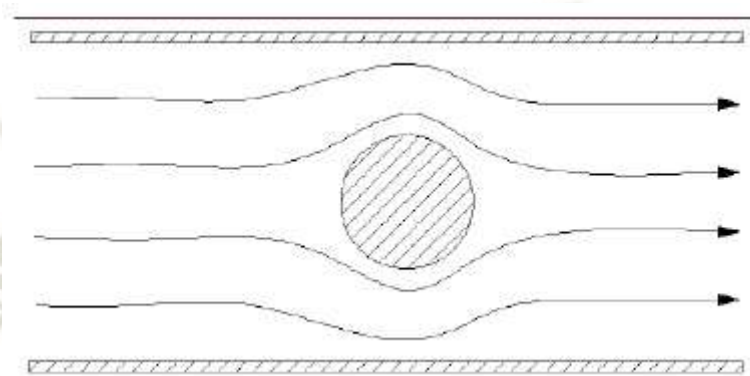
2.2.2.2. Flujo unidimensional, bidimensional y tridimensional

Para realizar una idealización del flujo unidimensional es necesaria una sección transversal en la cual se consideran los promedios de

todas las características del fluido. Es bajo este régimen que se diseñan tuberías, canales, etc.

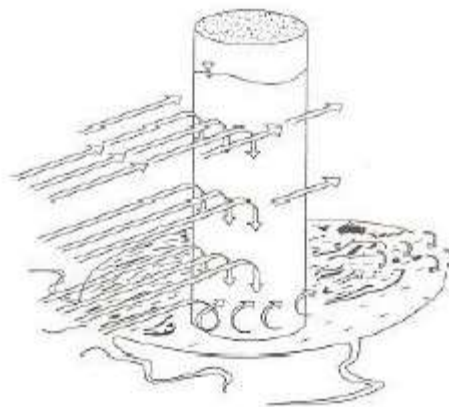
El flujo bidimensional (Figura N° 2) y tridimensional (Figura N° 3) son más utilizados para conocer la distribución de velocidades en las diversas obras hidráulicas.

Figura N° 2.- Flujo bidimensional



Fuente: (Noguez Becerril, 1960)

Figura N° 3.- Flujo tridimensional



Fuente: (Rocha Felices, 1998)

2.2.2.3. Flujo permanente y no permanente

Un flujo permanente se da cuando todos sus elementos permanecen o pueden suponerse constantes con respecto al tiempo.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial A}{\partial t} = 0; \quad \text{etc.}$$

Un flujo no permanente se da cuando sus elementos varían con respecto al tiempo.

$$\frac{\partial y}{\partial t} \neq 0; \quad \frac{\partial v}{\partial t} \neq 0; \quad \frac{\partial A}{\partial t} \neq 0; \quad etc.$$

2.2.2.4. Flujo uniforme y variado

En un flujo uniforme se mantienen constantes los parámetros con respecto al espacio.

$$\frac{\partial y}{\partial L} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial L} = 0; \quad \frac{\partial A}{\partial L} = 0; \quad etc.$$

En un flujo variado o no uniforme, no se mantienen constantes los parámetros con respecto al espacio. A su vez se puede clasificar en flujo gradualmente variado y flujo rápidamente variado.

$$\frac{\partial y}{\partial L} \neq 0; \quad \frac{\partial v}{\partial L} \neq 0; \quad \frac{\partial A}{\partial L} \neq 0; \quad etc.$$

2.2.2.5. Flujo laminar y turbulento

Para describir el comportamiento del flujo es necesario considerar la viscosidad en relación a las fuerzas de inercia del flujo. El número de Reynolds (R_e) es utilizado para medir esta relación y caracterizar al flujo, teniendo que:

$$R_e = \frac{VR}{\nu}$$

Siendo:

R = radio hidráulico de la sección transversal (m)

V = velocidad media (m/s)

ν = viscosidad cinemática del agua (m^2/s)

En el caso de un canal de acuerdo a R_e se clasifica:

- Para $R_e < 580$, se consideran las fuerzas viscosas como predominantes al tener mayor magnitud que las fuerzas de inercia, se denomina flujo laminar.
- Para $580 \leq R_e \leq 750$, se conoce como flujo de transición.
- Para $R_e > 750$, se consideran las fuerzas de inercia como predominantes ya que las fuerzas viscosas son débiles en comparación a ellas, se denomina flujo turbulento.

2.2.2.6. Flujo subcrítico, crítico y supercrítico

Para describir el comportamiento del flujo es necesario considerar también la gravedad en relación a las fuerzas de inercia del flujo. El número de Froude (F) es utilizado para medir esta relación y caracterizar al flujo, teniendo que:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gy_m}}$$

Siendo:

V = velocidad media de la sección (m/s)

g = aceleración de la gravedad (m/s^2)

y_m = tirante medio o profundidad media (m), donde:

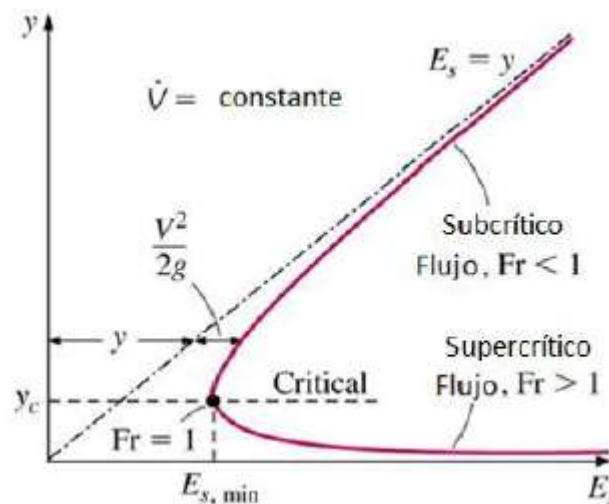
$$y_m = A/T$$

De acuerdo al número de Froude se tiene:

- Para $F < 1$, las fuerzas de gravedad son mayores que las fuerzas de inercia, esto se ve reflejado en la baja velocidad del flujo por lo que cualquier interferencia en el fluido tiene influencia aguas arriba, se denomina flujo subcrítico.
- Para $F = 1$, las fuerzas de gravedad e inercia se mantienen en equilibrio, se denomina flujo crítico.
- Para $F > 1$, las fuerzas de inercia son más elevadas por lo que el flujo adopta un estado torrencioso debido a las altas velocidades es por esto que cualquier interferencia en el fluido

tendrá influencia aguas abajo, se denomina flujo supercrítico (Figura N° 4).

Figura N° 4.- Flujo subcrítico, crítico y supercrítico



Fuente: (Llanque Quispe, 2012)

2.2.3. Altura del vertedero (P)

Considera la distancia vertical de la pared del vertedero siendo la zona en donde se acumula el fluido.

2.2.4. Ancho del vertedero (W)

Es la distancia en la que el vertedero se encuentra inmerso. En la Figura N° 5 se puede apreciar que el vertedero se encuentra en un canal de ancho "W".

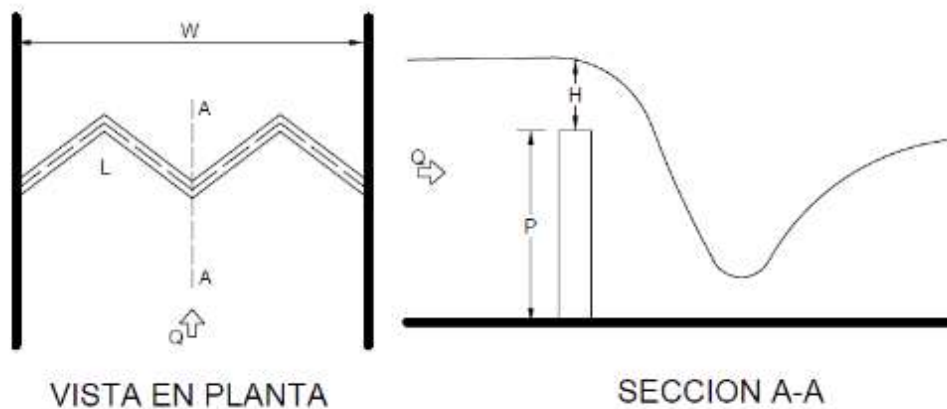
2.2.5. Longitud del vertedero (L)

También conocida como longitud efectiva, es el recorrido por el cual se vierte el fluido. En la Figura N° 5 está representada por una línea discontinua. En vertederos de cresta recta la longitud (L) y el ancho (W) del vertedero son iguales.

2.2.6. Altura de carga (H)

Espesor del chorro que transcurre por encima de la cresta del vertedero, es considerado como uno de los parámetros de diseño y análisis más importantes del vertedero.

Figura N° 5.- Elementos de un vertedero



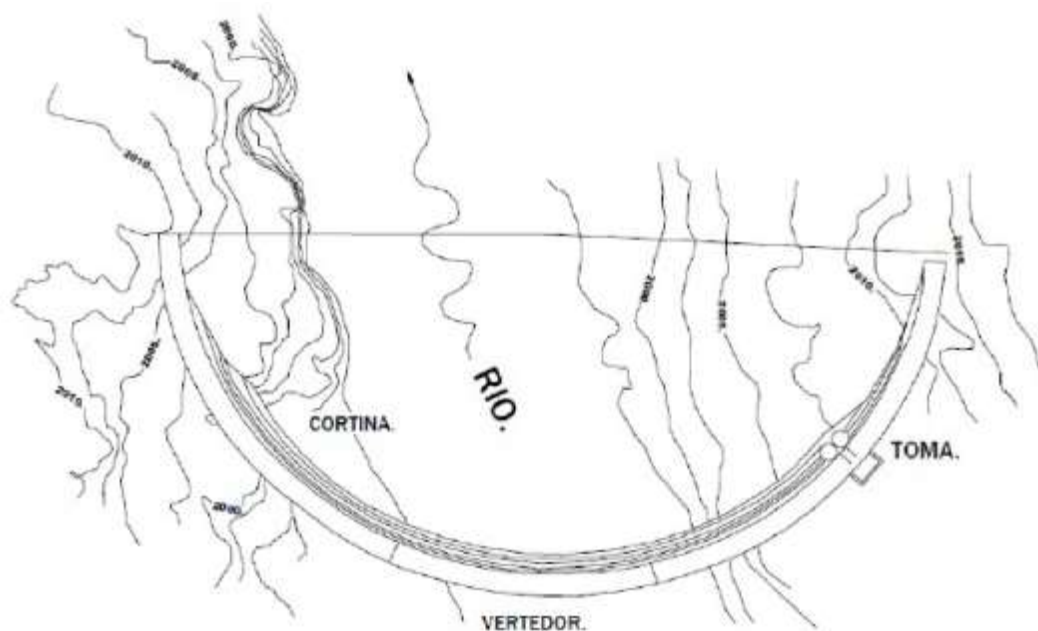
Fuente: Elaboración propia

2.3. Tipos de vertederos

2.3.1. Vertederos de caída libre

Estos vertederos están asociados a cortinas de arco o de contrafuertes, donde el espesor de concreto y la geometría general no sean favorables para guiar la vena líquida desde la cresta hasta la parte inferior; si la roca de cimentación es resistente a la erosión, el agua se puede dejar caer libremente sin protección; pero en caso contrario se debe prever alguna y así amortiguar el impacto (Llanque Quispe, 2012).

Figura N° 6.- Vista en planta de un vertedero de caída libre



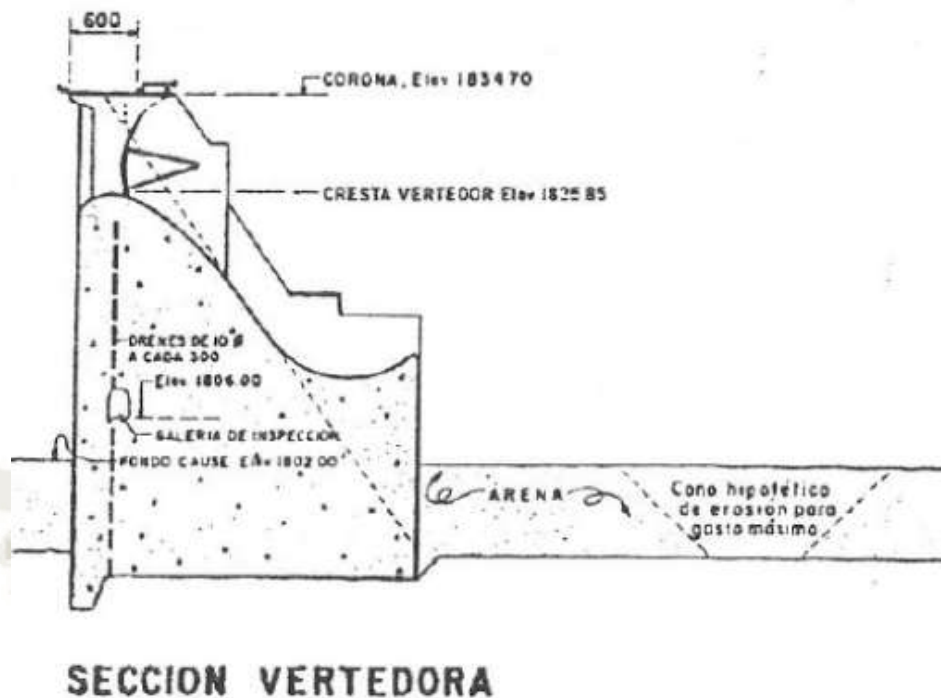
Fuente: (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966)

2.3.2. Cortinas vertedoras con caída rápida

Este tipo de vertedores se localiza en una sección reducida de una cortina de tipo gravedad, sobre la cual se permite el paso del flujo de agua.

La cresta se forma para justarse a la vena líquida, en las condiciones de gasto máximo. Si la roca de cimentación es compacta y de buena calidad, la parte inferior de la descarga se puede diseñar como un deflector o salto de esquí pero si la cimentación es erosionable se requerirá la construcción de un tanque dissipador de energía (Llanque Quispe, 2012).

Figura N° 7.- Cortinas vertedoras con caída rápida



Fuente: (Torres Herrera, 1987)

2.3.3. *Vertederos con tiro vertical*

Los vertederos con descarga en tiro vertical tienen una entrada en embudo que conecta a un túnel, en cuyo extremo inferior puede existir un deflector o una estructura disipadora de energía. Esta forma de vertedero se adaptará a presas con base de almacenamiento muy encañonado, gastos relativamente pequeños y en que el agua que fluya a través de ellos esté libre de objetos que puedan obstruirlos (Llanque Quispe, 2012).

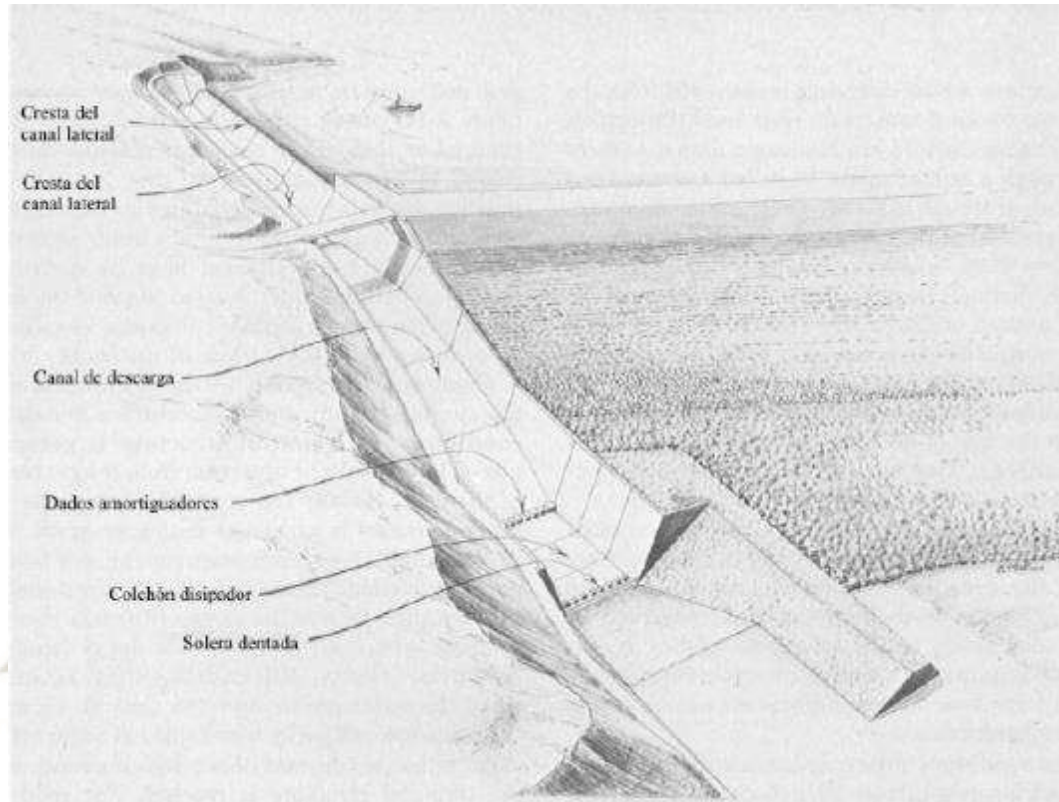
2.3.4. *Vertedero con canal lateral*

Estos vertederos se caracterizan porque el vertedero de control forma un cimacio cuya cresta es paralela al tramo inicial del conducto de descarga, tomando el nombre de Capa Colectora. El agua que se vierte sobre la cresta cae a un conducto angosto opuesto al de descarga principal.

Las descargas de los canales pueden conducirse directamente a un canal de descarga abierto, a un conducto cerrado o a un túnel inclinado. El agua

puede entrar en el canal lateral por un lado del conducto en el caso que esté colocado en una ladera empinada, o por ambos lados si está ubicado en la cumbre de una loma (Llanque Quispe, 2012).

Figura N° 8.- Esquema de una captación con vertedero lateral



Fuente: (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966)

Las características de descarga de un vertedor lateral son semejantes a los vertederos frontales ordinarios ya que dependen del perfil de la cresta. Sin embargo, cuando se presenta una avenida máxima el funcionamiento hidráulico puede variar debido a que su cresta generalmente quedara ahogada y su circulación estará en un estado restringido.

Figura N° 9.- Vertedero de la presa de los Alfилorios



Fuente: (Miguel Angel, 2007)

2.3.5. Vertederos de cimacio

Este tipo de vertederos están constituidos por dos secciones limitadas por la cresta vertedora; aguas arriba y aguas debajo de la cresta. Su eficiencia radica en la configuración de las mismas debido a la aproximación que tienen con la superficie inferior de la lámina que se produce en un vertedero de pared delgada; la forma que adoptan ambas secciones depende directamente de la inclinación del paramento y de la carga hidráulica.

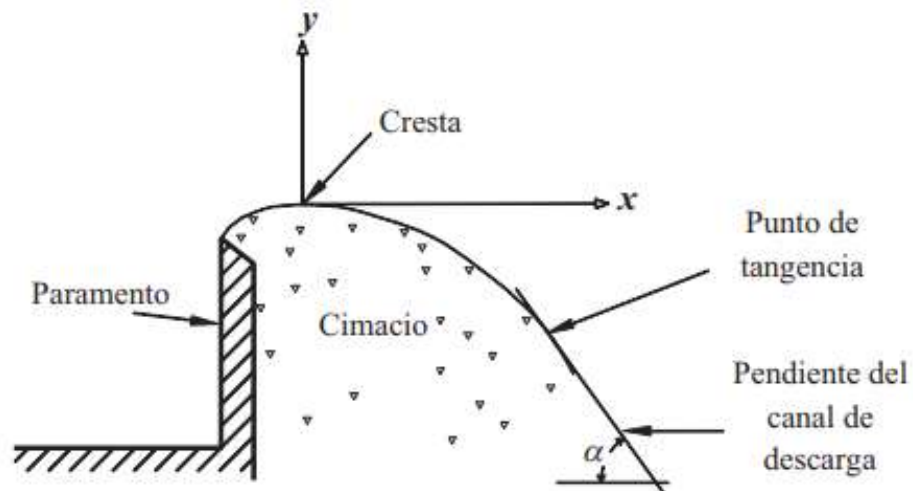
El perfil aguas arriba de la cresta se puede obtener mediante un método semigráfico, el cual consiste en dos curvas tangentes entre si y tangentes a la cresta del cimacio. Mientras que el perfil aguas abajo de la cresta inicia desde el origen de coordenadas (eje de la cresta) hasta un punto donde se une con el canal de salida con pendiente constante, está trayectoria está definida por la ecuación: (Victory, 2011)

$$y = -kH_o \left(\frac{x}{H_o} \right)^n$$

Donde:

- k y n son constantes adimensionales que dependen del criterio a emplear.
- x y y son las coordenadas del perfil mostrados en la Figura N° 9.

Figura N° 10.- Vertedero de cimacio



Fuente: (Victory, 2011)

2.3.6. Vertederos en rápida

Este tipo de vertederos es utilizado en presas de tierra con más frecuencia que en las de otro tipo. Para elegir este tipo de vertedero es considerada la sencillez de su proyecto y construcción, su adaptabilidad a cualquier tipo de cimentación y la gran economía que se puede obtener empleando los productos de excavación del vertedero para el terraplén de la presa.

El tipo más sencillo posee un eje recto y un ancho uniforme; con mayor frecuencia se componen de:

- Canal de entrada.
- Estructura de control.
- Canal de descarga.
- Estructura terminal.
- Canal de desagüe.

También son conocidos como rápidas, canal abierto o vertedero tipo canal y se han empleado satisfactoriamente en cualquier clase de cimientos desde rocas hasta arcillas (Llanque Quispe, 2012).

Figura N° 11.- Presa de Alqueva, Portugal



Fuente: (Ceinturion, 2007)

2.3.7. Vertederos de túnel

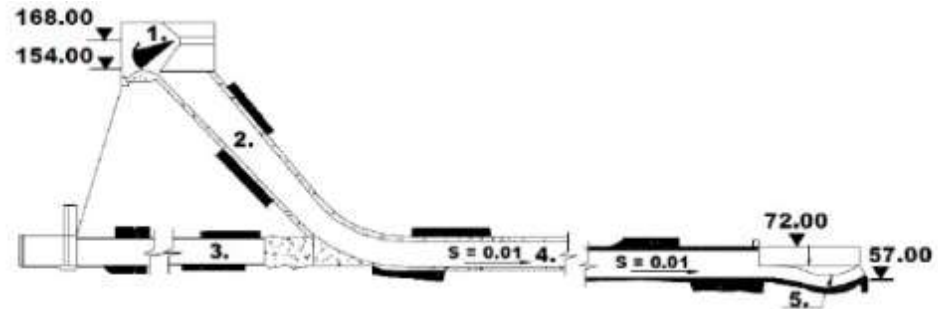
Son utilizados como solución alterna a los vertederos tipo canal, en situación de caídas grandes en la que el caudal se reparte en un número determinado de túneles, los cuales descargan el fluido a una altura en la que se evite el ahogamiento es por ello que las características de mayor importancia son las geológicas y topográficas con la finalidad de evitar erosiones importantes en la zona de la caída del chorro. A su vez es de suma importancia analizar las velocidades del fluido para evitar dañar el revestimiento del túnel (Llanque Quispe, 2012).

Elementos del vertedero:

- Estructura de control.
- Túnel de transición.
- Túnel de desvío.
- Sección de control.
- Conducto de descarga.

- Cubeta salto de esquí.

Figura N° 12.- Vertedero en túnel



Fuente: (Sanchez Bribiesca, 1997)

2.3.8. Vertederos en sifón

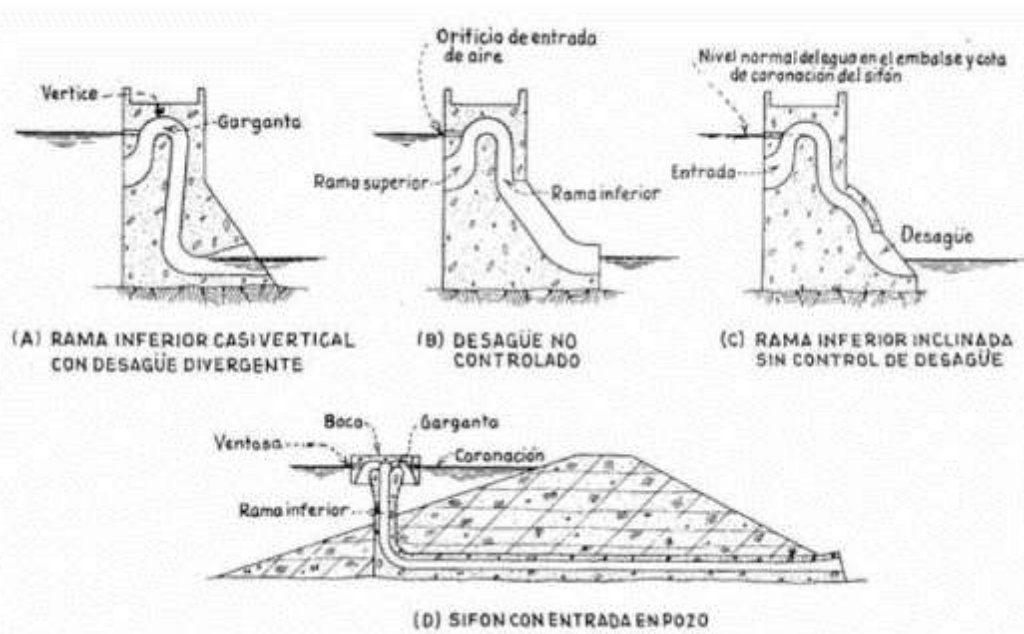
Son sistemas de conductos cerrados en tal posición que el interior de la curva del pasaje superior tenga la altura del nivel normal de almacenamiento en el vaso. Las descargas iniciales al subir el nivel del vaso arriba de lo normal adoptan un funcionamiento como sifón.

Componentes:

- Canal de entrada.
- Rama superior.
- Garganta o control.
- Rama inferior.
- Canal de salida.

La ventaja principal de este tipo de vertederos es su calidad para dar paso a la descarga de toda su capacidad dentro de estrechos límites de aumento en la carga. A su vez tiene una operación efectiva y automática (Llanque Quispe, 2012).

Figura N° 13.- Vertederos tipo sifón



Fuente: (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966)

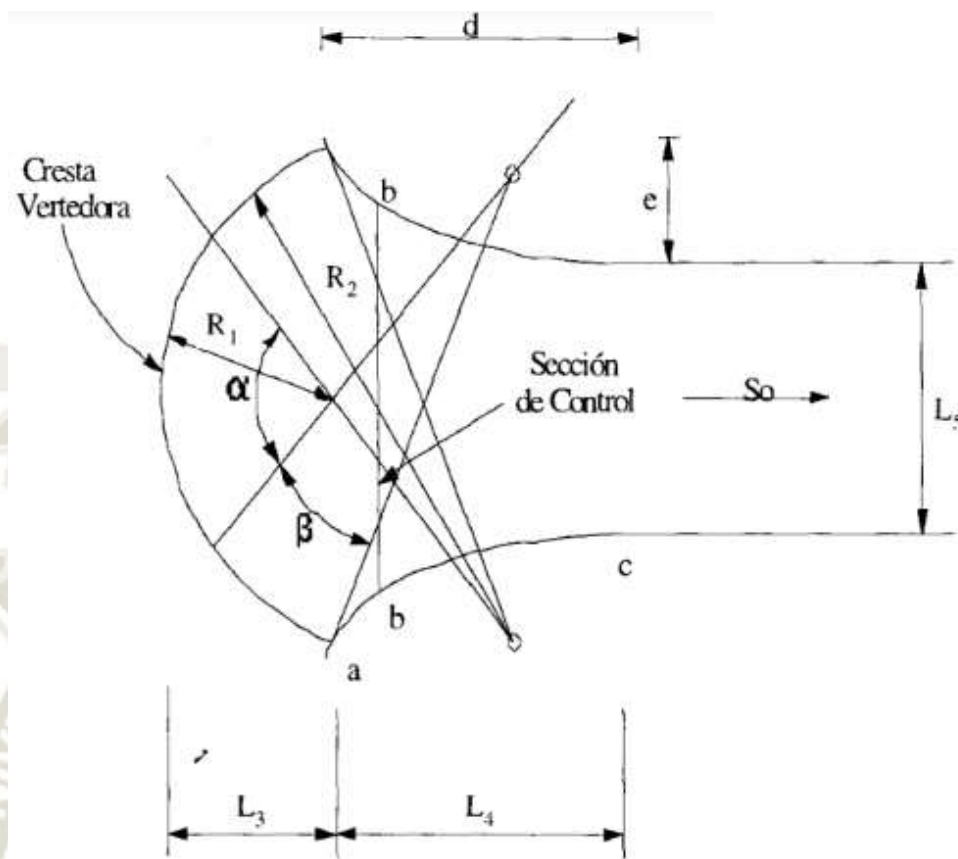
2.3.9. Vertederos en abanico

Un vertedero en abanico es una estructura hidráulica conformada por un cimacio que sigue la forma de una curva cóncava en relación a la dirección media del escurrimiento, el cual descarga a un tanque diseñado para geométricamente para generar un resalto al pie del cimacio (Llanque Quispe, 2012).

Componentes:

- Canal de entrada
- Cimacio
- Colchón
- Sección de control
- Transición
- Canal de salida
- Disipadores de energía

Figura N° 14.- Geometría de un vertedero en abanico



Fuente: (Arreguín Cortés, 2000)

Donde:

L_1 Longitud de la cresta.

R_1 Radio del arco central de la cresta.

α Ángulo total del arco central.

R_2 Radio de las áreas laterales de la cresta.

β Ángulo de los arcos laterales.

L_2 Ancho de la sección de control b-b.

L_3 Distancia de la cresta a la sección de control a lo largo del eje longitudinal.

L_4 Distancia de la sección de control al final de la transición.

L_5 Ancho del canal de descarga.

S_0 Pendiente inicial de la rápida, en la zona de transición.

H Carga máxima sobre la cresta vertedora.

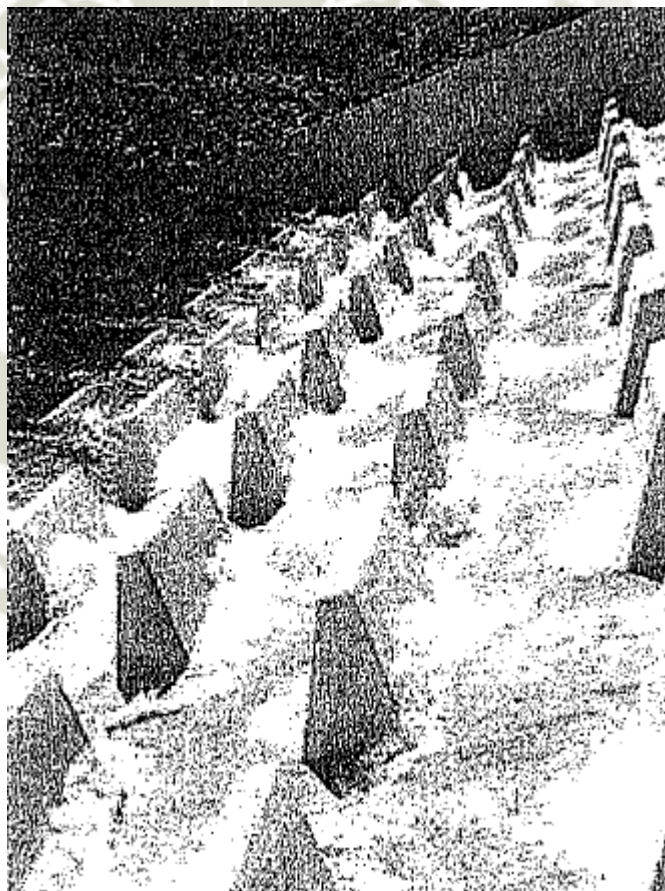
h Altura del cimacio.

2.3.10. Vertederos dentados

Los aliviaderos dentados se utilizan en donde el agua debe de ser bajada de un nivel a otro, y donde no se recomienda un cuenco amortiguador. El dentado obstruye el flujo con la finalidad de disipar la energía para lograr reducir las velocidades significativamente.

Esta clase de vertedero tiene un costo bajo en relación a otros y las velocidades pequeñas se generan independientemente de la diferencia de cotas (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966).

Figura N° 15.- Vertedero dentado en la presa de Conconully, Washington



Fuente: (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966)

2.3.11. Vertederos circulares o “morning glory”

Para este caso la toma de agua se encuentra situada horizontalmente, desde allí el agua cae hacia un pozo casi vertical hasta una conducción horizontal que se encarga de llevar el agua hasta aguas abajo del cauce

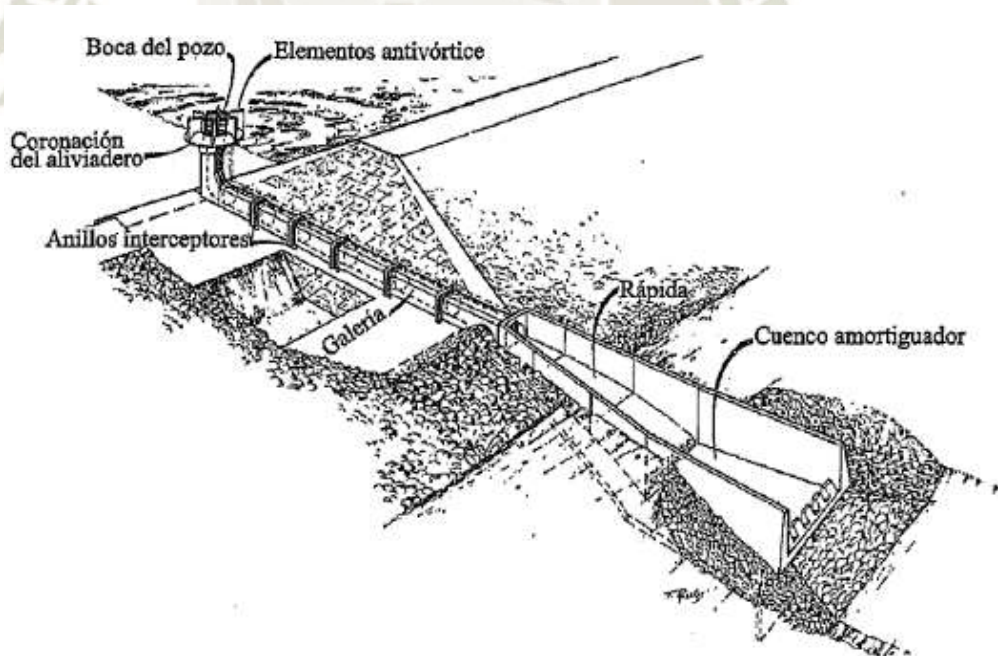
del río. Cuando la entrada es en forma de cráter adopta el nombre de vertedero circular o vertedero-pozo.

Componentes:

- Vertedero de control.
- Una transición vertical.
- Conducto cerrado de desagüe.

Se recomienda usar este tipo de vertederos en desfiladeros muy angostos o cuando se puede aprovechar un túnel o conducto de desviación del cauce. Para limitar el máximo caudal desaguado, estos vertederos son idóneos debido a que llegan a alcanzar la máxima capacidad de desagüe con cargas de agua relativamente bajas (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966).

Figura N° 16.- Componentes de vertedero en pozo



Fuente: (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966)

2.3.12. Vertederos tipo laberinto

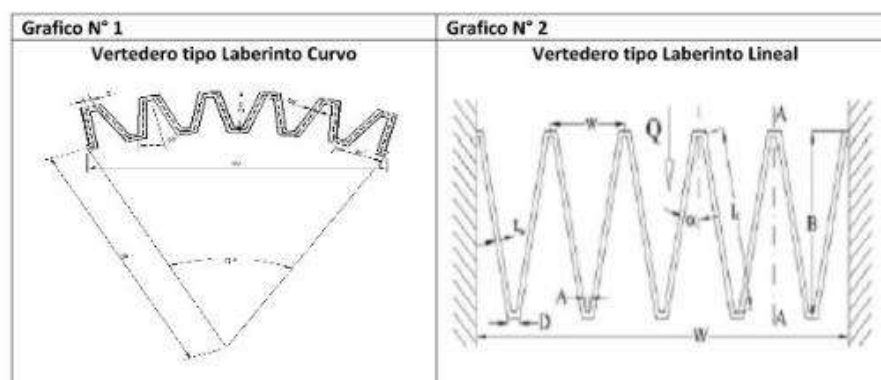
La finalidad principal de estos vertederos es añadir la longitud efectiva de vertido de la coronación para un ancho de canal determinado y lograr

reducir el espesor de la lámina vertiente bajo condiciones ya determinadas previamente.

Este modelo de vertedero tiene una gran gama de aplicaciones y ventajas. Pueden ser utilizados en cualquier lugar en donde se necesite un elemento de desagüe que dependa de las condiciones del lugar.

El comportamiento del caudal en un vertedero tipo laberinto es muy complicado ya que depende de diversos parámetros que afectan el flujo y por lo tanto el comportamiento del vertedero (BUREAU OF RECLAMATION & Elgin Dominy, 1966).

Figura N° 17.- Vista en planta de un vertedero tipo laberinto



Fuente: (Meave Silva & Torrez Mejia, 2016)

2.4. Estimación del coeficiente de descarga

Se presentan las fórmulas más utilizadas en el sistema métrico para vertederos de pared delgada.

2.4.1. Fórmula de Francis

Sin considerar la velocidad de llegada:

$$Q = 1.84LH^{3/2}$$

Considerando la velocidad de llegada:

$$Q = 1.84LH^{3/2} \left\{ 1 + 0.2 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right\}$$

Consideraciones para su aplicación:

$$0.18m \leq H \leq 0.50m$$

$$2.40m \leq L \leq 3.00m$$

$$0.60m \leq P \leq 1.50m$$

$$L \geq 3H$$

2.4.2. Fórmula de Bazin

Sin considerar la velocidad de llegada:

$$Q = C_o \sqrt{2g} LH^{3/2}$$

$$C_o = \left\{ 0.405 + \frac{0.0027}{H} \right\} \left\{ 1 + 0.551 \left(\frac{H}{H+P} \right)^2 \right\}$$

Considerando la velocidad de llegada:

$$Q = \left(1.794 + \frac{0.0133}{H} \right) \left[1 + 0.55 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right] LH^{3/2}$$

Consideraciones para su aplicación:

$$0.10m \leq H \leq 0.60m$$

$$0.50m \leq L \leq 2.00m$$

$$0.20m \leq P \leq 2.00m$$

2.4.3. Fórmula de Kindsvater y Carter

Considerando la velocidad de llegada:

$$Q = C_e \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_e H_e^{3/2}$$

Para vertederos rectangulares sin contracción delgada:

$$C_e = 0.602 + 0.075 \frac{H}{P}$$

$$L_e = L - 0.001$$

$$H_e = H + 0.001$$

Consideraciones para su aplicación:

No se indica.

2.4.4. Fórmula de Rehbock

Sin considerar la velocidad de llegada:

$$Q = C_o \frac{2}{3} \sqrt{2g} LH^{3/2}$$

$$C_o = \left(0.6035 + 0.0813 \frac{H}{P} + \frac{0.00009}{P} \right) \left(1 + \frac{0.0011}{H} \right)^{3/2}$$

Considerando la velocidad de llegada:

$$Q = \left(1.787 + 0.236 \frac{H}{P} \right) LH^{3/2}$$

Consideraciones para su aplicación:

$$0.03m \leq H \leq 0.60m$$

$$0.30m \leq L$$

$$0.10m \leq P$$

2.4.5. Fórmula de King

Sin considerar la velocidad de llegada:

$$Q = 1.84LH^{1.47}$$

Considerando la velocidad de llegada:

$$Q = 1.78LH^{1.47} \left\{ 1 + 0.56 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right\}$$

Consideraciones para su aplicación:

No se indica.

2.4.6. Fórmula de la sociedad suiza de ingenieros y arquitectos

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_o L H^{3/2} = 2.953 C_o L H^{3/2}$$

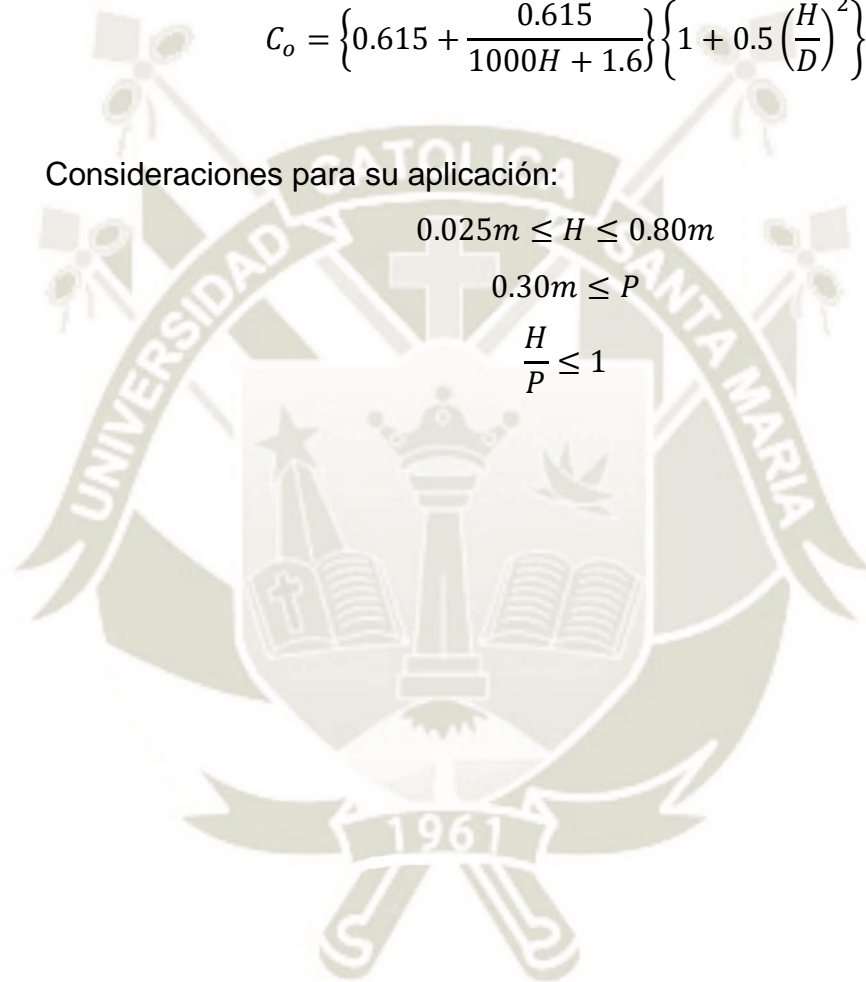
$$C_o = \left\{ 0.615 + \frac{0.615}{1000H + 1.6} \right\} \left\{ 1 + 0.5 \left(\frac{H}{D} \right)^2 \right\}$$

Consideraciones para su aplicación:

$$0.025m \leq H \leq 0.80m$$

$$0.30m \leq P$$

$$\frac{H}{P} \leq 1$$



CAPITULO III

VERTEDERO TIPO TECLA DE PIANO

Un vertedero tipo tecla de piano posee una configuración en forma de zigzag, la cual se asemeja bastante a los vertederos tipo laberinto, teniendo como principales diferencias a los voladizos que pueden estar ubicados tanto en las teclas de entrada como en las de salida y adoptar diversas geometrías, además de poseer en la mayoría de los casos un fondo inclinado desde la base hasta la cresta del vertedero.

El vertedero en tecla de piano está constituido por uno o más ciclos, denominados así por su peculiar geometría la cual asemeja a una onda, este tipo de vertedero fue estudiado por HydroCoop y desarrollado por Lempérière y Ouamane. Se originó a partir del vertedero tipo laberinto con la finalidad de poder ubicarlo más fácilmente en las crestas de la presa y mejorar el comportamiento hidráulico. Los modelos experimentales demostraron que los vertederos tipo tecla de piano pueden llegar a ser hasta cuatro veces más eficientes que un vertedero tradicional; dependiendo de los parámetros del vertedero. En la actualidad el diseño hidráulico está basado en el conocimiento experimental, modelos recomendados y una serie de rango de valores para los factores adimensionales tales como W_i/W_o , B_i/B_o , P_i/P_o y T_s/P .

Por otro lado, es indispensable tener en consideración las condiciones previas del proyecto ya que esto determinará muchas de las variables que serán necesarias evaluar e identificar a la hora de realizar la elaboración de estos vertederos.

3.1. Clasificación de los vertederos tipo tecla de piano

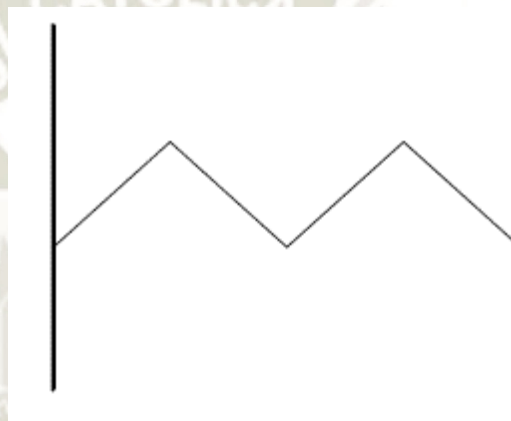
Los vertederos tipo tecla de piano proceden de los vertederos tipo laberinto, los cuales fueron modificados en geometría logrando mejorar las condiciones primarias en relación al sistema de descarga, si bien existen factores que determinan los parámetros de diseño aún no se conoce a ciencia cierta cómo afectan al funcionamiento.

Uno de estos factores es el tipo de módulo por el cual estará conformado el vertedero; estos módulos deberán estar distribuidos de forma regular en el eje principal y se pueden clasificar en:

3.1.1. Triangular

Se caracterizan por poseer un ángulo determinado entre las paredes del módulo. Esto dependerá de la longitud efectiva que se quiera alcanzar y de las dimensiones del canal.

Figura N° 18.- Módulo triangular



Fuente: Elaboración Propia

3.1.2. Trapezoidal

Al igual que el modulo tipo triangular posee un ángulo entre las paredes que están unidas por ápices perpendiculares al flujo.

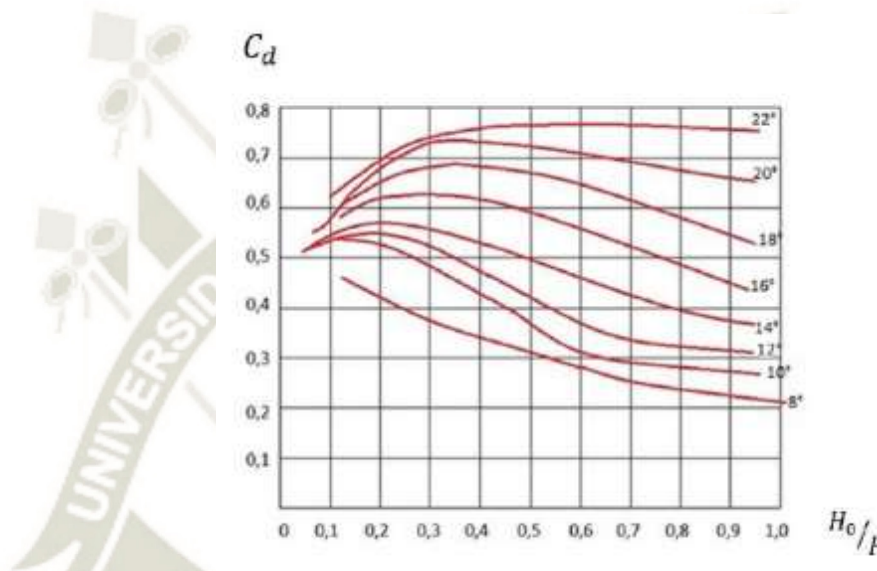
Figura N° 19.- Módulo trapezoidal



Fuente: Elaboración Propia

Este modelo fue estudiado por (Tullis & Waldron, 1995) siendo el más usado para vertederos tipo laberinto. Numerosos ensayos con diferentes ángulos entre las paredes de los módulos, concluyeron en un ábaco relacionando los coeficientes de descarga, el factor adimensional H_o/P (que relaciona la altura de carga H_o y la altura del vertedero P) y el ángulo correspondiente.

Figura N° 20.- Coeficiente de descarga para diversos ángulos del módulo trapezoidal

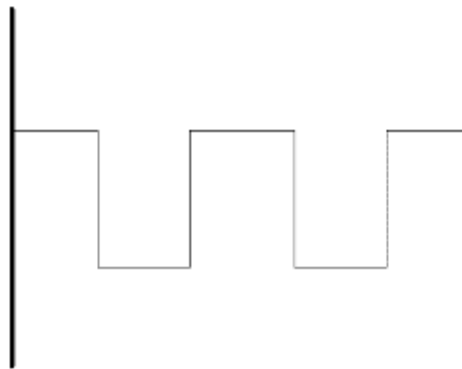


Fuente: (Tullis & Waldron, 1995)

3.1.3. Rectangular

Este caso de vertedero es el más común en lo que respecta a vertederos tipo tecla de piano. Se da cuando el ángulo que forma las paredes del módulo es de 90° creando un factor adimensional (W_i/W_o) que relaciona el ancho de los ápices de entrada y de salida. Este factor fue estudiado por Lempérière y Jun (2005) y Barcouda et al. (2006) proponiendo que el factor más óptimo era 1.2. Luego se realizaron más estudios pero la conclusión fue la misma debido a que aumentaba en un 5% la eficiencia.

Figura N° 21.- Módulo Rectangular

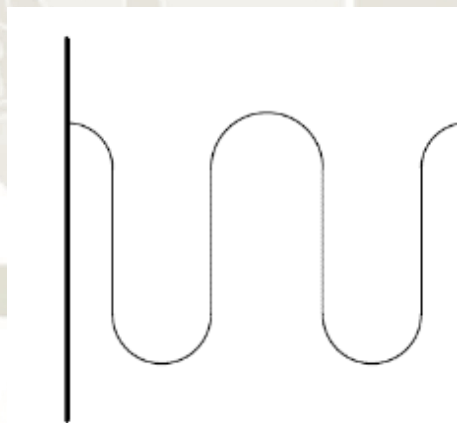


Fuente: Elaboración Propia

3.1.4. Circular

Se caracterizan por tener las paredes del módulo paralelas a la dirección de flujo del canal o bien asemejarse a la geometría de un módulo tipo trapezoidal; mientras que los ápices que los conectan son semicirculares.

Figura N° 22.- Módulo circular



Fuente: Elaboración Propia

3.2. Geometría en planta

Está determinada por la dirección del eje, la cual es la orientación que permite ordenar las PKW-unidades (conocida así por ser la unidad más pequeña que posee un vertedero tipo tecla de piano; este término es traducción del término Piano Key Weir-unit).

3.2.1. Horizontal

El eje principal del vertedero es una línea recta perpendicular al sentido del flujo del canal.

Figura N° 23.- Dirección horizontal

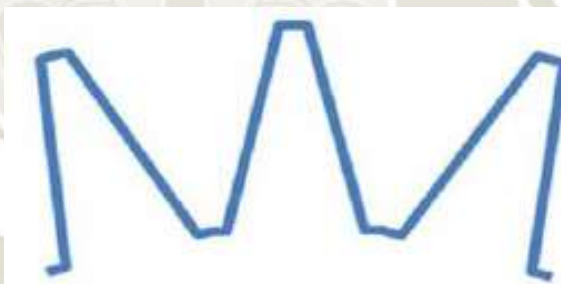


Fuente: (Delgado, 2009)

3.2.2. Circular

El eje principal del vertedero sigue la geometría de un arco, esta variación se realiza con la finalidad de ampliar la longitud del vertedero y poder incorporar más PKW-unidades.

Figura N° 24.- Dirección circular



Fuente: (Delgado, 2009)

Las direcciones mencionadas pueden ser utilizadas de acuerdo al criterio del proyectista en base a las condiciones que se presenten en la zona obedeciendo a las necesidades topográficas y si fuese el caso la menor intervención sobre el vertedero previo, es por ello que cada estructura se tiene que analizar de manera particular para obtener una mayor eficiencia del vertedero.

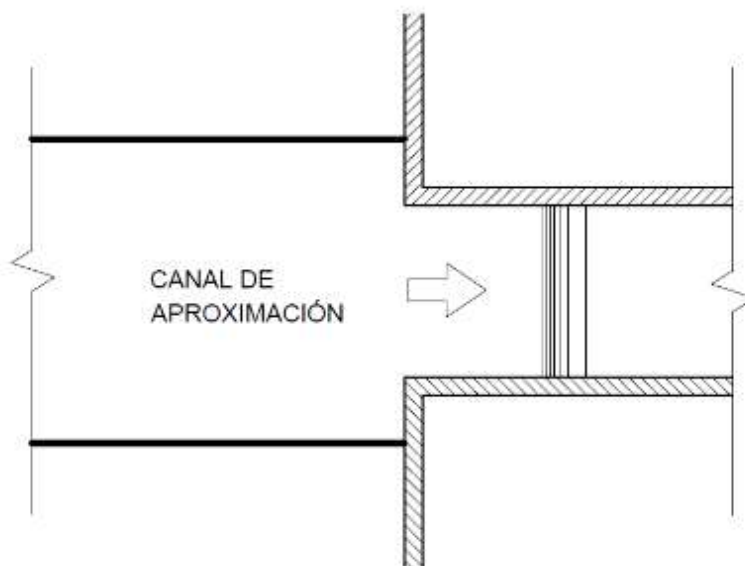
3.3. Partes del vertedero

3.3.1. Canal de aproximación

El inicio de un vertedero generalmente está dado por un canal de aproximación o canal de acceso el cual permite el ingreso del agua en dirección a la sección vertedora desde el reservorio.

Este canal debe producir la menor pérdida de carga posible, esto para generar una mayor carga hidráulica en la zona de vertimiento evitando generar turbulencias que afecten la eficiencia del vertedero. Para el diseño de esta estructura no existen parámetros que sean constantes para todos los casos, debido a que los diseños varían para cada presa y se hace muy difícil crear una tabla de datos que muestren límites o consideraciones previas para el canal. La topografía de la zona y la sección vertedora son factores determinantes para el dimensionamiento del canal.

Figura N° 25.- Canal de aproximación



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Perfiles de cresta

Los perfiles de cresta son el acabado que tienen las paredes del vertedero que están en contacto directo con el caudal circulante siendo el punto en el que el fluido concentrado aguas arriba es descargado, es por ello que su aplicación correcta es de suma importancia ya que diversos estudios

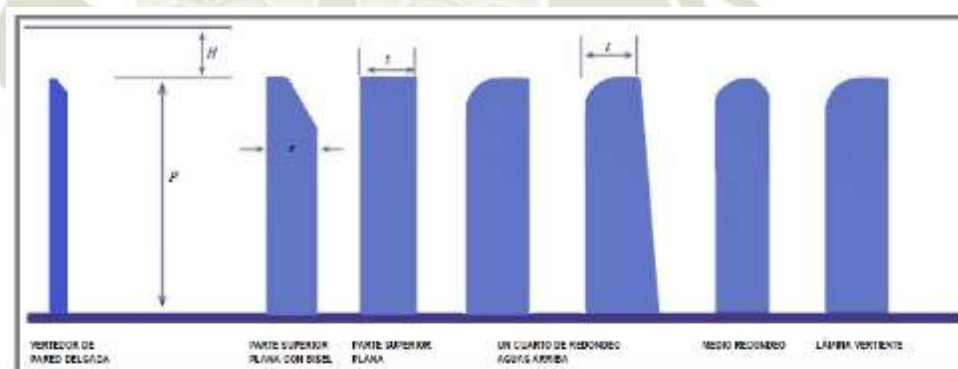
revelaron que tienen una influencia directa en la magnitud del coeficiente de descarga.

Las primeras formas de cresta fueron creadas en base a una parábola simple, ya que se adaptaba mejor a la trayectoria de una lámina vertiente. Bazin realizó experimentos para determinar las primeras consideraciones de diseño.

Los perfiles de cresta son diseñados con el ideal de mantener el nivel de aguas normales del embalse. El agua sobrante es descargada por la sección vertedora para no comprometer estructuralmente a la presa ni al vertedero; cabe resaltar que comúnmente el canal que contiene al vertedero es diseñado con un borde libre como factor de seguridad.

3.3.2.1. *Perfiles de cresta generalmente empleados*

Figura N° 26.- *Perfiles de cresta usados generalmente en vertederos tipo laberinto*



Fuente: (Erices Sepúlveda, 2013)

3.3.3. *Canal rápido y flujo aguas abajo*

Un canal rápido es denominado así por estar en régimen supercrítico; se encarga de llevar el agua desde la estructura de control hasta los elementos disipadores de energía y posterior al canal de salida.

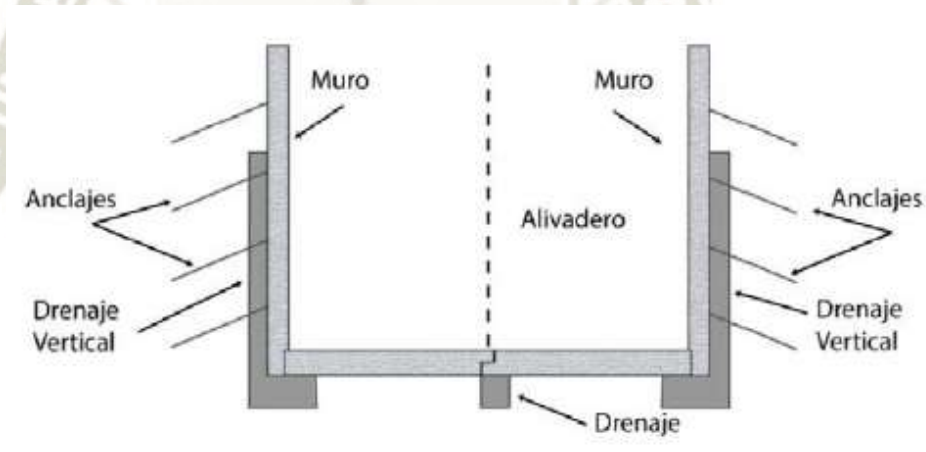
Según (Erices Sepúlveda, 2013) las dimensiones del canal son determinados por la magnitud del caudal descargado, el estudio

económico del vertedero y por las características morfológicas del lugar. Generalmente son canales rectangulares de ancho constante igual al de la estructura de control pero no es determinante ya que existen casos en que se pueden hacer convergentes o divergentes.

El diseño hidráulico de un canal rápido implica en lo fundamental lo siguiente:

- a) Trazado en planta.
- b) Trazado del perfil longitudinal.
- c) Obtención de la sección transversal.
- d) Cálculo de la altura de los muros laterales.

Figura N° 27.- Sección transversal de un canal rápido



Fuente: (Erices Sepúlveda, 2013)

3.3.4. Elementos de disipación de energía

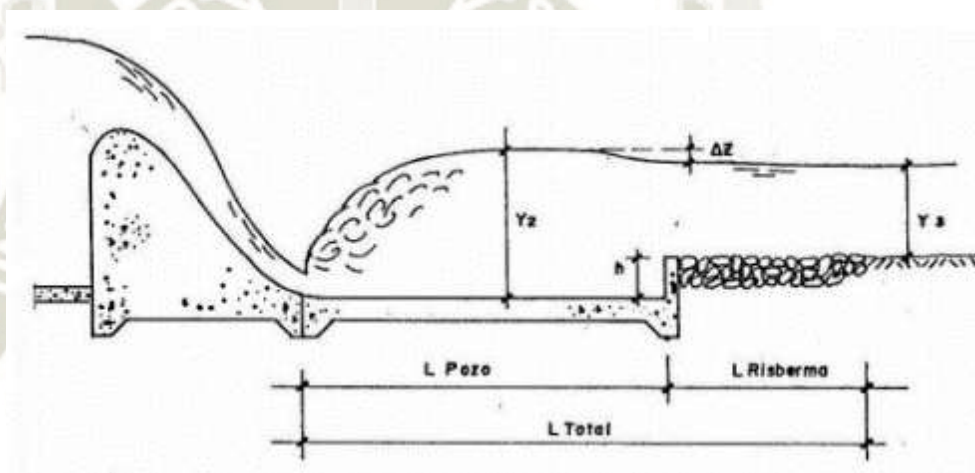
Los elementos disipadores cumplen la función principal de cambiar el régimen del canal rápido, es decir pasar de un flujo supercrítico a uno subcrítico para la entrega del agua al canal de salida sin tener la posibilidad de generar erosiones que conforme vaya pasando el tiempo pueda atender contra el sistema de la presa.

En la actualidad existen diversos tipos de disipadores de energía, dentro de los cuales se encuentran:

a) *Pozo amortiguador*

El pozo amortiguador es una estructura que está ubicada de manera contigua al canal rápido y utiliza el resalto hidráulico como medio de disipación, logrando así entregar un flujo en condiciones ideales para el canal de salida. Como se puede observar en la Figura 28, el fondo del canal de salida se encuentra a una altura “ h ” del fondo del pozo; siendo h la distancia necesaria para cumplir con el sistema de tirantes Y_2 y Y_3 .

Figura N° 28.- Pozo amortiguador



Fuente: (Alegret Breña & Pardo Gómez, 2001 - 2005)

b) *Estanque amortiguador*

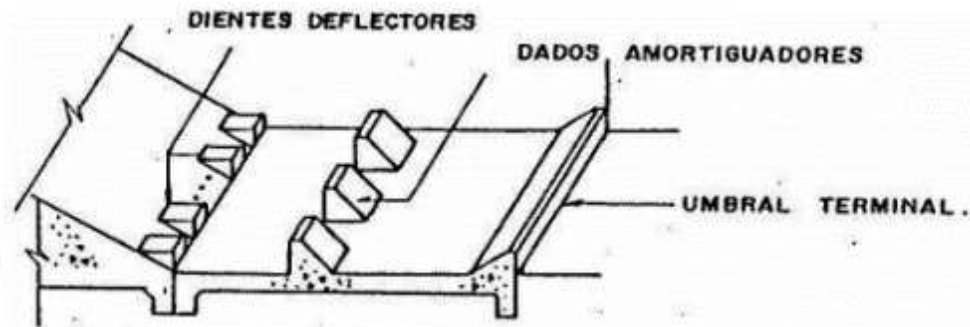
En el estanque amortiguador, al igual que en el pozo amortiguador, la disipación de energía se da por medio de la ocurrencia del resalto hidráulico pero las cotas tanto del fondo del canal de salida como del propio estanque coinciden. Además en este sistema se utilizan accesorios con la finalidad de aumentar la disipación y lograr una estabilidad en el flujo antes de ingresar al canal de salida.

Entre los accesorios mencionados tenemos:

- Dientes deflectores.
- Dados amortiguados.

- Umbral terminal.

Figura N° 29.- Accesorios del estanque amortiguador

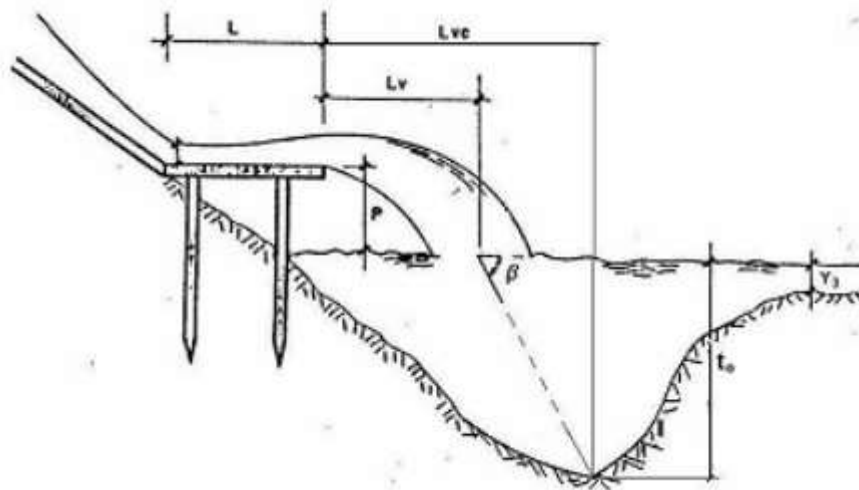


Fuente: (Alegret Breña & Pardo Gómez, 2001 - 2005)

c) Trampolines

Son estructuras que funcionan con descarga libre cuya función es el lanzamiento del chorro de agua hacia su cono de socavación, en el cual por el impacto del chorro y ocurrencia de fuerte turbulencia se disipa la energía. Existe una relación entre el funcionamiento del trampolín y del cono ya que un cálculo erróneo en la distancia que los separa podría ocasionar la falla estructural del trampolín y por consiguiente al vertedero.

Figura N° 30.- Trampolín como disipador de energía



Fuente: (Alegret Breña & Pardo Gómez, 2001 - 2005)

La geometría del trampolín es variable en relación al punto de vista en que se analice, clasificándolo en elevación y en planta.

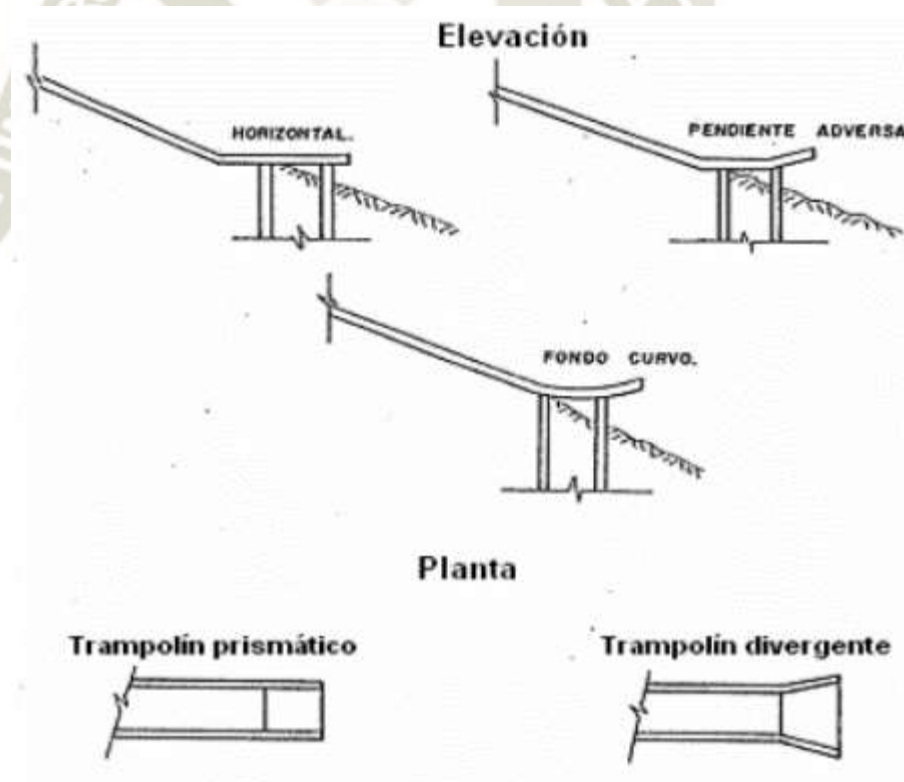
En elevación se puede clasificar en:

- De pendiente horizontal.
- De pendiente adversa.
- De forma curva.

En planta se puede clasificar en:

- Trampolín plano.
- Trampolín divergente.

Figura N° 31.- Geometría del Trampolín



Fuente: (Alegret Breña & Pardo Gómez, 2001 - 2005)

3.4. Dirección de vertido

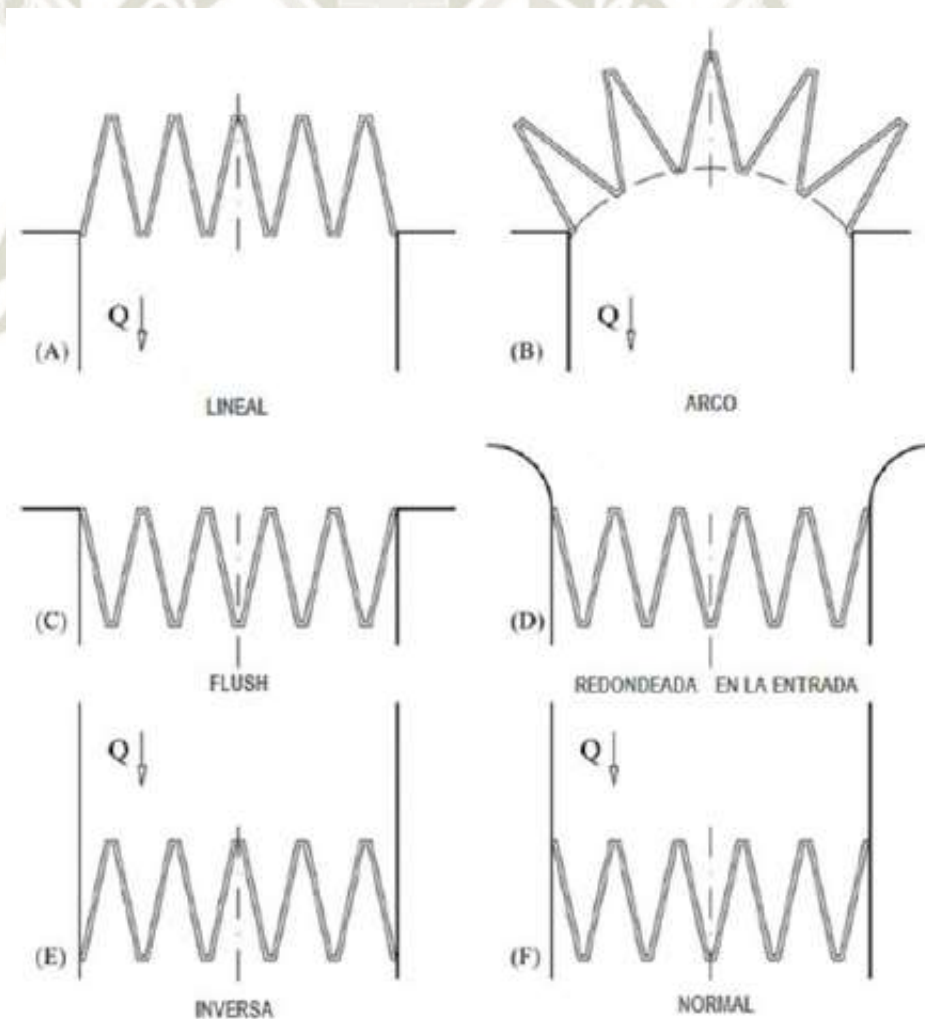
Los vertederos tipo tecla de piano tienen gran cantidad de parámetros que influyen en el flujo de vertido, generalmente se busca que el diseño del vertedero

genere un modelo simétrico y para ello diversos autores realizaron propuestas que hasta ahora son estudiadas.

(Delgado, 2009), demostró que si el vertedero está introducido en el reservorio influye en la descarga. Su estudio se basó en un modelo experimental a escala.

Por otro lado en vertederos canalizados, Houston (1983) probó varias orientaciones del vertedero tipo laberinto (normal, inversa, flush y parcialmente proyectado) y concluyó que la orientación normal tiene una descarga 3.5% mayor que la orientación inversa (Figura 32).

Figura N° 32.- Configuraciones del vertedero tipo laberinto



Fuente: (Rodríguez Ramirez, 2015)

3.5. Funcionamiento Hidráulico

El aumento de caudal generado por una avenida en una presa, tiene como consecuencia primaria el incremento de la carga hidráulica sobre el vertedero construido, es por ello; que es indispensable conocer los parámetros que afectan directamente al coeficiente de descarga y a su vez tener una mayor aproximación al caudal con el que se garantiza un funcionamiento óptimo del vertedero en cuestión.

Como bien es recomendación de diversos autores la eficiencia de un vertedero depende exclusivamente del diseño geométrico. Las partes que conforman el sistema completo del vertedero en tecla de piano se desarrollan en base a varios modelos físicos que llevados a su condición de prototipo deberán cumplir con los requerimientos de operatividad y condiciones topográficas del lugar.

3.5.1. Canal de aproximación

En los primeros modelos físicos realizados para vertederos tipo laberinto se ignoró el mecanismo de aproximación sin considerar la posibilidad de influencia sobre este. Debido a que estos vertederos son generalmente utilizados para rehabilitar las condiciones hidráulicas de un vertedero previo no se consideró también adaptar el sistema de aproximación.

Es cierto que en comparación a un vertedero de cresta recta, uno del tipo tecla de piano también es clasificado como un vertedero frontal y existen algunas recomendaciones para la construcción del sistema de aproximación. Los canales y estructuras de la alimentación al influir particularmente en los ciclos del vertedero tipo tecla de piano, deben adoptar formas redondeadas. Además, Hinchliff (1984) menciona que según sea el caso, se deberá analizar la dirección del flujo para concluir si es más conveniente proyectar los ciclos del vertedero dentro del vaso de almacenamiento, en lugar de estar colocado en el canal.

3.5.2. Perfiles de cresta

Los perfiles de cresta al estar ubicados sobre las paredes del vertedero, poseen gran importancia debido al contacto directo que presenta con el flujo pues de un lado de este, se encontrará el volumen a ser descargado y por el otro lado, la vena líquida de descarga.

Su diseño influye directamente con el coeficiente de descarga lo cual se ve reflejado en el funcionamiento del vertedero, a raíz de esto se desarrollaron estudios particulares con la finalidad de caracterizar los diversos tipos de perfil de cresta y presentar asimismo, coeficientes de descarga y patrones de diseño.

La selección del perfil de cresta más adecuado para un vertedero en tecla de piano dependerá del criterio del diseñador y sobretodo de las condiciones del proyecto; esto relacionado con la factibilidad al momento de la construcción, evitando que el trabajo sea más laborioso y por ende, más costoso.

El estudio principal radica en mejorar las condiciones del flujo al momento del vertido, bajo esta consideración, se puede optar por combinar diversos perfiles de cresta ya sea para los ápices de entrada y salida como para los perfiles de cresta sobre las paredes del vertedero. También es correcto proponer una sección de cresta diferente a las recomendadas en la bibliografía pero por necesidad; estas deben estar fundamentadas por un modelo a escala.

3.6. Aplicaciones

Los vertederos tipo tecla de piano son estructuras hidráulicas que poseen gran cantidad de aplicaciones de acuerdo al tipo de proyecto. Como cualquier vertedero, una de sus funciones es la de controlar el nivel de agua constante en un embalse; también puede ser utilizado como medio de captación en una obra de toma para el funcionamiento de una central hidroeléctrica. Además, permite el control del flujo dejando escapar el agua de crecientes que no cabe en el espacio de almacenamiento.

En la Figura N° 33 se presenta un ejemplo claro de aplicación de un vertedero en tecla de piano; el vertedero denominado “Record” se construyó en el año 2015 en Francia y presenta 4 secciones que están conformadas por 3 ciclos cada una, teniendo una capacidad de descarga máxima de 1350 m³/s.

Figura N° 33.- PKW Record, Francia (2015 – 2016)



Fuente: (Local Organizing Committee (LOC), 2017)

En el caso de presas de material suelto es de suma importancia reconocer que la amplitud de la capacidad del vertedero debe ser el factor más importante a evaluar, debido al alto riesgo de colapso que poseen si son rebasadas. Cabe resaltar que los verteros de alta capacidad, como el vertedero en tecla de piano, no presentan un costo elevado en comparación a un vertedero de pequeña capacidad. Por otro lado, los vertederos de elevada capacidad deben ser hidráulica y estructuralmente eficientes para evitar cualquier problema de erosión en el talón aguas debajo del embalse. Con respecto a las superficies del canal aguas abajo del vertedero se tiene que asegurar que soporte las velocidades producidas por la caída y la frecuencia de uso del vertedero.

3.6.1. Vertederos PKW en el mundo

Los vertederos PKW son estructuras que se encuentran en diversos países de todo el mundo; en el tercer taller mundial de vertederos de laberinto y tecla de piano realizado en Vietnam en el 2017 se creó un documento recopilatorio de todas las construcciones concluidas y que se

encuentran aún en pleno proceso. A continuación se presenta una tabla con un resumen de los proyectos que involucran a los vertederos en tecla de piano, estos datos fueron extraídos de la matriz de datos obtenida en Vietnam.

Tabla N° 1.- PKW alrededor del mundo

Nombre de la presa	País	Fecha de construcción
Goulours	Francia	2006
Saint-Marc	Francia	2008
Etroit	Francia	2009
Gloriettes	Francia	2010
Rattling Lake	Canadá	2011
Malarce	Francia	2012
Beaufort	Francia	2013
Black Est	Reino unido	2013
Dak MI 4B	Vietnam	2013
Dak Rong 3	Vietnam	2013
Giritale	Sri Lanka	2013
Loombah	Australia	2013
Sawra Kuddu	India	2013
Emma	Suiza	2013
Rambawa Tank	Sri Lanka	2015
Raviege	Francia	2015
Da Dang 3	Vietnam	2016
Dak Mi 3	Vietnam	2016
Record	Francia	2016
Xuan Minh	Vietnam	2016
Gage	Francia	2017
Hazelmere	Sudáfrica	2017
Oule	Francia	En progreso
Ouljet Mellegue	Argelia	En progreso

Fuente: (Local Organizing Committee (LOC), 2017)

CAPITULO IV

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DE ESTRUCTURAS PARA LA REALIZACIÓN DEL MODELAMIENTO HIDRÁULICO

4.1. Metodología

Para llevar a cabo esta investigación, en primer lugar se habilitaron las instalaciones disponibles en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Nacional de San Agustín, en relación a las condiciones necesarias. En simultáneo se diseñaron y construyeron los modelos que servirían como objeto de estudio. A partir de ahí se procedió a elaborar los tres modelos PKW basados en ratios adimensionales y espesores constantes; el material utilizado fue de acero inoxidable de 3 mm de espesor. Las piezas fueron cortadas, soldadas y pintadas con la finalidad de evitar cualquier tipo de imperfección que pueda comprometer el procedimiento de extracción de datos. Los tres modelos fueron diseñados para un número de 5, 4 y 2 unidades PKW. Teniendo en cuenta que el modelo de 5 unidades se denominó como modelo piloto, ya que fue el primero en ser construido y fue por el cual pasaron todas las pruebas de sondeo necesarias para el correcto análisis de los principales modelos.

El canal utilizado tiene 45.7 centímetros y 52.3 centímetros de ancho y alto respectivamente, en conjunto con ciertas características que posteriormente serán detalladas; además se utilizaron 8 sensores y un controlador principal para la recolección de datos en tiempo real. Las pruebas se tomaron en un rango de 5 a 6 horas por día, desde la instalación revisión y limpieza de todos los elementos hasta su desmontaje y guardado. Cada prueba considera alrededor de 200 datos para caudales, tirantes y velocidades; mientras que para las presiones se tomaron alrededor de 120 datos en total. El incremento de caudal para los ensayos fue de manera progresiva, es decir se inició con caudales bajos desde los 5 L/s hasta un máximo de 118 L/s.

La Instalación del siguiente vertedero a ser evaluado se realizó una vez extraídos y organizados los valores obtenidos en la campaña de toma de datos del vertedero previo. A partir de ahí se procedió a realizar el procesamiento

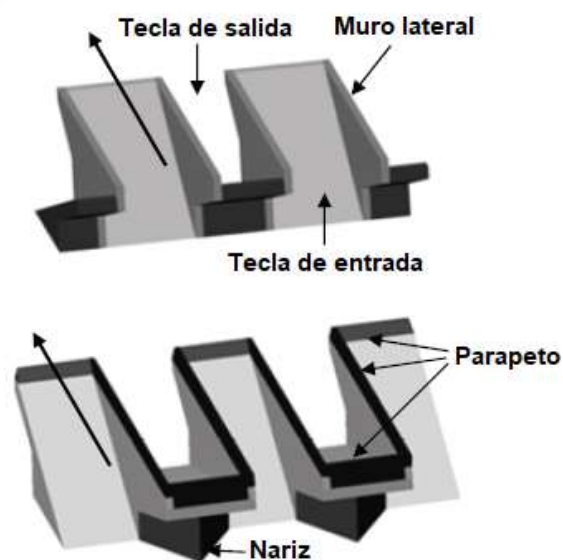
de datos y relacionar mediante gráficos y porcentajes los diferentes factores adimensionales con respecto a los datos de interés.

4.2. Parámetros de diseño

Los vertederos en tecla de piano al ser una elección sumamente atractiva cuando existe la posibilidad de inundaciones, debido a la alta capacidad de descarga que poseen. Involucran una gran cantidad de parámetros con la finalidad de generar una versatilidad al momento de adecuarse a las condiciones de un proyecto existente o nuevo. Estos parámetros dependen directamente del procedimiento de diseño que se desee adoptar ya que en particulares casos se decidirá la existencia de alguna subestructura del vertedero.

El convenio de denominación solo toma en cuenta la estructura propia del vertedero, esto significa que no se considera la posible semejanza que podría existir con la convención de las estructuras anexas. Los componentes que fueron considerados para la actual nomenclatura son la estructura básica, los parapetos y las narices. La estructura básica del PKW consta de las teclas de entrada, las teclas de salida y los muros laterales; mientras que los parapetos y las narices son opcionales en el diseño.

Figura N° 34.- Componentes de un PKW considerados en la nomenclatura

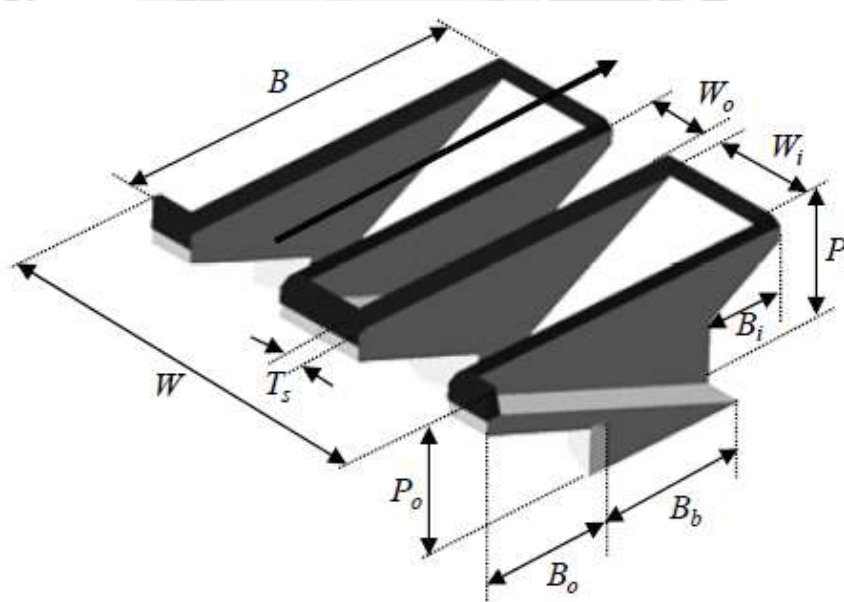


Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

Las siguientes reglas fueron aplicadas en acuerdo con la nomenclatura que es usada para los vertederos tipo laberinto (Falvey, 2003) teniendo en cuenta las publicaciones previas acerca de los vertederos en laberinto y tecla de piano (US Dpt. Of Interior 1987, Tullis 1995, Lempérière & Ouamane 2003, Leite Ribeiro et al. 2009); siendo: B usado para longitudes, W para anchos, P para alturas, L para longitudes desarrolladas, S para pendientes y T para espesores.

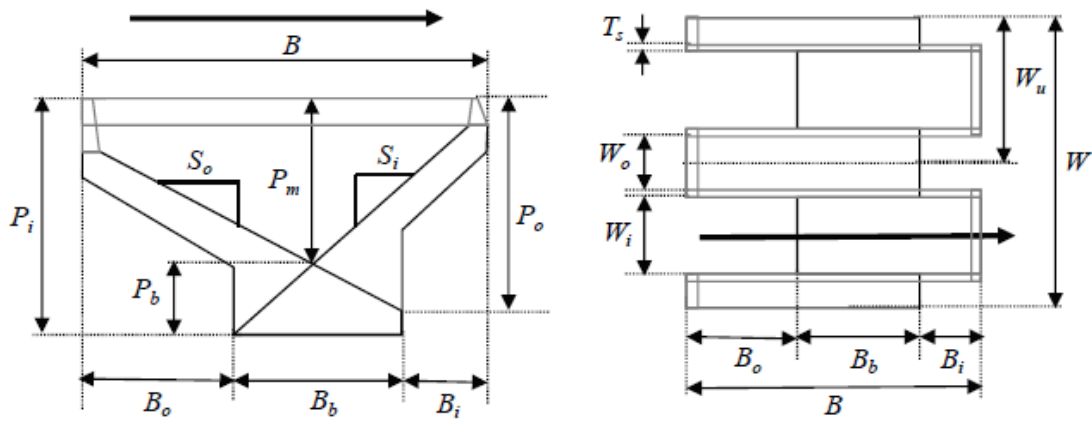
Además es necesario diferenciar las condiciones de entrada y salida del flujo es por ello que se utilizan subíndices para definir la ubicación de los parámetros geométricos: el subíndice "i" hace referencia a las teclas de entrada, el subíndice "o" a las teclas de salida y "b" para vincular los parámetros con respecto a la base del vertedero.

Figura N° 35.- Parámetros fundamentales de un PKW – Vista 3D



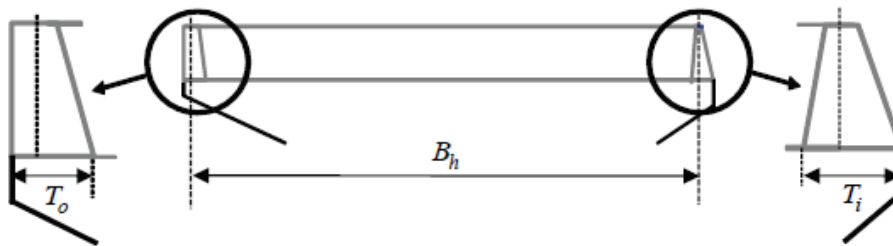
Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

Figura N° 36.- Parámetros fundamentales de un PKW – Vista en planta (izquierda) y sección transversal (derecha)



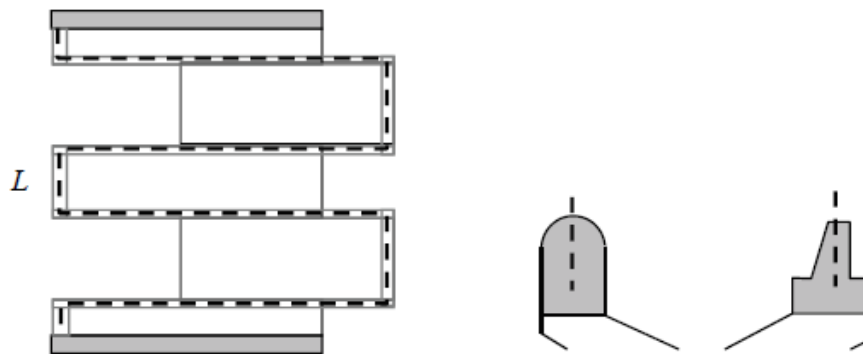
Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

Figura N° 37.- Detalle de la geometría de la cresta



Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

Figura N° 38.- Longitud desarrollada de un PKW (derecha) y secciones típicas de cresta (derecha)



Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

A continuación se presenta una tabla con 25 parámetros básicos para el diseño (Tabla N°2) pues la geometría del vertedero tipo tecla de piano podría ser implementado con un gran número de parámetros que definen características más específicas según la investigación realizada y los resultados esperados.

Tabla N° 2.- Nomenclatura de los parámetros de la geometría del PKW

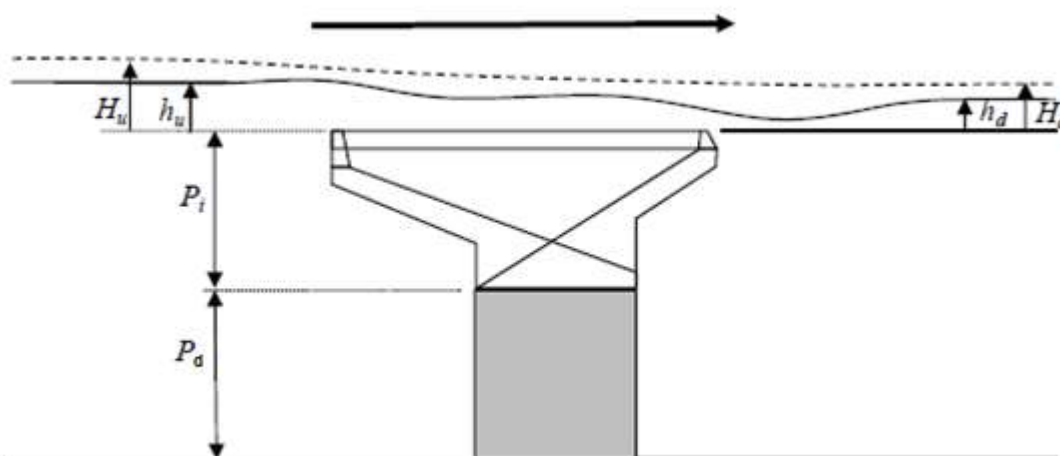
Símbolo del Parámetro	Significado
B	Longitud del PKW medido desde aguas arriba hasta aguas abajo ($B = B_b + B_i + B_o$)
B_o	Longitud de la cresta en voladizo aguas arriba (tecla de salida)
B_i	Longitud de la cresta en voladizo aguas abajo (tecla de entrada)
B_b	Longitud de la base
B_h	Longitud de la cresta del muro lateral medida desde el eje de cresta de la tecla de salida al eje de cresta de la tecla de entrada (Figura 37)
P_i	Altura de la tecla de entrada medida desde el inicio de la misma hasta la cresta del PKW (incluye posible parapeto)
P_o	Altura de la tecla de salida medida desde el inicio de la misma hasta la cresta del PKW (incluye posible parapeto)
P_b	Altura desde el nivel de la plataforma hasta la intersección de la tecla de entrada y la tecla de salida
P_m	Diferencia entre P_i y P_b
S_i	Pendiente de la tecla de entrada (longitud sobre altura)
S_o	Pendiente de la tecla de salida (longitud sobre altura)
λ_i	Ángulo de la losa inclinada en la tecla de entrada
λ_o	Ángulo de la losa inclinada en la tecla de salida
W	Ancho total del PKW
W_u	Ancho de una unidad PKW
W_i	Ancho de la tecla de entrada (medida entre muros laterales)
W_o	Ancho de la tecla de salida (medida entre muros laterales)
T_s	Espesor de los muros laterales
T_i	Espesor horizontal de la cresta en el extremo de la tecla de entrada (medido en la base de posible parapeto)

T_o	Espesor horizontal de la cresta en el extremo de la tecla de salida (medido en la base de posible parapeto)
L	Longitud total desarrollada a lo largo del eje de cresta desbordante
L_u	Longitud desarrollada de una unidad PKW a lo largo del eje de cresta desbordante ($L_u = W_i + W_o + 2B_h + 2T_s$)
N_u	Número de unidades PKW que constituyen la estructura
n	Ratio de la longitud desarrollada del PKW: $n = \frac{L}{W}$
n_u	Ratio de la longitud desarrollada de la unidad PKW: $n_u = \frac{L_u}{W_u}$

Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

En la Figura N°39 y la Tabla N°3 se encuentran graficados y desarrollados, los parámetros físicos aguas arriba y aguas abajo, así como la altura del embalse. Por ende, es necesario considerarlos dentro de la nomenclatura de los vertederos en tecla de piano.

Figura N° 39.- Parámetros físicos de un PKW (sección transversal)



Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

Tabla N° 3.- Nomenclatura de los parámetros físicos para un PKW

Símbolo del Parámetro	Significado
P_d	Altura de la presa

H_u	Carga total sobre la cresta del vertedero aguas arriba
h_u	Espesor del flujo sobre la cresta aguas arriba
H_d	Carga total sobre la cresta del vertedero aguas abajo (puede ser negativa)
h_d	Espesor del flujo sobre la cresta aguas abajo (puede ser negativa)
Q	Caudal
q_{sW}	Descarga específica referida al ancho del PKW, $q_{sW} = \frac{Q}{W}$
C_{dW}	Coefficiente de descarga relacionado al ancho total del PKW, $Q = C_{dW} \cdot W \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}$
q_{sL}	Descarga específica referida a la longitud desarrollada del PKW, $q_{sL} = \frac{Q}{L}$
C_{dL}	Coefficiente de descarga relacionado a la longitud desarrollada del PKW, $Q = C_{dL} \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}$

Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

Adicionalmente existen parámetros opcionales que hacen referencia a los detalles que pueda poseer el vertedero, puesto que es necesario precisar sus características de manera completa, logrando establecer un completo análisis de la estructura. Los componentes que están incluidos dentro de este apartado son:

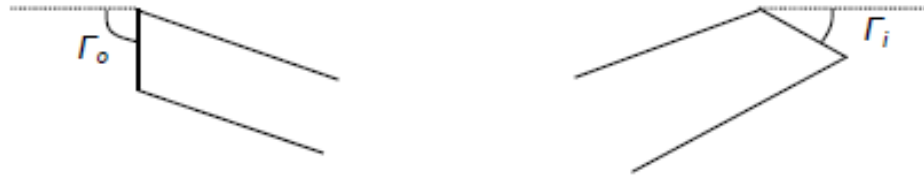
- Descripción estructural de los voladizos.

Figura N° 40.- Espesores en la base y extremo de los voladizos – aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha)



Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

Figura N° 41.- Angulo extremo de voladizo – aguas arriba (izquierda) y aguas abajo (derecha)



Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

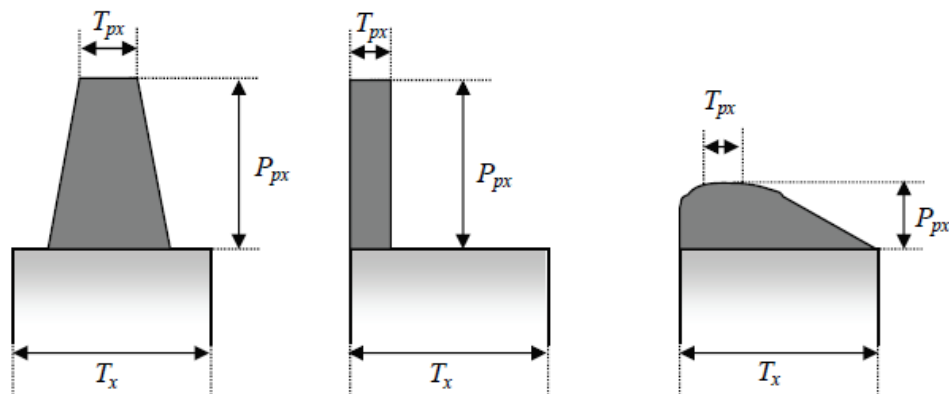
Tabla N° 4.- Nomenclatura de los parámetros para espesores de los voladizos y ángulos en los extremos

Símbolo del Parámetro	Significado
T_{ob}	Espesor al inicio del voladizo aguas arriba
T_{oc}	Espesor al extremo del voladizo aguas arriba
T_{ib}	Espesor al inicio del voladizo aguas abajo
T_{ic}	Espesor al extremo del voladizo aguas abajo
Γ_o	Ángulo en el extremo del voladizo aguas arriba (tecla de salida)
Γ_i	Ángulo en el extremo del voladizo aguas abajo (tecla de entrada)

Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

- Parapetos.

Figura N° 42.- Parámetros del parapeto (sección transversal)



Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

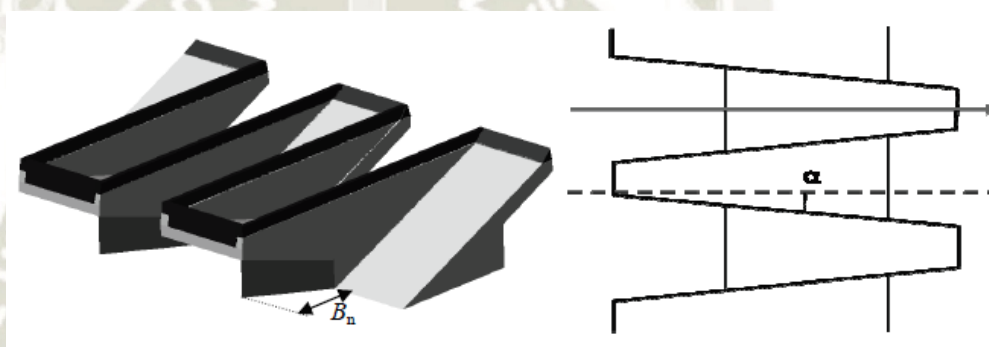
Tabla N° 5.- Nomenclatura de los parámetros del parapeto

Símbolo del Parámetro	Significado
P_{px}	Altura del parapeto en la componente "x"
T_{px}	Espesor de la cresta del parapeto en la componente "x"

Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

- Narices y ángulo de los muros laterales.

Figura N° 43.- Parámetro de la nariz (izquierda) y ángulo de los muros laterales (derecha)



Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

Tabla N° 6.- Nomenclatura del parámetro de la nariz y el ángulo de los muros laterales

Símbolo del Parámetro	Significado
B_n	Longitud de la nariz
α	Ángulos de los muros laterales

Fuente: (Pralong, y otros, 2011)

4.3. Procedimiento de diseño

El diseño de un vertedero en tecla de piano actualmente no es un proceso rigurosamente definido, debido a los múltiples parámetros que lo conforman y a la necesidad de utilizarlos (como se mencionó en el apartado anterior) es por ello que la variabilidad del diseño ofrece diversas soluciones para una misma necesidad.

En el presente estudio se propone un orden tentativo de las fórmulas que se pueden usar para el diseño geométrico básico de la estructura, cabe resaltar que el diseño puede optar diversos caminos; esto sustentado en los datos de entrada y salida que se posean, y en la caracterización propia del vertedero es decir, partiendo desde la configuración de los muros, el número de ciclos, las relaciones adimensionales W_i/W_o , B_i/B_o , P_i/P_o y T_s/P , el tipo de vertedero, la existencia de nariz bajo los voladizos aguas arriba y el tipo de sección de cresta.

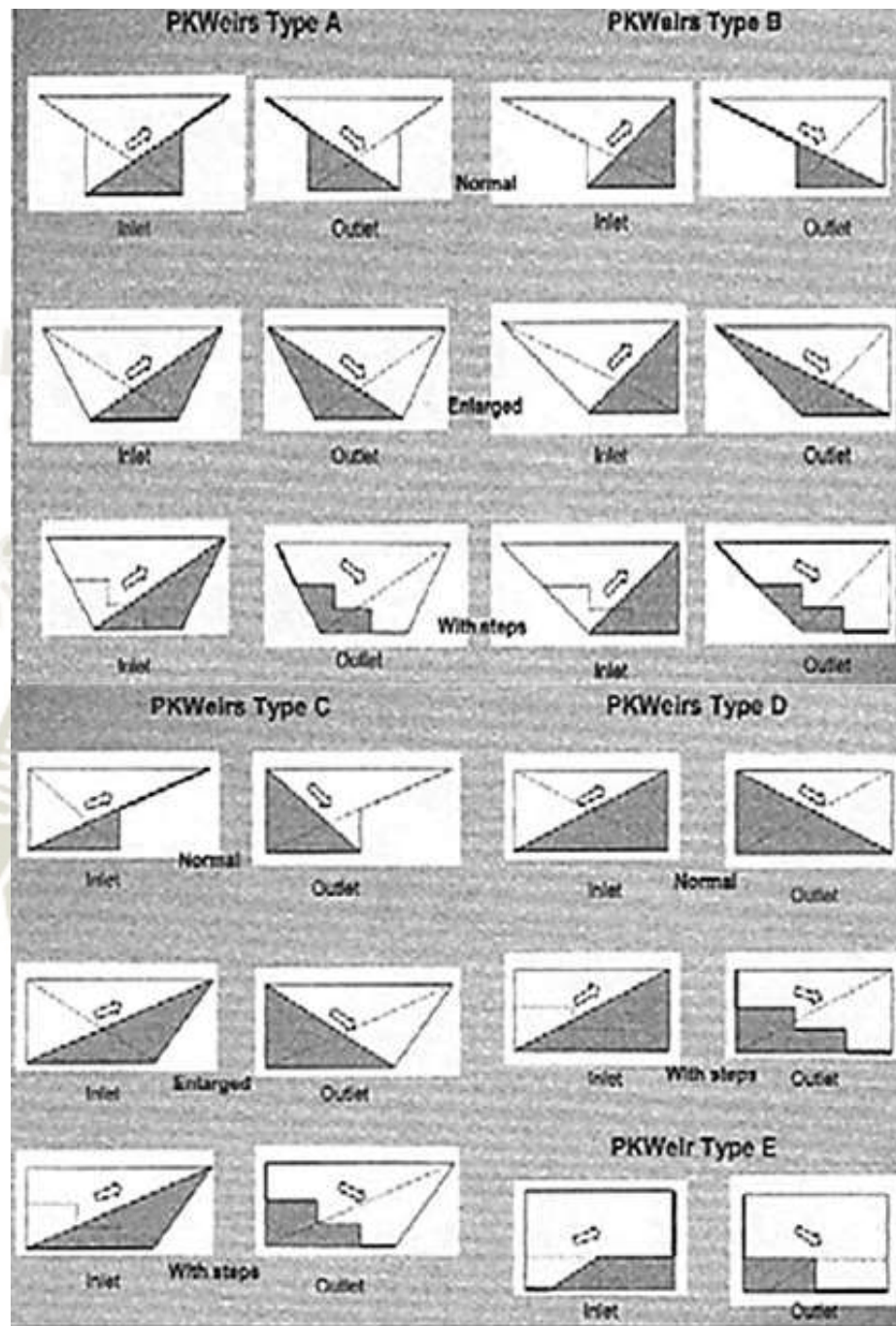
4.3.1. Principales tipos de P.K.W.

Desde 1998 hasta 2005, HydroCoop coordinó los primeros estudios y pruebas que dieron nacimiento al vertedero en tecla de piano. Para esto, cinco laboratorios fueron habilitados alrededor del mundo; ubicados en Francia, Algeria, China, India y Vietnam.

Principalmente los estudios fueron basados en la alteración de la geometría de los vertederos tipo laberinto, partiendo de la configuración de los ápices hasta la inserción de elementos como gradas, pendientes, entre otras. Siendo, la reducción en la fundación la característica más importante del vertedero en tecla de piano, con la finalidad de poder adaptarse mejor a las condiciones de los proyectos.

La configuración final de los tipos de vertederos en tecla de piano (Figura N°44) se basa en una forma rectangular, una losa inclinada para las teclas tanto de entrada como de salida, una longitud reducida de la base y el uso de voladizos (Ouamane & Lempérière, 2006). La elección de la forma del vertedero en tecla de piano depende principalmente de las restricciones del proyecto, las cuales pueden ser: la optimización hidráulica, restricciones constructivas y estructurales, requerimientos operacionales, consideraciones económicas, entre otras.

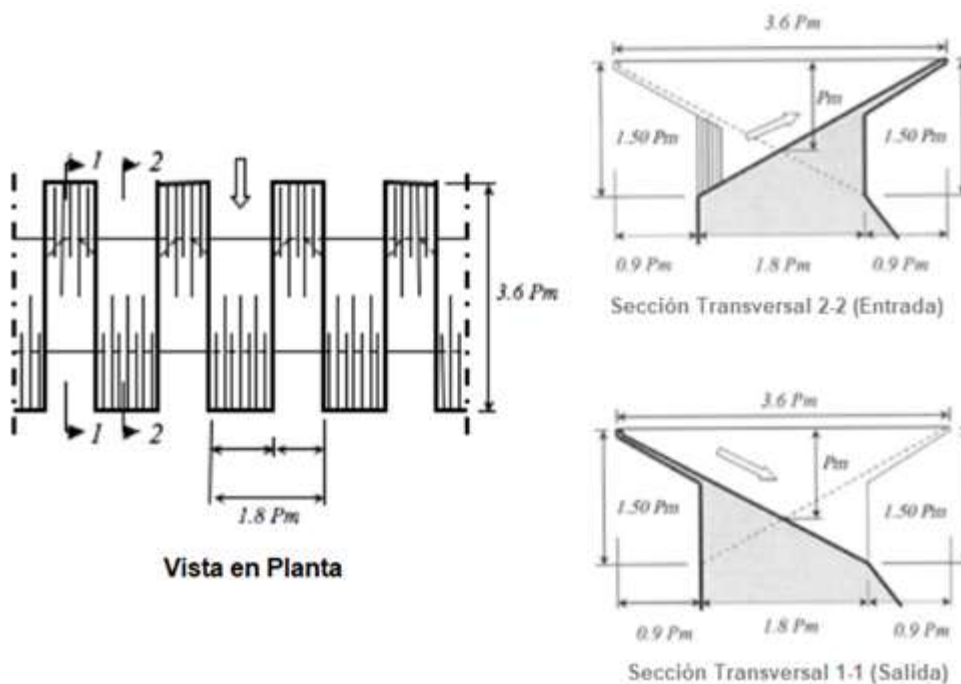
Figura N° 44.- Tipos de vertederos en tecla de piano propuestos por HydroCoop



Fuente: (Lempérière, Ouamane, & Vigny, 2013)

A partir de los modelos básicos, se elaboraron algunos modelos estándar teniendo en cuenta consideraciones económicas y estructurales para facilitar la comparación con otras alternativas, uno de los modelos más utilizados es el desarrollado por Lempérière (ICOLD, 2010) para el vertedero en tecla de piano tipo A con $n = 5$; siendo $n = L/W$.

Figura N° 45.- Modelo estándar para un PKW tipo A



Fuente: (Lempérière, Ouamane, & Vigny, 2013)

La finalidad de proponer modelos estándar es generar una fórmula simplificada para poder hallar una curva aproximada de gasto específico con relación a la carga total sobre el vertedero aguas arriba. Para el modelo presentado en la Figura N°45 la curva es casi lineal y se representa por la siguiente ecuación:

$$q_s = 4.3H_u\sqrt{P_m}$$

Considerando:

$$0.4P_m \leq H_u \leq 2P_m$$

4.3.2. Ecuaciones de diseño geométrico para vertederos tecla de piano tipo A

Las siguientes ecuaciones son el sustento del diseño geométrico de los vertederos de la actual investigación; cabe resaltar que para el diseño geométrico en un prototipo es recomendable realizar un análisis dimensional geométrico para trasladar los datos obtenidos en el modelo asegurando un comportamiento hidráulico similar.

4.3.2.1. *Parámetros de entrada*

Para iniciar el diseño de un PKW es necesario determinar los parámetros constantes, los factores adimensionales que se utilizarán (ratios) y los parámetros que irán tomando valores hasta el diseño definitivo.

En la Tabla N°7 se muestran los parámetros utilizados por investigadores, lo cual servirá como referencia y en ciertos casos como límites para nuestras propuestas de diseño.

Tabla N° 7.- Geometría de modelos PKW estudiados

Referencia	Tipo	n	W_i/W_o	S_i	S_o	T_s/p
Laugier (2009) & Ribeiro et al. (2007)	A	4.94	1.41	2.04:1	2.04:1	0.07
Lempérière (2009)	A	5	1.25	1.8:1	1.8:1	NR
Machiels et al. (2009)	A	4.15	1	0.849:1	0.849:1	0.0381
Ribeiro et al. (2009)	A	4.99-6.66	1.23-1.57	1.67:1-2.70:1	1.72:1-2.04:1	NR
Laugier (2007)	A	5	1.43	2.05:1	2.05:1	0.067
Barcouda et al. (2006)	A	6	1.2	2:1	2:1	NR
Barcouda et al. (2006)	B	6	1.2	1:1	2:1	NR
Ouamane & Lempérière (2006)	varios	4-8.5	0.67-1.49	NR	NR	varios
Hien, et al. (2006)	A	4-7	1.5	NR	NR	NR

Lempérière & Jun (2005)	A	6	1.2	2:1	2:1	NR
Lempérière & Ouamane (2003)	A	6	1	1.5:1	1.5:1	NR
Lempérière & Ouamane (2003)	B	6	1	0.75:1	1.5:1	NR
*NR = No Reportado						

Fuente: (M. Anderson, 2011)

Es necesario considerar la recomendación previa, para obtener resultados más óptimos tanto de forma hidráulica como económica. En el caso del parámetro “n”, Lempérière (2009) recomienda que $n = 5$ es el valor más óptimo de un rango entre 4 y 8.5, además Lempérière & Ouamane (2006) menciona que para valores de “n” mayores o iguales a 8.5 representan un significativo aumento en la eficiencia de la descarga sólo si los valores de H_t/P son pequeños.

Para el ratio de anchos W_i/W_o , Lempérière (2009) recomienda que el valor más cerca a lo óptimo es 1.25, sabiendo que los valores de $W_i/W_o > 1.0$ producen una eficiencia de descarga más alta que $W_i/W_o < 1.0$. Los valores de pendientes según la Tabla N°7 se encuentran en un rango desde 0.85:1 a 2.05:1, siendo 1.8:1 el valor de pendiente recomendado por Lempérière (2009). Además, Lempérière & Ouamane (2006) encontraron que el incremento de la altura en un 25% refleja un aumento de la eficiencia en un 6% para modelos con todos los parámetros constantes exceptuando las pendientes y “P”, aunque teniendo estos dos parámetros cambiando conjuntamente no es tan fácil determinar que parámetro es el que genera dicho incremento. (M. Anderson, 2011)

También es necesario considerar seis parámetros para completar los datos de entrada y poder generar un diseño definitivo siguiendo las formulas propuestas en el siguiente apartado. Estos parámetros son elección del diseñador de acuerdo a las condiciones de su investigación.

- a. Número de unidades PKW (N_u).
- b. Ancho del vertedero (W).
- c. Espesor de los muros (T_s).
- d. Ratio de bases (B_b/B_i , B_b/B_o y B_i/B_o).
- e. Altura del parapeto (P_p).

4.3.2.2. Longitud desarrollada del PKW

$$L = W * n$$

4.3.2.3. Longitud desarrollada de una unidad PKW

$$L_u = \frac{L}{N_u}$$

4.3.2.4. Ancho de una unidad PKW

$$W_u = \frac{W}{N_u}$$

4.3.2.5. Ancho de las teclas de salida

$$W_o = \frac{(W_u - 2T_s)}{1 + W_i/W_o}$$

4.3.2.6. Ancho de las teclas de entrada

$$W_i = W_o * W_i/W_o$$

4.3.2.7. Longitud de los muros laterales medidos desde los ejes de los ápices de entrada y salida

$$B_h = \frac{1}{2}(L_u - W_i - W_o - 2T_s)$$

4.3.2.8. Angulo de pendiente para las teclas de entrada y salida

$$\lambda_i = \tan^{-1}\left(\frac{1}{S_i}\right)$$

$$\lambda_o = \tan^{-1}\left(\frac{1}{S_o}\right)$$

4.3.2.9. Espesor de los ápices a la entrada y salida

$$T_i = T_s \sqrt{1 + S_i^2}$$

$$T_o = T_s \sqrt{1 + S_o^2}$$

4.3.2.10. Longitud total del PKW

$$B = B_h + \frac{T_i + T_o}{2}$$

4.3.2.11. Longitud del voladizo aguas arriba

$$B_o = \frac{B}{\left(1 + \frac{B_b}{B_o} + \frac{B_i}{B_o}\right)}$$

4.3.2.12. Longitud del voladizo aguas abajo

$$B_i = B_o * \frac{B_i}{B_o}$$

4.3.2.13. Longitud de la base del PKW

$$B_b = B_o * B_b / B_o$$

4.3.2.14. Diferencia de alturas para las condiciones de entrada y salida

$$\Delta P = \frac{(B_b + B_o - T_o)}{S_o} - \frac{(B_b + B_i - T_i)}{S_i}$$

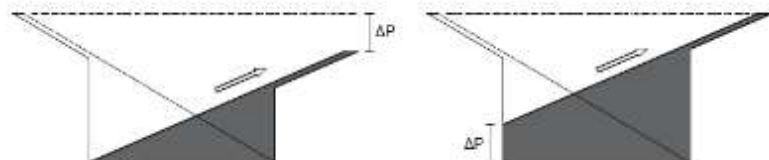
4.3.2.15. Consideraciones finales de diseño

Para culminar el proceso de diseño, será necesario calcular según la nomenclatura todas las alturas para las teclas de entrada y salida (P_i, P_o, P_b y P_m).

Según los datos de entrada, el valor hallado en el punto anterior “ ΔP ” podrá ser mayor, menor o igual que “0”, entonces:

- f. Si $\Delta P > 0$, se deberá optar por elegir alguna de las cuatro opciones que se presentan a continuación:
 - Aumentar el nivel en la base del inicio de la tecla de entrada para compensar las alturas generadas por ΔP en el vertedero.

Figura N° 46.- Primera solución propuesta para $\Delta P > 0$



Fuente: Elaboración propia

Para esta configuración las alturas vienen determinadas por:

$$P_i = \frac{B_b + B_i - T_i}{S_i} + P_p$$

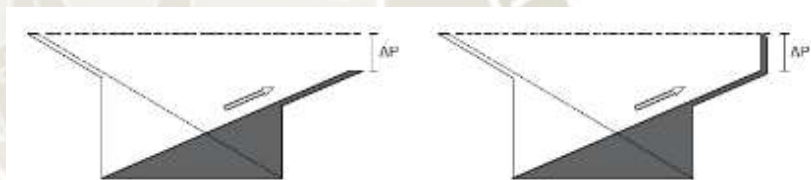
$$P_o = \frac{B_b + B_o - T_o}{S_o} + P_p$$

$$P_b = \frac{B_b + \Delta P * S_i}{S_i + S_o}$$

$$P_m = P_i - P_b + \Delta P = P_o - P_b$$

- Colocar un parapeto al final de la tecla de entrada para compensar las alturas generadas por ΔP en el vertedero. El diseño geométrico del parapeto dependerá de las restricciones presentadas.

Figura N° 47.- Segunda solución propuesta para $\Delta P > 0$



Fuente: Elaboración propia

Para esta configuración las alturas vienen determinadas por:

$$P_i = \frac{B_b + B_i - T_i}{S_i} + P_p^*$$

$$\text{Siendo, } P_p^* = P_p + \Delta P$$

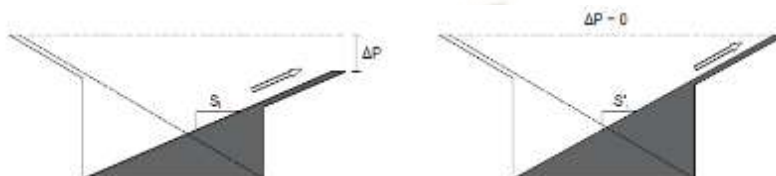
$$P_o = \frac{B_b + B_o - T_o}{S_o} + P_p$$

$$P_b = \frac{B_b}{S_i + S_o}$$

$$P_m = P_i - P_b = P_o - P_b$$

- Disminuir la pendiente de las teclas de entrada y recalcular todos los parámetros que dependan de la misma, hasta garantizar un $\Delta P \approx 0$.

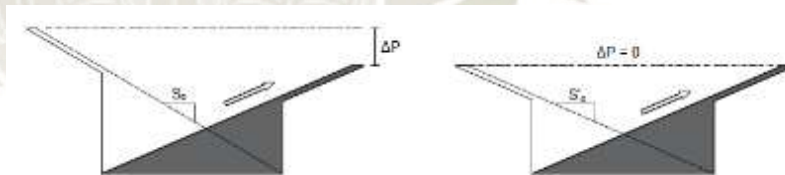
Figura N° 48.- Tercera solución propuesta para $\Delta P > 0$



Fuente: Elaboración propia

- Aumentar la pendiente de las teclas de salida y recalcular todos los parámetros que dependan de la misma, hasta garantizar un $\Delta P \approx 0$.

Figura N° 49.- Cuarta solución propuesta para $\Delta P > 0$

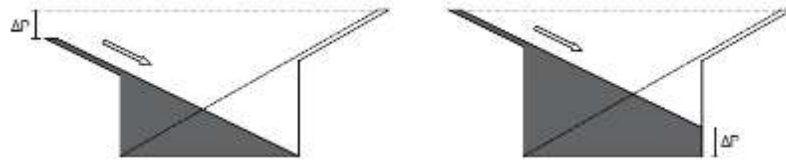


Fuente: Elaboración propia

g. Si $\Delta P < 0$, se deberá optar por elegir alguna de las cuatro opciones que se presentan a continuación:

- Aumentar el nivel en la base del inicio de la tecla de salida para compensar las alturas generadas por ΔP en el vertedero.

Figura N° 50.- Primera solución propuesta para $\Delta P < 0$



Fuente: Elaboración propia

Para esta configuración las alturas vienen determinadas por:

$$P_i = \frac{B_b + B_i - T_i}{S_i} + P_p$$

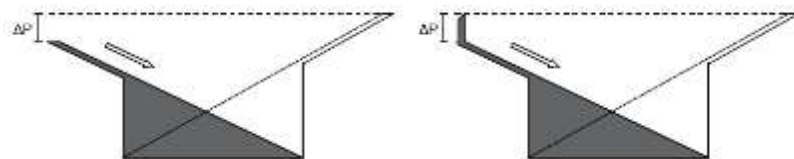
$$P_o = \frac{B_b + B_o - T_o}{S_o} + P_p$$

$$P_b = \frac{B_b + \Delta P * S_o}{S_i + S_o}$$

$$P_m = P_i - P_b = P_o - P_b + \Delta P$$

- Colocar un parapeto al final de la tecla de salida para compensar las alturas generadas por ΔP en el vertedero. El diseño geométrico del parapeto dependerá de las restricciones presentadas.

Figura N° 51.- Segunda solución propuesta para $\Delta P < 0$



Fuente: Elaboración propia

Para esta configuración las alturas vienen determinadas por:

$$P_i = \frac{B_b + B_i - T_i}{S_i} + P_p$$

$$P_o = \frac{B_b + B_o - T_o}{S_o} + P_p^*$$

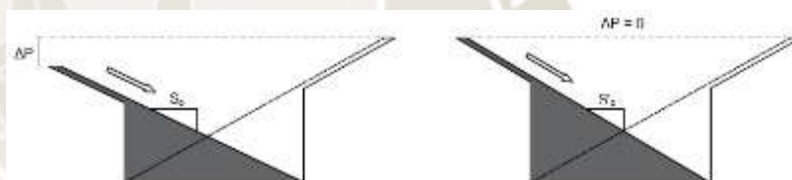
$$\text{Siendo, } P_p^* = P_p + \Delta P$$

$$P_b = \frac{B_b}{S_i + S_o}$$

$$P_m = P_i - P_b = P_o - P_b$$

- Disminuir la pendiente de las teclas de salida y recalcular todos los parámetros que dependan de la misma, hasta garantizar un $\Delta P \approx 0$.

Figura N° 52.- Tercera solución propuesta para $\Delta P < 0$



Fuente: Elaboración propia

- Aumentar la pendiente de las teclas de entrada y recalcular todos los parámetros que dependan de la misma, hasta garantizar un $\Delta P \approx 0$.

Figura N° 53.- Cuarta solución propuesta para $\Delta P < 0$



Fuente: Elaboración propia

h. Si $\Delta P = 0$, se procede a calcular las alturas del vertedero.

$$P_i = \frac{B_b + B_i - T_i}{S_i} + P_p$$

$$P_o = \frac{B_b + B_o - T_o}{S_o} + P_p$$

$$P_b = \frac{B_b}{S_i + S_o}$$

$$P_m = P_i - P_b = P_o - P_b$$

4.3.3. Ecuaciones para determinar la curva de gasto

Debido al número de parámetros involucrados diversos investigadores realizaron propuestas de ecuaciones para calcular la curva de gasto de los PKW. Cabe resaltar que para la aplicación de las ecuaciones mostradas más adelante; se presentan diversos límites (Tabla N°8) para garantizar un correcto cálculo aproximado ya que los valores en las curvas de gasto obtenidos a través de las fórmulas son muy sensibles a estos.

Tabla N° 8.- Límites de aplicación para las ecuaciones de capacidad

	L/W	H/P	W_i/W_o	B/P	$B_i/B,$ B_o/B	P/W_u	$B_i/P,$ B_o/P
Kabiri-Samani et al. (2012)	2.5 – 7.0	0.1 – 0.6	0.33 – 1.22	1.0 – 2.5	0.00 – 0.26	?	?
Leite Ribeiro et al. (2012)	3.0 – 7.0	0.1 – 2.8	0.50 – 2.00	1.5 – 4.6	0.20 – 0.40	0.29 – 0.65	0.25 – 4.00
Machiels (2012)	4.2 – 5.0	0.1 – 5.0	0.50 – 2.00	1.0 – 6.0	0.29 – 0.33	0.33 – 2.00	0.00 – 2.67

Fuente: (Denys, 2017)

4.3.3.1. *Kabiri-Samani & Javaheri (2012)*

Sus estudios fueron realizados en la Universidad de Tecnología Isfahan, en Irán. Utilizó modelos PKW de tipo A, B y C para descargas específicas desde 25 hasta 175 l/s/m para condiciones de flujo libre y sumergido. (Denys, 2017)

$$Q = \frac{2}{3} C_d W \sqrt{2gH^3}$$

$$C_d = \left[0.212 \left(\frac{H}{P}\right)^{-0.675} \left(\frac{L}{W}\right)^{0.377} \left(\frac{W_i}{W_o}\right)^{0.426} \left(\frac{B}{P}\right)^{0.306} e^{1.504\frac{B_o}{B} + 0.093\frac{B_i}{B}} \right] + 0.606$$

4.3.3.2. *Leite Ribeiro et al. (2012)*

Se realizaron pruebas limitadas al tipo A de PKW para condiciones de flujo libre y un rango desde 26 a 440 l/s/m de descargas específicas en el Laboratorio de Construcciones Hidráulicas, Suiza.

$$r = \frac{Q_{PKW}}{Q_s} = \frac{Q_{PKW}}{0.42W\sqrt{2gH}}$$

El ratio de mejora del caudal, con relación a un vertedero de cresta lineal afilada, principalmente se encuentra en función de L, W, P_i y H . (Denys, 2017)

$$r = 1 + 0.24 \left(\frac{(L - W)P_i}{WH} \right)^{0.9} \quad (wpba)$$

Donde:

$w = \left(\frac{W_i}{W_o}\right)^{0.05}$, define la influencia del ratio entre el ancho las teclas de entrada y salida.

$p = \left(\frac{P_o}{P_i}\right)^{0.25}$, define la diferencia de las alturas las teclas de entrada y salida.

$b = \left(0.3 + \frac{B_o + B_i}{B}\right)^{-0.5}$, define la influencia de las longitudes de los voladizos.

$a = 1 + \left(\frac{R_o}{P_o}\right)^2$; define la presencia de parapetos.

4.3.3.3. *Machiels (2012)*

La metodología se desarrolló en la Universidad de Liège, Bélgica; usando vertederos en tecla de piano con la zona de rebose plana, en condiciones de flujo libre y con una descarga específica de 13 a 400 l/s/m. La fórmula de descarga está conformada por la suma de descargas calculadas para cada uno de los tres elementos de un vertedero en tecla de piano. Machiels (2012) nombró el uso del subíndice “d” para la descarga relacionada con el voladizo aguas abajo, “u” para la descarga del voladizo aguas arriba y “s” para las crestas laterales. Sin embargo, el parámetro “ W_u ” sigue representando el ancho de una unidad PKW ($W_u = W_i + W_o + 2T$).

$$q = \frac{Q_{PKW}}{W} = q_u \frac{W_o}{W_u} + q_d \frac{W_i}{W_u} + q_s \frac{2B}{W_u}$$

Donde:

$$q_u = 0.374 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1.6}\right) \left(1 + 0.5 \left(\frac{H}{H + P_T}\right)^2\right) \sqrt{2gH^3}$$

$$q_d = 0.445 \left(1 + \frac{1}{1000H + 1.6}\right) \left(1 + 0.5 \left(\frac{H}{H + P}\right)^2\right) \sqrt{2gH^3}$$

$$q_s = 0.41 \left(1 + \frac{1}{833H + 1.6} \right) \left(1 + 0.5 \left(\frac{0.833H}{0.833H + P_e} \right)^2 \right) \left(\frac{P_e^\alpha + \beta}{(0.833H + P_e)^\alpha + \beta} \right) K_{W_i} K_{W_o} \sqrt{2gH^3}$$

Además:

$$P_T = P + P_d$$

$$P_e = P_T \frac{B_o}{B} + \frac{P}{2} \left(1 - \frac{B_o}{B} \right)$$

Los símbolos griegos determinan la influencia de la pendiente en la tecla de entrada:

$$\alpha = \frac{0.7}{S_i^2} - \frac{3.58}{S_i} + 7.55$$

$$\beta = 0.029e^{\frac{-1.446}{S_i}}$$

La influencia de la variación de la velocidad del flujo a lo largo de la cresta lateral viene representado por:

$$K_{W_i} = 1 - \frac{\gamma}{\gamma + W_i^2}, \text{ donde } \gamma = 0.0037 \left(1 - \frac{W_i}{W_o} \right)$$

La manera en que la interferencia de las láminas vertientes reduce la longitud efectiva y eventualmente genera efectos locales de sumersión adopta las siguientes denominaciones:

$$K_{W_o} = 1 \quad \text{para} \quad \frac{H}{W_o} \leq \delta_1$$

$$K_{W_o} = \frac{2}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \left(\frac{H}{W_o} \right)^3 - \frac{3(\delta_2 + \delta_1)}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \left(\frac{H}{W_o} \right)^2 + \frac{6\delta_2\delta_1}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \left(\frac{H}{W_o} \right) + \frac{\delta_2^2(\delta_2 - 3\delta_1)}{(\delta_2 - \delta_1)^3} \quad \text{para} \quad \delta_1 \leq \frac{H}{W_o} \leq \delta_2$$

$$K_{W_o} = 1 \quad \text{para} \quad \delta_2 \leq \frac{H}{W_o}$$

Donde los límites de la función son definidos por:

$$\delta_1 = -0.788 S_o^{-1.88}$$

$$\delta_2 = 0.236 S_o^{-1.94} + 5$$

4.3.4. Diseño geométrico definitivo

Con la finalidad de comparar la eficiencia hidráulica entre vertederos convencionales y vertederos en tecla de piano, se optó por ensayar paralelamente vertederos frontales de pared delgada y vertederos tipo Creager. A continuación se presenta la configuración geométrica de diseño final para los modelos en tecla de piano.

4.3.4.1. Vertederos tipo tecla de piano

El diseño final de los modelos se realizó en base al procedimiento y ecuaciones mencionados en el apartado 4.3.2 de la actual investigación tomando como punto de partida el modelo estándar tipo "A" ofrecido por Lempérière para un ratio de magnificación de $n = 5$. A partir de ahí, se fueron seleccionando los parámetros de entrada necesarios para el desarrollo del diseño de los tres modelos, siendo la única diferencia, para el caso de estudio, el número de unidades PKW.

Utilizando la tabla N°7 (Geometría de modelos PKW estudiados) como referencia, las recomendaciones brindadas por (M. Anderson, 2011) y con la finalidad de obtener modelos, coeficientes de descarga, curvas de gasto, etc. en condiciones óptimas para ser la base del diseño preliminar de prototipos; se plasman los parámetros de entrada para los tres modelos en la tabla N°9. (Ver Anexo 1)

Tabla N° 9.- Parámetros de entrada para los modelos PKW

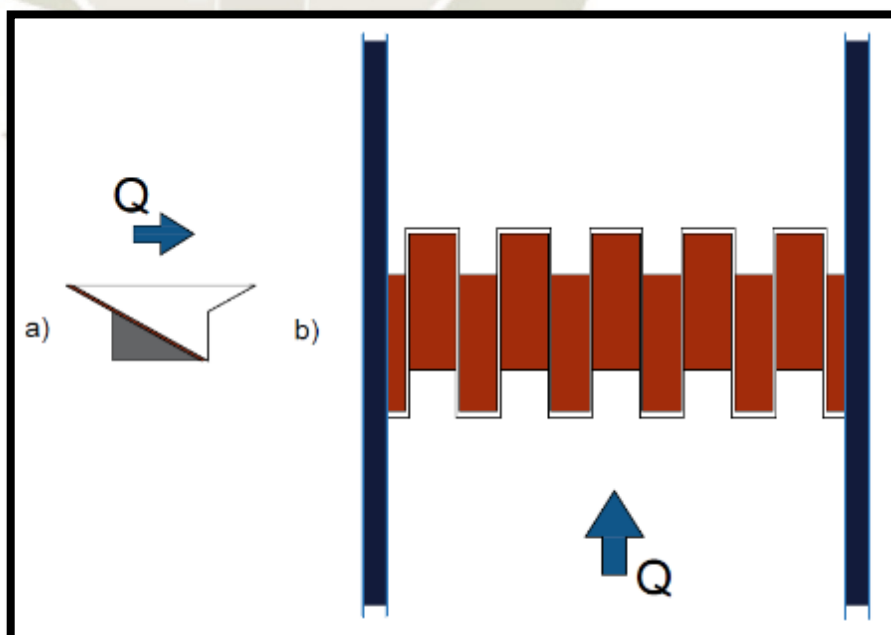
	Parámetros de entrada							
	N_u	$\frac{W_i}{W_o}$	$\frac{B_i}{B_o}$	$\frac{B_b}{(B_i, B_o)}$	$\frac{P_i}{P_o}$	S_i, S_o	W (cm)	T_s (mm)
Modelo piloto	5	1.25	1.0	2.0	1.0	1.8	45.7	3.0
Modelo 1	4	1.25	1.0	2.0	1.0	1.8	45.7	3.0
Modelo 2	2	1.25	1.0	2.0	1.0	1.8	45.7	3.0

Fuente: Elaboración propia

4.3.4.1.1. Modelo piloto: PKW de 5 unidades

Luego de procesar todos los datos iniciales y realizar los cálculos respectivos en conjunto con las consideraciones finales de diseño (Ver sección 4.3.2.15), se obtuvo la geometría final para el modelo piloto.

Figura N° 54.- Elevación lateral a) y superior b) del Modelo piloto



Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 10 presenta los parámetros de salida del vertedero en tecla de piano de cinco unidades.

Tabla N° 10.- Parámetros de salida para el Modelo piloto (5 unidades PKW)

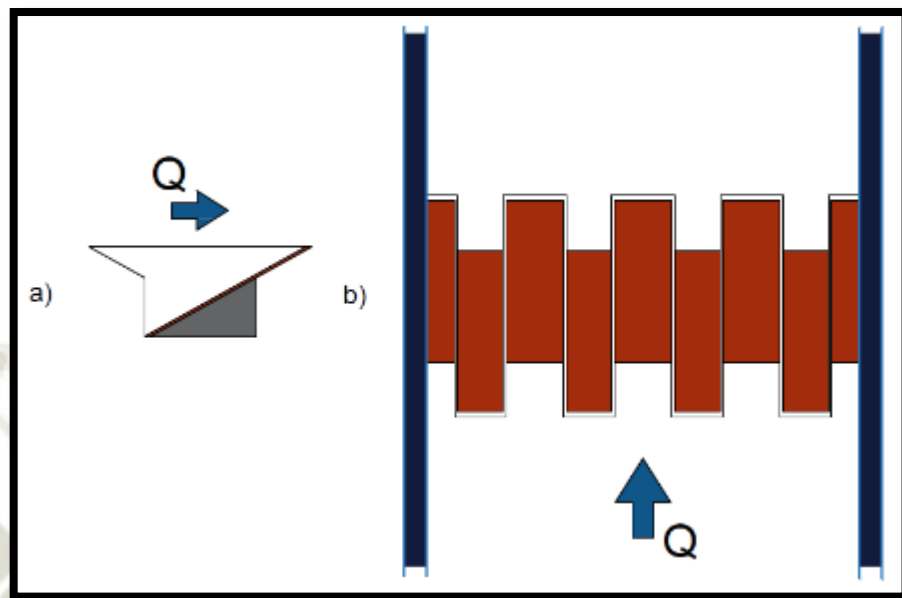
	Modelo piloto		Unidad
	B	18.90	cm
B_i	4.72	cm	
B_o	4.72	cm	
B_b	9.45	cm	
B_h	18.28	cm	
Parámetros geométricos o de salida	P_i	7.53	cm
	P_o	7.53	cm
	P_b	2.62	cm
	P_m	4.91	cm
	W_u	9.14	cm
	W_i	4.74	cm
	W_o	3.80	cm
	T_i	6.18	mm
	T_o	6.18	mm
	α	0.5071	rad
	L	228.50	cm
	L_u	45.70	cm
	T_s/p	0.0398	

Fuente: Elaboración propia

4.3.4.1.2. Modelo 1: PKW de 4 unidades

Luego de procesar todos los datos iniciales y realizar los cálculos respectivos en conjunto con las consideraciones finales de diseño (Ver sección 4.3.2.15), se obtuvo la geometría final para el modelo 1.

Figura N° 55.- Elevación lateral a) y superior b) del Modelo 1



Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 11 presenta los parámetros de salida del vertedero en tecla de plano de cuatro unidades.

Tabla N° 11.- Parámetros de salida para el Modelo 1 (4 unidades PKW)

	Modelo 1		Unidad
	Parámetros geométricos o de salida	B	23.47
B_i		5.87	cm
B_o		5.87	cm
B_b		11.73	cm
B_h		22.85	cm
P_i		9.44	cm
P_o		9.44	cm
P_b		3.26	cm
P_m		6.18	cm
W_u		11.43	cm
W_i		6.02	cm
W_o		4.81	cm
T_i		6.18	mm

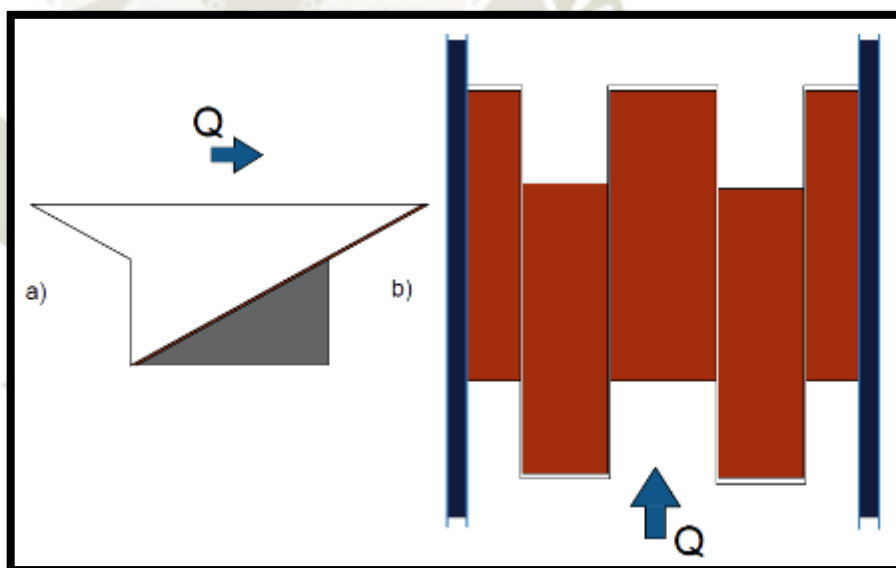
T_o	6.18	mm
α	0.5071	rad
L	228.50	cm
L_u	57.13	cm
T_s/P	0.0318	

Fuente: Elaboración propia

4.3.4.1.3. Modelo 2: PKW de 2 unidades

Luego de procesar todos los datos iniciales y realizar los cálculos respectivos en conjunto con las consideraciones finales de diseño (Ver sección 4.3.2.15), se obtuvo la geometría final para el modelo 2.

Figura N° 56.- Elevación lateral a) y superior b) del Modelo 2



Fuente: Elaboración propia

La Tabla N° 12 presenta los parámetros de salida del vertedero en tecla de piano de dos unidades.

Tabla N° 12.- Parámetros de salida para el Modelo 2 (2 unidades PKW)

	Modelo 2		Unidad
	B	46.32	cm
B_i	11.58	cm	
B_o	11.58	cm	
B_b	23.16	cm	
B_h	45.70	cm	
P_i	18.96	cm	
P_o	18.96	cm	
P_b	6.43	cm	
P_m	12.52	cm	
W_u	22.85	cm	
W_i	12.36	cm	
W_o	9.89	cm	
T_i	6.18	mm	
T_o	6.18	mm	
α	0.5071	rad	
L	228.50	cm	
L_u	114.25	cm	
T_s/p	0.0158		

Fuente: Elaboración propia

4.4. Construcción e instalación

El proceso de construcción e instalación se divide en dos grupos, el primero abarca la descripción de todas las estructuras existentes en el laboratorio y sus características; el segundo muestra el procedimiento que se llevó a cabo en la elaboración tanto en los vertederos en tecla de piano como en la base de los sensores.



Fotografía N° 1.- Vista del sistema interno y externo utilizado

4.4.1. Descripción del canal modular

4.4.1.1. Estructuras propias del canal

4.4.1.1.1. Pozo de disipación

Es la estructura previa al canal aguas arriba del vertedero, conformado por paredes de acrílico de 1.105 m. x 3 m., paredes de acero de 1.21 m. x 1.02 m., marcos y soportes regulables de acero de 0.825 m. de altura.



Fotografía N° 2.- Pozo de disipación

A su vez el pozo de disipación cuenta con dos puntos de desagüe, los cuales liberan el agua acumulada en el canal por el vertedero; para realizar la limpieza y si fuera necesario el intercambio del vertedero a ensayar.



Fotografía N° 3.- Puntos de desagüe en el pozo de disipación

4.4.1.1.2. Canal aguas arriba

Está ubicado a 67.6 m. de la base del pozo de disipación y en la pared delantera de acero; formada por 4 módulos de 1.5 m. de longitud cada uno. Con una sección transversal de 0.457 m. x 0.523 m. el canal aguas arriba tiene su extensión hasta la mesa en volado del vertedero.



Fotografía N° 4.- Canal aguas arriba

Además, el canal aguas arriba se sostiene mediante soportes modulares de acero de 1.303 m. de altura y 0.523 m. de distancia entre los dos puntos de apoyo. Los soportes se encuentran distribuidos uno por módulo.



Fotografía N° 5.- Soporte típico del canal aguas arriba

4.4.1.1.3. Canal aguas abajo

Está ubicado a 0.5 m. por debajo de la base del canal aguas arriba y la mesa en volado del vertedero; formada por dos secciones continuas: la primera de un módulo de 1.5 m. de longitud con una sección transversal de 0.457 m. x 102.3 m. y la segunda de 3 módulos de 1.5 m de longitud con una sección transversal de 0.457 m. x 0.523 m. El canal aguas abajo tiene su extensión hasta la piscina de almacenamiento.



Fotografía N° 6.- Canal aguas abajo

Además, el canal se sostiene mediante soportes modulares de acero de 0.80 m. de altura y 0.386 m. de distancia entre los cuatro puntos de apoyo. Los soportes se encuentran distribuidos de la siguiente manera: dos en el primer módulo, uno en el segundo y tercer módulo y dos en el último módulo; siendo uno de ellos un soporte extra de 1.5 pulgadas de diámetro y una base de 0.2 cm x 0.1 cm.



Fotografía N° 7.- Soporte típico y extra del canal aguas abajo

4.4.1.2. Estructuras externas del canal

4.4.1.2.1. Sistema de bombas

Las bombas utilizadas son de la categoría mecánica; teniéndose disponibles una bomba de 7 HP y tres bombas de 15 HP. Cabe resaltar que el caudal máximo alcanzado operando las cuatro bombas simultáneas fue de 118 L/s.



Fotografía N° 8.- Bombas de 15 hp y 7 hp (de izquierda a derecha)

El sistema a su vez comprende las tuberías de succión, impulsión y llegada que son necesarias para el abastecimiento del agua en el canal al momento de la toma de datos. Los

diámetros de las tuberías son de 3 y 4 pulgadas dependiendo del tipo de bomba.



Fotografía N° 9.- Tuberías de succión, impulsión y llegada

4.4.1.2.2. **Piscina de almacenamiento**

Es la estructura encargada de acumular y recibir agua garantizando la recirculación de la misma y el correcto funcionamiento de las bombas al momento de realizar las diferentes pruebas. Posee un diámetro de 3.6 m., una altura de 0.70 m. y un volumen máximo de $7.125 m^3$. En la fotografía N° 11 se presenta el punto de alimentación para todo el sistema.



Fotografía N° 10.- Piscina de almacenamiento



Fotografía N° 11.- Punto de alimentación

4.4.1.2.3. Sistema de automatización SCADA

Para realizar la puesta a punto del sistema de automatización SCADA, fue necesario realizar la programación, configuración y calibración del Datalogger y los periféricos.

4.4.1.2.3.1. Datalogger

Es el controlador principal, el cual recibe toda la información brindada por los periféricos y muestra todos los datos organizados en grupos; según lo programado en la configuración inicial.



Fotografía N° 12.- Datalogger

4.4.1.2.3.2. **Periféricos**

Son todos los sensores y actuadores que se comunican con el Datalogger. En el caso de la presente investigación sólo se utilizarán sensores (de presión) debido a la necesidad única de recolectar datos sobre el vertedero para su posterior análisis.



Fotografía N° 13.- Sensores de presión

4.4.2. **Construcción e instalación del sistema de vertederos tipo tecla de piano**

En el siguiente apartado se detalla e ilustra el procedimiento de construcción e instalación general para los modelos de vertedero tipo tecla de piano, base de sensores y el montaje final sobre el canal.



Fotografía N° 14.- Modelos finalizados previo a la prueba de color

4.4.2.1. Modelos PKW

a) Corte de piezas



Fotografía N° 15.- Corte de piezas

b) Pulido y limpieza de piezas



Fotografía N° 16.- Pulido y limpieza de piezas

c) Soldadura de teclas independientes



Fotografía N° 17.- Soldadura de teclas independientes

d) Soldadura del vertedero



Fotografía N° 18.- Soldadura del vertedero

e) Nivelado de la base y detalle de cresta



Fotografía N° 19.- Nivelado de la base y detalle de cresta

f) Perforación de los espacios para las mangueras



Fotografía N° 20.- Perforación de los espacios para las mangueras

g) Pintado del vertedero y teclas



Fotografía N° 21.- Pintado del vertedero y teclas

h) Instalación de mangueras



Fotografía N° 22.- Instalación de mangueras

4.4.2.2. Sistema de sensores de presión

El procedimiento de construcción de la base para los sensores está fundamentado por un diseño previo que satisface las necesidades de los tres vertederos en tecla de piano.

La intención del diseño fue mantener los mismos sensores para puntos de investigación semejantes además de facilitar la trabajabilidad tanto en la etapa de instalación de las mangueras en los sensores; como en la etapa de sellado de las mismas. Para el intercambio de modelo, se retiró todo el sistema para poder realizar la limpieza de los sensores y así poder instalar y sellar las mangueras del siguiente modelo nuevamente.

a) Corte de las piezas de madera para la base de sensores



Fotografía N° 23.- Corte de piezas y lijado para la base de sensores

b) Prueba de verticalidad y ajuste de sensores



Fotografía N° 24.- Prueba de verticalidad y ajuste de sensores

c) Calibración de sensores

Para realizar una toma de datos correcta es indispensable calibrar los sensores antes de instalarlos. El proceso utilizado fue colocar una altura de agua que pudo ser medida directamente sobre los sensores y a partir de allí; comparar cual es el diferencial existente para cada uno de ellos y realizar el aumento o la disminución de los valores. En el Datalogger se configura esta corrección en miliamperios.



Fotografía N° 25.- Calibración de sensores

d) Pintado de la base e instalación final de sensores



Fotografía N° 26.- Instalación final de sensores

4.4.2.3. Montaje sobre el canal

a) Limpieza del canal



Fotografía N° 27.- Limpieza del canal

b) Instalación y nivelado de la mesa en volado del vertedero



Fotografía N° 28.- Instalación de la mesa en volado del vertedero

c) Instalación de la plancha de desnivel



Fotografía N° 29.- Instalación de la plancha de desnivel

d) Armado y nivelado de la mesa para base de sensores



Fotografía N° 30.- Armado y nivelado de la mesa para base de sensores

e) Armado del modelo a ensayar



Fotografía N° 31.- Vista frontal y superior del vertedero en tecla de piano instalado



Fotografía N° 32.- Vistas laterales del sistema completo

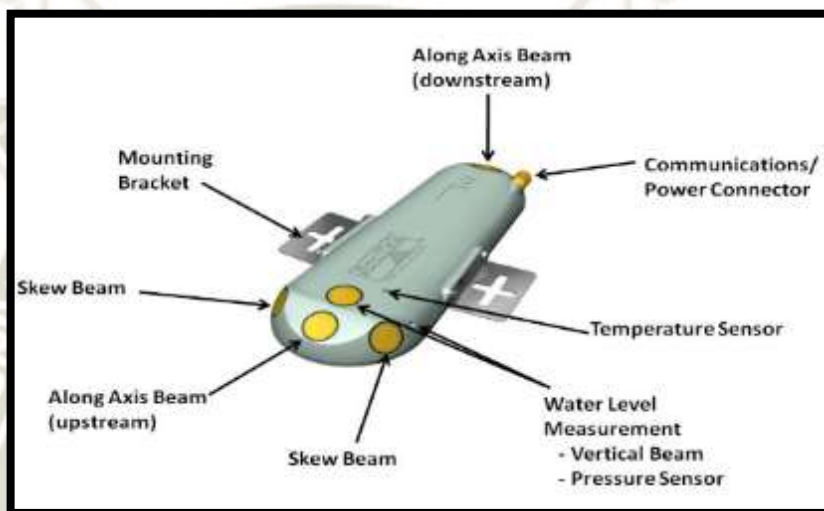
CAPITULO V

MODELAMIENTO DE VERTEDEROS TIPO TECLA DE PIANO

5.1. Medición de variables físicas

La toma de datos se clasificará en tres grupos y dependiendo del modelo. El primer grupo abarca todos los datos concernientes al caudalímetro SonTek IQ; siendo prioritarios los datos del caudal, la velocidad y el tirante aguas arriba. En la figura N° 57 se ilustra la descripción del mismo.

Figura N° 57.- Descripción del caudalímetro SonTek IQ



Fuente: (SonTek YSI incorporated)

El segundo grupo incluye los tirantes, velocidades y caudal aguas abajo. Para facilitar la toma de datos se instalaron tres reglas de precisión al milímetro; una por módulo. El tercer grupo de datos registrado directamente del Datalogger estará presente (al igual que el segundo grupo) sólo en los modelos de los vertederos en tecla de piano. Este grupo está conformado por los sensores mencionados en el apartado 4.4.1.2.3.2, los cuales registrarán y mostrarán la variación de presiones sobre el vertedero en función de la siguiente tabla.

Tabla N° 13.- Rangos de entrada y salida en sensores de presión

Input:	-100 a 100 mbar
Output:	4 a 20 mA

Fuente: Elaboración propia

5.2. Datos obtenidos y calculados

Una vez instalados todos los equipos ya mencionados, la toma de datos se hizo de manera progresiva partiendo desde caudales bajos que oscilaban desde los 5 a 8 litros por segundo hasta caudales altos entre 100 y 118 litros por segundo. Las pruebas aproximadamente duraron entre cinco y seis horas consecutivas tomando en cuenta el montaje y desmontaje de los instrumentos necesarios. En relación a los sensores de presión los valores fueron tomados directamente del Datalogger (cinco valores por bomba en funcionamiento) generando así un total de 20 datos por modelo; los cuales se presentan en los respectivos apartados.

5.2.1. Vertederos de pared delgada

5.2.1.1. Modelo 1: $P = 10 \text{ cm}$

Para el caso del modelo 1 (Pared delgada) se presenta una tabla resumen de los datos obtenidos por el caudalímetro "SonTek IQ". En la figura N° 58 se observa la relación entre el caudal (L/s) y la carga hidráulica total aguas arriba (m). La fotografía N° 33 ilustra el modelo en funcionamiento.

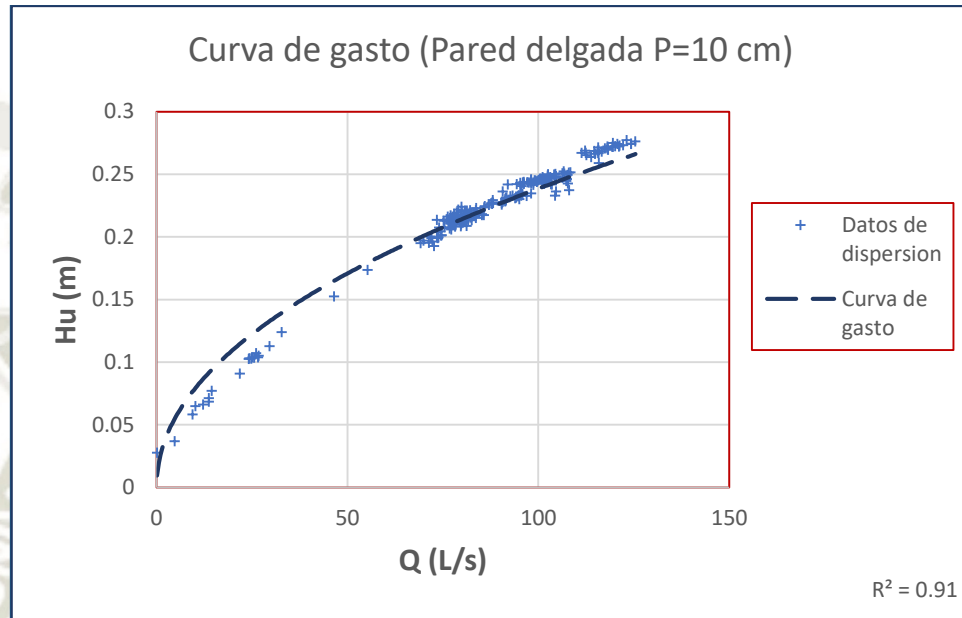
Tabla N° 14.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (Pared delgada $P = 10\text{cm}$)

Caudal (L/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	hu (m)	hv (m)	Hu (m)
4.7	0.1365	0.0753	0.0365	0.0003	0.0368
10.2	0.1639	0.1360	0.0639	0.0009	0.0648
14.5	0.1755	0.1802	0.0755	0.0017	0.0772
25.2	0.1999	0.2756	0.0999	0.0039	0.1037
32.7	0.2183	0.3280	0.1183	0.0055	0.1238
46.5	0.2435	0.4175	0.1435	0.0089	0.1524
55.3	0.2628	0.4601	0.1628	0.0108	0.1736
69.2	0.2800	0.5408	0.1800	0.0149	0.1949
72.2	0.2801	0.5644	0.1801	0.0162	0.1963
78.2	0.2907	0.5889	0.1907	0.0177	0.2084
80.6	0.2944	0.5995	0.1944	0.0183	0.2127
82.6	0.2942	0.6142	0.1942	0.0192	0.2134
86.0	0.3052	0.6166	0.2052	0.0194	0.2246
91.3	0.3090	0.6468	0.2090	0.0213	0.2303
95.5	0.3187	0.6557	0.2187	0.0219	0.2406
98.7	0.3203	0.6746	0.2203	0.0232	0.2435
103.6	0.3156	0.7181	0.2156	0.0263	0.2419

104.7	0.3081	0.7435	0.2081	0.0282	0.2363
115.8	0.3381	0.7493	0.2381	0.0286	0.2667
117.4	0.3419	0.7516	0.2419	0.0288	0.2707

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 58.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (Pared delgada P = 10cm)



Fuente: Elaboración propia



Fotografía N° 33.- Vertedero de pared delgada P = 10cm en funcionamiento (Q = 91 L/s)

5.2.1.2. Modelo 2: $P = 20 \text{ cm}$

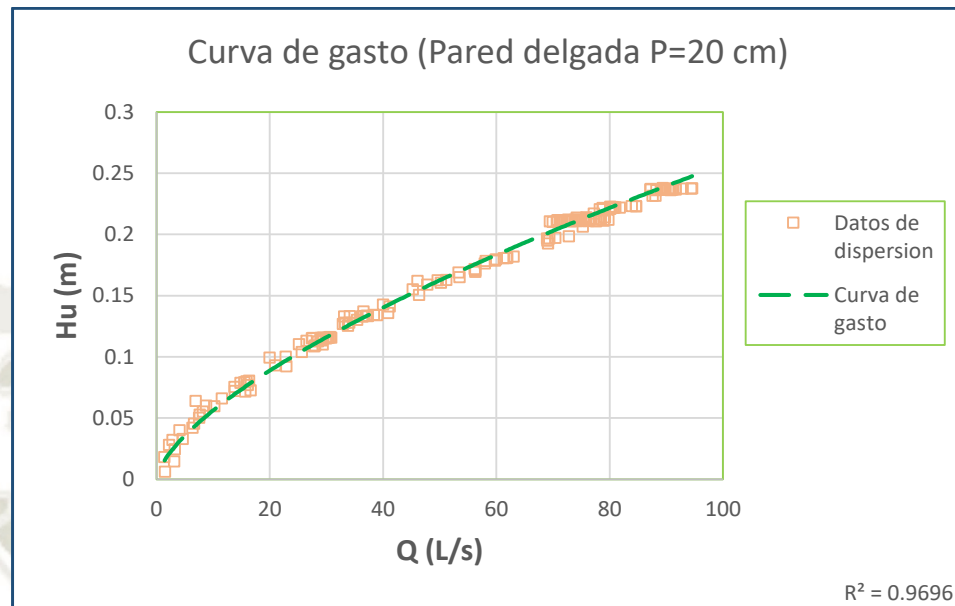
Para el caso del modelo 2 (Pared delgada) se presenta una tabla resumen de los datos obtenidos por el caudalímetro “SonTek IQ”. En la figura N° 59 se observa la relación entre el caudal (L/s) y la carga hidráulica total aguas arriba (m). La fotografía N° 34 ilustra el modelo en funcionamiento.

Tabla N° 15.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (Pared delgada $P = 20\text{cm}$)

Caudal (L/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	hu (m)	hv (m)	Hu (m)
6.9	0.2638	0.0575	0.0638	0.0002	0.0640
8.8	0.2598	0.0739	0.0598	0.0003	0.0600
10.2	0.2592	0.0864	0.0592	0.0004	0.0596
11.5	0.2654	0.0952	0.0654	0.0005	0.0659
16.1	0.2760	0.1280	0.0760	0.0008	0.0768
22.9	0.2985	0.1675	0.0985	0.0014	0.0999
26.5	0.3112	0.1866	0.1112	0.0018	0.1130
34.0	0.3250	0.2291	0.1250	0.0027	0.1277
41.2	0.3373	0.2673	0.1373	0.0036	0.1409
46.4	0.3460	0.2933	0.1460	0.0044	0.1504
51.2	0.3577	0.3132	0.1577	0.0050	0.1627
56.3	0.3633	0.3392	0.1633	0.0059	0.1692
61.3	0.3739	0.3587	0.1739	0.0066	0.1805
63.1	0.3749	0.3682	0.1749	0.0069	0.1818
69.2	0.3846	0.3935	0.1846	0.0079	0.1924
78.3	0.4118	0.4159	0.2118	0.0088	0.2206
83.9	0.4128	0.4447	0.2128	0.0101	0.2229
87.6	0.4209	0.4555	0.2209	0.0106	0.2315
91.6	0.4262	0.4704	0.2262	0.0113	0.2375
94.6	0.4255	0.4863	0.2255	0.0121	0.2376

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 59.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (Pared delgada P = 20cm)



Fuente: Elaboración propia



Fotografía N° 34.- Vertedero de pared delgada P = 20cm en funcionamiento (Q = 84 L/s)

5.2.2. Vertederos tipo Creager

5.2.2.1. Modelo 1: P = 10 cm

Para el caso del modelo 1 (Creager) se presenta una tabla resumen de los datos obtenidos por el caudalímetro “SonTek IQ”. En la figura N° 60 se observa la relación entre el caudal (L/s) y la carga hidráulica

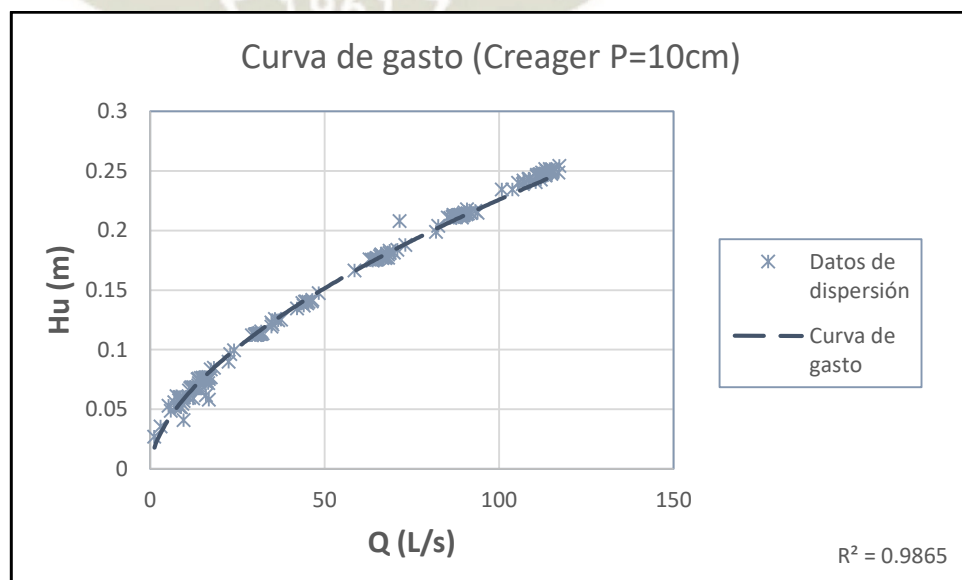
total aguas arriba (m). La fotografía N° 35 ilustra el modelo en funcionamiento.

Tabla N° 16.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (Creager P = 10cm)

Caudal (L/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	hu (m)	hv (m)	Hu (m)
5.3	0.1526	0.0762	0.0526	0.0003	0.0529
7.0	0.1553	0.0981	0.0553	0.0005	0.0558
8.4	0.1569	0.1168	0.0569	0.0007	0.0576
12.4	0.1577	0.1717	0.0577	0.0015	0.0592
16.9	0.1553	0.2377	0.0553	0.0029	0.0582
18.3	0.1825	0.2193	0.0825	0.0025	0.0849
30.1	0.2076	0.3169	0.1076	0.0051	0.1127
35.1	0.2148	0.3579	0.1148	0.0065	0.1213
42.1	0.2263	0.4072	0.1263	0.0085	0.1347
45.1	0.2296	0.43	0.1296	0.0094	0.1390
58.6	0.2536	0.506	0.1536	0.0130	0.1666
71.5	0.2934	0.5335	0.1934	0.0145	0.2079
63.9	0.2602	0.5372	0.1602	0.0147	0.1749
65.1	0.2604	0.5468	0.1604	0.0152	0.1756
86.1	0.2891	0.6517	0.1891	0.0216	0.2108
89.2	0.2896	0.6737	0.1896	0.0231	0.2128
103.8	0.3065	0.7412	0.2065	0.0280	0.2345
108.9	0.3135	0.7602	0.2135	0.0295	0.2430
111.7	0.3162	0.7731	0.2162	0.0305	0.2467
117.0	0.3149	0.8132	0.2149	0.0337	0.2486

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 60.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (Creager P = 10cm)



Fuente: Elaboración propia



Fotografía N° 35.- Vertedero Creager $P = 10\text{cm}$ en funcionamiento ($Q = 89\text{ L/s}$)

5.2.2.2. Modelo 2: $P = 20\text{ cm}$

Para el caso del modelo 2 (Creager) se presenta una tabla resumen de los datos obtenidos por el caudalímetro “SonTek IQ”. En la figura N° 61 se observa la relación entre el caudal (L/s) y la carga hidráulica total aguas arriba (m). La fotografía N° 36 ilustra el modelo en funcionamiento.

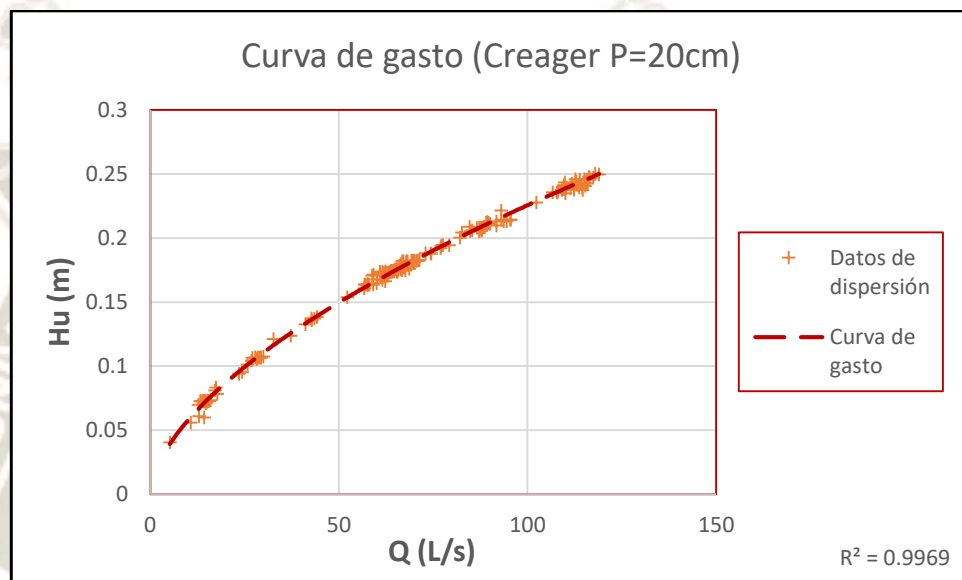
Tabla N° 17.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (Creager $P = 20\text{cm}$)

Caudal (L/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	h_u (m)	h_v (m)	H_u (m)
5.2	0.2405	0.0472	0.0405	0.0001	0.0406
10.7	0.2555	0.0913	0.0555	0.0004	0.0560
12.9	0.2604	0.1088	0.0604	0.0006	0.0610
17.1	0.2803	0.1337	0.0803	0.0009	0.0812
24.3	0.2937	0.1812	0.0937	0.0017	0.0954
30.0	0.3052	0.2149	0.1052	0.0024	0.1075
37.2	0.3206	0.2542	0.1206	0.0033	0.1239
41.1	0.3290	0.2737	0.1290	0.0038	0.1328
52.2	0.3484	0.3281	0.1484	0.0055	0.1539
58.0	0.3571	0.3555	0.1571	0.0064	0.1636
66.3	0.3721	0.39	0.1721	0.0078	0.1798
74.5	0.3786	0.4306	0.1786	0.0095	0.1880
77.5	0.3847	0.441	0.1847	0.0099	0.1946

82.6	0.3938	0.4591	0.1938	0.0107	0.2045
87.8	0.3936	0.4882	0.1936	0.0121	0.2057
94.5	0.3996	0.5172	0.1996	0.0136	0.2133
102.4	0.4127	0.5428	0.2127	0.0150	0.2278
109.1	0.4213	0.5667	0.2213	0.0164	0.2377
115.7	0.4246	0.5963	0.2246	0.0181	0.2427
119.0	0.4313	0.6036	0.2313	0.0186	0.2499

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 61.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (Creager P = 20cm)



Fuente: Elaboración propia



Fotografía N° 36.- Vertedero Creager P = 20cm en funcionamiento (Q = 60 L/s)

Fuente: Elaboración propia

5.2.3. Vertederos tipo tecla de piano

5.2.3.1. Modelo piloto: PKW de 5 unidades

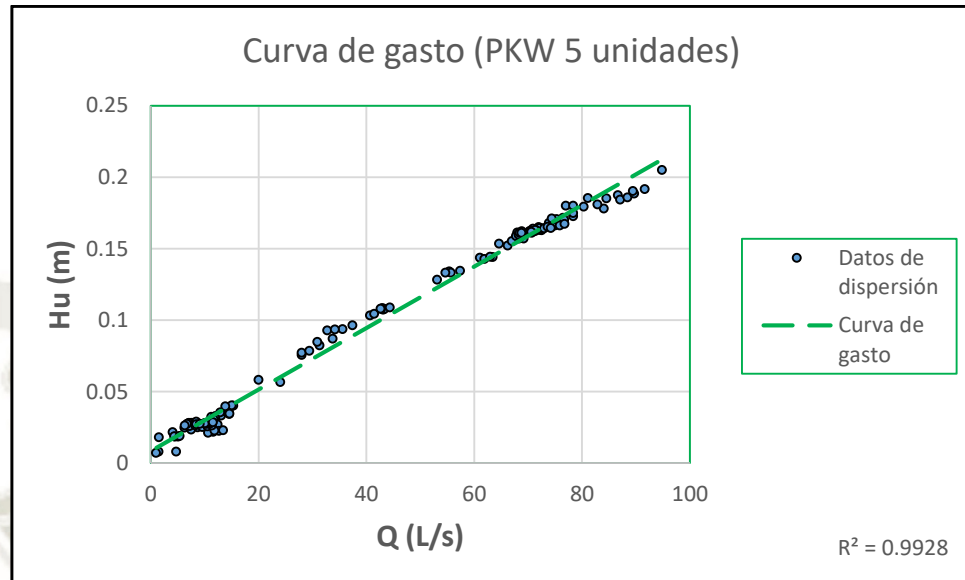
Para el caso del modelo piloto (tecla de piano) se presenta una tabla resumen de los datos obtenidos por el caudalímetro “SonTek IQ”. En la figura N° 62 se observa la relación entre el caudal (L/s) y la carga hidráulica total aguas arriba (m). La fotografía N° 37 ilustra el modelo en funcionamiento.

Tabla N° 18.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (PKW 5 unidades)

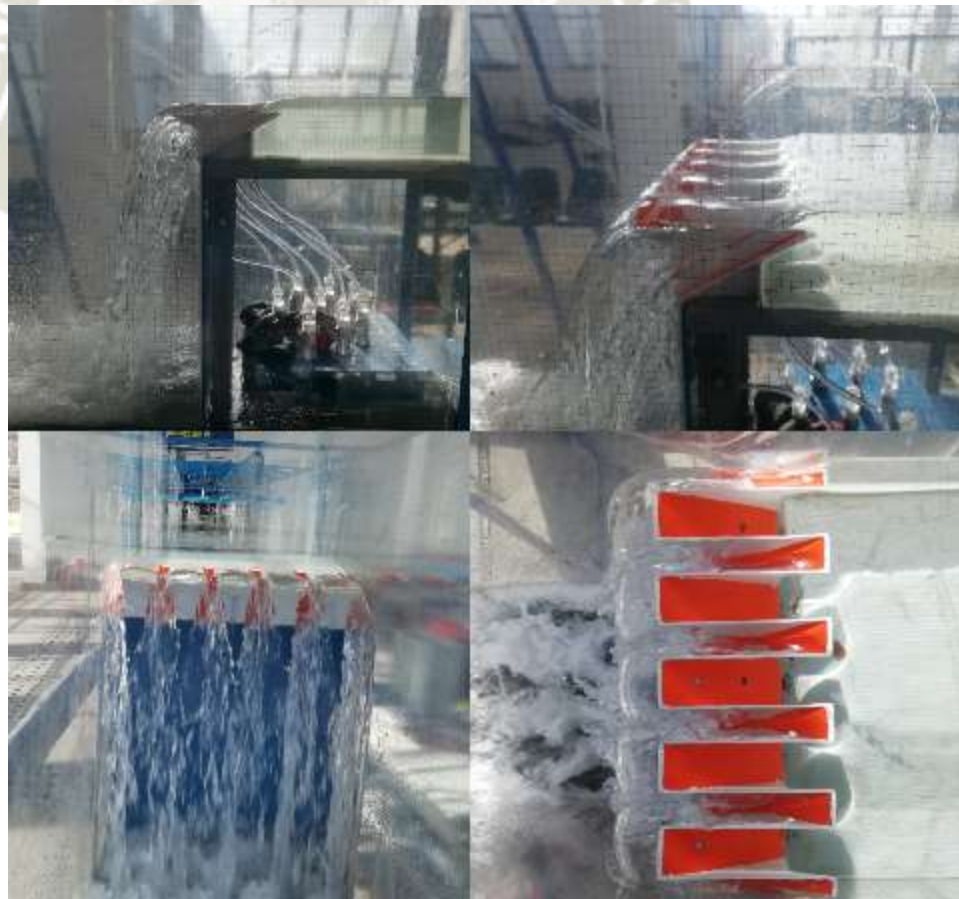
Caudal (L/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	hu (m)	hv (m)	Hu (m)	F	Re
4.4	0.0935	0.103	0.0182	0.0005	0.0187	0.108	7270.22
5.4	0.0935	0.1256	0.0182	0.0008	0.0190	0.131	8863.02
11.9	0.1049	0.2486	0.0296	0.0031	0.0327	0.245	19011.93
12.0	0.1049	0.2505	0.0296	0.0032	0.0328	0.247	19161.14
15.0	0.1114	0.2953	0.0361	0.0044	0.0405	0.283	23519.99
24.0	0.1226	0.4288	0.0473	0.0094	0.0567	0.391	36398.45
28.0	0.1415	0.4329	0.0662	0.0096	0.0758	0.367	40249.30
33.8	0.1500	0.4927	0.0747	0.0124	0.0870	0.406	47457.04
35.6	0.1565	0.4979	0.0812	0.0126	0.0938	0.402	49195.27
40.7	0.1634	0.5447	0.0881	0.0151	0.1033	0.430	55216.23
41.5	0.1641	0.5531	0.0888	0.0156	0.1044	0.436	56197.87
55.4	0.1882	0.6443	0.1129	0.0212	0.1340	0.474	70732.82
57.4	0.1868	0.6724	0.1115	0.0230	0.1345	0.497	73512.96
61.9	0.1930	0.7021	0.1177	0.0251	0.1428	0.510	78144.61
63.4	0.1931	0.7189	0.1178	0.0263	0.1441	0.522	80030.07
75.0	0.2111	0.777	0.1358	0.0308	0.1666	0.540	90699.68
77.0	0.2275	0.7404	0.1522	0.0279	0.1802	0.496	89798.68
88.5	0.2228	0.8689	0.1475	0.0385	0.1860	0.588	104273.60
91.7	0.2273	0.8822	0.1520	0.0397	0.1917	0.591	106953.97
94.8	0.2433	0.8528	0.1680	0.0371	0.2051	0.552	106913.59

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 62.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (PKW 5 unidades)



Fuente: Elaboración propia



Fotografía N° 37.- Vertedero PKW 5 unidades en funcionamiento ($Q = 13 \text{ L/s}$)

5.2.3.2. Modelo 1: PKW de 4 unidades

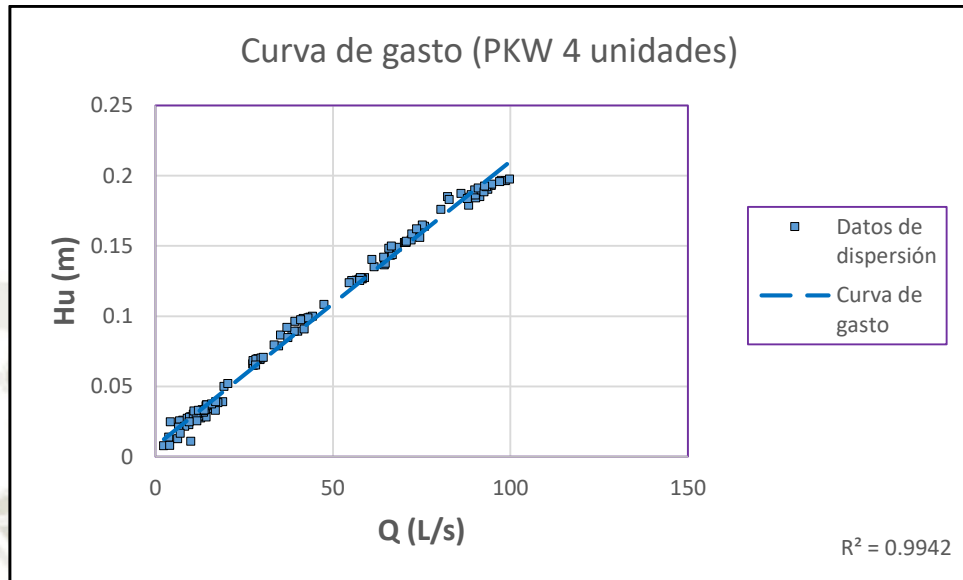
Para el caso del modelo 1 (tecla de piano) se presenta una tabla resumen de los datos obtenidos por el caudalímetro “SonTek IQ”. En la figura N° 63 se observa la relación entre el caudal (L/s) y la carga hidráulica total aguas arriba (m). La fotografía N° 38 ilustra el modelo en funcionamiento.

Tabla N° 19.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (PKW 4 unidades)

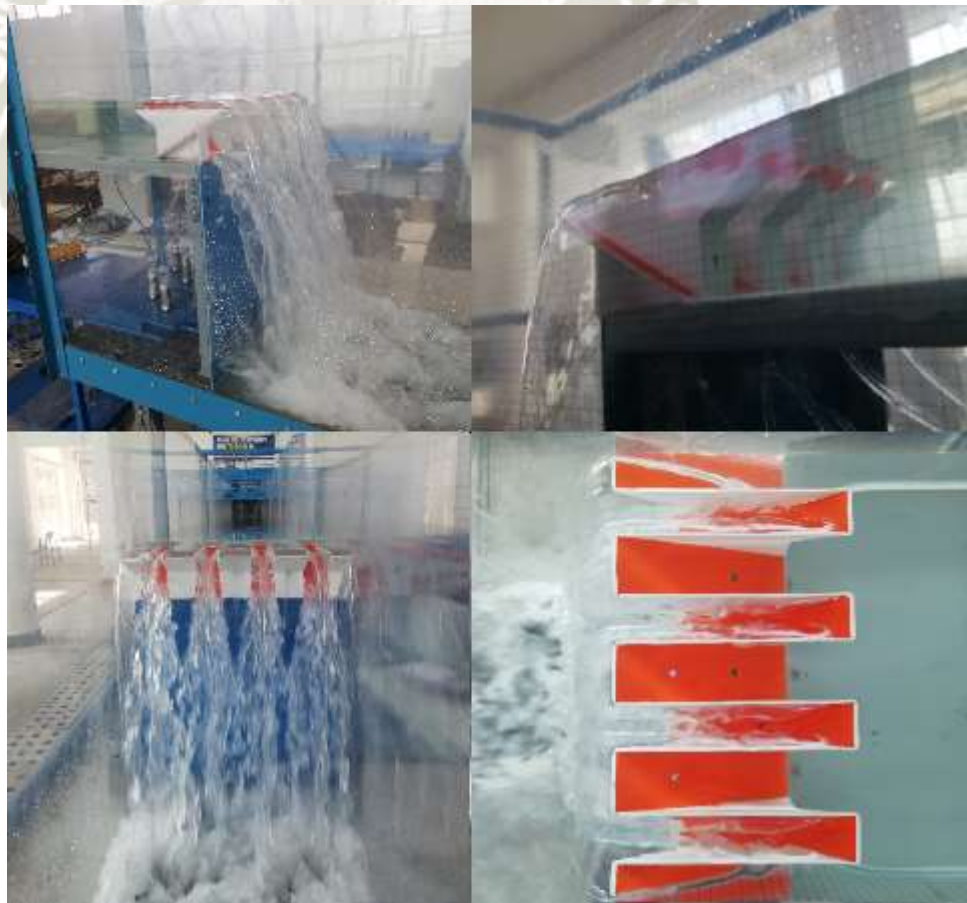
Caudal (L/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	hu (m)	hv (m)	Hu (m)	F	Re
6.9	0.1190	0.1267	0.0246	0.0008	0.0254	0.117	10548.74
11.1	0.1190	0.2048	0.0246	0.0021	0.0268	0.190	17050.23
13.6	0.1228	0.2422	0.0284	0.0030	0.0314	0.221	20582.83
16.9	0.1226	0.3017	0.0282	0.0046	0.0329	0.275	25615.36
27.6	0.1511	0.3998	0.0567	0.0081	0.0648	0.328	38677.13
28.7	0.1552	0.4050	0.0608	0.0084	0.0692	0.328	39825.28
30.4	0.1557	0.4272	0.0613	0.0093	0.0706	0.346	42078.92
34.8	0.1620	0.4697	0.0676	0.0112	0.0788	0.373	47363.13
43.6	0.1792	0.5320	0.0848	0.0144	0.0992	0.401	56835.56
44.3	0.1793	0.5409	0.0849	0.0149	0.0998	0.408	57815.79
56.6	0.2006	0.6174	0.1062	0.0194	0.1256	0.440	70154.47
58.3	0.2003	0.6371	0.1059	0.0207	0.1265	0.455	72333.66
61.7	0.2080	0.6488	0.1136	0.0215	0.1351	0.454	75160.58
66.2	0.2143	0.6762	0.1199	0.0233	0.1432	0.466	79546.58
70.7	0.2222	0.6961	0.1278	0.0247	0.1525	0.472	83416.46
74.5	0.2232	0.7305	0.1288	0.0272	0.1560	0.494	87742.80
89.0	0.2500	0.7788	0.1556	0.0309	0.1865	0.497	98904.20
90.1	0.2484	0.7941	0.1540	0.0321	0.1861	0.509	100540.89
93.3	0.2533	0.8062	0.1589	0.0331	0.1921	0.511	103038.86
97.4	0.2553	0.8351	0.1609	0.0355	0.1964	0.528	107118.30

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 63.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (PKW 4 unidades)



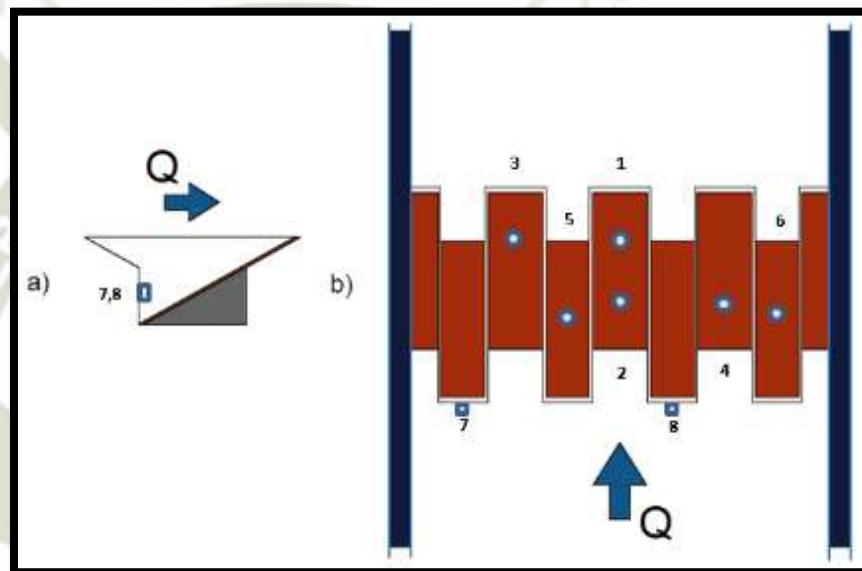
Fuente: Elaboración propia



Fotografía N° 38.- Vertedero PKW 4 unidades en funcionamiento (Q = 9 L/s)

Las presiones obtenidas en los ensayos se muestran en la Tabla N° 20. Como se mencionó en el apartado anterior, los datos de salida calibrados del Datalogger son expresados en “miliamperios” por lo que demanda calcular todos los valores en función del rango de los sensores (-100 a 100 mbar), en centímetros de columna de agua y a su vez el diferencial con respecto a los valores de partida. La figura N° 64 muestra los Puntos Distribuidos sobre el vertedero (P.D.).

Figura N° 64.- Puntos Distribuidos (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 20.- Datos diferenciales de presión (PKW 4 unidades)

DATOS DIFERENCIALES PKW 4 unidades (cm H2O)							
Toma		D.G.		Grupo 1			
		Caudal (L/s)	Tirante (m)	S1	S2	S3	S4
B1	1	7	0.119	5.48	8.29	5.48	7.27
	2	9	0.120	4.46	7.90	5.99	8.54
	3	12	0.121	6.25	7.90	7.27	8.29
	4	14	0.124	5.23	8.16	6.50	8.41
	5	19	0.128	5.99	8.41	6.37	9.05
B1, B2	6	27	0.152	6.12	9.18	7.27	9.94
	7	35	0.162	7.52	9.56	7.90	10.71
	8	40	0.170	6.63	9.81	7.52	10.71
	9	42	0.178	7.65	10.96	8.29	11.98
	10	44	0.179	9.18	11.09	8.67	11.60

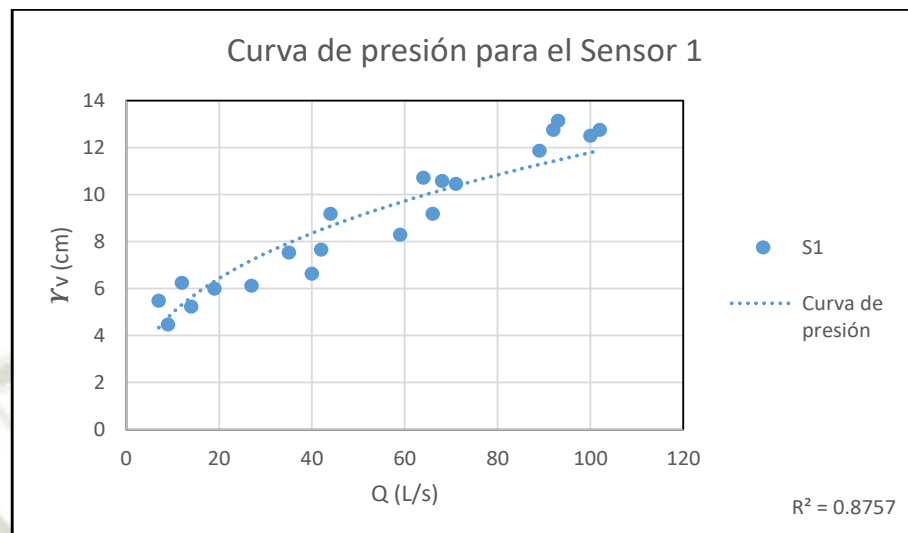
B1, B2, B3	11	59	0.201	8.29	12.36	9.69	13.00
	12	64	0.207	10.71	12.62	9.81	14.15
	13	66	0.214	9.18	12.75	10.96	14.79
	14	68	0.220	10.58	14.40	10.58	14.53
	15	71	0.222	10.45	14.66	10.32	14.53
B1, B2, B3, B4	16	89	0.250	11.85	15.42	11.34	15.17
	17	92	0.252	12.75	15.55	12.49	15.55
	18	93	0.249	13.13	15.81	12.24	14.91
	19	100	0.255	12.49	15.55	12.11	14.40
	20	102	0.255	12.75	15.68	11.47	15.68
Toma	D.G.		Grupo 2				
	Caudal (L/s)	Tirante (m)	S5	S6	S7	S8	
B1	1	7	0.119	4.33	3.82	9.69	8.67
	2	9	0.120	5.48	4.08	10.20	8.92
	3	12	0.121	4.72	4.21	11.85	8.80
	4	14	0.124	4.97	4.33	9.18	9.05
	5	19	0.128	4.84	4.59	9.94	9.43
B1, B2	6	27	0.152	6.37	5.35	13.13	13.00
	7	35	0.162	6.76	5.86	12.87	13.26
	8	40	0.170	6.88	6.63	15.04	13.77
	9	42	0.178	7.27	7.14	15.68	15.93
	10	44	0.179	7.27	7.65	16.06	15.04
B1, B2, B3	11	59	0.201	7.90	8.16	18.48	18.48
	12	64	0.207	8.29	8.54	18.99	19.63
	13	66	0.214	9.05	8.80	21.29	19.63
	14	68	0.220	8.92	8.92	21.41	20.14
	15	71	0.222	8.92	8.54	20.90	20.90
B1, B2, B3, B4	16	89	0.250	9.43	9.30	23.33	24.60
	17	92	0.252	9.56	9.43	22.31	24.73
	18	93	0.249	10.20	9.94	25.11	24.98
	19	100	0.255	9.81	9.56	24.73	24.86
	20	102	0.255	9.81	8.92	25.75	23.96

Fuente: Elaboración propia

Gráficos de dispersión para curvas de presión sobre puntos distribuidos semejantes:

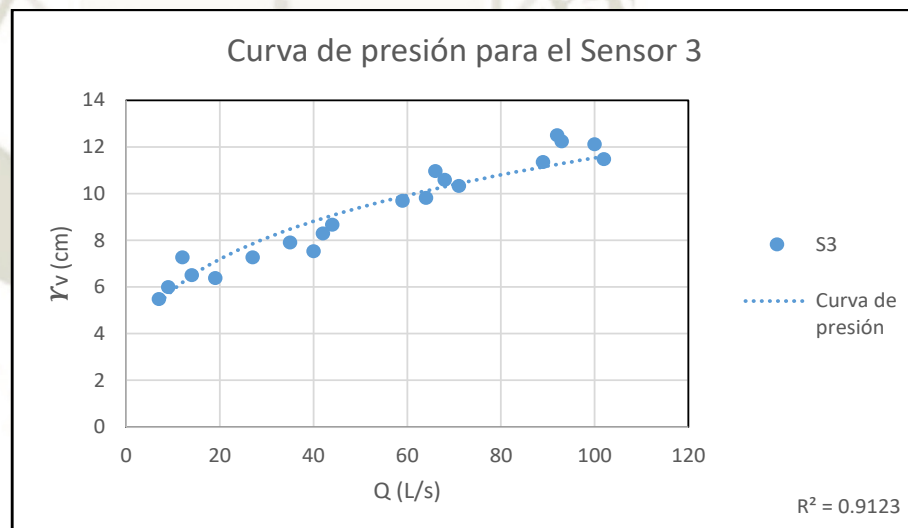
- Sensor 1 y 3.- Ubicados en las teclas de entrada a un tercio de la altura del vertedero, medido desde la cresta.

Figura N° 65.- Curva de presión para el Sensor 1 (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

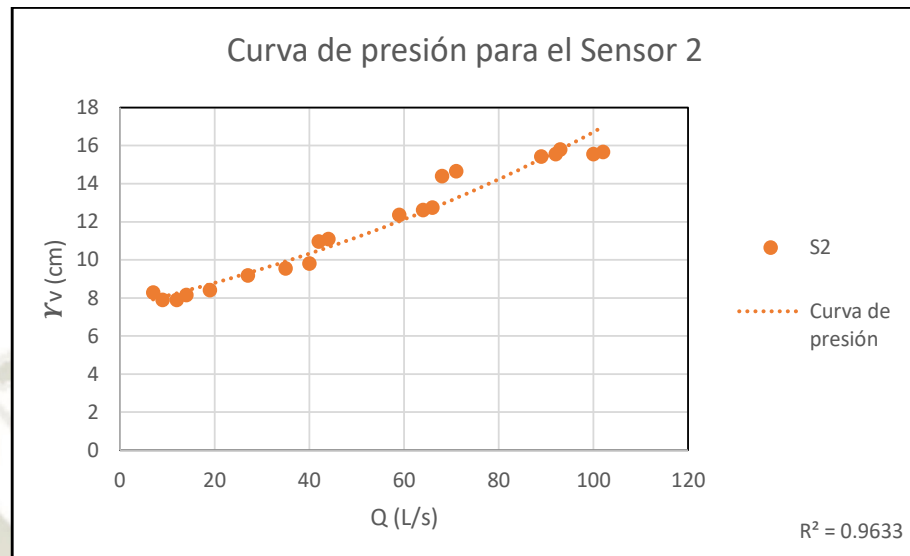
Figura N° 66.- Curva de presión para el Sensor 3 (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

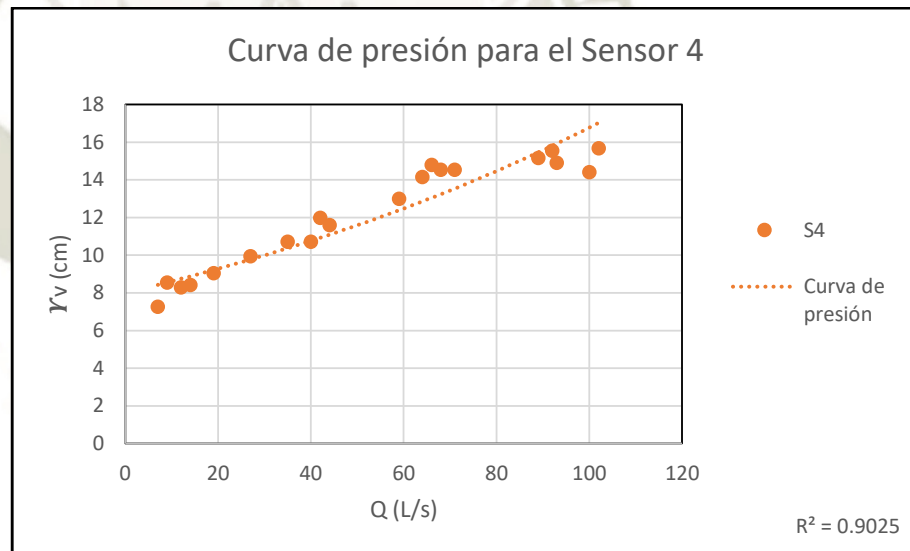
- Sensor 2 y 4.- Ubicados en las teclas de entrada a los dos tercios de la altura del vertedero, medido desde la cresta.

Figura N° 67.- Curva de presión para el Sensor 2 (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

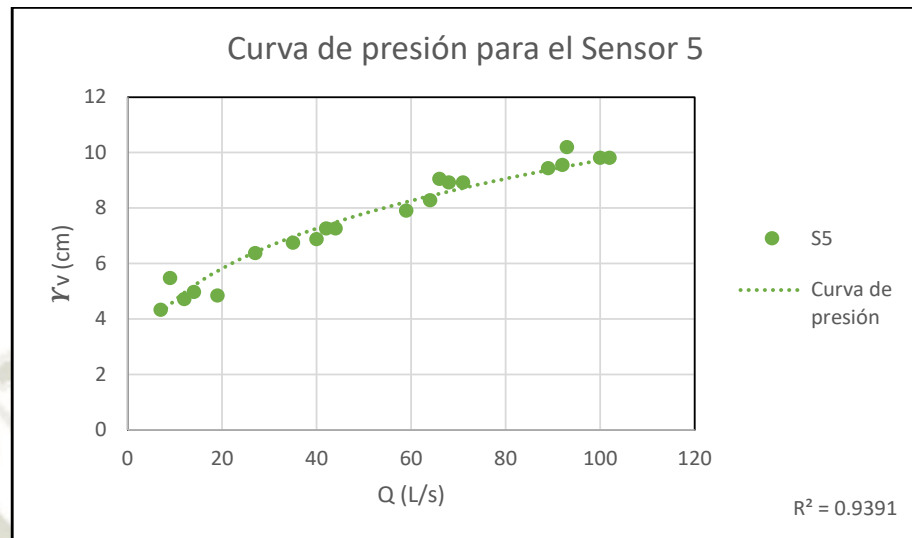
Figura N° 68.- Curva de presión para el Sensor 4 (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

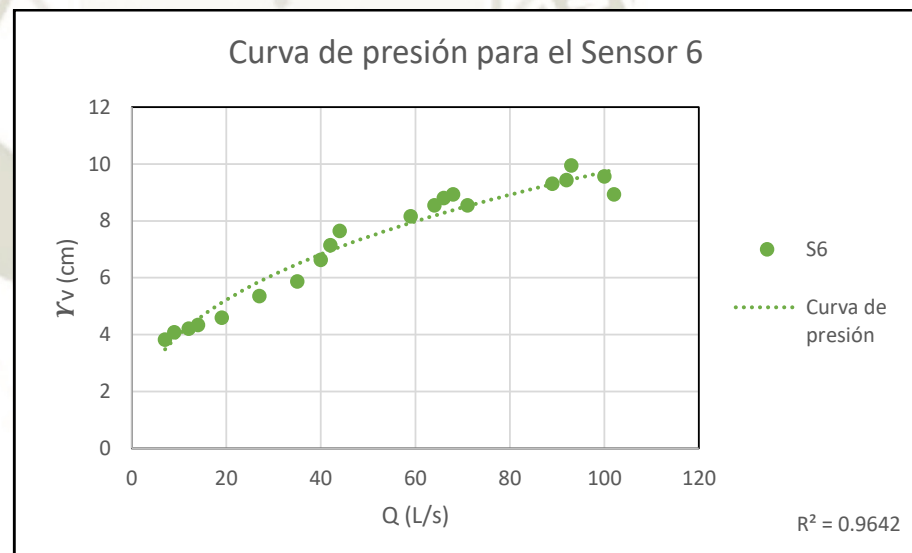
- Sensor 5 y 6.- Ubicados en las teclas de salida a la mitad de la altura del vertedero, medido desde la cresta.

Figura N° 69.- Curva de presión para el Sensor 5 (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

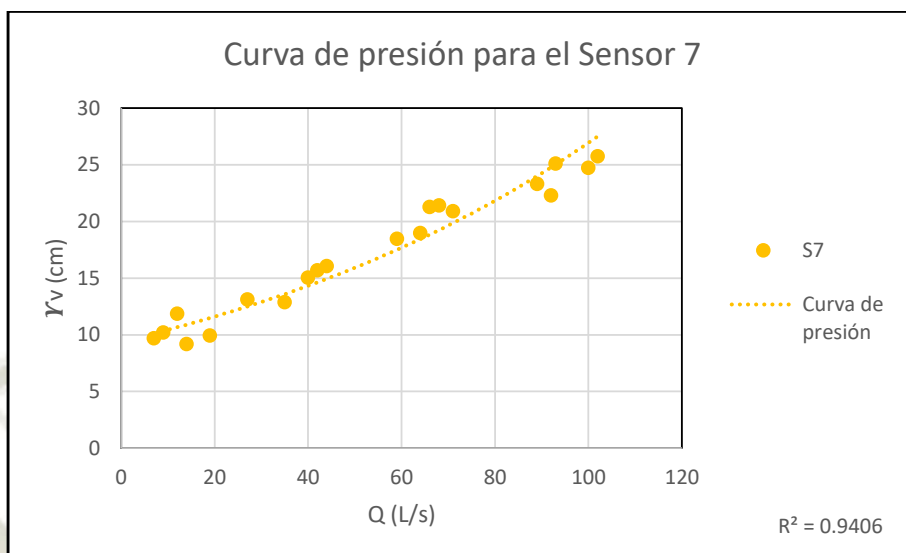
Figura N° 70.- Curva de presión para el Sensor 6 (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

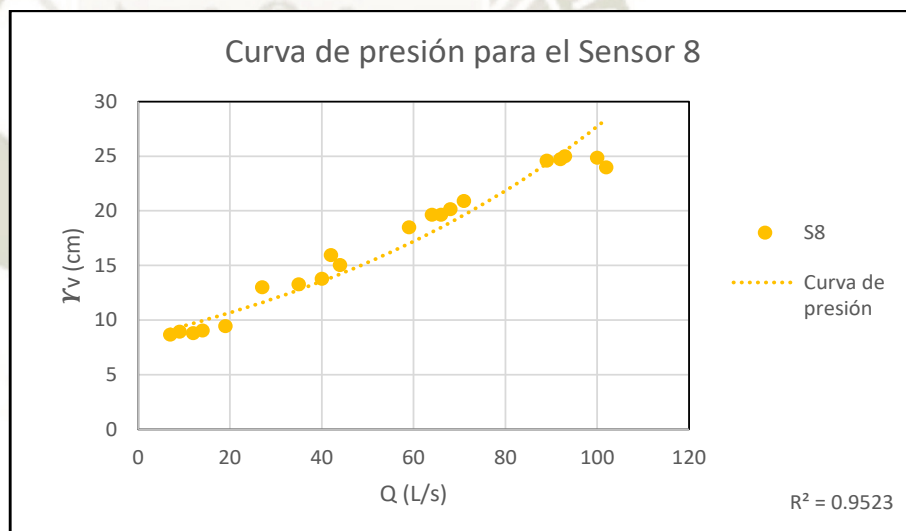
- Sensor 7 y 8.- Ubicados al centro de las paredes verticales de las teclas de salida.

Figura N° 71.- Curva de presión para el Sensor 7 (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 72.- Curva de presión para el Sensor 8 (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se procedió a tomar datos en la sección aguas abajo del sistema, la cual no posee compuertas y mantiene la geometría del canal aguas arriba; si bien se presentan tirantes bajos el flujo cambia de régimen (de flujo subcrítico a flujo supercrítico) al tener velocidades elevadas, haciendo del proceso de captura de datos bastante complicado e incierto. Pese a las dificultades se presenta

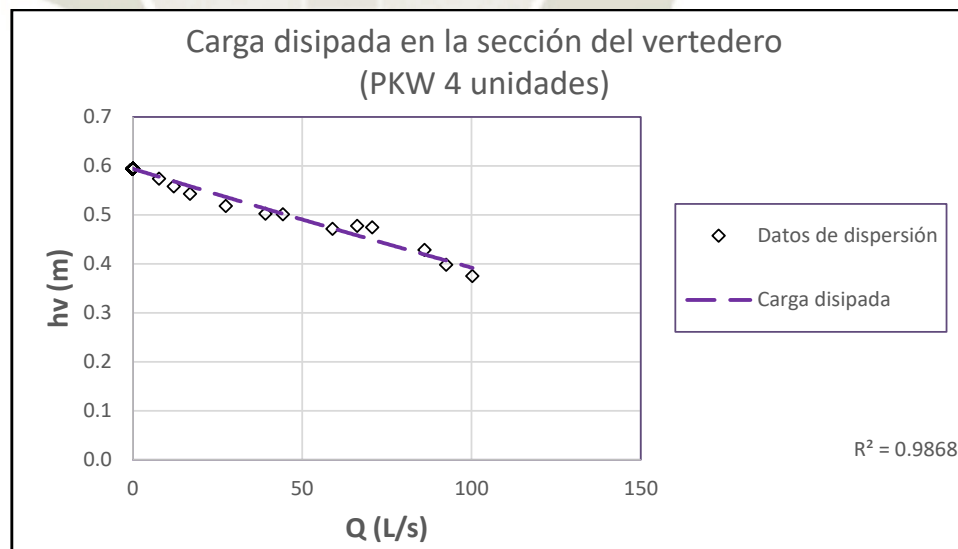
en la Tabla N° 21 y en la Figura N° 73 los datos y relaciones obtenidas.

Tabla N° 21.- Carga disipada (PKW 4 unidades)

Carga disipada (PKW 4 unidades)							
Vu (m/s)	T1 (cm)	T2 (cm)	T3 (cm)	T prom (cm)	Ad (m2)	Vd (m/s)	hv (m)
0.000							0.59
0.142	2.8	3.1	4.2	3.4	0.0154	0.504	0.57
0.220	2.2	3.4	4.6	3.4	0.0155	0.781	0.56
0.302	3.0	3.7	5.2	4.0	0.0181	0.933	0.54
0.394	3.3	4.2	5.4	4.3	0.0197	1.397	0.52
0.502	4.4	5.1	6.8	5.4	0.0248	1.578	0.50
0.541	5.0	5.8	7.2	6.0	0.0274	1.617	0.50
0.643	5.9	7.7	6.9	6.8	0.0312	1.888	0.47
0.676	7.2	8.0	7.7	7.6	0.0349	1.898	0.48
0.694	7.8	7.9	8.1	7.9	0.0363	1.950	0.47
0.743	8.4	7.9	8.2	8.2	0.0373	2.308	0.43
0.813	8.8	7.8	8.4	8.3	0.0381	2.430	0.40
0.861	9.1	8.2	8.5	8.6	0.0393	2.551	0.38

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 73.- Gráfico de dispersión para la carga disipada (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

5.2.3.3. Modelo 2: PKW de 2 unidades

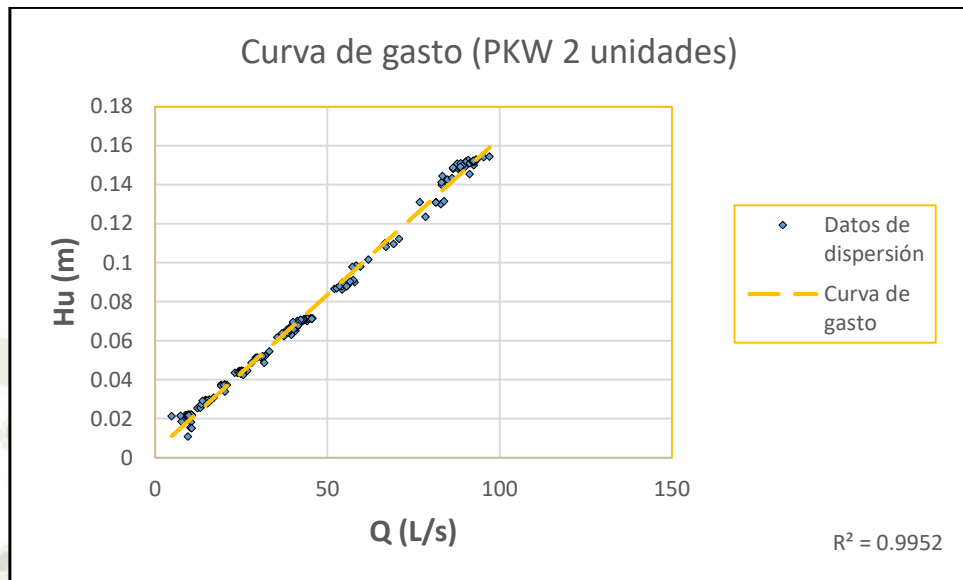
Para el caso del modelo 2 (tecla de piano) se presenta una tabla resumen de los datos obtenidos por el caudalímetro “SonTek IQ. En la figura N° 74 se observa la relación entre el caudal (L/s) y la carga hidráulica total aguas arriba (m). La fotografía N° 39 ilustra el modelo en funcionamiento.

Tabla N° 22.- Tabla resumen para los datos de caudal obtenidos (PKW 2 unidades)

Caudal (L/s)	Tirante (m)	Velocidad (m/s)	hu (m)	hv (m)	Hu (m)	F	Re
8.2	0.2079	0.0868	0.0183	0.0004	0.0187	0.061	10052.21
10.2	0.2044	0.1097	0.0148	0.0006	0.0154	0.077	12591.54
14.8	0.2177	0.1484	0.0281	0.0011	0.0292	0.102	17601.21
15.2	0.2178	0.1523	0.0282	0.0012	0.0294	0.104	18066.03
28.0	0.2349	0.2606	0.0453	0.0035	0.0487	0.172	32109.33
31.0	0.2366	0.2863	0.0470	0.0042	0.0512	0.188	35403.35
33.1	0.2396	0.3028	0.0500	0.0047	0.0546	0.198	37671.96
38.4	0.2496	0.3366	0.0600	0.0058	0.0658	0.215	42714.75
39.9	0.2495	0.3497	0.0599	0.0062	0.0661	0.224	44371.97
41.2	0.2497	0.3609	0.0601	0.0066	0.0668	0.231	45811.18
54.3	0.2657	0.4471	0.0761	0.0102	0.0863	0.277	58431.92
66.7	0.2863	0.5099	0.0967	0.0133	0.1100	0.304	68934.68
70.8	0.2870	0.5398	0.0974	0.0149	0.1123	0.322	73057.19
81.6	0.3030	0.5890	0.1134	0.0177	0.1311	0.342	81624.60
83.9	0.3023	0.6071	0.1127	0.0188	0.1315	0.353	84050.89
88.3	0.3212	0.6017	0.1316	0.0185	0.1500	0.339	85464.46
90.3	0.3224	0.6128	0.1328	0.0191	0.1519	0.345	87171.25
92.5	0.3192	0.6342	0.1296	0.0205	0.1501	0.358	89844.34
95.4	0.3223	0.6479	0.1327	0.0214	0.1541	0.364	92158.08
97.1	0.3218	0.6602	0.1322	0.0222	0.1544	0.372	93847.32

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 74.- Gráfico de dispersión para carga hidráulica vs caudal (PKW 2 unidades)



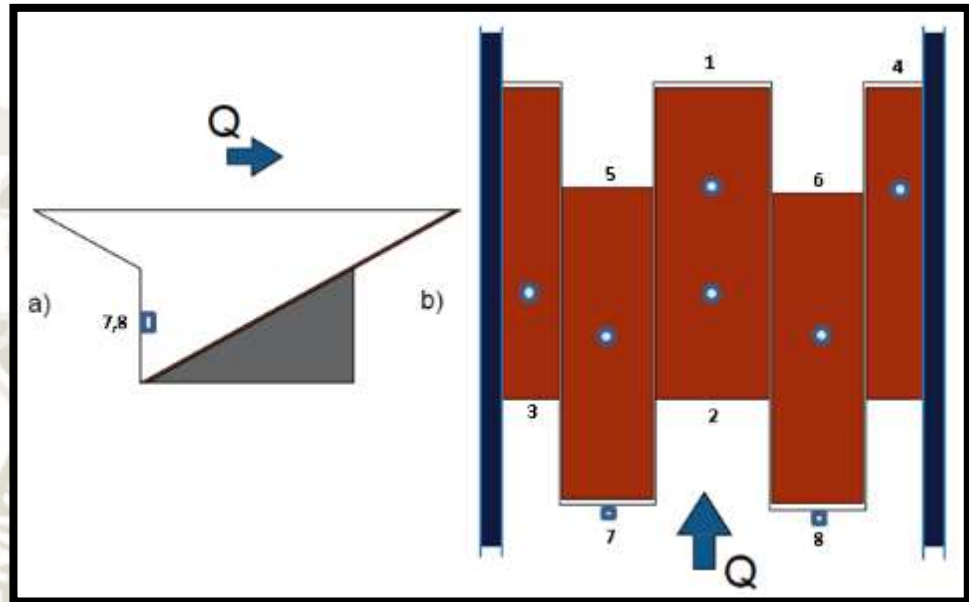
Fuente: Elaboración propia



Fotografía N° 39.- Vertedero PKW 2 unidades en funcionamiento (Q = 33 L/s)

Siguiendo el procedimiento de cálculo adoptado en el modelo 1, se presenta en la Tabla N° 23 las presiones sobre los Puntos Distribuidos para el estudio del modelo 2 (Figura N°75).

Figura N° 75.- Puntos Distribuidos (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 23.- Datos diferenciales de presión (PKW 2 unidades)

DATOS DIFERENCIALES PKW 2 unidades (cm H2O)							
Toma		D.G.		Grupo 1			
		Caudal (L/s)	Tirante (m)	S1	S2	S3	S4
B1	1	8	0.206	9.18	14.28	15.04	9.18
	2	10	0.212	8.80	14.53	14.79	8.03
	3	12	0.213	10.58	14.53	15.68	9.18
	4	13	0.216	9.94	14.66	15.30	8.92
	5	16	0.218	10.20	14.79	15.68	9.94
B1, B2	6	30	0.237	10.58	15.68	16.32	10.58
	7	33	0.241	10.71	16.06	16.06	10.71
	8	37	0.249	10.83	16.19	17.59	10.07
	9	41	0.252	12.11	17.21	17.97	10.20
	10	43	0.252	12.75	16.70	18.23	10.58
B1, B2, B3	11	56	0.269	12.87	17.59	18.23	10.71
	12	57	0.273	12.11	17.72	19.12	11.09
	13	62	0.281	11.09	18.48	18.86	12.24
	14	66	0.287	12.36	18.48	21.03	12.36

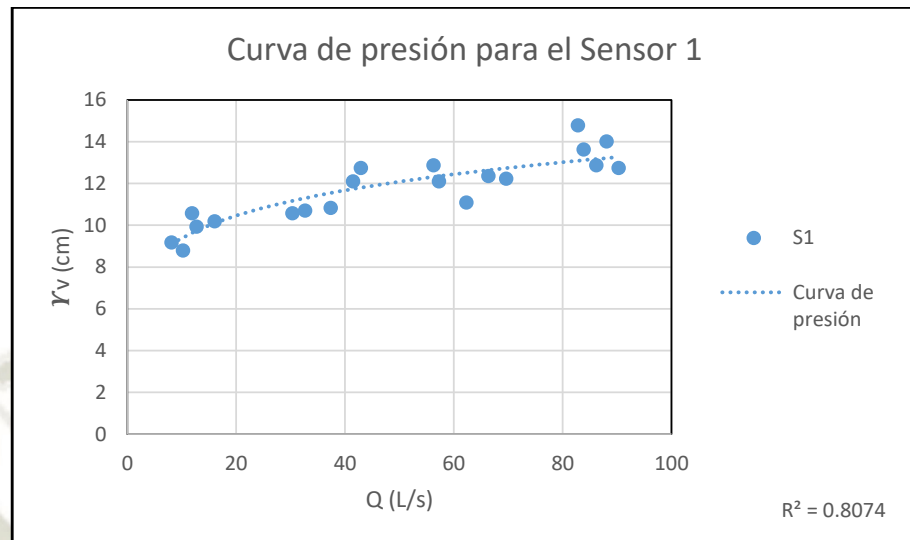
	15	70	0.288	12.24	17.97	18.74	12.11
B1, B2, B3, B4	16	83	0.308	14.79	18.99	21.41	13.89
	17	84	0.302	13.64	20.78	22.31	12.49
	18	86	0.315	12.87	20.52	24.35	14.53
	19	88	0.319	14.02	20.14	21.41	12.75
	20	90	0.322	12.75	21.16	23.71	11.60
Toma	D.G.		Grupo 2				
	Caudal (L/s)	Tirante (m)	S5	S6	S7	S8	
B1	1	8	0.206	3.44	3.95	17.59	15.55
	2	10	0.212	3.82	1.91	15.04	13.13
	3	12	0.213	2.04	3.44	17.46	14.91
	4	13	0.216	3.19	3.82	15.81	14.40
	5	16	0.218	5.99	5.23	15.93	14.15
B1, B2	6	30	0.237	6.63	7.27	17.85	17.21
	7	33	0.241	6.50	6.63	17.85	18.61
	8	37	0.249	7.39	5.74	18.10	20.01
	9	41	0.252	6.25	7.14	19.50	17.34
	10	43	0.252	6.12	7.52	19.50	19.76
B1, B2, B3	11	56	0.269	6.76	8.03	21.54	21.03
	12	57	0.273	8.67	6.63	21.41	22.69
	13	62	0.281	7.78	7.78	22.56	22.43
	14	66	0.287	8.41	7.90	24.09	23.58
	15	70	0.288	8.80	7.65	24.22	23.96
B1, B2, B3, B4	16	83	0.308	10.32	8.41	25.49	26.77
	17	84	0.302	10.58	9.30	27.66	26.00
	18	86	0.315	10.83	8.92	26.77	26.64
	19	88	0.319	11.34	7.78	27.40	27.79
	20	90	0.322	9.94	9.94	27.53	27.53

Fuente: Elaboración propia

Gráficos de dispersión para curvas de presión sobre puntos distribuidos semejantes:

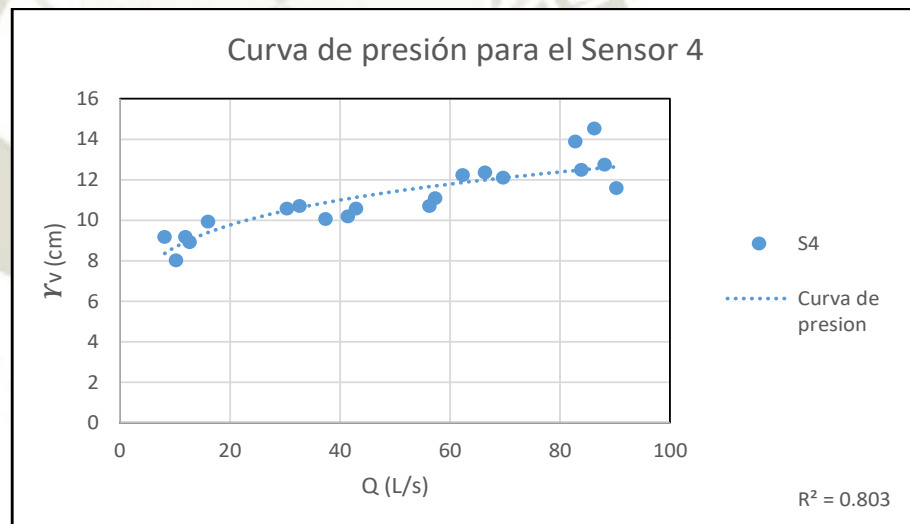
- Sensor 1 y 4.- Ubicados en las teclas de entrada a un tercio de la altura del vertedero, medido desde la cresta.

Figura N° 76.- Curva de presión para el Sensor 1 (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

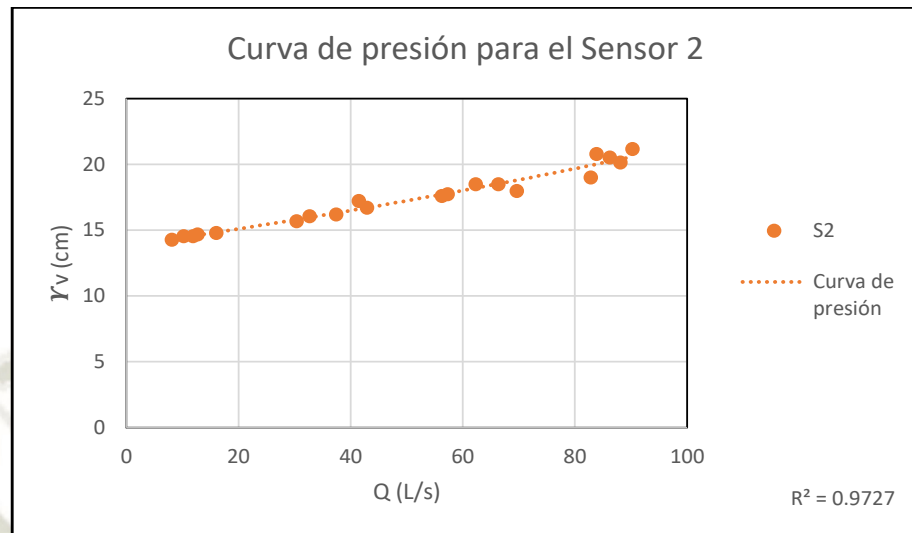
Figura N° 77.- Curva de presión para el Sensor 4 (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

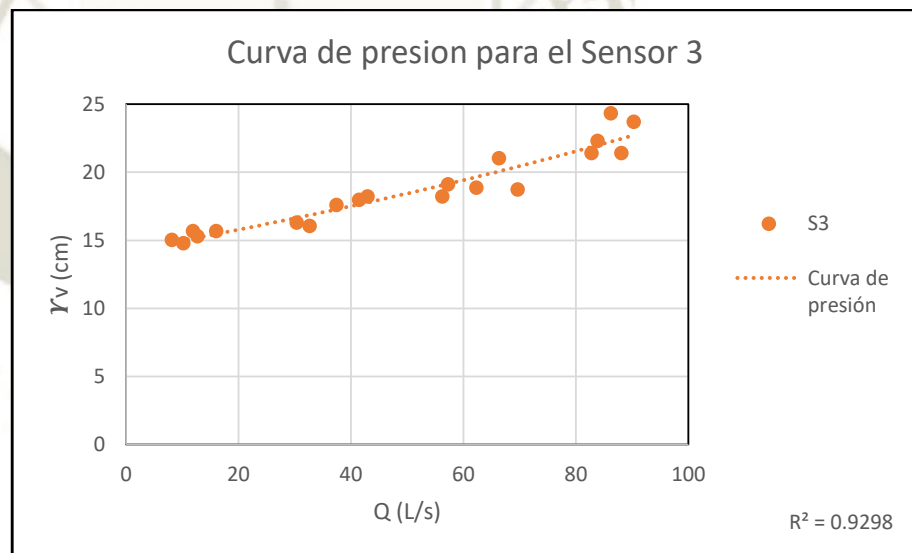
- Sensor 2 y 3.- Ubicados en las teclas de entrada a los dos tercios de la altura del vertedero, medido desde la cresta.

Figura N° 78.- Curva de presión para el Sensor 2 (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

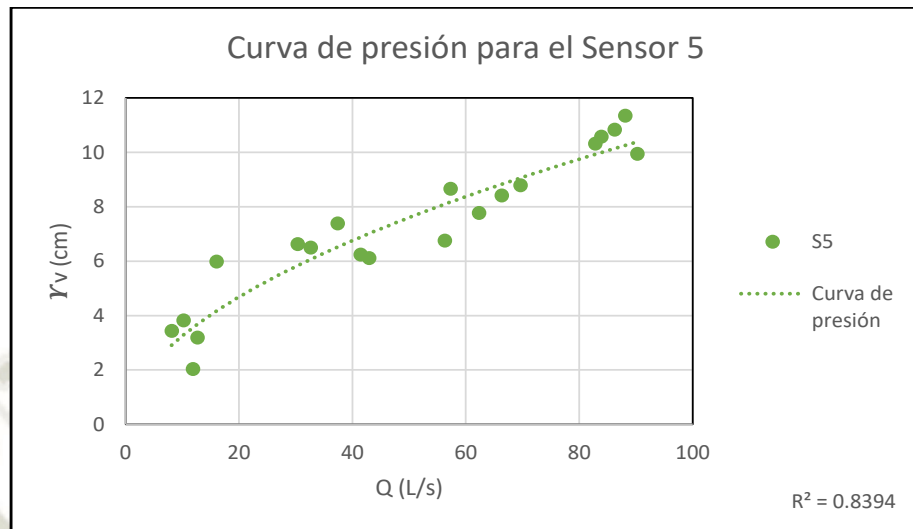
Figura N° 79.- Curva de presión para el Sensor 3 (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

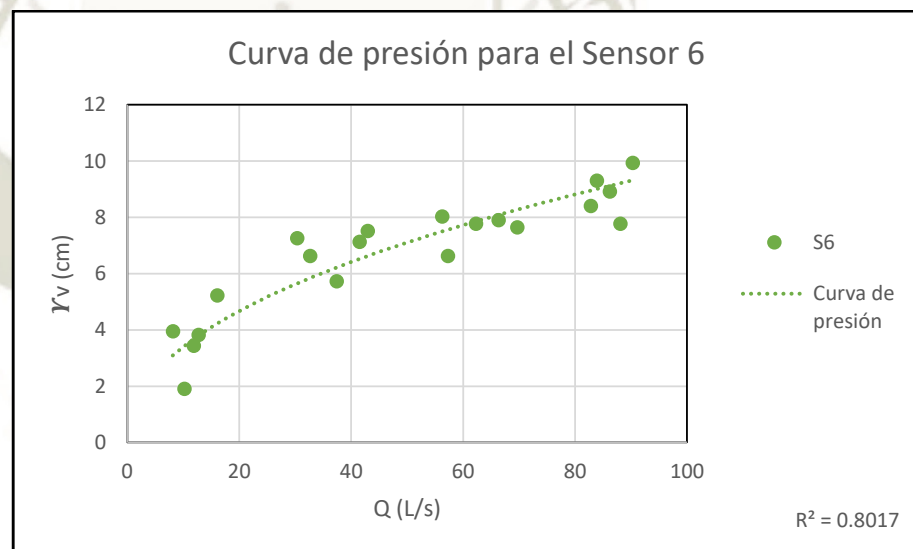
- Sensor 5 y 6.- Ubicados en las teclas de salida a la mitad de la altura del vertedero, medido desde la cresta.

Figura N° 80.- Curva de presión para el Sensor 5 (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

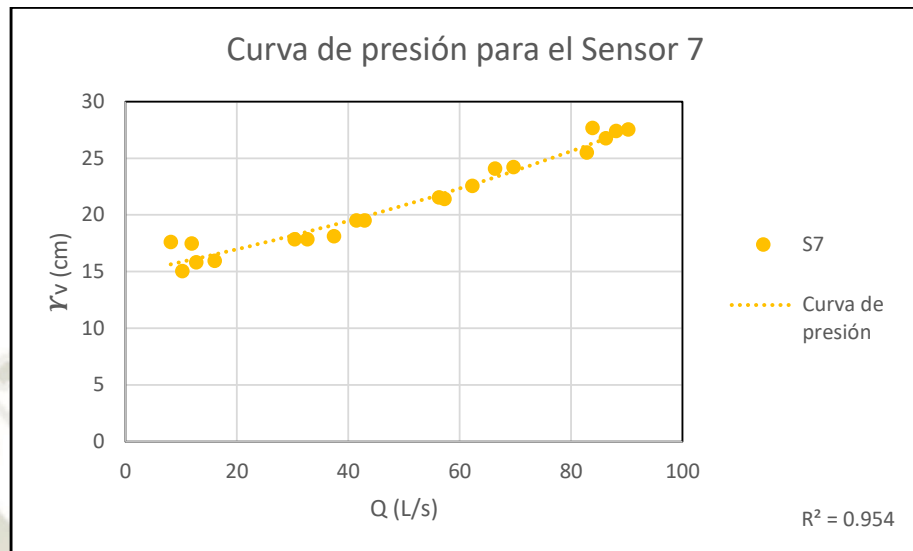
Figura N° 81.- Curva de presión para el Sensor 6 (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

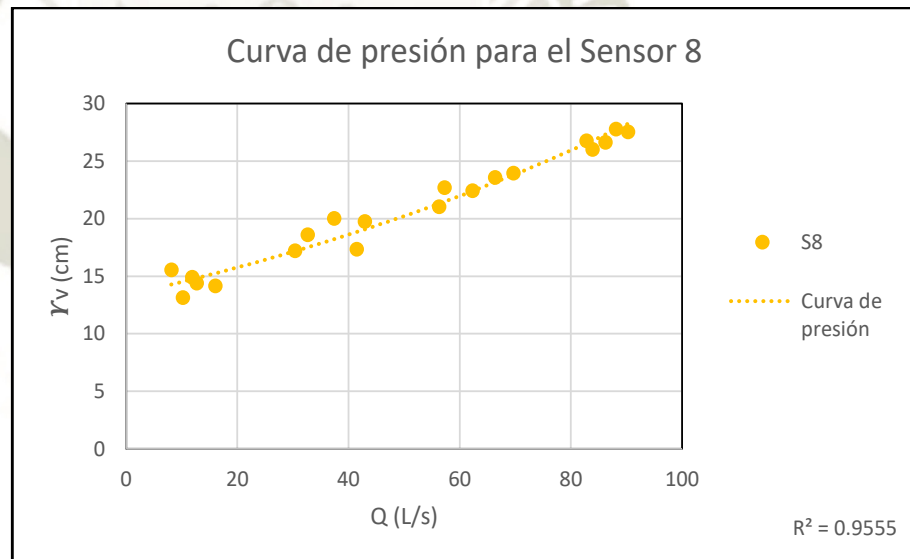
- Sensor 7 y 8.- Ubicados al centro de las paredes verticales de las teclas de salida.

Figura N° 82.- Curva de presión para el Sensor 7 (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 83.- Curva de presión para el Sensor 8 (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

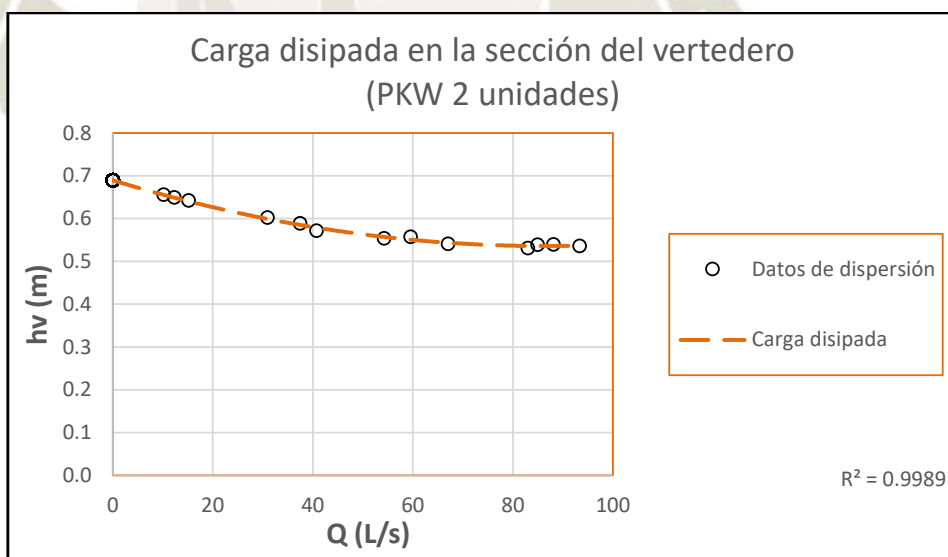
De igual manera y bajo las mismas condiciones de canal y flujo se realizó el estudio aguas abajo del vertedero. Los resultados se muestran en la Tabla N° 24 y en la Figura N° 84.

Tabla N° 24.- Carga disipada (PKW 2 unidades)

Carga disipada (PKW 2 unidades)							
Vu (m/s)	T1 (cm)	T2 (cm)	T3 (cm)	T prom (cm)	Ad (m2)	Vd (m/s)	hv (m)
0.000							0.69
0.105	2.7	3.8	3.6	3.4	0.0154	0.661	0.66
0.126	3.7	3.4	3.3	3.5	0.0158	0.777	0.65
0.152	3.7	3.9	3.8	3.8	0.0174	0.873	0.64
0.286	5.2	5.0	5.4	5.2	0.0238	1.303	0.60
0.333	5.5	5.9	5.6	5.7	0.0259	1.446	0.59
0.359	5.8	5.6	5.6	5.7	0.0259	1.574	0.57
0.447	6.0	7.2	7.3	6.8	0.0312	1.738	0.55
0.472	6.8	8.1	7.5	7.5	0.0341	1.746	0.56
0.516	8.2	7.8	7.5	7.8	0.0358	1.873	0.54
0.603	9.9	9.1	8.8	9.3	0.0423	1.960	0.53
0.591	10.1	9.3	8.8	9.4	0.0430	1.977	0.54
0.604	10.7	9.5	8.9	9.7	0.0443	1.987	0.54
0.635	11.3	10.0	9.3	10.2	0.0466	2.002	0.54

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 84.- Gráfico de dispersión para la carga disipada (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

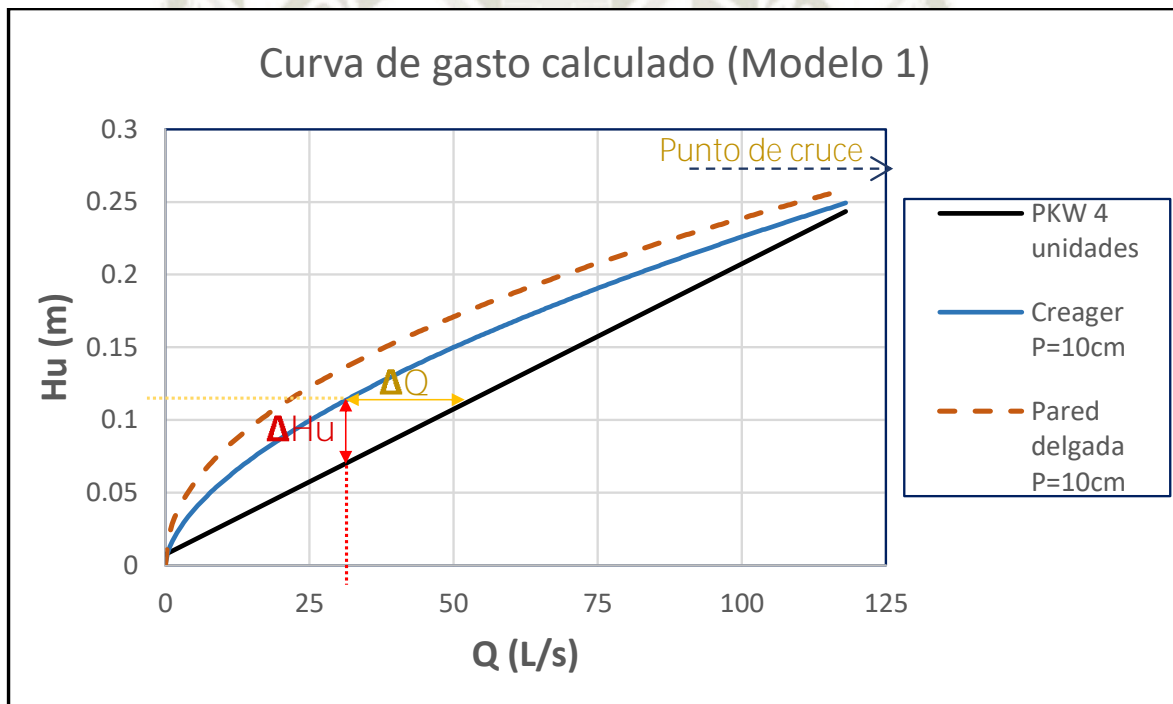
5.3. Análisis de resultados

5.3.1. Curvas de gasto (H_u/Q)

En las figuras N° 85 y 86 se tienen las curvas de gasto calculadas (vertedero de pared delgada, Creager y tecla de piano) en las cuales se

comprueba gráficamente el incremento del caudal para una misma carga sobre el vertedero y por semejanza, la reducción de la carga sobre el vertedero para un mismo caudal. La aplicación directa de estos resultados, se refleja en el aumento de la capacidad del embalse para las condiciones de diseño previas. Si bien la tendencia de la curva de gasto de los vertederos en tecla de piano es lineal, y según el gráfico, en los puntos próximos a los ensayados la eficiencia sobre los vertederos convencionales se puede ver comprometida, se demuestra en las secciones siguientes la eficiencia de los PKW para el rango de los ratios de diseño.

Figura N° 85.- Curva de gasto calculado (Modelo 1)

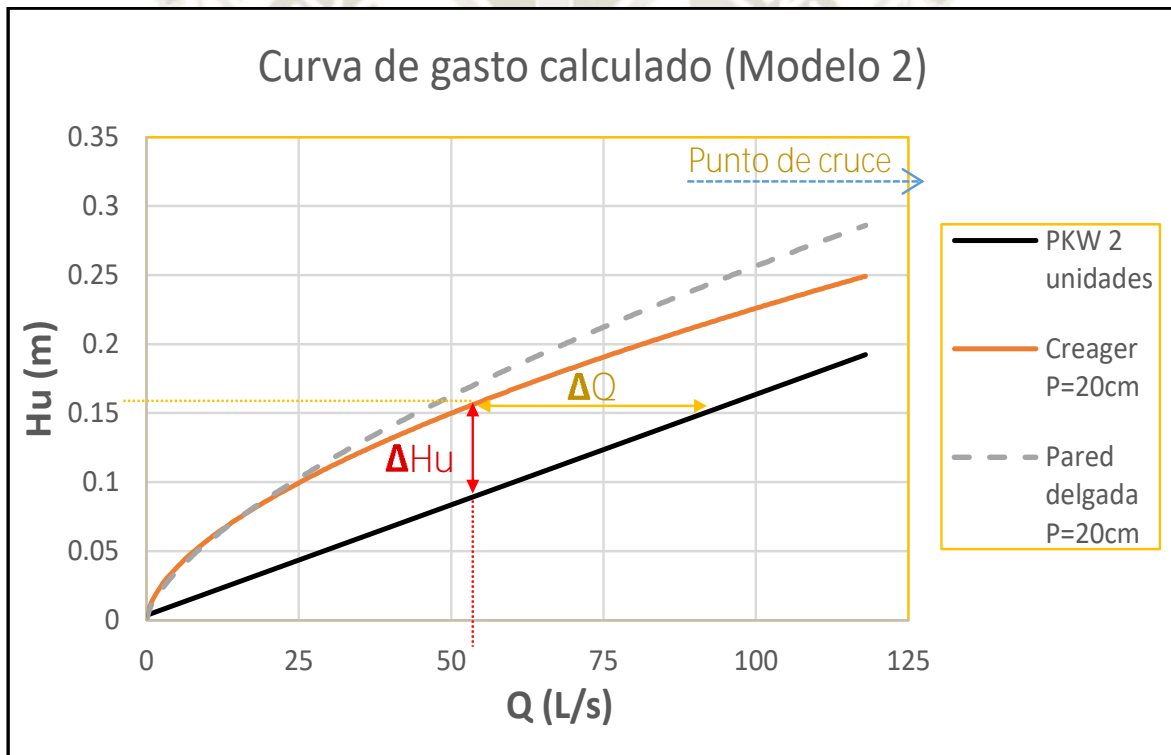


Fuente: Elaboración propia



Fotografía N° 40.- Tirante: 0.17m para los Modelos 1. Vertederos Creager $Q = 16 \text{ L/s}$ (izquierda) y PKW $Q = 40 \text{ L/s}$ (derecha)

Figura N° 86.- Curva de gasto calculada (Modelo 2)

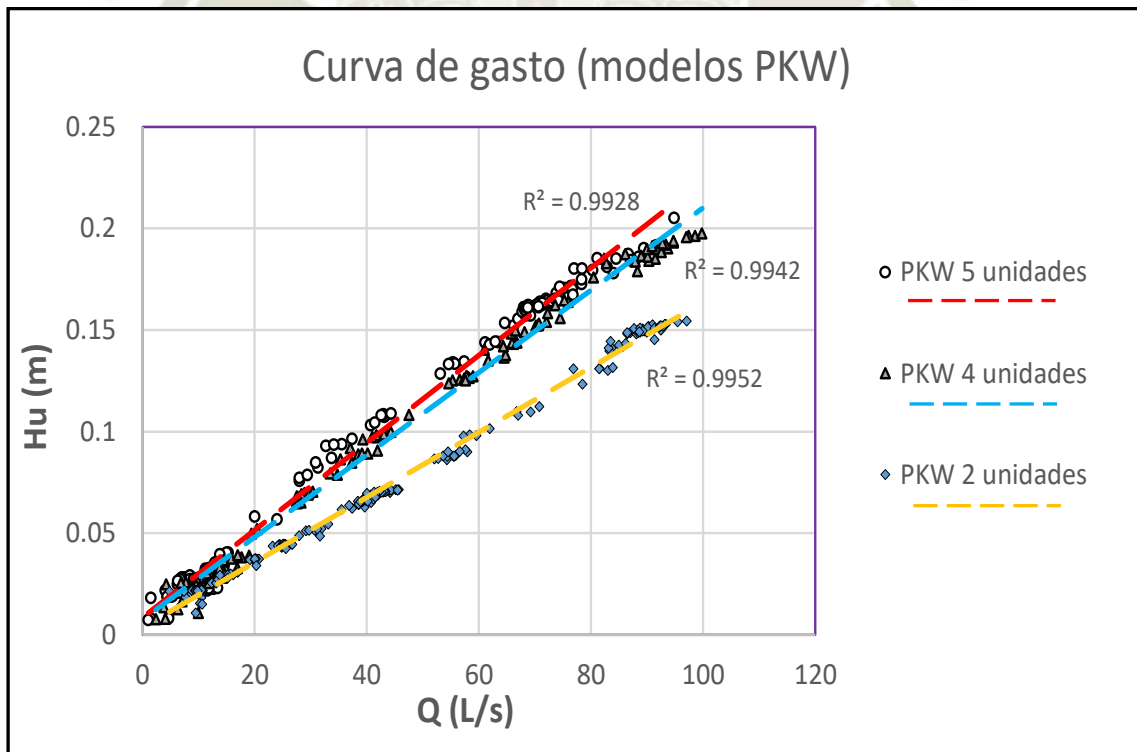


Fuente: Elaboración propia



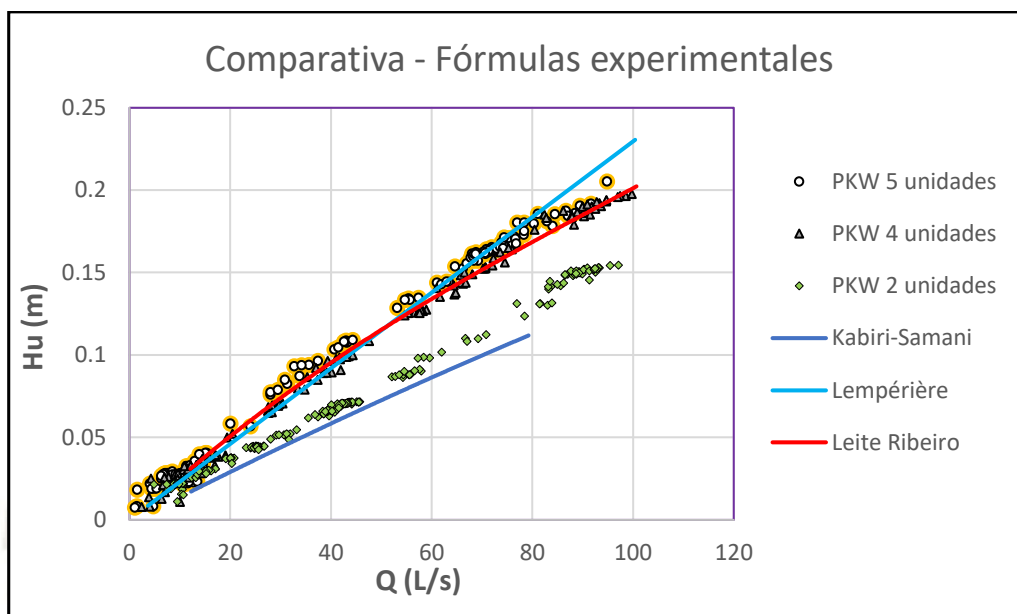
Fotografía N° 41.- Caudal: 89 L/s para los Modelos 2. Vertederos Creager $H_u = 0.21\text{m}$ (izquierda) y PKW $H_u = 0.149\text{m}$ (derecha)

Figura N° 87.- Gráfico de dispersión para las curvas de gastos de los modelos PKW



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 88.- Comparativa de los resultados para los modelos PKW con las curvas experimentales de la sección 4.3.3

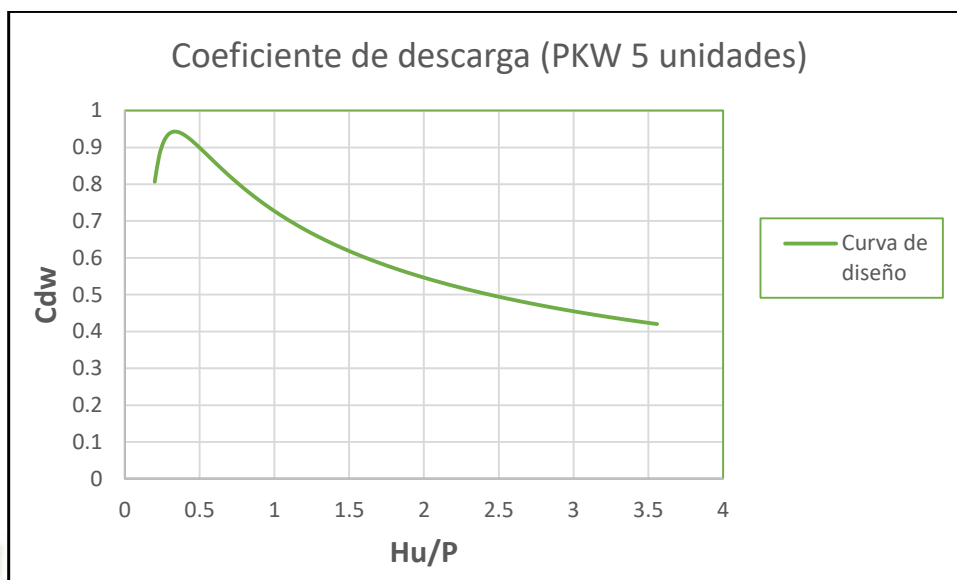


Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Curvas de diseño para gasto ($C_{dw}/H_u/p$)

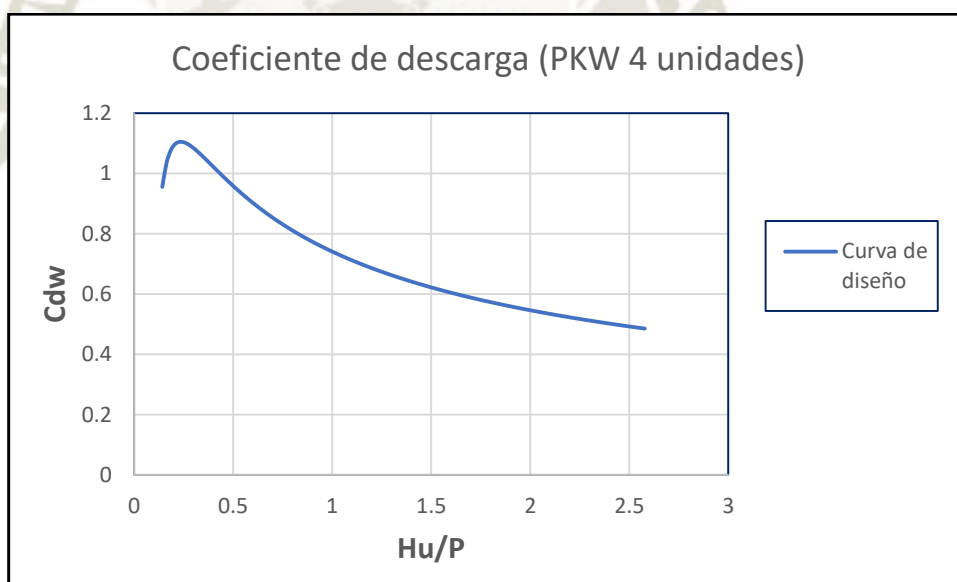
En base a la ecuación general de vertederos ($Q = C_d W \sqrt{2gH^3}$), se realizó el cálculo de los coeficientes de descarga en función del ancho del vertedero y las características hidráulicas progresivas de los modelos. A su vez se calculó el ratio de carga hidráulica y altura del vertedero (H_u/p) y posteriormente se graficaron los resultados (C_{dw} vs H_u/p); obteniendo la curva de diseño hidráulica para todos los casos. En los Anexos 2, 3 y 4 respectivamente se encuentran las Tablas completas de diseño para cada uno de los gráficos siguientes.

Figura N° 89.- Curva de diseño para gasto (PKW 5 unidades)



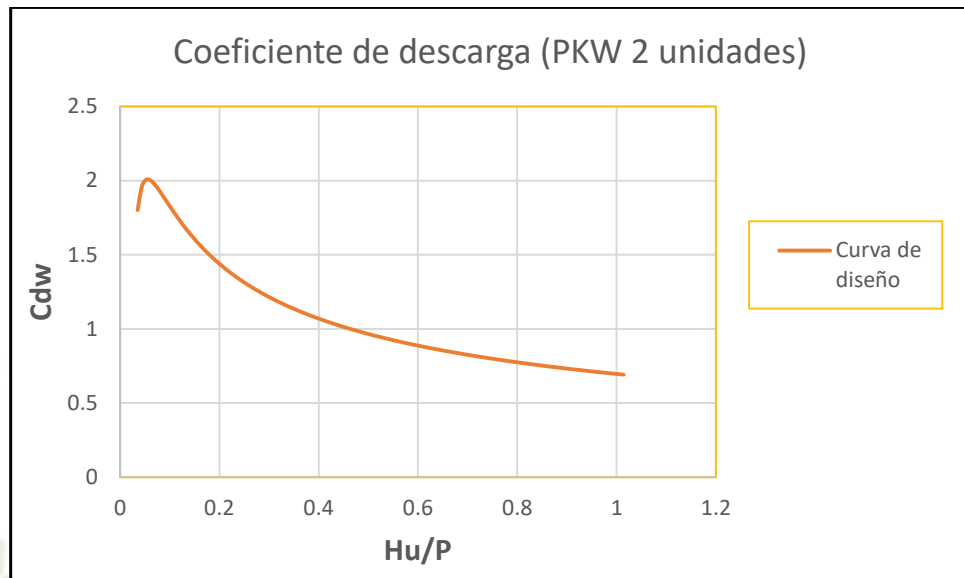
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 90.- Curva de diseño para gasto (PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

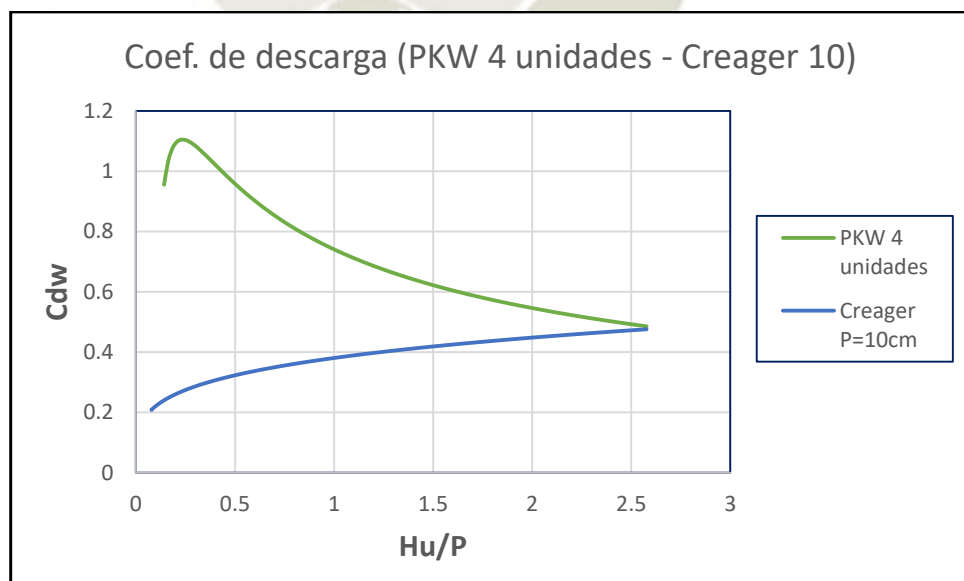
Figura N° 91.- Curva de diseño para gasto (PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

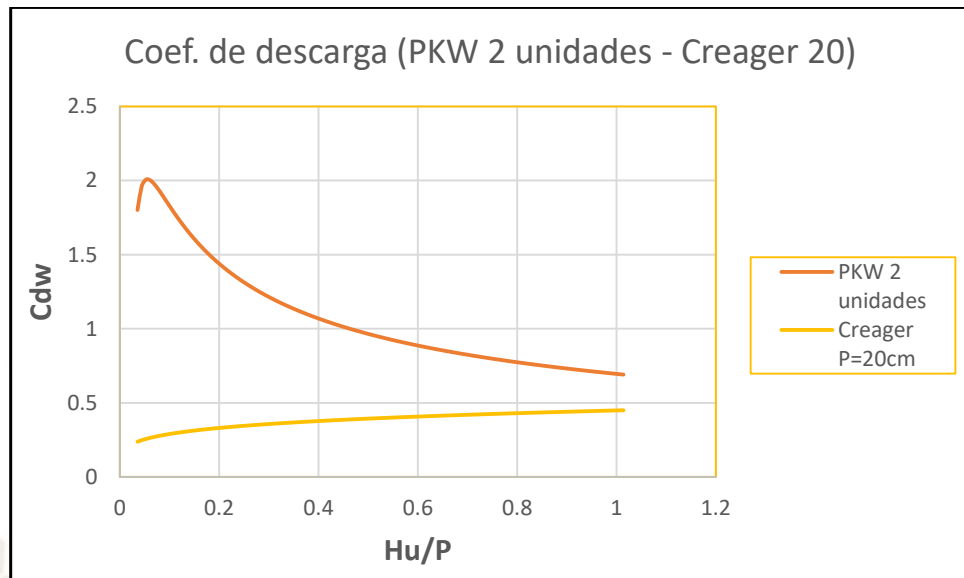
Las Figuras N° 92 y 93 demuestran la variación existente entre las curvas de diseño de gasto para los vertederos Creager y tecla de piano, para los modelos 1 y 2 respectivamente. Mientras que en la Figura N° 94 se analiza las curvas de diseño de gasto para los tres modelos en tecla de piano.

Figura N° 92.- Coeficiente de descarga vs Hu/P para los Modelos 1



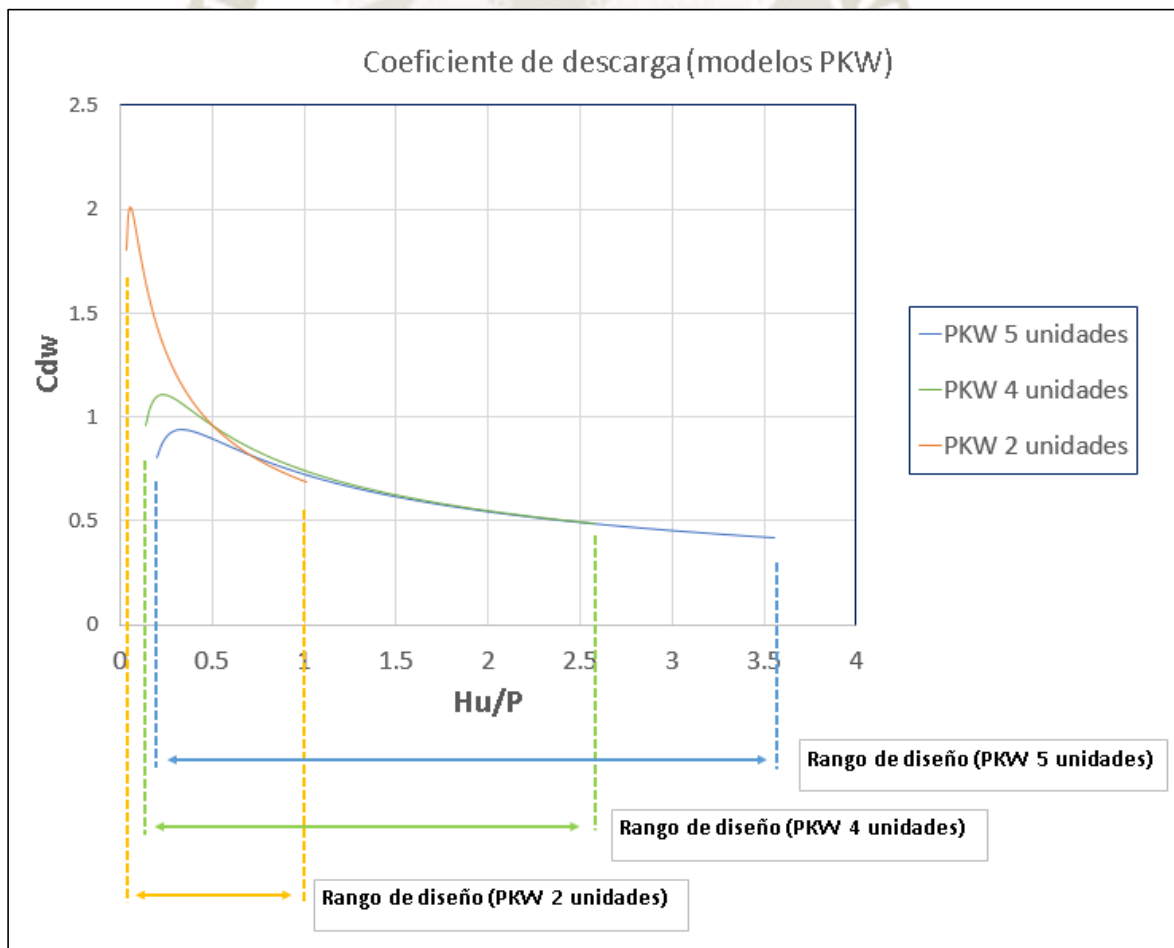
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 93.- Coeficiente de descarga vs H_u/P para los Modelos 2



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 94.- Curvas de diseño de gasto para los Modelos PKW



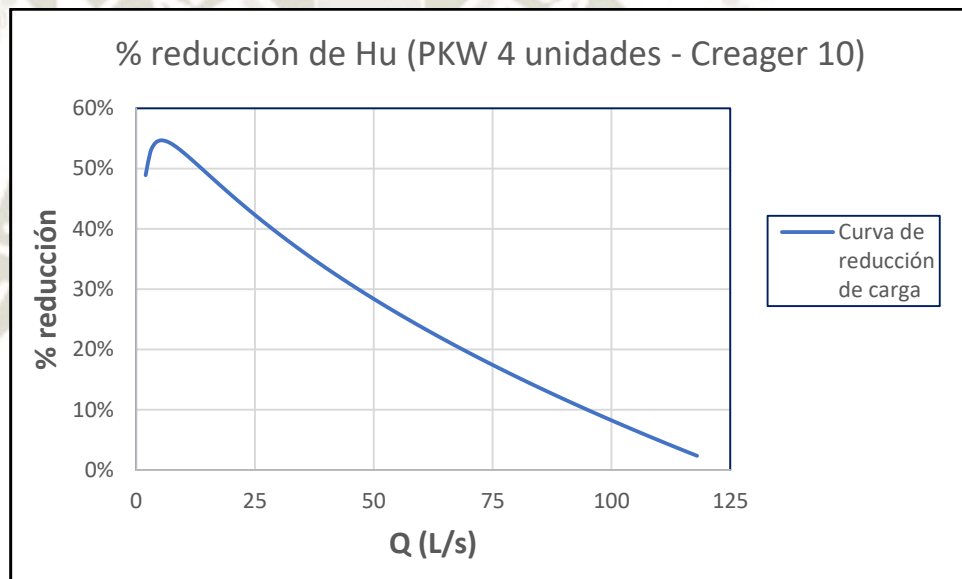
Fuente: Elaboración propia

5.3.3. Curvas de eficiencia hidráulica

Los vertederos tecla de piano tienen como finalidad reducir el nivel del embalse para un determinado caudal de diseño, en consecuencia se calcularon tanto en la Figura N° 95 como la Figura N° 96 una curva que representa en porcentaje, la reducción de carga para el rango completo de caudales ensayados para los Modelos 1 y 2, siendo:

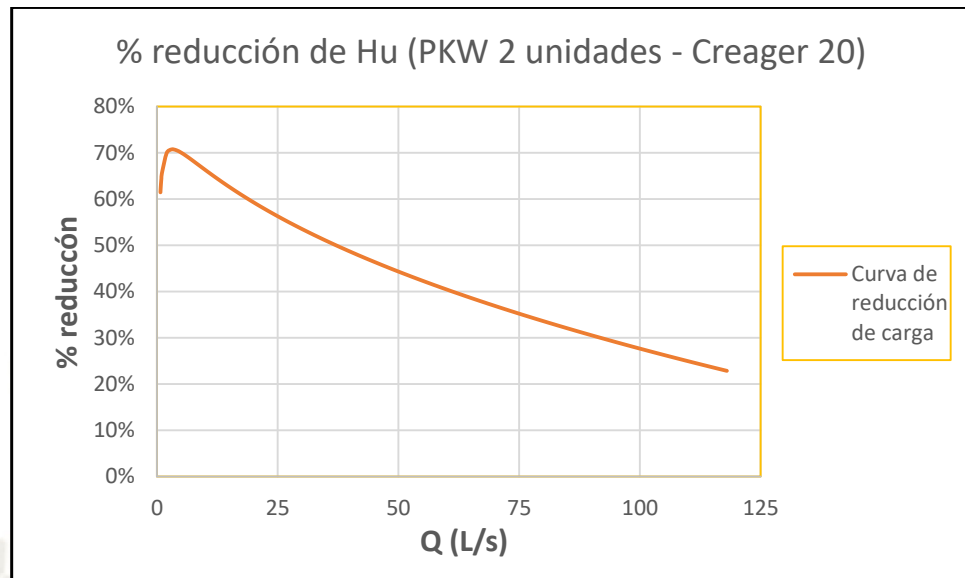
$$\% \text{ reducción} = 1 - \frac{H_{uPKW}}{H_{uCre}}$$

Figura N° 95.- Reducción (%) de H_u entre los Modelos 1



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 96.- Reducción (%) de H_u entre los Modelos 2

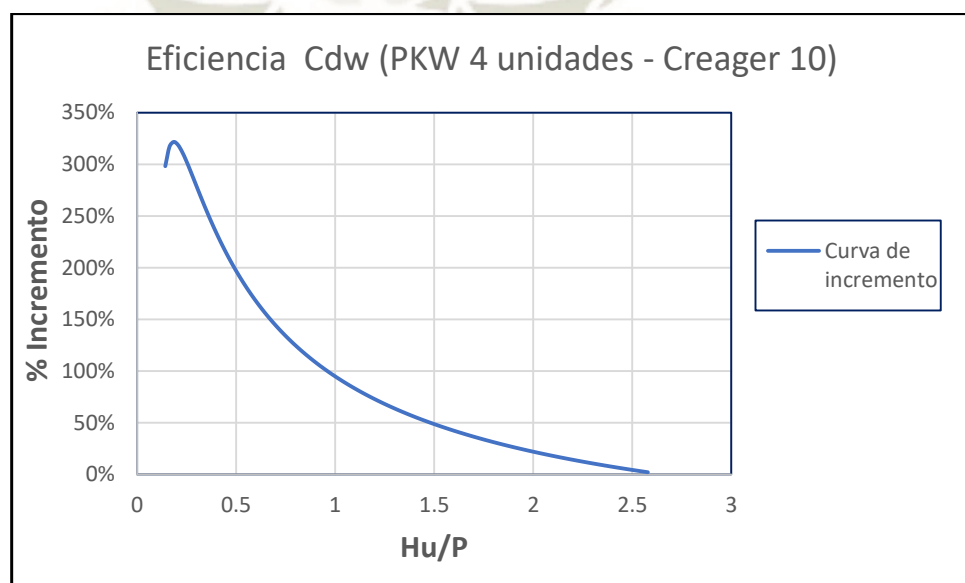


Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se procede a calcular el incremento en porcentaje del coeficiente de descarga del vertedero en tecla plano sobre el vertedero tipo Creager para los Modelos 1 y 2, siendo:

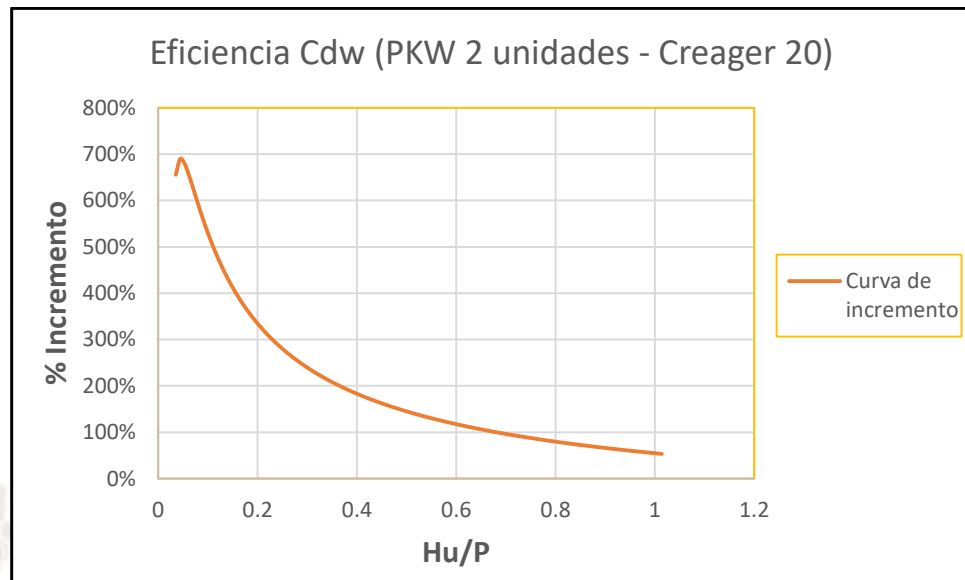
$$\% \text{ incremento} = \frac{C_{dwPKW}}{C_{dwCre}} - 1$$

Figura N° 97.- Incremento (%) del C_{dw} entre los Modelos 1



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 98.- Incremento (%) del C_{dw} entre los Modelos 2



Fuente: Elaboración propia

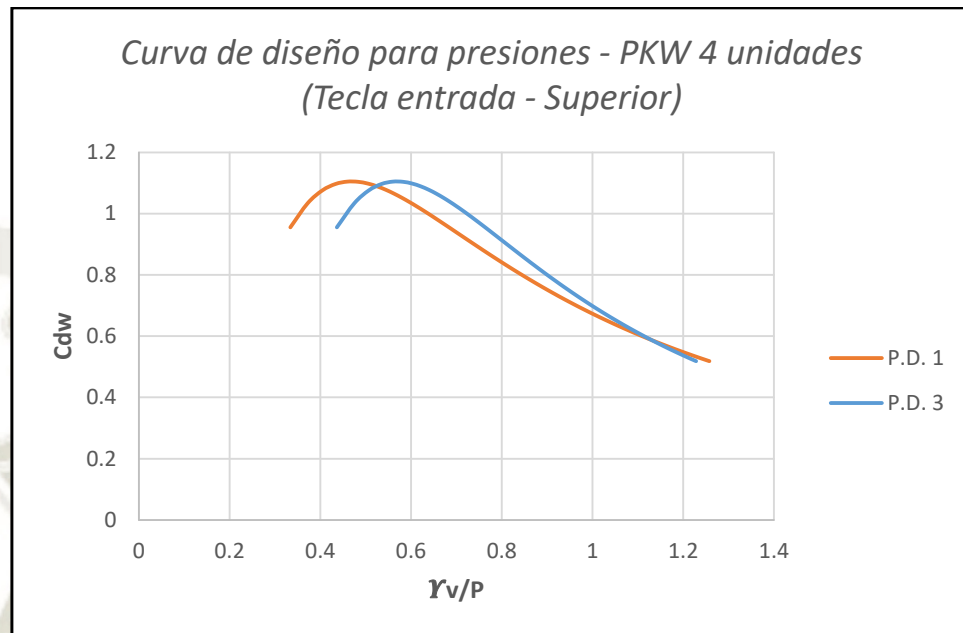
5.3.4. Curvas de diseño para presión ($C_{dw}/\gamma_v/p$)

Una vez calculados todos los valores del coeficiente de descarga, se procede a encontrar los respectivos ratios de presión con respecto a la altura del vertedero (γ_v/p) y graficarlos como función del coeficiente de descarga (C_{dw} vs γ_v/p).

Las curvas para los puntos de presión similares son agrupadas en un solo gráfico, demostrando cuál de las dos en cuanto a criterios de diseño es la más conservadora, a su vez es recomendable hacer un seguimiento previo a los coeficientes de correlación para tener una guía más clara de la aproximación de las presiones. En el anexo 5 y 6 se presentan las Tablas completas de diseño para las presiones de los modelos 1 y 2 (PKW) respectivamente.

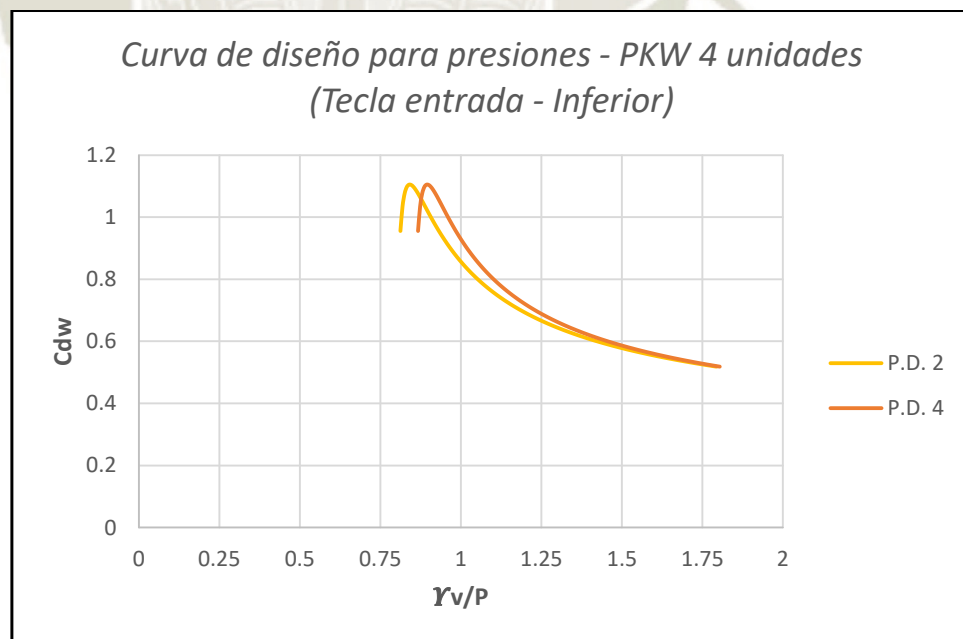
5.3.4.1. Modelo 1 (PKW 4 unidades)

Figura N° 99.- Curva de diseño para presiones (Tecla entrada – Superior, PKW 4 unidades)



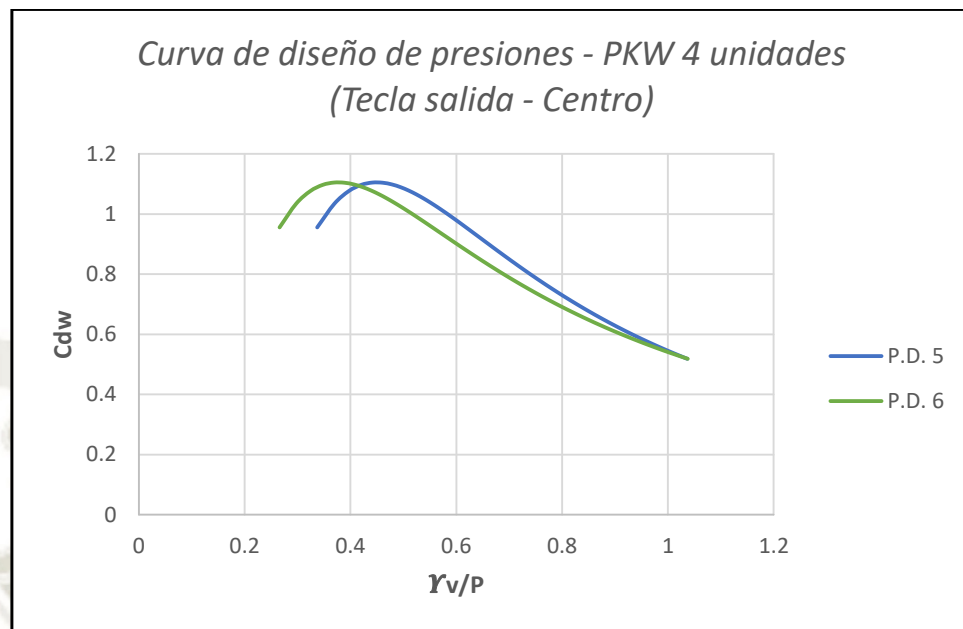
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 100.- Curva de diseño para presiones (Tecla entrada – Inferior, PKW 4 unidades)



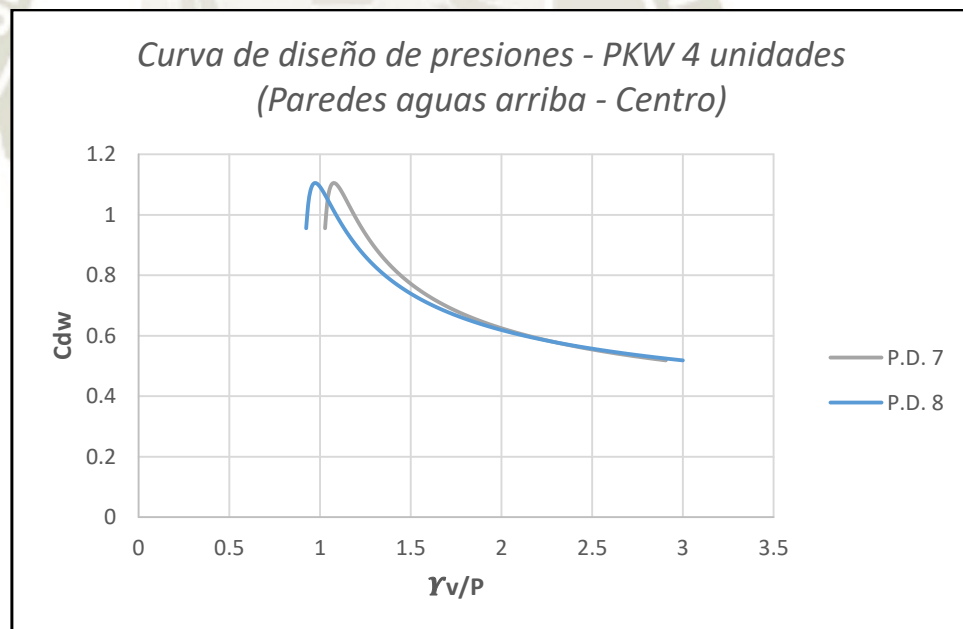
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 101.- Curva de diseño para presiones (Tecla salida – Centro, PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

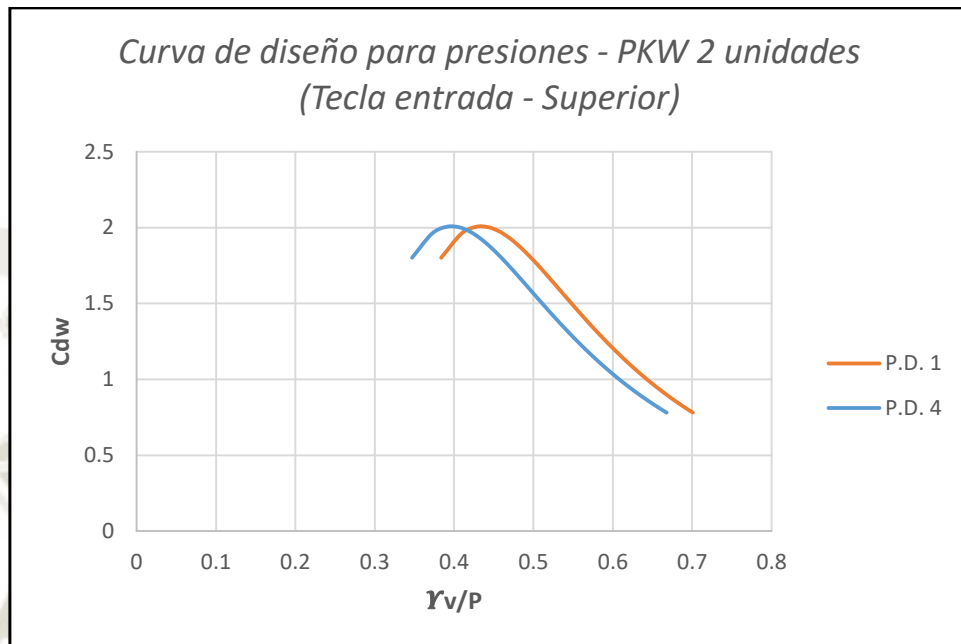
Figura N° 102.- Curva de diseño para presiones (Paredes aguas arriba – Centro, PKW 4 unidades)



Fuente: Elaboración propia

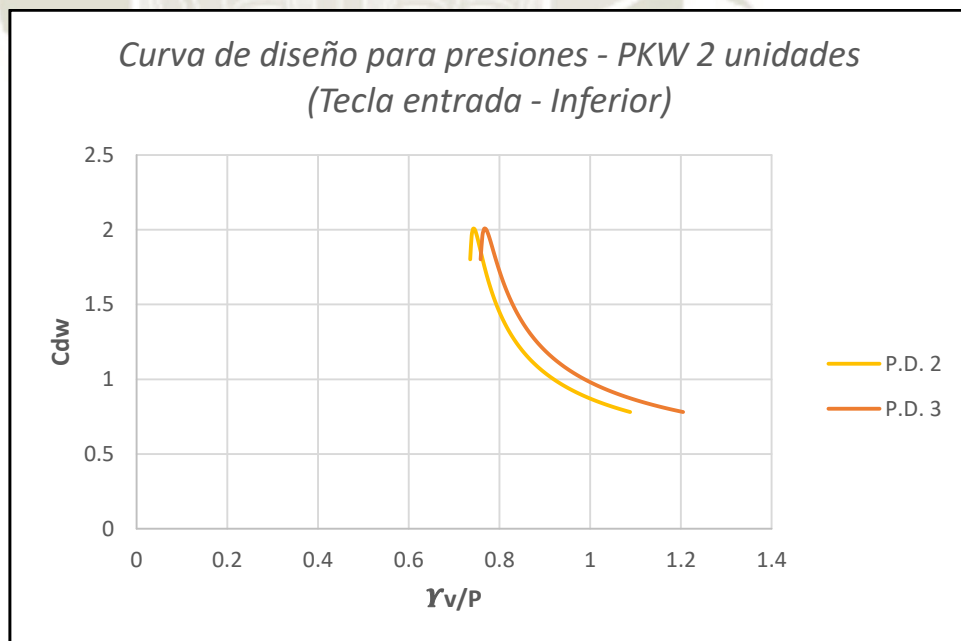
5.3.4.2. Modelo 2 (PKW 2 unidades)

Figura N° 103.- Curva de diseño para presiones (Tecla entrada – Superior, PKW 2 unidades)



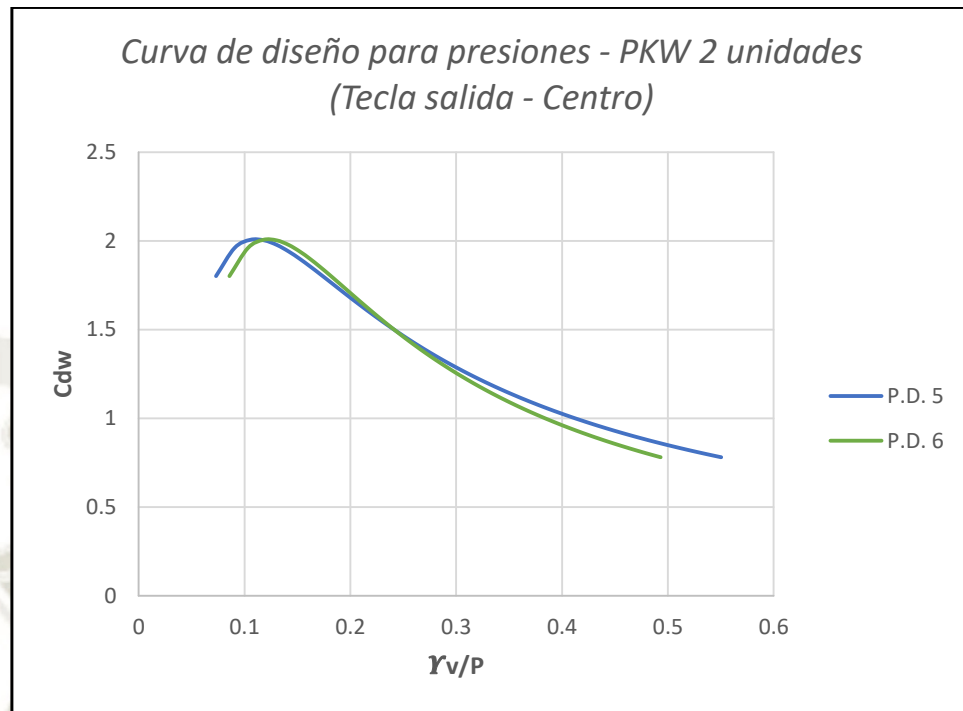
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 104.- Curva de diseño para presiones (Tecla entrada – Inferior, PKW 2 unidades)



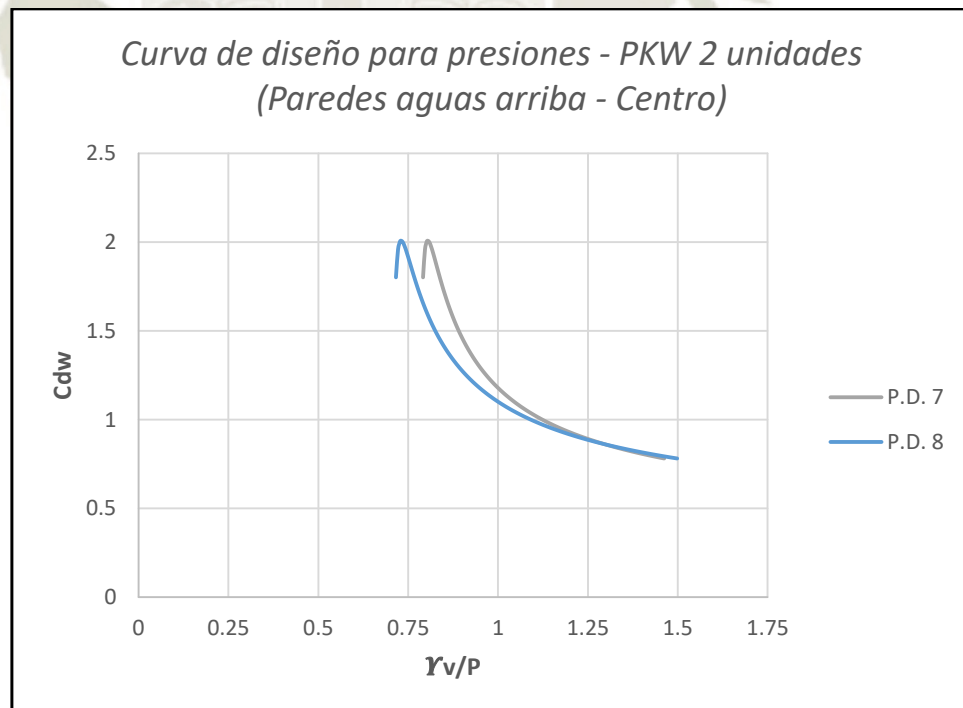
Fuente: Elaboración propia

Figura N° 105.- Curva de diseño para presiones (Tecla salida – Centro, PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 106.- Curva de diseño para presiones (Paredes aguas arriba – Centro, PKW 2 unidades)



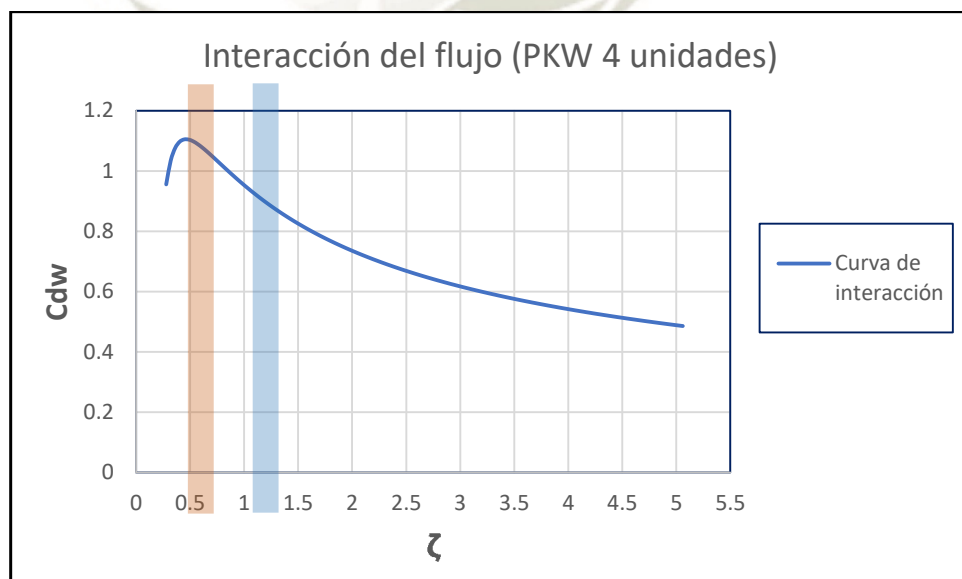
Fuente: Elaboración propia

5.4. Características hidráulicas

5.4.1. Interferencia de láminas y sumersión local

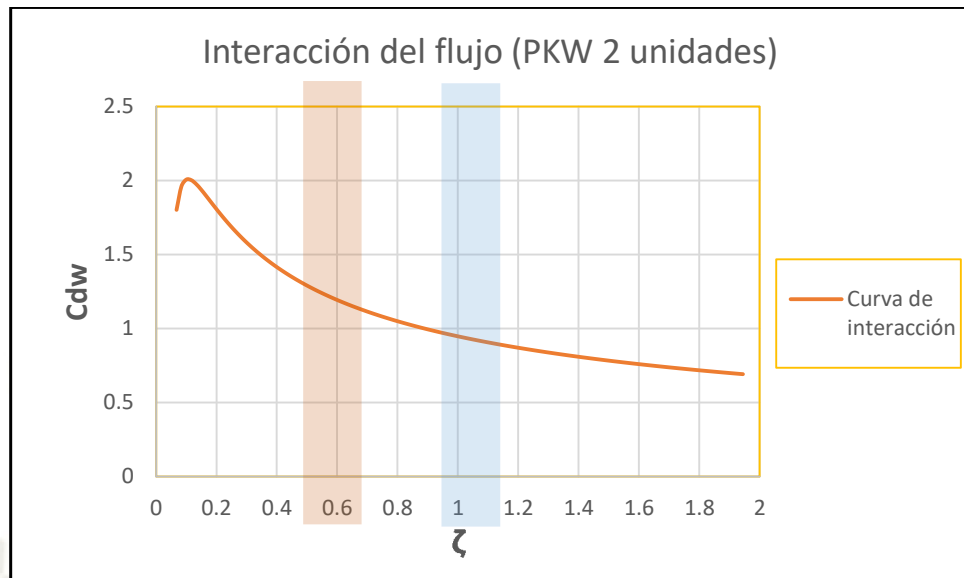
La eficiencia de los vertederos tecla de piano parte de la optimización de los parámetros de diseño del modelo siendo el ratio de magnificación de la longitud efectiva de cresta uno de los principales; es decir que al tener interrupciones en la misma, la eficiencia decaerá y el vertedero no se va a comportar de la forma en la fue diseñada (exceptuando los raros diseños sobre ratios de carga elevados). Es importante detallar que este fenómeno se obtiene por el aumento del caudal y según las apreciaciones en los modelos estudiados, las láminas de flujo producen ligera interferencia en cargas bajas y a medida que las cargas se incrementan la interferencia también; se puede decir que el vertedero a partir del estado en que el espesor de la vena líquida vertiente alcanza un 50% del ancho de la tecla de salida ($\zeta = 0.5$) se encuentra en un estado de interferencia de láminas completo. Mientras que al alcanzar un 100% del mismo ($\zeta = 1$), el vertedero se considera en condiciones de sumersión local. Visto desde otro punto los vertederos en tecla de piano se desarrollan bajo estos dos efectos reduciendo su eficiencia a mayor carga, es por ello que los PKW se diseñan generalmente para bajos ratios de carga.

Figura N° 107.- Interacción del flujo (PKW 4 unidades)

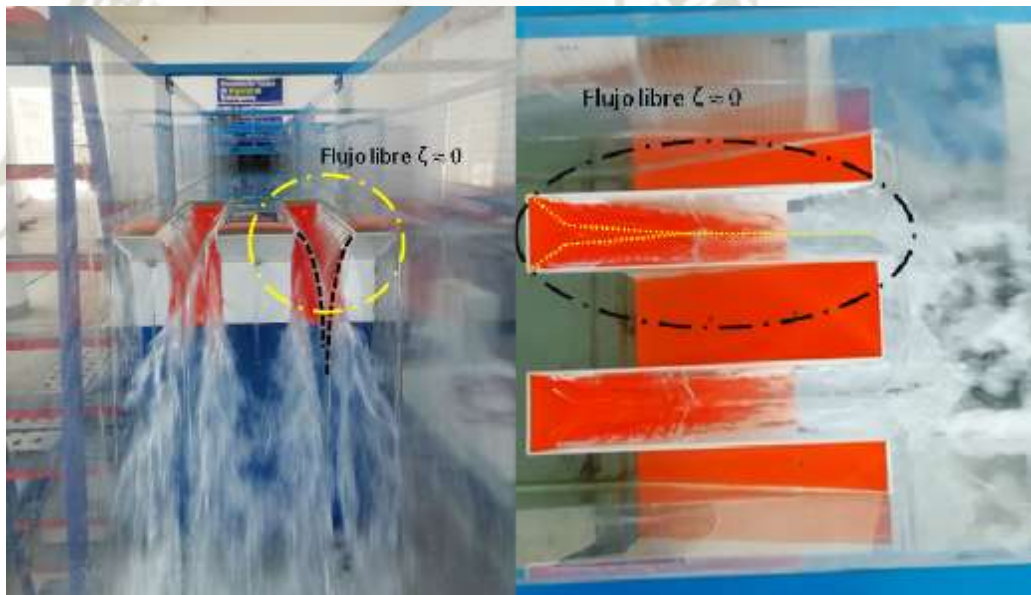


Fuente: Elaboración propia

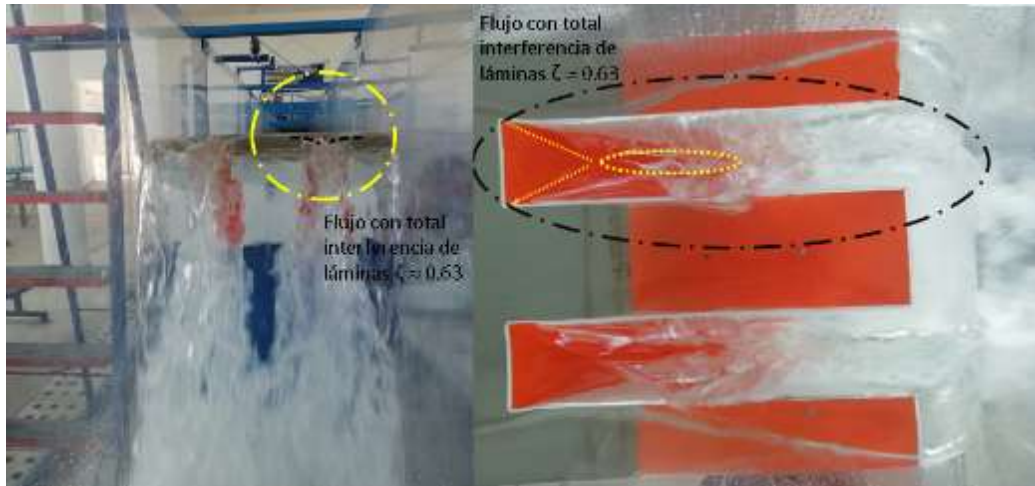
Figura N° 108.- Interacción del flujo PKW 2 unidades)



Fuente: Elaboración propia



Fotografía N° 42.- Interferencia de láminas para $\zeta \approx 0$ (PKW 2 unidades $Q = 10$ L/s)



Fotografía N° 43.- Interferencia de láminas para $\zeta \approx 0.63$ (PKW 2 unidades $Q = 37$ L/s)



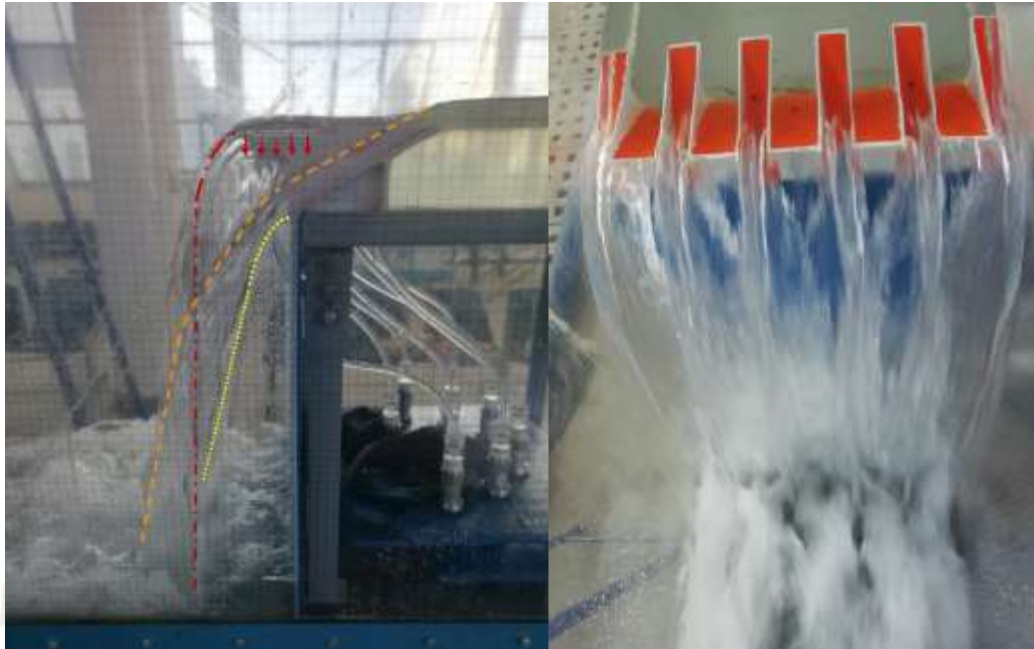
Fotografía N° 44.- Sumersión local en el Modelo 2 ($\zeta \approx 1.04$ para $Q = 62$ L/s)



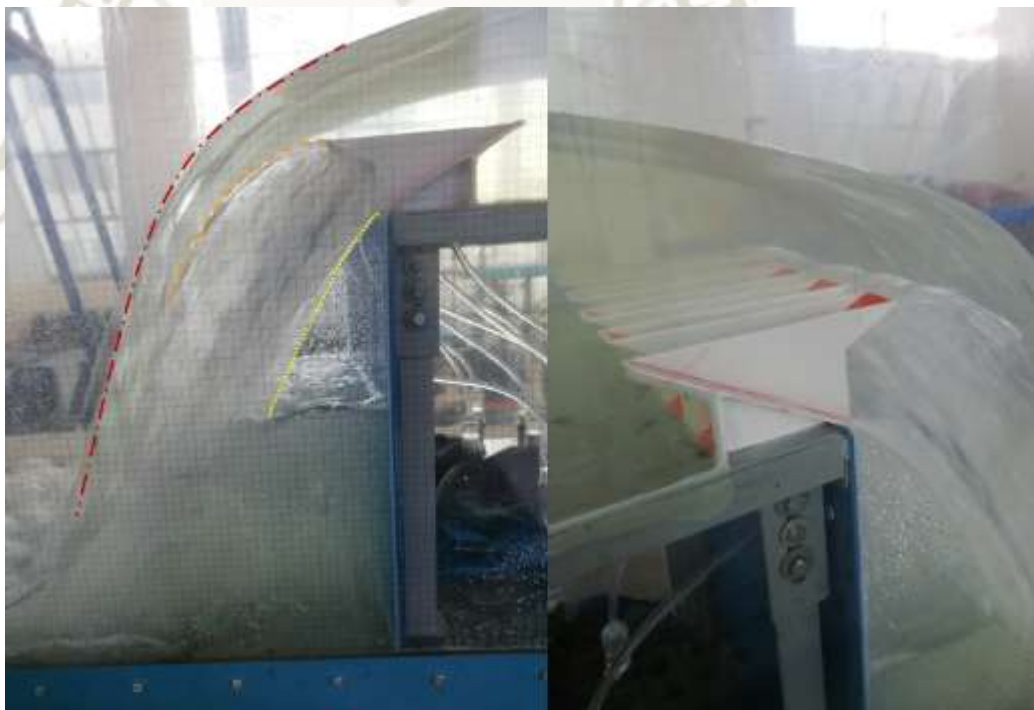
Fotografía N° 45.- Sumersión total en el Modelo 2 ($\zeta \approx 1.46$ para $Q = 88$ L/s)

5.4.2. Flujo vertido

Como parte final de la investigación, se analizó las características físicas del flujo una vez que cruza la cresta del vertedero. Por las Fotografías N° 46 y N° 47, se concluye y demuestra gráficamente que el flujo puede ser dividido en tres: el flujo libre proveniente de la tecla de entrada, el flujo lanzado por la tecla de salida y el flujo resultante de ambos. A partir de la cresta, el flujo cambia a régimen supercrítico y el estudio se extiende en base a las consideraciones propuestas aguas abajo; es por ello que el estudio presentado en los apartados de disipación de carga para los puntos 5.2.3.2 y 5.2.3.3 no puede ser generalizado para la extrapolación de datos en un prototipo, más que para condiciones semejantes a las de esta investigación.



Fotografía N° 46.- Flujo vertido en el Modelo piloto ($Q = 8 \text{ L/s}$)



Fotografía N° 47.- Flujo vertido en el Modelo piloto ($Q = 75 \text{ L/s}$)

5.5. Diseño hidráulico y geométrico para un prototipo

El diseño de un prototipo depende mayormente de las condiciones del proyecto, el método constructivo y los costos finales; es por ello que la elección de las diferentes alternativas depende probablemente más de las restricciones

estructurales y económicas que de las discrepancias existentes en relación al comportamiento hidráulico. A continuación se presenta la metodología de diseño geométrico – hidráulica de un prototipo de vertedero en tecla de piano basado en un modelo a escala (Machiels, Erpicum, Archambeau, Dewals, & Piroton, 2012).

5.5.1. Ancho de la unidad PKW (W_u)

$$W_u = \frac{W}{N_u}$$

5.5.2. Escala del proyecto (x)

$$x = \frac{W_u}{W_u^*}$$

5.5.3. Carga de diseño correspondiente para el modelo (H^*)

$$H^* = \frac{H}{x}$$

5.5.4. Coeficiente de descarga (C_{dw}^*) y ratio de presiones (γ_v^* / p^*)

Luego del cálculo de la carga de diseño y en relación a la geometría del modelo seleccionado se procede a encontrar los valores adimensionales que determinarán las condiciones hidráulicas del proyecto. La exactitud y semejanza de los resultados dependerá directamente de la precisión en las pruebas experimentales del modelo seleccionado y de la cantidad de los resultados disponibles.

5.5.5. Caudal (Q) y presiones (γ_v)

$$Q = C_{dw}^* W \sqrt{2gH^3}$$

$$Y_v = \left(Y_v^* / P^* \right) P$$

5.5.6. Dimensiones del vertedero en tecla de piano (X)

$$X = x * X^*$$



CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El comportamiento de los vertederos tipo tecla de piano se resume en lo siguiente: al evaluar los tres modelos PKW se observó que la curva de gasto para los tres casos tiende a ser lineal lo que comparado con los modelos de pared delgada y Creager significa en una eficiencia mayor en relación al incremento de caudal (hasta un 320% para $\frac{H_u}{P} = 0.2$) y la reducción del tirante (hasta un 58% para $\frac{H_u}{P} = 0.2$), no obstante para caudales elevados se proyecta un decaimiento del mismo por efecto de la pérdida de longitud efectiva de vertido.
- Partiendo de los gráficos presentados se concluye que las ecuaciones para el cálculo de la curva de gasto presentadas por Lempérière y Leite Ribeiro se ajustan perfectamente para los modelos de 5 y 4 unidades PKW, mientras que la ecuación de Kabiri-Samani tiene similitud sólo para caudales bajos con respecto al modelo de 2 unidades PKW.
- Para la realización de las pruebas se necesitó de un modelo piloto, para identificar el procedimiento y metodología de construcción, montaje y toma de datos. A partir de ese punto se realizó el diseño de los modelos de estudio principales variando sólo el número de unidades PKW y manteniendo constantes los factores de $\frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{B_o}, \frac{B_b}{(B_i, B_o)}, \frac{P_i}{P_o}, S_i, S_o, W$ y T_s .
- Se demostró que el vertedero de 2 unidades PKW posee un mayor coeficiente de descarga frente a los modelos de 4 y 5 unidades PKW, elevando a un 690% el caudal descargado en relación a un vertedero tipo Creager de similares condiciones y para ratios de carga extremadamente bajos ($\frac{H_u}{P} = 0.044$). Si comparamos los tres modelos PKW para las mismas condiciones de diseño ($0.5 < \frac{H_u}{P} < 1$) los coeficientes de descarga tienen valores similares. A partir

de $\frac{H_u}{P} > 1$, las curvas para los modelos de 5 y 4 unidades tienen la misma tendencia.

- Además, se encontró que el modelo piloto posee un rango de valores de 3.42 veces mayor para el diseño de gasto esto debido a las dimensiones reducidas del modelo. Sin embargo y por el mismo factor, no se presentan las curvas de diseño en relación a las presiones ya que el diseño de vertederos tipo tecla de piano parte de ratios de carga reducidos buscando la máxima eficiencia hidráulica.
- Las curvas presentadas para las cargas disipadas, demuestran que el flujo a partir de la cresta del vertedero adquiere un régimen supercrítico. Se debe tener en cuenta que las condiciones aguas abajo serán las que predominen en el diseño de esta sección por lo que el estudio se amplía en relación a este punto.
- Los vertederos tipo tecla de piano obtienen su eficiencia a partir de incrementar la longitud efectiva en relación a un mismo ancho. Por lo tanto, lo ideal es que trabajen bajo condiciones de flujo libre ($\zeta \approx 0$) pero la realidad es que desde caudales bajos existe interferencia de láminas lo que compromete el desempeño hidráulico. Por lo tanto es de suma importancia que al diseñar un prototipo basado en estos modelos, el vertedero no trabaje constantemente en el estado de interferencia de láminas completo y mucho menos sobrepase el estado de sumersión local.
- Como campos futuros de investigación se recomiendan los siguientes: analizar modelos a diferentes escalas con la finalidad de crear factores de corrección y así precisar aún más el diseño de un prototipo, experimentar con los diferentes tipos de vertederos en tecla de piano, ajustar los parámetros de diseño en relación a las narices, los parapetos y el acabado de la cresta para obtener un mejoramiento en el desempeño hidráulico y por último, realizar un estudio aplicativo de los vertederos tipo tecla de piano como solución o mejoramiento para un proyecto en específico.

BIBLIOGRAFÍA

- Alegret Breña, E., & Pardo Gómez, R. (2001 - 2005). *Diseño hidraulico de aliviaderos para presas pequeñas*.
- Arreguín Cortés, F. I. (2000). *Obras de excedencia*. México.
- Bejar, M. (2007). *Hidráulica de Canales*. Perú: Villón.
- BUREAU OF RECLAMATION, & Elgin Dominy, F. (1966). *PROYECTO DE PRESAS PEQUEÑAS*. Madrid, España: Dossat.
- Ceinturion. (Mayo de 2007). *Wikipedia*. Obtenido de https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Alqueva_dam.JPG
- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. (M. E. R., Ed.) Santafé de Bogotá, Colombia.
- Delgado, G. (2009). *Obtención de los coeficientes de descarga de aliviaderos según especificaciones de forma*. Caracas.
- Denys, F. (2017). *Piano key weir spillway standard design principles and flow induced vibrations*.
- Erices Sepúlveda, F. E. (2013). *Estudio de la influencia de aproximaciones hidrodinámicas a los ápices de aliviaderos en laberinto, en su coeficiente de descarga*. Valdivia, Chile.
- Lempérière, F., Ouamane, A., & Vigny, J. (29 de Septiembre de 2013). *Hydrocoop*. Obtenido de <http://www.hydrocoop.org>
- Llanque Quispe, C. J. (2012). *Simulación en vertederos tipo laberinto como solución a problemas de descarga en vertedores de demasías*. Juliaca, Perú.
- Local Organizing Committee (LOC). (2017). *Labyrinth and piano key weirs*. Obtenido de <http://www.pk-weirs.ulg.ac.be/?q=content/world-register-pkw>
- M. Anderson, R. (2011). *Piano key weir head discharge relationships*. Logan, Utah, Estados Unidos.
- Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B., & Piroton, M. (2012). *Method for the preliminary design of Piano Key Weirs*.

- Meave Silva, O., & Torrez Mejia, N. (25 de Octubre de 2016). *Mimadretierra*. Obtenido de <http://mimadretierra.bo/2016/10/25/disenio-de-un-vertedero-tipo-laberinto-curvo-o-lineal-de-una-presa/>
- Miguel Angel. (22 de Mayo de 2007). *Flickr*. Obtenido de <https://www.flickr.com/photos/ingeniero-de-caminos/5553296840>
- Noguez Becerril, J. E. (1960). *Hidromecánica*. Madrid, España: Dossat.
- Pralong, J., Vermeulen, J., Blancher, B., Laugier, F., Erpicum, S., Machiels, O., . . . Schleiss, A. (2011). *A naming convention for the Piano Key Weirs Geometrical parameters*.
- Rocha Felices, A. (1998). *Introducción a la hidráulica fluvial*. Lima, Perú.
- Rodriguez Ramirez, M. A. (2015). *Metodología para el diseño hidráulico de vertederos de laberinto*. México.
- Sanchez Bribiesca, J. L. (1997). *Introducción al diseño de obras de excedencia*. México.
- Shames, I. (1997). *Mecánica de Fluidos*. Colombia: MC Graw Hill Interamericana S.A.
- SonTek YSI incorporated. (s.f.). *Product Intrduction: The SonTek-IQ*.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. México.
- Streeter, V., & Otros. (2000). *Mecanica de Fluidos*. Colombia: MC Graw Hill Interamericana S.A.
- Torres Herrera, F. (1987). *Obras Hidráulicas*. México: Limusa.
- Tullis, J., & Waldron, D. (1995). *Desing of labyrinth spillways*. EE.UU.
- Victory, R. A. (2011). *Algoritmos para obtener el perfil de la superficie libre la carga de presión en el fondo curvo de un cimacio de cresta libre*. México.
- White, F. (2010). *Mecánica de Fluidos*. Colombia: MC Graw Hill Interamericana S.A.

ANEXO N° 1

Hoja de cálculo elaborada para el diseño de los modelos PKW

DISEÑO GEOMÉTRICO PARA UN PKW (Tipo A)

Diagrama de un PKW tipo "A" (Machiels et al. 2004)

Secciones en planta y elevación de un PKW (Karabi-Samani & Javaheri 2012)

Especificar Automático

Parámetros de entrada

$W_i/W_o =$	1.25	($0 < W_i/W_o \leq 2$)
$T_s/P =$	0.01582623	
$B_i/B_o =$	1	(Tipo A)
$B_b/(B_i, B_o) =$	2	(mayor que "0")
$P_i/P_o =$	1	(Tipo A)
$N_u =$	2	Unidades PKW
$n =$	5	Ratio de magnificación ($2 \leq n \leq 5$)
$nu =$	5	(Lu/W_u)

Referencia	Type	n	W_i/W_o	S_i	S_o	T_s/P
Langier (2009) & Ribeiro et al. (2007)	A	4.04	1.41	2.041	2.041	0.07
Lempereire (2009)	A	5	1.25	1.8:1	1.8:1	NR
Machiels et al. (2009)	A	4.15	1	0.849:1	0.849:1	0.0381
Ribeiro et al. (2009)	A	4.94-6.66	1.23-1.57	1.671-2.701	1.721-2.041	NR
Langier (2007)	A	5	1.43	2.05:1	2.05:1	0.067
Barcooda et al. (2006)	A	6	1.2	2:1	2:1	NR
Barcooda et al. (2006)	B	6	1.2	1:1	2:1	NR
Ouamane & Lempereire (2005)	various	4-8.5	0.67-1.40	NR	NR	various
Hien, et al. (2006)	A	4-7	1.5	NR	NR	NR
Lempereire & Jan (2005)	A	6	1.2	2:1	2:1	NR
Lempereire & Ouamane (2003)	A	6	1	1.5:1	1.5:1	NR
Lempereire & Ouamane (2003)	B	6	1	0.75:1	1.5:1	NR

*NR = not reported

Geometría estudiada de los PKW (Anderson, Ricky M. 2011)

Parámetros geométricos

B =	46.31773781	cm
B _i =	11.57943445	cm
B _o =	11.57943445	cm
B _b =	23.1588689	cm
B _h =	45.7	cm
P _i =	18.96586975	cm
P _o =	18.96586975	cm
P _b =	6.43901914	cm
P _m =	12.5285061	cm
S _i =	1.8	
S _o =	1.8	
W _i =	45.7	cm
W _u =	22.85	cm
W _l =	12.96111111	cm
W _o =	9.88888889	cm
T _s =	3	mm
T _i =	6.177378085	mm
T _o =	6.177378085	mm
$\alpha =$	0.507098504	rad
L =	228.5	cm
L _u =	114.25	cm
D _s =	39.03403643	cm

*Dimensiones en cm

Elaboración propia

ANEXO N° 2

Tabla de diseño para coeficientes de descarga y ratios de carga

(PKW 5 unidades)

Hu/P	Cdw	Hu/P	Cdw	Hu/P	Cdw	Hu/P	Cdw
0.1992	0.8067	1.0757	0.7072	1.9522	0.5522	2.8287	0.4674
0.2284	0.8760	1.1049	0.6999	1.9814	0.5486	2.8579	0.4652
0.2576	0.9141	1.1341	0.6928	2.0106	0.5451	2.8871	0.4630
0.2869	0.9337	1.1633	0.6859	2.0398	0.5416	2.9163	0.4608
0.3161	0.9418	1.1926	0.6792	2.0691	0.5382	2.9456	0.4587
0.3453	0.9427	1.2218	0.6727	2.0983	0.5349	2.9748	0.4567
0.3745	0.9389	1.2510	0.6664	2.1275	0.5316	3.0040	0.4546
0.4037	0.9320	1.2802	0.6602	2.1567	0.5284	3.0332	0.4526
0.4329	0.9232	1.3094	0.6542	2.1859	0.5252	3.0624	0.4506
0.4622	0.9132	1.3386	0.6483	2.2151	0.5221	3.0916	0.4486
0.4914	0.9024	1.3679	0.6426	2.2444	0.5191	3.1208	0.4467
0.5206	0.8911	1.3971	0.6370	2.2736	0.5161	3.1501	0.4447
0.5498	0.8797	1.4263	0.6316	2.3028	0.5131	3.1793	0.4428
0.5790	0.8682	1.4555	0.6263	2.3320	0.5102	3.2085	0.4410
0.6082	0.8568	1.4847	0.6211	2.3612	0.5074	3.2377	0.4391
0.6375	0.8456	1.5139	0.6161	2.3904	0.5046	3.2669	0.4373
0.6667	0.8345	1.5432	0.6111	2.4197	0.5018	3.2961	0.4355
0.6959	0.8237	1.5724	0.6063	2.4489	0.4991	3.3254	0.4337
0.7251	0.8131	1.6016	0.6016	2.4781	0.4964	3.3546	0.4319
0.7543	0.8029	1.6308	0.5970	2.5073	0.4938	3.3838	0.4302
0.7835	0.7928	1.6600	0.5924	2.5365	0.4912	3.4130	0.4285
0.8127	0.7831	1.6892	0.5880	2.5657	0.4887	3.4422	0.4268
0.8420	0.7736	1.7185	0.5837	2.5950	0.4861	3.4714	0.4251
0.8712	0.7645	1.7477	0.5795	2.6242	0.4837	3.5007	0.4234
0.9004	0.7555	1.7769	0.5753	2.6534	0.4812	3.5299	0.4218
0.9296	0.7469	1.8061	0.5713	2.6826	0.4788	3.5591	0.4202
0.9588	0.7385	1.8353	0.5673	2.7118	0.4765		
0.9880	0.7303	1.8645	0.5634	2.7410	0.4741		
1.0173	0.7224	1.8938	0.5596	2.7703	0.4719		
1.0465	0.7147	1.9230	0.5559	2.7995	0.4696		

ANEXO N° 3

Tabla de diseño para coeficientes de descarga y ratios de carga

(PKW 4 unidades)

Hu/P	Cdw	Hu/P	Cdw	Hu/P	Cdw	Hu/P	Cdw
0.1419	0.9554	0.7775	0.8198	1.4131	0.6388	2.0487	0.5402
0.1631	1.0340	0.7987	0.8113	1.4343	0.6346	2.0699	0.5376
0.1843	1.0762	0.8199	0.8030	1.4555	0.6305	2.0911	0.5351
0.2055	1.0969	0.8411	0.7949	1.4767	0.6264	2.1123	0.5326
0.2267	1.1046	0.8623	0.7870	1.4979	0.6225	2.1335	0.5302
0.2479	1.1041	0.8835	0.7794	1.5191	0.6186	2.1547	0.5278
0.2691	1.0983	0.9047	0.7720	1.5403	0.6148	2.1758	0.5254
0.2903	1.0892	0.9258	0.7648	1.5614	0.6111	2.1970	0.5230
0.3114	1.0780	0.9470	0.7577	1.5826	0.6074	2.2182	0.5207
0.3326	1.0654	0.9682	0.7509	1.6038	0.6038	2.2394	0.5184
0.3538	1.0521	0.9894	0.7442	1.6250	0.6002	2.2606	0.5162
0.3750	1.0384	1.0106	0.7377	1.6462	0.5967	2.2818	0.5139
0.3962	1.0245	1.0318	0.7313	1.6674	0.5933	2.3030	0.5117
0.4174	1.0107	1.0530	0.7251	1.6886	0.5900	2.3242	0.5095
0.4386	0.9970	1.0742	0.7191	1.7097	0.5866	2.3453	0.5074
0.4597	0.9835	1.0953	0.7132	1.7309	0.5834	2.3665	0.5053
0.4809	0.9703	1.1165	0.7074	1.7521	0.5802	2.3877	0.5032
0.5021	0.9574	1.1377	0.7018	1.7733	0.5770	2.4089	0.5011
0.5233	0.9449	1.1589	0.6963	1.7945	0.5739	2.4301	0.4991
0.5445	0.9326	1.1801	0.6909	1.8157	0.5709	2.4513	0.4971
0.5657	0.9208	1.2013	0.6856	1.8369	0.5679	2.4725	0.4951
0.5869	0.9092	1.2225	0.6805	1.8581	0.5649	2.4936	0.4931
0.6081	0.8981	1.2436	0.6755	1.8792	0.5620	2.5148	0.4911
0.6292	0.8872	1.2648	0.6705	1.9004	0.5591	2.5360	0.4892
0.6504	0.8767	1.2860	0.6657	1.9216	0.5563	2.5572	0.4873
0.6716	0.8665	1.3072	0.6610	1.9428	0.5535	2.5784	0.4854
0.6928	0.8566	1.3284	0.6564	1.9640	0.5508		
0.7140	0.8470	1.3496	0.6518	1.9852	0.5481		
0.7352	0.8376	1.3708	0.6474	2.0064	0.5454		
0.7564	0.8286	1.3919	0.6430	2.0275	0.5428		

ANEXO N° 4

Tabla de diseño para coeficientes de descarga y ratios de carga

(PKW 2 unidades)

Hu/P	Cdw	Hu/P	Cdw	Hu/P	Cdw	Hu/P	Cdw
0.0353	1.8016	0.2885	1.2357	0.5417	0.9306	0.7948	0.7769
0.0438	1.9599	0.2969	1.2204	0.5501	0.9239	0.8033	0.7730
0.0522	2.0060	0.3054	1.2056	0.5585	0.9174	0.8117	0.7691
0.0607	2.0029	0.3138	1.1913	0.5670	0.9110	0.8201	0.7654
0.0691	1.9769	0.3223	1.1775	0.5754	0.9048	0.8286	0.7616
0.0775	1.9402	0.3307	1.1642	0.5839	0.8986	0.8370	0.7580
0.0860	1.8991	0.3391	1.1513	0.5923	0.8926	0.8455	0.7543
0.0944	1.8565	0.3476	1.1389	0.6007	0.8867	0.8539	0.7508
0.1028	1.8142	0.3560	1.1268	0.6092	0.8810	0.8623	0.7472
0.1113	1.7730	0.3645	1.1151	0.6176	0.8753	0.8708	0.7438
0.1197	1.7333	0.3729	1.1037	0.6261	0.8697	0.8792	0.7403
0.1282	1.6954	0.3813	1.0927	0.6345	0.8643	0.8877	0.7370
0.1366	1.6593	0.3898	1.0820	0.6429	0.8589	0.8961	0.7336
0.1450	1.6249	0.3982	1.0716	0.6514	0.8537	0.9045	0.7303
0.1535	1.5923	0.4066	1.0615	0.6598	0.8485	0.9130	0.7271
0.1619	1.5613	0.4151	1.0516	0.6682	0.8435	0.9214	0.7239
0.1704	1.5318	0.4235	1.0421	0.6767	0.8385	0.9299	0.7207
0.1788	1.5038	0.4320	1.0328	0.6851	0.8336	0.9383	0.7176
0.1872	1.4771	0.4404	1.0237	0.6936	0.8288	0.9467	0.7145
0.1957	1.4518	0.4488	1.0149	0.7020	0.8240	0.9552	0.7115
0.2041	1.4275	0.4573	1.0063	0.7104	0.8194	0.9636	0.7085
0.2126	1.4044	0.4657	0.9979	0.7189	0.8148	0.9720	0.7055
0.2210	1.3824	0.4742	0.9897	0.7273	0.8103	0.9805	0.7026
0.2294	1.3613	0.4826	0.9817	0.7358	0.8059	0.9889	0.6997
0.2379	1.3410	0.4910	0.9739	0.7442	0.8016	0.9974	0.6969
0.2463	1.3217	0.4995	0.9662	0.7526	0.7973	1.0058	0.6941
0.2547	1.3031	0.5079	0.9588	0.7611	0.7931	1.0142	0.6913
0.2632	1.2852	0.5164	0.9515	0.7695	0.7889		
0.2716	1.2681	0.5248	0.9444	0.7780	0.7849		
0.2801	1.2516	0.5332	0.9374	0.7864	0.7808		

ANEXO N° 5

Tabla de diseño para presiones (Modelo 1)

Cdw	Yv1/P	Yv2/P	Yv3/P	Yv4/P	Yv5/P	Yv6/P	Yv7/P	Yv8/P
0.9554	0.3341	0.8125	0.4366	0.8672	0.3372	0.2661	1.0278	0.9236
1.0340	0.3722	0.8190	0.4751	0.8737	0.3695	0.2973	1.0386	0.9347
1.0762	0.4048	0.8256	0.5072	0.8801	0.3968	0.3240	1.0496	0.9459
1.0969	0.4335	0.8322	0.5351	0.8867	0.4205	0.3476	1.0607	0.9572
1.1046	0.4594	0.8389	0.5598	0.8933	0.4416	0.3690	1.0719	0.9686
1.1041	0.4831	0.8457	0.5822	0.8999	0.4608	0.3885	1.0832	0.9802
1.0983	0.5049	0.8524	0.6027	0.9066	0.4784	0.4065	1.0946	0.9920
1.0892	0.5253	0.8593	0.6216	0.9133	0.4948	0.4234	1.1062	1.0039
1.0780	0.5445	0.8662	0.6392	0.9201	0.5100	0.4393	1.1178	1.0159
1.0654	0.5626	0.8732	0.6558	0.9269	0.5243	0.4543	1.1296	1.0280
1.0521	0.5798	0.8802	0.6713	0.9338	0.5379	0.4685	1.1416	1.0403
1.0384	0.5962	0.8872	0.6861	0.9408	0.5507	0.4821	1.1536	1.0528
1.0245	0.6119	0.8944	0.7001	0.9477	0.5630	0.4951	1.1658	1.0654
1.0107	0.6269	0.9015	0.7135	0.9548	0.5747	0.5076	1.1781	1.0781
0.9970	0.6414	0.9088	0.7263	0.9619	0.5859	0.5196	1.1905	1.0911
0.9835	0.6553	0.9161	0.7386	0.9690	0.5966	0.5312	1.2031	1.1041
0.9703	0.6687	0.9234	0.7504	0.9762	0.6070	0.5424	1.2158	1.1173
0.9574	0.6818	0.9309	0.7618	0.9835	0.6170	0.5532	1.2286	1.1307
0.9449	0.6944	0.9383	0.7728	0.9908	0.6266	0.5638	1.2416	1.1442
0.9326	0.7066	0.9459	0.7834	0.9981	0.6360	0.5740	1.2547	1.1579
0.9208	0.7185	0.9535	0.7937	1.0056	0.6451	0.5839	1.2680	1.1718
0.9092	0.7301	0.9611	0.8037	1.0130	0.6539	0.5936	1.2813	1.1858
0.8981	0.7414	0.9689	0.8133	1.0205	0.6624	0.6030	1.2949	1.2000
0.8872	0.7524	0.9766	0.8228	1.0281	0.6708	0.6122	1.3085	1.2144
0.8767	0.7632	0.9845	0.8319	1.0358	0.6789	0.6212	1.3223	1.2289
0.8665	0.7737	0.9924	0.8408	1.0435	0.6868	0.6300	1.3363	1.2436
0.8566	0.7840	1.0004	0.8495	1.0512	0.6945	0.6385	1.3504	1.2585
0.8470	0.7940	1.0084	0.8580	1.0590	0.7020	0.6470	1.3647	1.2736
0.8376	0.8039	1.0165	0.8663	1.0669	0.7094	0.6552	1.3791	1.2888
0.8286	0.8135	1.0247	0.8744	1.0748	0.7166	0.6633	1.3936	1.3043

Cdw	Yv1/P	Yv2/P	Yv3/P	Yv4/P	Yv5/P	Yv6/P	Yv7/P	Yv8/P
0.8198	0.8230	1.0329	0.8824	1.0828	0.7237	0.6712	1.4083	1.3199
0.8113	0.8323	1.0412	0.8901	1.0908	0.7306	0.6790	1.4232	1.3357
0.8030	0.8414	1.0495	0.8977	1.0989	0.7374	0.6866	1.4382	1.3517
0.7949	0.8504	1.0580	0.9052	1.1071	0.7440	0.6941	1.4534	1.3679
0.7870	0.8592	1.0665	0.9125	1.1153	0.7505	0.7015	1.4687	1.3842
0.7794	0.8679	1.0750	0.9197	1.1236	0.7569	0.7087	1.4842	1.4008
0.7720	0.8764	1.0837	0.9267	1.1319	0.7632	0.7159	1.4999	1.4176
0.7648	0.8848	1.0924	0.9336	1.1403	0.7694	0.7229	1.5157	1.4345
0.7577	0.8930	1.1012	0.9404	1.1488	0.7755	0.7298	1.5317	1.4517
0.7509	0.9011	1.1100	0.9471	1.1574	0.7814	0.7367	1.5479	1.4691
0.7442	0.9091	1.1189	0.9536	1.1659	0.7873	0.7434	1.5642	1.4867
0.7377	0.9170	1.1279	0.9601	1.1746	0.7931	0.7500	1.5808	1.5045
0.7313	0.9248	1.1370	0.9664	1.1833	0.7988	0.7565	1.5974	1.5225
0.7251	0.9325	1.1461	0.9727	1.1921	0.8044	0.7630	1.6143	1.5407
0.7191	0.9401	1.1553	0.9788	1.2010	0.8100	0.7693	1.6313	1.5592
0.7132	0.9475	1.1646	0.9849	1.2099	0.8154	0.7756	1.6486	1.5778
0.7074	0.9549	1.1739	0.9909	1.2189	0.8208	0.7818	1.6660	1.5967
0.7018	0.9622	1.1834	0.9968	1.2279	0.8261	0.7879	1.6835	1.6158
0.6963	0.9694	1.1929	1.0026	1.2371	0.8313	0.7940	1.7013	1.6352
0.6909	0.9765	1.2024	1.0083	1.2462	0.8365	0.7999	1.7193	1.6547
0.6856	0.9835	1.2121	1.0140	1.2555	0.8415	0.8058	1.7374	1.6746
0.6805	0.9904	1.2218	1.0195	1.2648	0.8466	0.8117	1.7558	1.6946
0.6755	0.9973	1.2317	1.0250	1.2742	0.8515	0.8174	1.7743	1.7149
0.6705	1.0041	1.2415	1.0305	1.2837	0.8564	0.8231	1.7930	1.7354
0.6657	1.0108	1.2515	1.0358	1.2932	0.8613	0.8288	1.8119	1.7562
0.6610	1.0174	1.2616	1.0411	1.3028	0.8661	0.8344	1.8311	1.7772
0.6564	1.0240	1.2717	1.0464	1.3125	0.8708	0.8399	1.8504	1.7985
0.6518	1.0305	1.2819	1.0515	1.3223	0.8755	0.8454	1.8699	1.8200
0.6474	1.0369	1.2922	1.0567	1.3321	0.8801	0.8508	1.8897	1.8418
0.6430	1.0432	1.3026	1.0617	1.3420	0.8847	0.8561	1.9096	1.8639

Cdw	Yv1/P	Yv2/P	Yv3/P	Yv4/P	Yv5/P	Yv6/P	Yv7/P	Yv8/P
0.6388	1.0495	1.3131	1.0667	1.3519	0.8892	0.8614	1.9298	1.8862
0.6346	1.0558	1.3236	1.0716	1.3620	0.8936	0.8667	1.9501	1.9087
0.6305	1.0619	1.3342	1.0765	1.3721	0.8981	0.8719	1.9707	1.9316
0.6264	1.0681	1.3450	1.0814	1.3823	0.9024	0.8770	1.9915	1.9547
0.6225	1.0741	1.3558	1.0861	1.3925	0.9068	0.8821	2.0126	1.9781
0.6186	1.0801	1.3666	1.0909	1.4029	0.9111	0.8872	2.0338	2.0018
0.6148	1.0861	1.3776	1.0956	1.4133	0.9153	0.8922	2.0553	2.0258
0.6111	1.0920	1.3887	1.1002	1.4238	0.9195	0.8972	2.0770	2.0500
0.6074	1.0978	1.3998	1.1048	1.4344	0.9237	0.9021	2.0989	2.0746
0.6038	1.1036	1.4111	1.1093	1.4450	0.9278	0.9070	2.1210	2.0994
0.6002	1.1093	1.4224	1.1138	1.4558	0.9319	0.9118	2.1434	2.1245
0.5967	1.1150	1.4338	1.1183	1.4666	0.9359	0.9166	2.1660	2.1500
0.5933	1.1206	1.4454	1.1227	1.4775	0.9399	0.9214	2.1889	2.1757
0.5900	1.1262	1.4570	1.1271	1.4884	0.9439	0.9261	2.2120	2.2017
0.5866	1.1318	1.4687	1.1314	1.4995	0.9479	0.9308	2.2354	2.2281
0.5834	1.1373	1.4805	1.1357	1.5106	0.9518	0.9354	2.2590	2.2548
0.5802	1.1428	1.4924	1.1399	1.5219	0.9556	0.9400	2.2828	2.2818
0.5770	1.1482	1.5043	1.1442	1.5332	0.9595	0.9446	2.3069	2.3091
0.5739	1.1536	1.5164	1.1483	1.5446	0.9633	0.9492	2.3312	2.3367
0.5709	1.1589	1.5286	1.1525	1.5560	0.9670	0.9537	2.3559	2.3647
0.5679	1.1642	1.5409	1.1566	1.5676	0.9708	0.9581	2.3807	2.3930
0.5649	1.1694	1.5533	1.1607	1.5792	0.9745	0.9626	2.4058	2.4216
0.5620	1.1746	1.5657	1.1647	1.5910	0.9782	0.9670	2.4312	2.4506
0.5591	1.1798	1.5783	1.1687	1.6028	0.9818	0.9713	2.4569	2.4800
0.5563	1.1850	1.5910	1.1727	1.6147	0.9854	0.9757	2.4828	2.5097
0.5535	1.1901	1.6038	1.1766	1.6267	0.9890	0.9800	2.5090	2.5397
0.5508	1.1951	1.6167	1.1805	1.6388	0.9926	0.9843	2.5355	2.5701
0.5481	1.2002	1.6296	1.1844	1.6509	0.9961	0.9885	2.5623	2.6009
0.5454	1.2052	1.6427	1.1882	1.6632	0.9997	0.9928	2.5893	2.6320
0.5428	1.2101	1.6559	1.1920	1.6755	1.0031	0.9970	2.6167	2.6635
0.5402	1.2151	1.6692	1.1958	1.6880	1.0066	1.0011	2.6443	2.6954
0.5376	1.2200	1.6826	1.1996	1.7005	1.0100	1.0053	2.6722	2.7277
0.5351	1.2248	1.6961	1.2033	1.7132	1.0134	1.0094	2.7004	2.7603
0.5326	1.2296	1.7098	1.2070	1.7259	1.0168	1.0135	2.7289	2.7934
0.5302	1.2344	1.7235	1.2107	1.7387	1.0202	1.0175	2.7577	2.8268
0.5278	1.2392	1.7373	1.2143	1.7516	1.0235	1.0216	2.7868	2.8606
0.5254	1.2440	1.7513	1.2180	1.7646	1.0268	1.0256	2.8162	2.8949
0.5230	1.2487	1.7654	1.2216	1.7777	1.0301	1.0296	2.8460	2.9295
0.5207	1.2533	1.7795	1.2251	1.7909	1.0334	1.0335	2.8760	2.9646
0.5184	1.2580	1.7938	1.2287	1.8042	1.0367	1.0375	2.9064	3.0001

ANEXO N° 6

Tabla de diseño para presiones (Modelo 2)

Cdw	Yv1/P	Yv2/P	Yv3/P	Yv4/P	Yv5/P	Yv6/P	Yv7/P	Yv8/P
1.8016	0.3837	0.7356	0.7586	0.3470	0.0730	0.0857	0.7913	0.7159
1.9599	0.4091	0.7389	0.7625	0.3720	0.0905	0.1032	0.7968	0.7219
2.0060	0.4281	0.7421	0.7665	0.3908	0.1054	0.1177	0.8023	0.7279
2.0029	0.4434	0.7454	0.7705	0.4060	0.1186	0.1304	0.8079	0.7339
1.9769	0.4564	0.7487	0.7745	0.4189	0.1306	0.1418	0.8135	0.7401
1.9402	0.4676	0.7520	0.7786	0.4302	0.1417	0.1522	0.8191	0.7462
1.8991	0.4776	0.7553	0.7826	0.4401	0.1521	0.1618	0.8248	0.7525
1.8565	0.4865	0.7586	0.7867	0.4491	0.1619	0.1708	0.8305	0.7587
1.8142	0.4947	0.7620	0.7908	0.4573	0.1711	0.1792	0.8362	0.7650
1.7730	0.5022	0.7653	0.7949	0.4648	0.1800	0.1872	0.8420	0.7714
1.7333	0.5091	0.7687	0.7991	0.4718	0.1885	0.1948	0.8479	0.7779
1.6954	0.5156	0.7721	0.8032	0.4783	0.1966	0.2021	0.8537	0.7843
1.6593	0.5217	0.7755	0.8074	0.4844	0.2045	0.2091	0.8596	0.7909
1.6249	0.5274	0.7789	0.8116	0.4902	0.2121	0.2158	0.8656	0.7975
1.5923	0.5328	0.7824	0.8159	0.4957	0.2194	0.2223	0.8716	0.8041
1.5613	0.5379	0.7858	0.8201	0.5009	0.2266	0.2286	0.8776	0.8108
1.5318	0.5428	0.7893	0.8244	0.5058	0.2336	0.2346	0.8837	0.8176
1.5038	0.5474	0.7927	0.8287	0.5105	0.2403	0.2405	0.8898	0.8244
1.4771	0.5519	0.7962	0.8330	0.5150	0.2469	0.2462	0.8960	0.8313
1.4518	0.5561	0.7998	0.8374	0.5193	0.2534	0.2518	0.9022	0.8382
1.4275	0.5602	0.8033	0.8417	0.5235	0.2597	0.2572	0.9084	0.8452
1.4044	0.5642	0.8068	0.8461	0.5275	0.2659	0.2625	0.9147	0.8522
1.3824	0.5680	0.8104	0.8505	0.5314	0.2719	0.2677	0.9211	0.8593
1.3613	0.5716	0.8140	0.8550	0.5351	0.2779	0.2728	0.9274	0.8665
1.3410	0.5752	0.8175	0.8594	0.5387	0.2837	0.2777	0.9338	0.8737
1.3217	0.5786	0.8211	0.8639	0.5422	0.2894	0.2826	0.9403	0.8810
1.3031	0.5819	0.8248	0.8684	0.5456	0.2950	0.2873	0.9468	0.8883
1.2852	0.5852	0.8284	0.8729	0.5489	0.3006	0.2920	0.9534	0.8957
1.2681	0.5883	0.8321	0.8775	0.5521	0.3060	0.2965	0.9600	0.9032
1.2516	0.5914	0.8357	0.8821	0.5552	0.3114	0.3010	0.9666	0.9107

Cdw	Yv1/P	Yv2/P	Yv3/P	Yv4/P	Yv5/P	Yv6/P	Yv7/P	Yv8/P
1.2357	0.5943	0.8394	0.8867	0.5582	0.3166	0.3054	0.9733	0.9183
1.2204	0.5972	0.8431	0.8913	0.5612	0.3218	0.3098	0.9801	0.9260
1.2056	0.6001	0.8468	0.8959	0.5641	0.3270	0.3140	0.9868	0.9337
1.1913	0.6028	0.8506	0.9006	0.5669	0.3320	0.3182	0.9937	0.9415
1.1775	0.6055	0.8543	0.9053	0.5696	0.3370	0.3224	1.0006	0.9493
1.1642	0.6081	0.8581	0.9100	0.5723	0.3419	0.3265	1.0075	0.9572
1.1513	0.6107	0.8619	0.9148	0.5749	0.3468	0.3305	1.0145	0.9652
1.1389	0.6132	0.8657	0.9195	0.5775	0.3516	0.3344	1.0215	0.9732
1.1268	0.6156	0.8695	0.9243	0.5800	0.3563	0.3383	1.0286	0.9814
1.1151	0.6180	0.8733	0.9291	0.5825	0.3610	0.3422	1.0357	0.9895
1.1037	0.6204	0.8772	0.9340	0.5849	0.3656	0.3460	1.0429	0.9978
1.0927	0.6227	0.8810	0.9389	0.5873	0.3702	0.3497	1.0501	1.0061
1.0820	0.6250	0.8849	0.9437	0.5896	0.3747	0.3534	1.0573	1.0145
1.0716	0.6272	0.8888	0.9487	0.5919	0.3792	0.3571	1.0647	1.0229
1.0615	0.6294	0.8927	0.9536	0.5941	0.3837	0.3607	1.0720	1.0315
1.0516	0.6315	0.8967	0.9586	0.5963	0.3880	0.3643	1.0795	1.0401
1.0421	0.6336	0.9006	0.9636	0.5984	0.3924	0.3678	1.0869	1.0487
1.0328	0.6357	0.9046	0.9686	0.6006	0.3967	0.3713	1.0945	1.0575
1.0237	0.6377	0.9086	0.9737	0.6026	0.4010	0.3748	1.1020	1.0663
1.0149	0.6397	0.9126	0.9787	0.6047	0.4052	0.3782	1.1097	1.0752
1.0063	0.6417	0.9166	0.9838	0.6067	0.4094	0.3816	1.1174	1.0841
0.9979	0.6436	0.9207	0.9890	0.6087	0.4135	0.3849	1.1251	1.0932
0.9897	0.6455	0.9247	0.9941	0.6106	0.4176	0.3882	1.1329	1.1023
0.9817	0.6474	0.9288	0.9993	0.6126	0.4217	0.3915	1.1407	1.1115
0.9739	0.6492	0.9329	1.0045	0.6145	0.4257	0.3948	1.1486	1.1207
0.9662	0.6510	0.9370	1.0097	0.6163	0.4297	0.3980	1.1566	1.1301
0.9588	0.6528	0.9411	1.0150	0.6182	0.4337	0.4012	1.1646	1.1395
0.9515	0.6546	0.9453	1.0203	0.6200	0.4376	0.4043	1.1726	1.1490
0.9444	0.6563	0.9495	1.0256	0.6218	0.4416	0.4074	1.1808	1.1586
0.9374	0.6580	0.9537	1.0310	0.6235	0.4454	0.4105	1.1889	1.1682
0.9306	0.6597	0.9579	1.0363	0.6253	0.4493	0.4136	1.1972	1.1780
0.9239	0.6614	0.9621	1.0417	0.6270	0.4531	0.4167	1.2055	1.1878
0.9174	0.6630	0.9663	1.0472	0.6287	0.4569	0.4197	1.2138	1.1977
0.9110	0.6647	0.9706	1.0526	0.6304	0.4607	0.4227	1.2222	1.2077
0.9048	0.6663	0.9749	1.0581	0.6320	0.4644	0.4256	1.2307	1.2177
0.8986	0.6678	0.9792	1.0636	0.6337	0.4681	0.4286	1.2392	1.2279
0.8926	0.6694	0.9835	1.0692	0.6353	0.4718	0.4315	1.2478	1.2381
0.8867	0.6710	0.9878	1.0748	0.6369	0.4754	0.4344	1.2564	1.2484
0.8810	0.6725	0.9922	1.0804	0.6384	0.4791	0.4373	1.2651	1.2588
0.8753	0.6740	0.9966	1.0860	0.6400	0.4827	0.4401	1.2739	1.2693

Cdw	Yv1/P	Yv2/P	Yv3/P	Yv4/P	Yv5/P	Yv6/P	Yv7/P	Yv8/P
0.8697	0.6755	1.0009	1.0917	0.6415	0.4863	0.4430	1.2827	1.2799
0.8643	0.6769	1.0054	1.0974	0.6431	0.4898	0.4458	1.2916	1.2906
0.8589	0.6784	1.0098	1.1031	0.6446	0.4934	0.4486	1.3005	1.3013
0.8537	0.6798	1.0142	1.1088	0.6460	0.4969	0.4513	1.3095	1.3122
0.8485	0.6813	1.0187	1.1146	0.6475	0.5004	0.4541	1.3186	1.3231
0.8435	0.6827	1.0232	1.1204	0.6490	0.5038	0.4568	1.3277	1.3341
0.8385	0.6841	1.0277	1.1263	0.6504	0.5073	0.4595	1.3369	1.3453
0.8336	0.6854	1.0323	1.1321	0.6518	0.5107	0.4622	1.3462	1.3565
0.8288	0.6868	1.0368	1.1380	0.6532	0.5141	0.4649	1.3555	1.3678
0.8240	0.6881	1.0414	1.1440	0.6546	0.5175	0.4675	1.3649	1.3792
0.8194	0.6895	1.0460	1.1499	0.6560	0.5209	0.4702	1.3743	1.3907
0.8148	0.6908	1.0506	1.1559	0.6574	0.5242	0.4728	1.3838	1.4023
0.8103	0.6921	1.0552	1.1620	0.6587	0.5276	0.4754	1.3934	1.4139
0.8059	0.6934	1.0599	1.1680	0.6601	0.5309	0.4780	1.4031	1.4257
0.8016	0.6947	1.0645	1.1741	0.6614	0.5342	0.4805	1.4128	1.4376
0.7973	0.6960	1.0692	1.1802	0.6627	0.5375	0.4831	1.4226	1.4496
0.7931	0.6972	1.0740	1.1864	0.6640	0.5407	0.4856	1.4324	1.4617
0.7889	0.6985	1.0787	1.1926	0.6653	0.5440	0.4882	1.4423	1.4739
0.7849	0.6997	1.0834	1.1988	0.6666	0.5472	0.4907	1.4523	1.4861
0.7808	0.7009	1.0882	1.2050	0.6678	0.5504	0.4932	1.4624	1.4985

