

Maestría en Ingeniería Civil

Estructuras escalonadas. Modelación física y formulación matemática

Jorge Alejandro Gómez Martínez

Bogotá, D.C., 10 de junio de 2019



Estructuras escalonadas. Modelación física y formulación matemática

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en
Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

Ing. Héctor Alfonso Rodríguez Díaz, M. Sc.

Director

Bogotá, D.C., 10 de junio de 2019



La tesis de maestría titulada “Estructuras escalonadas. Modelación física y formulación matemática”, presentada por Jorge Alejandro Gómez Martínez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Jurado

German Ricardo Santos Granados

Jurado

Héctor Matamoros Rodríguez

Bogotá, D.C., 10 de junio de 2019

Dedicatoria

A mi madre, Martica.

Agradecimientos

Quiero agradecer al ingeniero Alfonso Rodríguez Díaz, mi director y profesor de Hidráulica por varios años, por su colaboración, orientación e interés en este trabajo de grado y por haberme transmitido el gusto y el interés por el área de la Hidráulica.

Agradezco al Centro de Estudios Hidráulicos de La Escuela, por brindarme el espacio y el apoyo necesarios para la construcción de los modelos físicos y, particularmente, a Jhon Jairo Arias y al ingeniero Andrés Otálora.

También agradezco a los ingenieros Ana Hernández, Marcela Gómez, Ricardo Aguilar, Diana Beltrán y Nicolás López por su colaboración, en distintas etapas del desarrollo de este trabajo.

Resumen

El flujo a superficie libre está gobernado por las fuerzas de gravedad y su efecto en el comportamiento del flujo depende de la pendiente longitudinal del canal. Con frecuencia la topografía hace que sea necesario llevar el flujo de un nivel alto a uno bajo en una distancia relativamente corta, es decir, en un tramo con una pendiente muy alta, lo que producirá velocidades excesivas. Por lo anterior, se hace necesario disipar el exceso de energía cinética, lo que puede hacerse de manera puntual o gradual.

Las estructuras escalonadas, tema de estudio del presente trabajo, permiten disipar energía en flujos a superficie libre de manera gradual. Luego de recopilar y estudiar diferentes investigaciones sobre el tema de estructuras escalonadas, se ve la necesidad de continuar con el estudio del comportamiento del flujo en estas estructuras y, siguiendo las recomendaciones de varios autores, especialmente tratar de desarrollar una metodología para su dimensionamiento, que hasta ahora no se ha logrado.

La metodología para el desarrollo del presente trabajo de investigación consiste en la construcción de tres modelos físicos de estructuras escalonadas, el estudio y caracterización del flujo en la estructura y el desarrollo de una metodología para su dimensionamiento. Como resultado del trabajo propuesto se presentan dos ecuaciones para caracterizar el tipo de flujo en una estructura escalonada, conocida su geometría y el caudal; también se propone una metodología para el dimensionamiento de estructuras escalonadas con flujo rasante.

Palabras claves: Modelación física, estructura escalonada, flujo rasante, metodología de diseño

Abstract

Open channel flow is governed by gravity forces and its effect on the flow behavior depends on the slope of the channel. Frequently the topography means it is necessary to take the flow from a high level to a low level in a relatively short distance, i.e., in a segment with a steeper slope, which produces high velocities. As a result, it is necessary to dissipate the excessive kinetic energy, either locally or gradually.

Stepped structures, the topic of study of this research, allow energy to dissipate in open channel flows gradually. After compiling and studying different research about stepped structures, it is necessary to continue to studying the flow behavior on these types of structures. Following the recommendations of various authors, future research should be focused on developing a design methodology that so far hasn't been achieved.

The methodology of this research consists of building three physical models of stepped structures, studying and characterizing the flow through the structure and developing a design methodology. This study presents two equations to identify the type of flow in the structure, when the geometry of the structure and the flow rate are known. It is proposed a design methodology for skimming flow.

Keywords: physical modeling, stepped structure, skimming flow, design methodology.

Índice general

	Página
1. ESTADO DEL CONOCIMIENTO.....	20
1.1. Uso de las estructuras escalonadas	20
1.2. Flujo en estructuras escalonadas.....	20
1.2.1. Flujo escalón a escalón	20
1.2.2. Flujo rasante.....	22
1.2.3. Flujo de transición	24
1.2.4. Límite superior del flujo escalón a escalón e inicio del flujo rasante	24
1.3. Estudios sobre modelos físicos y prototipos de estructuras escalonadas.....	26
1.4. Metodologías para el diseño de estructuras escalonadas	27
1.4.1. Metodología de Ohtsu et al. (2004)	27
1.4.2. Método de Chanson:	31
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	33
3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS MODELOS FÍSICOS.....	34
3.1.1. Análisis dimensional modelo - prototipo.....	34
4. MONTAJE EXPERIMENTAL.....	36
4.1.1. Modelo CAD 3D de la estructura a construir	36
4.1.2. Definición del montaje	36
4.1.3. Construcción del modelo	37
4.1.4. Equipos e instrumentos de medición	41
4.1.4.1. Lecturas de profundidad de flujo.....	41
4.1.4.2. Medición del caudal	41
5. CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DEL FLUJO	42
5.1. Flujo escalón a escalón	42
5.2. Flujo rasante	44
5.3. Flujo de transición	45
6. CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DEL FLUJO.....	47
6.1. Límites entre los tipos de flujo	47
6.2. Energía disipada y eficiencia de la estructura.....	49
6.2.1. Estructura 1:1	49
6.2.2. Estructura 1:3.....	55

6.2.1. Estructura 1:5.....	60
7. METODOLOGÍA DE DISEÑO PROPUESTA	67
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	73
9. PROPUESTAS DE INVESTIGACIONES FUTURAS	75
10. BIBLIOGRAFÍA.....	76
11. ANEXOS	78
11.1. Anexo de cálculos.....	78
11.1.1. Estructura escalonada con pendiente 1:1	78
11.1.1. Estructura escalonada con pendiente 1:3	93
11.1.1. Estructura escalonada con pendiente 1:5	107
11.1. Anexo fotográfico.....	122
11.1.1. Estructura escalonada con pendiente 1:1	122
11.1.2. Estructura escalonada con pendiente 1:3	128
11.1.3. Estructura escalonada con pendiente 1:5	135

Índice de tablas

	Página
Tabla 1. Tipos de flujo en estructuras escalonadas.	16
Tabla 2. Flujo escalón a escalón.....	21
Tabla 3. Expresiones empleadas para el cálculo de flujo escalón a escalón.	22
Tabla 4. Caudales límites entre los tipos de flujo, en lps	47
Tabla 5. Caudales límites adimensionales entre los tipos de flujo	48
Tabla 6. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 3.23 lps (TR).....	50
Tabla 7. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 3.23 lps (TR).....	50
Tabla 8. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 3.23 lps (TR)	51
Tabla 9. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 14.70 lps (R).....	51
Tabla 10. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 14.70 lps (R)	52
Tabla 11. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 14.70 lps (R).....	53
Tabla 12. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:1.....	54
Tabla 13. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 9.62 lps (TR)	55
Tabla 14. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 9.62 lps (TR)	55
Tabla 15. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 9.62 lps (TR)	56
Tabla 16. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 29.38 lps (R).....	56
Tabla 17. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 29.38 lps (R)	57
Tabla 18. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 29.38 lps (R).....	58
Tabla 19. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:3.....	59
Tabla 20. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 2.70 lps (EE)	60
Tabla 21. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 2.70 lps (EE)	60
Tabla 22. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 2.70 lps (EE)	61
Tabla 23. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 8.85 lps (TR)	61
Tabla 24. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 8.85 lps (TR)	62
Tabla 25. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 8.85 lps (TR)	63
Tabla 26. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 30.0 lps (R)	63
Tabla 27. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 30.0 lps (R)	64
Tabla 28. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 30.0 lps (R).....	65
Tabla 29. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:5.....	66
Tabla 30. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:1	67
Tabla 31. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:3.....	68
Tabla 32. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:5.....	69
Tabla 33. Coeficiente equivalente de Manning para cada estructura.	70
Tabla 34. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 4.38 lps (T).....	78
Tabla 35. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 4.38 lps (T).....	78
Tabla 36. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 4.38 lps (T).....	79
Tabla 37. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 6.00 lps (T).....	79
Tabla 38. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 6.00 lps (T).....	80
Tabla 39. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 6.00 lps (T).....	81
Tabla 40. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 6.39 lps (R)	81
Tabla 41. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 6.39 lps (R)	82
Tabla 42. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 6.39 lps (R).....	83
Tabla 43. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 9.69 lps (R)	83
Tabla 44. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 9.69 lps (R)	84
Tabla 45. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 9.69 lps (R).....	85
Tabla 46. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 20.63 lps (R).....	85
Tabla 47. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 20.63 lps (R)	86
Tabla 48. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 20.63 lps (R).....	87

Tabla 49. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 24.84 lps (R).....	87
Tabla 50. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 24.84 lps (R)	88
Tabla 51. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 24.84 lps (R).....	89
Tabla 52. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 30.50 lps (R).....	89
Tabla 53. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 30.50 lps (R)	90
Tabla 54. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 30.50 lps (R).....	91
Tabla 55. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 39.65 lps (R).....	91
Tabla 56. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 39.65 lps (R)	92
Tabla 57. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 39.65 lps (R).....	93
Tabla 58. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 11.03 lps (R).....	93
Tabla 59. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 11.03 lps (R)	94
Tabla 60. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 11.03 lps (R).....	95
Tabla 61. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 14.39 lps (R).....	95
Tabla 62. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 14.39 lps (R)	96
Tabla 63. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 14.39 lps (R).....	97
Tabla 64. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 18.48 lps (R).....	97
Tabla 65. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 18.48 lps (R)	98
Tabla 66. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 18.48 lps (R).....	99
Tabla 67. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 22.84 lps (R).....	99
Tabla 68. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 22.84 lps (R)	100
Tabla 69. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 22.84 lps (R).....	101
Tabla 70. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 25.20 lps (R).....	101
Tabla 71. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 25.20 lps (R)	102
Tabla 72. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 25.20 lps (R).....	103
Tabla 73. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 33.74 lps (R).....	103
Tabla 74. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 33.74 lps (R)	104
Tabla 75. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 33.74 lps (R).....	105
Tabla 76. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 40.38 lps (R).....	105
Tabla 77. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 40.38 lps (R)	106
Tabla 78. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 40.38 lps (R).....	107
Tabla 79. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 5.54 lps (E).....	107
Tabla 80. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 5.54 lps (E).....	108
Tabla 81. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 5.54 lps (E).....	109
Tabla 82. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 12.02 lps (T).....	109
Tabla 83. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 12.02 lps (T).....	110
Tabla 84. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 12.02 lps (T).....	111
Tabla 85. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 14.96 lps (R).....	111
Tabla 86. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 14.96 lps (R)	112
Tabla 87. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 14.96 lps (R).....	113
Tabla 88. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 19.89 lps (R).....	113
Tabla 89. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 19.89 lps (R)	114
Tabla 90. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 19.89 lps (R).....	115
Tabla 91. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 25.56 lps (R).....	115
Tabla 92. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 25.56 lps (R)	116
Tabla 93. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 25.56 lps (R).....	117
Tabla 94. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 34.10 lps (R).....	117
Tabla 95. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 34.10 lps (R)	118
Tabla 96. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 34.10 lps (R).....	119
Tabla 97. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 39.75 lps (R).....	119
Tabla 98. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 39.75 lps (R)	120
Tabla 99. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 39.75 lps (R).....	121

Índice de ilustraciones

	Página
Ilustración 1. Árbol del problema	18
Ilustración 2. Flujo escalón a escalón.....	22
Ilustración 3. Flujo rasante con cavidad parcialmente ocupada por el flujo secundario	23
Ilustración 4. Esquema zona de inicio del atrapamiento de aire, en flujos rasantes	25
Ilustración 5. Esquema de tipos de flujos rasantes. Ohtsu et al. (2004)	28
Ilustración 6. Vista isométrica del modelo.	36
Ilustración 7. Sistema de alimentación. Válvula de regulación del caudal.	37
Ilustración 8. Vista lateral de los modelos físicos	37
Ilustración 9. Fotografías del modelo físico con relación h:L = 1:1	38
Ilustración 10. Fotografías del modelo físico con relación h:L = 1:3	39
Ilustración 11. Fotografías del modelo físico con relación h:L = 1:5	40
Ilustración 12. Instrumentos para la medición de las profundidades de flujo	41
Ilustración 13. Instrumentos para la medición de las profundidades de flujo	41
Ilustración 14. Perfil de flujo estructura 1:1. Q = 0.94 lps	42
Ilustración 15. Perfil de flujo estructura 1:3. Q = 0.94 lps	43
Ilustración 16. Perfil de flujo estructura 1:5. Q = 2.70 lps	43
Ilustración 17. Perfil de flujo en la estructura 1:1 para Q = 14.70 lps.....	44
Ilustración 18. Perfil de flujo en la estructura 1:3 para Q = 29.30 lps.....	45
Ilustración 19. Perfil de flujo en la estructura 1:5 para Q = 30.0 lps.....	45
Ilustración 20. Perfil de flujo en la estructura 1:1 para Q = 3.23 lps.....	45
Ilustración 21. Perfil de flujo en la estructura 1:3 para Q = 9.62 lps.....	46
Ilustración 22. Perfil de flujo en la estructura 1:5 para Q = 12.02 lps.....	46
Ilustración 23. Límites de ocurrencia de los flujos escalón a escalón, de transición y rasante	48
Ilustración 24. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 3.23 lps (TR).....	51
Ilustración 25. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 14.70 lps (R)	53
Ilustración 26. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:1	54
Ilustración 27. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 9.62 lps (TR).....	56
Ilustración 28. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 29.38 lps (R)	58
Ilustración 29. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:3.....	59
Ilustración 30. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 2.70 lps (EE).....	61
Ilustración 31. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 8.85 lps (TR).....	63
Ilustración 32. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 30.0 lps (R)	65
Ilustración 33. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:5.....	66
Ilustración 34. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:1	68
Ilustración 35. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:3	69
Ilustración 36. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:5	70
Ilustración 37. Relación entre el coeficiente equivalente de Manning y la pendiente de la estructura ...	71
Ilustración 38. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 4.38 lps (T)	79
Ilustración 39. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 6.00 lps (T)	81
Ilustración 40. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 6.39 lps (R)	83
Ilustración 41. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 9.69 lps (R)	85
Ilustración 42. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 20.63 lps (R)	87
Ilustración 43. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 24.84 lps (R)	89
Ilustración 44. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 30.50 lps (R)	91
Ilustración 45. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 39.65 lps (R)	93

Ilustración 46. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 11.03 lps (R)	95
Ilustración 47. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 14.39 lps (R)	97
Ilustración 48. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 18.48 lps (R)	99
Ilustración 49. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 22.84 lps (R)	101
Ilustración 50. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 25.20 lps (R)	103
Ilustración 51. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 33.74 lps (R)	105
Ilustración 52. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 40.38 lps (R)	107
Ilustración 53. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 5.54 lps (E)	109
Ilustración 54. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 12.02 lps (T)	111
Ilustración 55. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 14.96 lps (R)	113
Ilustración 56. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 19.89 lps (R)	115
Ilustración 57. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 25.56 lps (R)	117
Ilustración 58. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 34.10 lps (R)	119
Ilustración 59. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 39.75 lps (R)	121

Índice de anexos

Anexo 1. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 0.65 lps (EE)	122
Anexo 2. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 0.94 lps (EE)	122
Anexo 3. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 1.54 lps (EE)	123
Anexo 4. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 1.98 lps (EE)	123
Anexo 5. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 2.00 lps (T).....	124
Anexo 6. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 3.23 lps (T).....	124
Anexo 7. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 4.38 lps (T).....	125
Anexo 8. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 6.00 lps (T).....	125
Anexo 9. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 6.39 lps (R).....	126
Anexo 10. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 9.69 lps (R).....	126
Anexo 11. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 14.70 lps (R).....	127
Anexo 12. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 20.63 lps (R).....	127
Anexo 13. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 24.84 lps (R).....	127
Anexo 14. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 30.50 lps (R).....	127
Anexo 15. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 Q = 39.56 lps (R).....	128
Anexo 16. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 0.94 lps (EE)	128
Anexo 17. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 3.62 lps (EE)	129
Anexo 18. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 7.50 lps (T).....	129
Anexo 19. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 9.55 lps (T).....	129
Anexo 20. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 11.02 lps (R).....	130
Anexo 21. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 14.39 lps (R).....	130
Anexo 22. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 18.48 lps (R).....	131
Anexo 23. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 22.84 lps (R).....	131
Anexo 24. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 25.20 lps (R).....	132
Anexo 25. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 29.38 lps (R).....	133
Anexo 26. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 33.74 lps (R).....	134
Anexo 27. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 40.38 lps (R).....	134
Anexo 28. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 Q = 2.70 lps (EE)	135
Anexo 29. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 Q = 5.54 lps (EE)	136
Anexo 30. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 Q = 8.85 lps (T).....	137
Anexo 31. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 Q = 12.02 lps (T).....	137
Anexo 32. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 Q = 14.96 lps (R).....	138
Anexo 33. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 Q = 19.89 lps (R).....	139
Anexo 34. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 Q = 25.56 lps (R).....	139
Anexo 35. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 Q = 25.56 lps (R).....	140
Anexo 36. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 Q = 34.10 lps (R).....	141
Anexo 37. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 Q = 39.75 lps (R).....	141

Introducción

El estudio del comportamiento del flujo en estructuras escalonadas resulta de gran importancia, cuando de diseño y operación de sistemas hidráulicos se trata. En la presente investigación se estudiará el comportamiento del flujo en estructuras escalonadas con el propósito de plantear una metodología para su dimensionamiento.

El capítulo 1 trata el estado del arte del tema de estudio, presentando: los usos que se da a las estructuras escalonadas en el campo de la ingeniería hidráulica, los tipos de flujo reportados en la literatura, las investigaciones similares realizadas y algunas de las metodologías de diseño de mayor uso.

En el capítulo 2 se presenta la metodología propuesta para el desarrollo del presente trabajo, en el capítulo 3 se describen los criterios utilizados para el dimensionamiento de los modelos físicos y el capítulo 4 contiene el montaje experimental y los equipos de medición utilizados.

En el capítulo 5 se presenta la caracterización cualitativa del flujo en cada uno de los modelos físicos, en el capítulo 6 se realiza la caracterización cuantitativa del flujo, se plantean ecuaciones para los valores de caudal límite entre los tipos de flujo encontrados en el capítulo 5 y se miden varios perfiles de flujo para evaluar la eficiencia en la disipación de energía de los diferentes modelos y en el capítulo 7 se propone una metodología para el dimensionamiento de estructuras escalonadas con flujo rasante.

Finalmente, en el capítulo 8 se presenta el análisis de los resultados y conclusiones y en el capítulo 9 se proponen algunas investigaciones futuras para dar continuidad al estudio realizado.

Justificación

El flujo a superficie libre está gobernado por las fuerzas de gravedad y su efecto en el comportamiento del flujo depende de la pendiente longitudinal del canal. En la práctica, el transporte de flujos a superficie libre se realiza en canales de pendiente pequeña, lo que permite que las velocidades de flujo sean bajas.

Con frecuencia la topografía hace que sea necesario llevar el flujo de un nivel alto a uno bajo en una distancia relativamente corta, es decir, en un tramo con una pendiente muy alta, lo que producirá velocidades excesivas. Por lo anterior, se hace necesario disipar el exceso de energía cinética, lo que puede hacerse de manera puntual o gradual. Las estructuras escalonadas, tema de estudio del presente trabajo, permiten disipar energía en flujos a superficie libre de manera gradual.

En las últimas décadas se ha visto un creciente interés por el estudio de vertederos escalonados en numerosos laboratorios del mundo. Esto puede deberse a su uso como estructura de rebose y disipación de energía en presas. Este tipo de vertedero tiene la ventaja de requerir menor espacio para la disipación de energía que un tanque amortiguador.

Según la literatura, el flujo sobre una estructura escalonada puede desarrollarse siguiendo tres comportamientos: flujo de Napa, flujo de transición y flujo rasante.

Tabla 1. Tipos de flujo en estructuras escalonadas.

Flujo de napa	
<p>Se caracteriza por una sucesión de chorros de caída libre que inciden en los escalones y están seguidos por un resalto hidráulico con desarrollo total o parcial. Esta situación puede aplicarse a situaciones donde el caudal es pequeño o el vertedero es relativamente plano.</p>	
Flujo de transición	
<p>Con el aumento del caudal, la cavidad debajo del chorro comienza a desaparecer, con el impacto cerca del borde del escalón, causando una condición similar al estancamiento. Este régimen se caracteriza por aireación significativa, salpicaduras y apariencia caótica.</p>	
Flujo rasante	
<p>Ocurre cuando, por el aumento del caudal, la cavidad debajo del chorro desaparece por completo. El agua fluye como una corriente que roza los bordes de los escalones. La mayor parte de la energía se disipa para mantener vórtices horizontales estables debajo del pseudo-fondo, formado por los bordes externos de los escalones.</p>	

El diseño de estructuras escalonadas consiste, definidas sus dimensiones, en determinar la velocidad y la profundidad de flujo en la estructura, la energía al final de la estructura y el incremento de la profundidad de flujo por el efecto del aire para determinar la altura de los muros de la estructura.

Con el objetivo de cuantificar la energía disipada en una estructura escalonada y definir las características del flujo sobre los escalones, el profesor Robert M. Sorensen diseñó y construyó dos modelos a escala de un vertedero WES, uno estándar y otro con una variación, en la que la forma estándar del vertedero Ogge se formó con los bordes externos de los escalones de una estructura escalonada, la cual se construyó desde justo aguas abajo de la cresta hasta el pie del vertedero. Esta investigación concluyó que el vertedero escalonado es bastante efectivo en la disipación de energía y que la transición del flujo sobre la cresta lisa al flujo sobre la estructura escalonada es bastante suave. El autor sugirió continuar con la investigación para encontrar información adicional que permita optimizar la geometría de la estructura.

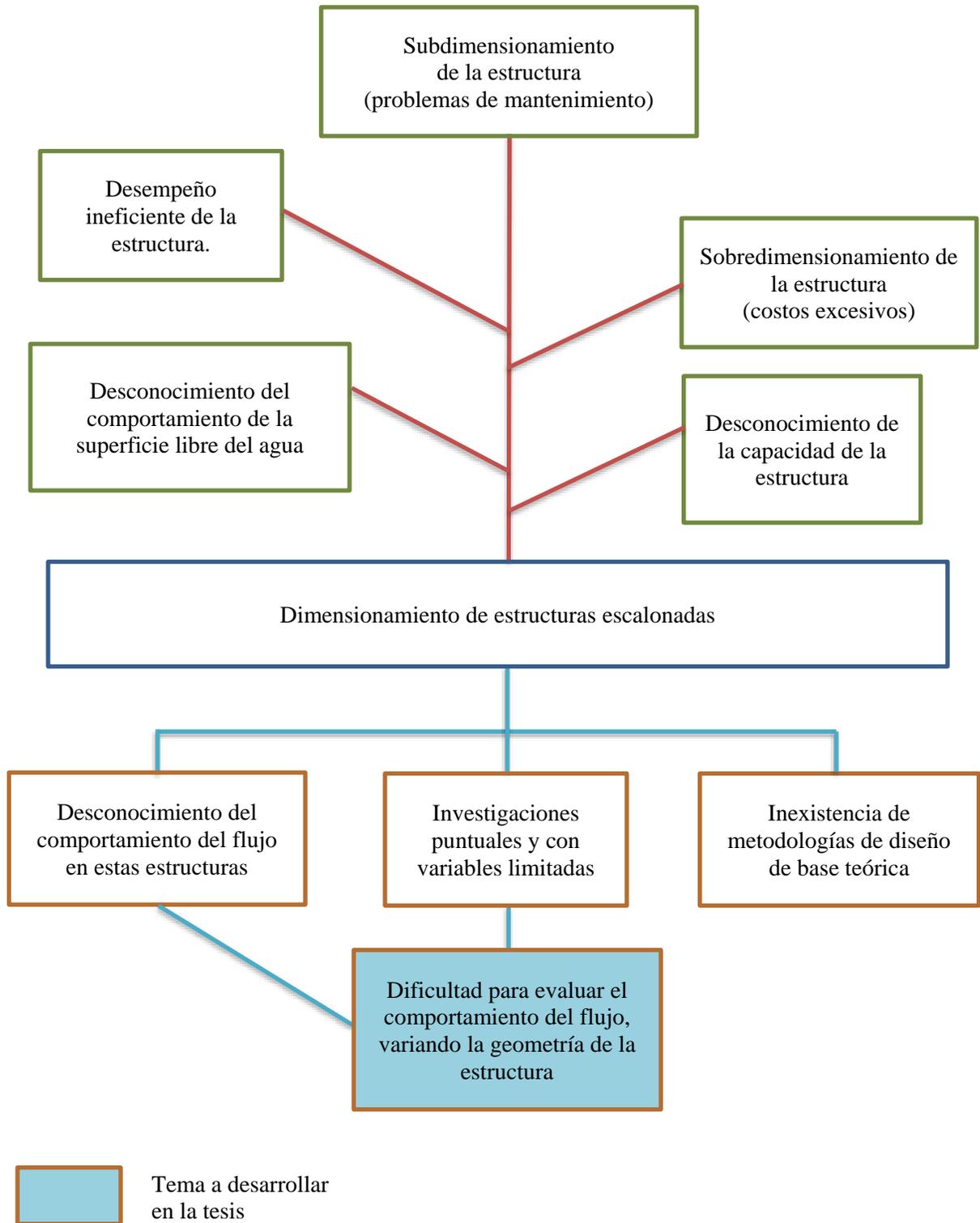
Otras investigaciones sobre el tema han evaluado la incidencia de la forma de los escalones. El doctor Z. L. Bai junto con los profesores Y. Peng y J. M. Zhang desarrollaron su investigación sobre vertederos escalonados, dando a los escalones una configuración en forma de V. El modelo tenía un total de 56 escalones, de los cuales 28 hacían parte de la transición entre escalones rectos y escalones en V, concluyendo que el flujo es tridimensional, de acuerdo con el patrón de flujo.

Stefan Felder y Hubert Chanson de la universidad de Queensland desarrollaron una investigación sobre vertederos escalonados en la que dieron una configuración no uniforme a la estructura, con diferentes alturas y tamaños de los escalones. Con base en sus resultados, en cuanto a disipación de energía, encontraron una mínima diferencia en la eficiencia de la estructura en comparación con estructuras de geometría uniforme.

Luego de recopilar y estudiar diferentes investigaciones sobre el tema de estructuras escalonadas, se ve la necesidad de continuar con el estudio del comportamiento del flujo en estas estructuras y, siguiendo las recomendaciones de varios autores, especialmente con el objetivo de desarrollar una metodología para su dimensionamiento, que hasta ahora no se ha logrado.

Árbol del problema:

Ilustración 1. Árbol del problema



Objetivos

Objetivo general

Realizar la modelación física de estructuras escalonadas.

Objetivos específicos

- Construir modelos físicos de estructuras escalonadas, conservando su sección transversal y variando su pendiente.
- Estudiar y caracterizar el flujo en estructuras escalonadas.
- Evaluar la eficiencia en disipación de energía de estructuras escalonadas.
- Elaborar una metodología para el dimensionamiento de estructuras escalonadas.

1. Estado del conocimiento

1.1. Uso de las estructuras escalonadas

Una de las principales aplicaciones de las estructuras escalonadas es la disipación de energía en sistemas presa embalse.

La estructura escalonada forma la superficie del vertedero de excesos, de tal manera que, por el paso del agua sobre el vertedero, el agua disipa su energía. La eficiencia de la estructura en disipación de energía permite reducir el tamaño del tanque amortiguador necesario al pie de la presa y eventualmente eliminarlo.

La mayoría de las presas pequeñas están equipadas con una estructura de desbordamiento, el aliviadero, que incluye típicamente una cresta, una rampa y un dissipador de energía en el extremo corriente abajo. El dissipador de energía está diseñado para disipar el exceso de energía cinética al final del aliviadero antes de volver a unirse a la corriente natural. La disipación de energía en los aliviaderos de las presas se logra generalmente mediante un depósito de contención estándar aguas abajo de una rampa empinada en la que tiene lugar un salto hidráulico, que convierte el flujo de condiciones supercríticas a subcríticas, un chorro de agua de alta velocidad que despega de un salto de esquí y choca con aguas abajo de la piscina de inmersión, o una piscina de inmersión en la que el flujo del canal choca y la energía cinética turbulenta se disipa en la recirculación turbulenta. La construcción de escalones en el canal del aliviadero también puede ayudar con la disipación de energía.

El diseño de canal escalonado se ha utilizado durante más de 3 milenios. Se construyó un número significativo de estructuras con sistemas de aliviaderos escalonados desde el siglo XIX hasta principios del siglo XX. Los avances recientes en materiales y tecnología de construcción, incluido el hormigón compactado con rodillo (RCC) y el alambre de gavión recubierto con polímero, llevaron a una renovación de interés para el diseño del canal escalonado. El perfil del aliviadero escalonado aumenta significativamente la tasa de disipación de energía que tiene lugar a lo largo del aliviadero, reduciendo así el tamaño de la estructura de amortiguación corriente abajo. Las cascadas escalonadas se utilizan también en plantas de tratamiento de agua para mejorar la transferencia aire-agua de gases atmosféricos (por ejemplo, oxígeno, nitrógeno) y de componentes orgánicos volátiles (COV). (Chanson H. , 2004)

Las estructuras escalonadas también se usan para regulación fluvial (modificación de las condiciones del río para un determinado propósito). En este caso las estructuras se construyen con gaviones, que les da una característica especial, debido a su permeabilidad.

1.2. Flujo en estructuras escalonadas

Cuando el agua fluye sobre una estructura escalonada se presentan principalmente tres tipos de flujo: el flujo escalón a escalón, cuando el caudal y la pendiente de la estructura son relativamente pequeños, y el flujo rasante, cuando para una misma pendiente el caudal es relativamente grande; para caudales intermedios, el flujo se denomina flujo de transición.

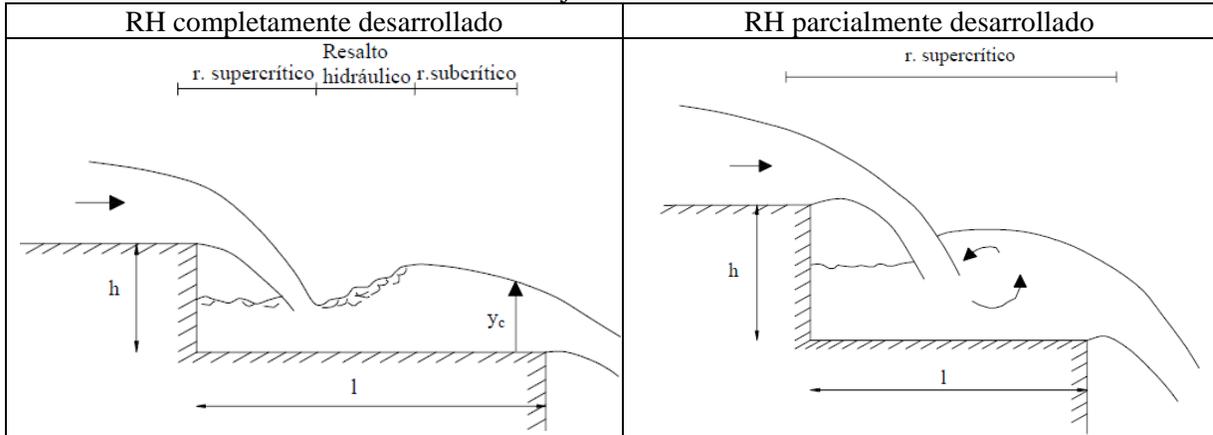
1.2.1. Flujo escalón a escalón

Este flujo se caracteriza por una sucesión de chorros con caída libre que impactan de escalón a escalón. Se presenta cuando el caudal transportado es pequeño o la pendiente de la estructura es baja. Dependiendo de las dimensiones del escalón y la magnitud del caudal, en la huella del escalón puede o no formarse un resalto hidráulico.

Si el chorro cae por completo dentro del siguiente escalón, se denomina flujo escalón a escalón aislado.

En la Tabla 2 se muestra un flujo escalón a escalón aislado con resalto hidráulico completamente desarrollado y un flujo escalón a escalón aislado con resalto hidráulico parcialmente desarrollado.

Tabla 2. Flujo escalón a escalón.



El primer caso se presenta cuando la estructura tiene baja pendiente, es decir, que las contrahuellas de los escalones son pequeñas y las huellas grandes. En esta condición de flujo la profundidad crítica se presenta cerca del vértice de cada escalón. En el segundo caso el flujo siempre es supercrítico en el escalón.

Chanson propuso una expresión para determinar el caudal máximo, en la cual, se garantiza el resalto hidráulico completo.

$$q_{m\acute{a}x} = \sqrt{\left(0.0916 \left(\frac{h}{l}\right)^{-1.276} \times h\right)^3 \times \frac{g}{\alpha}} \quad [1]$$

Cerca de la contrahuella se forma una cavidad de aire y un colchón de agua. El aire entra a través de la superficies superior e inferior del chorro de descarga y por medio del impacto del chorro sobre el colchón de agua.

Este tipo de flujo disipa la energía por fragmentación del chorro en el aire, el impacto del chorro en el escalón y la formación del resalto.

El flujo escalón a escalón aislado puede calcularse como una sucesión de estructuras de caída, con la metodología del número de caída, la cual se define como:

$$D = \frac{q^2}{gh^3} = \left(\frac{y_c}{h}\right)^3 \quad [2]$$

Donde:

q es el caudal unitario en m^3/s_m

g es la aceleración de la gravedad en m/s^2

h es la altura de la contrahuella en m

A partir del número de caída se puede estimar el comportamiento del flujo, como se describe a continuación:

Ilustración 2. Flujo escalón a escalón

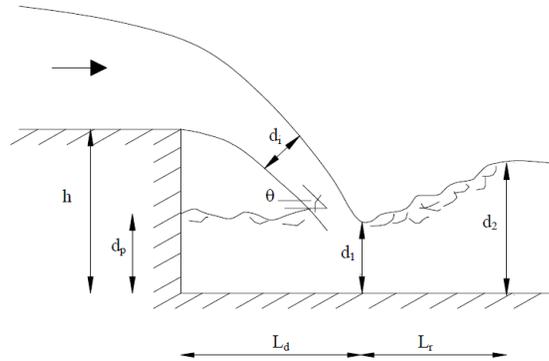


Tabla 3. Expresiones empleadas para el cálculo de flujo escalón a escalón.

$$\frac{d_p}{h} = D^{0.22} \quad [3] \quad \frac{d_i}{h} = 0.687D^{0.4943} \quad [4] \quad \frac{d_1}{h} = 0.54D^{0.425} \quad [5] \quad \frac{d_2}{h} = 1.66D^{0.27} \quad [6]$$

$$\tan(\theta) = 0.838D^{-0.1953} \quad [7] \quad \frac{L_d}{h} = 4.3D^{0.27} \quad [8] \quad \frac{L_r}{d_1} = 8(D^{0.5} - 1.5) \quad [9]$$

NOTA: Suposición para el uso de las ecuaciones. Perfecta aireación de la cavidad de aire. Si la presión relativa en la cavidad es negativa, el chorro presentará oscilaciones.

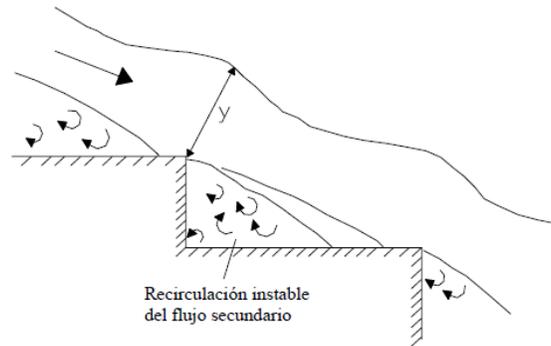
Si el chorro no cae por completo dentro del siguiente escalón, sino que cae alrededor del vértice del escalón se denomina flujo escalón a escalón parcial y el flujo será supercrítico en toda la estructura. Este tipo de flujo es más complejo por tratarse de un flujo tridimensional.

1.2.2. Flujo rasante

En el régimen de flujo de rasante, el agua fluye por la cara escalonada, rozando los peldaños y amortiguada por el fluido recirculante atrapado entre ellos (Rajaratnam, 1990). El flujo rasante está soportado por un pseudo fondo formado por los bordes externos de los escalones y los vórtices de recirculación del eje horizontal. La disipación de energía se produce por transferencia de momento, o la transmisión de la tensión de cizallamiento turbulenta, entre la corriente del flujo rasante y los vórtices (Chanson, 1994).

El flujo rasante se caracteriza por la sumersión completa de los pasos con el desarrollo de un flujo uniforme completamente aireado en la región aguas abajo. A lo largo de los pasos anteriores, existe una región de flujo no aireado dentro de la cual se desarrolla una capa límite turbulenta. El arrastre de aire en el flujo comienza donde la capa límite intersecta la superficie libre, conocida como el punto de inicio. Aguas abajo desde el punto de inicio, el flujo continúa aireando y varía gradualmente en profundidad. El flujo finalmente se vuelve completamente aireado, flujo uniforme en el que la profundidad del agua, la velocidad y la concentración del aire son constantes (Boes & Hager, 2003).

Ilustración 3. Flujo rasante con cavidad parcialmente ocupada por el flujo secundario



Dependiendo de la pendiente del aliviadero, ocurren distintos flujos secundarios, así el flujo rasante puede ser subdividido en flujo rasante con cavidad parcialmente ocupada por el flujo secundario (wake-step interference); flujo rasante con cavidad casi-totalmente ocupada por flujo secundario (wake-wake interference) y flujo rasante con una recirculación estable del flujo secundario (recirculating cavity flow). (Chanson, 1994)

En el flujo rasante con cavidad parcialmente ocupada por el flujo secundario, la cavidad donde recircula el fluido es delgada y alargada, tornándose imposible una recirculación estable. Los vórtices no ocupan la totalidad de la cavidad delimitada por los vértices de los escalones. La superficie libre exhibe un patrón ondulatorio.

El flujo rasante con cavidad parcialmente ocupada, ocurre para bajas pendientes ($\alpha < 12^\circ$ a 15°), este flujo se caracteriza por el impacto en el peldaño de la pseudo superficie que separa el flujo superior del flujo secundario, y fricción del flujo en la zona del peldaño aguas abajo del impacto. La recirculación inestable es tridimensional, y es controlada por el punto de impacto (Dolz, n.d.)

El flujo rasante ocurre si la altura de flujo es superior a la altura del escalón, sin embargo, esta condición no es única para que se presente el flujo bifásico. Cuando se produce el flujo rasante, cerca de la superficie libre del agua no se produce entrada de aire, sin embargo, en el fondo del canal se generan turbulencias en el flujo (vórtices). Cuando el borde de la capa límite turbulenta alcanza la superficie libre, se produce el arrastre de aire hacia la superficie libre. Ese arrastre de aire forma un flujo bifásico turbulento, que se ve representado por una concentración de aire en el agua. La concentración de aire en el agua se puede definir como el volumen de aire no disuelto contenido en un volumen de agua. (Pegram & Andrew, 1999)

En relación con el arrastre de aire, diferentes prototipos y observaciones de laboratorio destacaron la fuerte aireación de flujo en un aliviadero escalonado. La turbulencia que actúa junto a la superficie libre induce una auto-aireación sustancial. La aireación de flujo induce un aumento de flujo, por lo que requiere paredes laterales de canaleta más altas, mientras que evita el daño por cavitación. De este modo diferentes experimentos de laboratorio mostraron una ausencia de daño por cavitación, incluso para grandes descargas por unidad de ancho, que probablemente sea el resultado del arrastre de aire. (Wu, Zhang, & Ma, 2013)

Hay dos aspectos relacionados en estas investigaciones, uno está relacionado con el aliviadero suave, y el otro está relacionado con el escalonado. A principios de 1953, sobre la base de la suposición de que el arrastre de aire ocurre cuando la capa límite se desarrolla desde la parte inferior a la superficie de un flujo, Michaels y Lovely derivaron una expresión para el punto de inicio para el derrame suave utilizando el límite Teoría de la capa expresada como:

$$\frac{L}{d} = Kq^n \quad [10]$$

donde L es la distancia desde el punto de inicio hasta la parte superior del aliviadero, d es la profundidad del flujo en la ubicación del arrastre de aire, q es la descarga de la unidad y K y m son los coeficientes que se refieren a los materiales y geometría del aliviadero, respectivamente.

La teoría de la capa límite de placa se utiliza directamente para investigar la ubicación del punto de inicio del arrastre de aire sobre el aliviadero escalonado.

1.2.3. Flujo de transición

Entre el régimen del flujo saltante y el régimen rasante, se presenta un régimen intermedio, denominado régimen de flujo de transición (Ohtsu & Yasuda, 1997).

Chanson y Toombes, presentaron una caracterización del régimen de flujo de transición; en el cual determinaron que la aireación de superficie libre era muy intensa para todas las tasas de flujo de transición. Aguas abajo del punto de inicio de la aireación de la superficie libre, las concentraciones medidas en el aire oscilaron con un contenido máximo de aire promedio de hasta el 78% medido en el borde de un paso. Posteriormente se observaron redistribuciones importantes del contenido de aire y la velocidad entre los bordes de pasos sucesivos y adyacentes. (Chanson & Toombes, 2002)

En la mayoría de los bordes de escalón, las distribuciones de concentración de aire fueron ajustadas por

$$C = K''' \left[1 - \exp\left(-\lambda \frac{y}{Y_{90}}\right) \right] \quad [11]$$

Donde K''' y λ son funciones del contenido de aire medio solamente. La anterior ecuación se comporta favorablemente con la mayoría de datos, excepto por el primer paso hacia el final de la etapa inicial. Punto de aireación en superficie libre y para el chorro deflector. (Chanson & Toombes, 2002)

De este modo, el flujo de transición se caracteriza por un movimiento de flujo caótico asociado con salpicaduras intensas. El patrón de flujo de transición exhibe variaciones longitudinales significativas de las propiedades de flujo en cada paso y entre los pasos subsiguientes, e inestabilidades del flujo. (Chanson H., 2004).

1.2.4. Límite superior del flujo escalón a escalón e inicio del flujo rasante

Para que se presente el régimen de flujo rasante debe de existir un atrapamiento de aire a lo largo de una longitud en el canal. El inicio de aireación o atrapamiento del aire se ubica en la zona donde la capa límite turbulenta o capa viscosa, alcanza la superficie libre, atrapando una cantidad de aire disuelto.

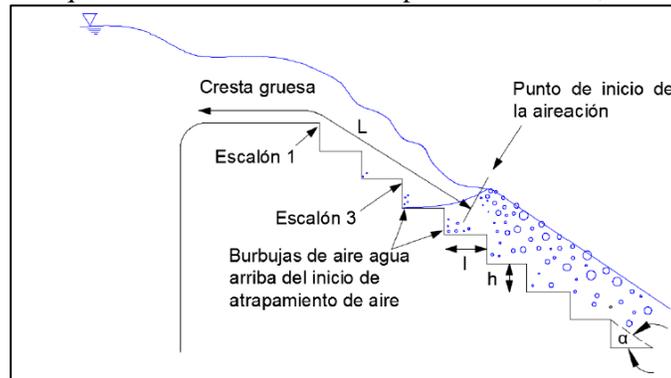
Por otra parte, en el comienzo de zona de inicio de la aireación, la turbulencia es tan alta que se rompe la tensión superficial y la fuerza de flotación de las burbujas, inyectando hacia aguas abajo el aire atrapado. Luego de atrapar dicho aire, el flujo tiende a uniformizarse manteniendo las condiciones hacia aguas abajo del canal, constantes o en equilibrio. (Gonzalez & Chanson, 2007)

La determinación del punto de atrapamiento de aire en canales escalonados, es un parámetro importante en el diseño de este tipo de canales, debido a que éste, está directamente relacionado con el fenómeno de

cavitación en canales, la disipación de la energía y determinación de las profundidades en los flujos. En la zona no aireada, el flujo se comporta, como un flujo gradualmente variado. (Wu, Zhang, & Ma, 2013)

La variable más importante en el inicio de la aireación en canales escalonados es el caudal, sin embargo, la pendiente, y la altura del escalón (macro-rugosidad) también tienen un peso importante (Cantillo, 2017).

Ilustración 4. Esquema zona de inicio del atrapamiento de aire, en flujos rasantes



Wood, et al. (1983) a partir de un análisis de regresión múltiple con valores obtenidos experimentalmente y teóricamente por Keller & Rastogi (1977) derivó una ecuación para el cálculo directo del punto de inicio de la aireación, en un canal de pendiente uniforme, considerando la expresión de capa límite viscosa.

$$\frac{l}{K_s} = 013.6 (\text{sen } \theta)^{0.0796} \quad [12]$$

Chanson & Toombes (2002) realizaron un análisis estadístico de varios experimentos sobre canales escalonados, encaminados a determinar el inicio de la aireación con relación al número de Froude rugoso y disipación de energía; las pendientes de los canales estaban comprendidas entre 16° y 53°. Los datos analizados fueron tomados de los trabajos realizados en modelos y prototipos de Haddad (1998), Sorensen (1985), Beitz & Lawless (1992), Bindo, et. al (1993), Frizell (1992), Essery & Horner (1978), Tozzi (1992), Chamani & Rajaratnam.

$$F^* = \frac{Q}{\sqrt{g \text{ sen } \theta (h \text{ cos } \theta)^3}} = \frac{v}{\sqrt{g \text{ sen } \alpha h \text{ cos } \theta}} \quad [13]$$

Basados en dichos análisis, Chanson & Toombes (2002) determinaron que para ángulos (α) entre 15.9° y 22°, y $F^* < 3.8$, la siguiente ecuación presenta una buena correlación entre los resultados de modelos y prototipos.

$$\frac{l}{h \cdot \text{cos } \alpha} = \frac{12.34}{(\text{sen } \theta)^{0.0796}} F^{*0.465} \quad [14]$$

Sin embargo, para canales escalonados con $F^* > 2$, la anterior ecuación no predice el comportamiento real, ya para este rango de valores, la ecuación presentada por Chanson (1995b) se ajusta de mejor manera. (Chanson & Toombes, 2002).

$$\frac{l}{h \cdot \cos\alpha} = \frac{19.72}{(\text{sen}\theta)^{0.0796}} F^{*0.713} \quad [15]$$

Chanson (2002) comparó la información obtenida en prototipos y encontró que la siguiente expresión:

$$\frac{l}{h \cdot \cos\alpha} = 9.719 (\text{sen } \alpha)^{0.0796} \times F^{*0.713} \quad [16]$$

$$\frac{d_i}{h \cdot \cos\alpha} = \frac{0.4034}{(\text{sen}\theta)^{0.04}} \times F^{*0.592} \quad [17]$$

Meireles, et al. (2012) propusieron las siguientes expresiones para determinar la longitud de inicio de aireación y la profundidad inicial (Meireles, Renna, Matos, & Bombardelli, 2012).

$$\frac{l}{K_s} = 6.75 F^{*0.76} \quad [18]$$

$$\frac{d_i}{K_s} = 0.35 F^{*0.59} \quad [19]$$

Ohtsu et al. (2004) determinó que el punto de inicio de aireación tiende a ser constante para determinados valores de ángulos (θ) si la altura relativa del escalón, h/y_c es mayor que 0.5 (Ohtsu, I; Yasuda, Y; Takahashi, 2004).

$$\text{Para } 5.7^\circ \leq \theta \leq 55^\circ \text{ y } 0.1 \leq \frac{h}{y_c} \leq (h/y_c)_s \quad [20]$$

$$\frac{H_e}{Y_c} = \frac{\left[5.7 + 6.7 \exp\left(-6.5 \frac{h}{Y_c}\right)\right]}{(-1.21 \times 10^{-5} \theta^3 + 1.60 \times 10^{-3} \theta^2 - 7.13 \times 10^{-2} \theta + 1.30)} \quad [21]$$

1.3. Estudios sobre modelos físicos y prototipos de estructuras escalonadas

Con el objetivo de cuantificar la energía disipada en una estructura escalonada y definir las características del flujo sobre los escalones, el profesor Robert M. Sorensen diseñó y construyó dos modelos a escala de un vertedero WES, uno estándar y otro con una variación, en la que la forma estándar del vertedero Ogge se formó con los bordes externos de los escalones de una estructura escalonada, la cual se construyó desde justo aguas abajo de la cresta hasta el pie del vertedero. Esta investigación concluyó que el vertedero escalonado es bastante efectivo en la disipación de energía y que la transición del flujo sobre la cresta lisa al flujo sobre la estructura escalonada es bastante suave. El autor sugirió continuar con la investigación para encontrar información adicional que permita optimizar la geometría de la estructura. (Robert & Sorensen , 1985)

Otras investigaciones sobre el tema han evaluado la incidencia de la forma de los escalones. El doctor Z. L. Bai junto con los profesores Y. Peng y J. M. Zhang desarrollaron su investigación sobre vertederos escalonados, dando a los escalones una configuración en forma de V. El modelo tenía un total de 56 escalones, de los cuales 28 hacían parte de la transición entre escalones rectos y escalones en V, concluyendo que el flujo es tridimensional, de acuerdo con el patrón de flujo. (Peng, Zhang, & Bai, 2017)

Stefan Felder y Hubert Chanson de la universidad de Queensland desarrollaron una investigación sobre vertederos escalonados en la que dieron una configuración no uniforme a la estructura, con diferentes alturas y tamaños de los escalones. Con base en sus resultados, en cuanto a disipación de energía, encontraron una mínima diferencia en la eficiencia de la estructura en comparación con estructuras de geometría uniforme. (Felder & Chanson, 2011).

1.4. Metodologías para el diseño de estructuras escalonadas

1.4.1. Metodología de Ohtsu et al. (2004)

Ohtsu et al. (2004) formuló una metodología para calcular las características del flujo rasante en canales escalonados con pendientes entre 5.7° y 55° , indiferente de la altura del escalón, esta metodología está enfocada en el diseño de canales escalonados para la disipación de energía en presas compactadas con rodillo (CCR).

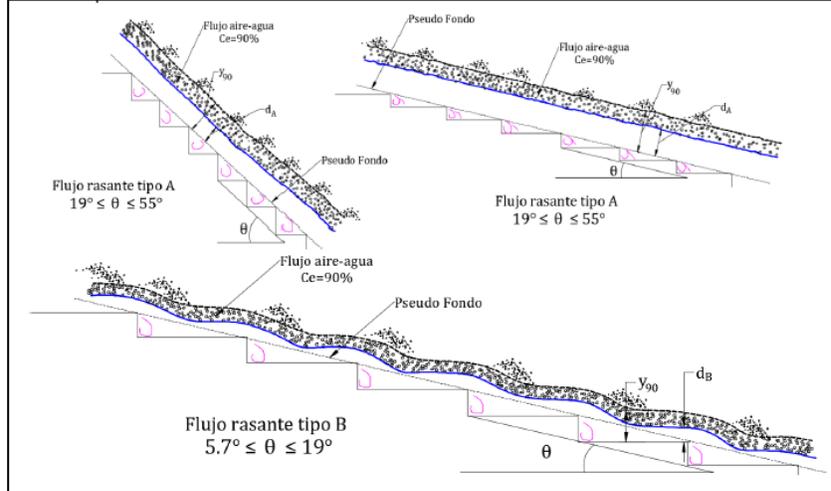
El diseño consiste entonces en determinar la velocidad, v_w y la profundidad del flujo, d_w en la estructura, la energía al final de la estructura, E_2 , y el incremento de la profundidad del flujo por efecto del aire ($y_{0.9}$) para determinar la altura de muros de la estructura, H_w .

Dados un ancho de canal, B , una caída total, H_{dam} , un ángulo del canal, θ y un caudal de diseño Q_w la profundidad crítica se calcula como

$$d_c = \left[\frac{(Q_w)^2}{g} \right]^{1/3} \quad [22]$$

Valor con el que la altura total relativa de caída es H_{dam}/d_c

Ilustración 5. Esquema de tipos de flujos rasantes. Ohtsu et al. (2004)



Posteriormente se selecciona la caída en cada escalón, S de manera que se forme una condición de flujo tipo rasante. Para ello debe cumplirse la siguiente condición

$$0.1 \leq \frac{S}{dc} \leq \left(\frac{S}{dc}\right) \quad [23]$$

$$\left(\frac{S}{dc}\right) = \frac{7}{6} (\tan\theta)^{1/6} \quad [24]$$

En las anteriores ecuaciones θ se encuentra en grados y se aplican para valores entre 5.7° y 55° . Los autores recomiendan valores de $\frac{S}{dc} \geq 0.25$ para incrementar las pérdidas de energía en la estructura.

De acuerdo a la experimentación realizada por Ohtsu, las condiciones de flujo cambian en función del ángulo θ y de la altura relativa del escalón $\frac{S}{dc} < (S/dc)_B$ o como tipo B en otro caso. La expresión para tal clasificación es:

$$(S/dc)_B = 13 (\tan\theta)^2 - 2.73 \tan\theta + 0.373 \quad \text{para } 5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ \quad [25]$$

Para el flujo tipo A, la lámina de agua es paralela al seudo-fondo formado por las esquinas exteriores de los escalones, mientras que para el flujo tipo B la lámina de agua fluye parcialmente paralela a la huella del escalón.

El flujo rasante es altamente turbulento, generándose la entrada de grandes cantidades de aire a lo largo del canal desde un punto de “inceptión” hasta un cierto punto en el cual el flujo llega a ser cuasi-uniforme, sección a partir de la cual no se producen variaciones en la profundidad, concentración de aire y velocidad para un caudal dado. La altura necesaria del canal para que se alcance el flujo cuasi-uniforme, H_e esta dada por la siguiente expresión:

$$\frac{H_e}{dc} = (-1.21 \times 10^{-5} + 1.60 \times 10^{-3} \theta^2 - 7.13 \times 10^{-2} \theta + 1.30)^{-1} \left\{ 5.7 + 6.7 \exp(-6.5 \frac{S}{dc}) \right\} \quad [26]$$

Si el flujo alcanza la condición cuasi-uniforme, la altura representativa del flujo d_w y la velocidad promedio, $\left(v_w = \left(\frac{Q_w}{B}\right) = \frac{q_w}{d_w}\right)$ pueden ser predichas a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dw}{dc} = \left(\frac{f}{8\text{sen}\theta}\right)^{\frac{1}{3}} \quad [27]$$

en que el factor de fricción f del flujo es:

$$f = fmax - A \left(0.5 - \frac{S}{dc}\right)^2 \quad \text{para } 0.1 \leq \frac{S}{dc} \leq 0.5 \quad [28]$$

$$f = fmax \quad \text{para } 0.5 \leq \frac{S}{dc} \leq (S/dc)_s \quad [29]$$

Siendo para $5.7^\circ \leq \theta \leq 19^\circ$

$$A = -1.7 \times 10^{-3}\theta^2 + 6.4 \times 10^{-2}\theta - 1.5 \times 10^{-1} \quad [30]$$

$$fmax = -4.2 \times 10^{-4}\theta^2 + 1.6 \times 10^{-2}\theta + 3.2 \times 10^{-2} \quad [31]$$

Y para $19^\circ < \theta \leq 55^\circ$

$$A = 0.452$$

$$fmax = 2.32 \times 10^{-5}\theta^2 - 2.75 \times 10^{-3}\theta + 2.31 \times 10^{-1} \quad [32]$$

Para el flujo cuasi- uniforme, la energía residual, $Eres$, en el extremo inferior de la estructura se determina con la primera parte de las siguientes expresiones:

Para flujo tipo A:

$$\left(\frac{Eres}{dc}\right)_u = \frac{dw}{dc} \cos\theta + \frac{1}{2} \left(\frac{dc}{dw}\right)^2 = \left(\frac{f}{8\text{sen}\theta}\right)^{\frac{1}{3}} \cos\theta + \frac{1}{2} \left(\frac{f}{8\text{sen}\theta}\right)^{-2/3} \quad [33]$$

Para flujo tipo B:

$$\left(\frac{Eres}{dc}\right)_u = \frac{dw}{dc} + \frac{1}{2}\left(\frac{dc}{dw}\right)^2 = \left(\frac{f}{8 \operatorname{sen}\theta}\right)^{1/3} + \frac{1}{2}\left(\frac{f}{8 \operatorname{sen}\theta}\right)^{-2/3} \quad [34]$$

Finalmente, para el flujo cuasi-uniforme la altura de los muros del canal, H_w esta dada por:

$$H_w = 1.4 y_{0.9} \quad [35]$$

Siendo $y_{0.9}$ la profundidad de flujo para una concentración de aire de 0.9. Este valor de $y_{0.9}$ se calcula como:

$$y_{0.9} = \frac{dw}{1 - Cmean} \quad [36]$$

$$Cmean = D - 0.30 \exp\left\{+5\left(\frac{S}{dc}\right)^2 - 4\frac{S}{dc}\right\} \quad [37]$$

$D = 0.300$ para $5.7^\circ \leq \theta, = 19^\circ$

$$D = -20 \times 10^{-4} \theta^2 - 3.57 \times 10^{-2} \quad \text{para } 19^\circ \leq \theta = 55^\circ \quad [38]$$

La variable $Cmean$ es la concentración media de aire.

En las estructuras en que no se alcanza a desarrollar el flujo cuasi –uniforme la energía residual, $Eres$ se calcula como:

$$\frac{Eres}{dc} = 1.5 + \left[\left(\frac{Eres}{dc}\right)_u - 1.5\right] \left(1 - \left(1 - \frac{Hdam}{He}\right)^{\frac{-\theta}{25+4}}\right) \quad [39]$$

La anterior ecuación es válida para $5.0 \leq \frac{Hdam}{dc} \leq \frac{He}{dc}$

Se calcula entonces para este flujo no uniforme la altura representativa del flujo, dw y la velocidad promedio, v_w por tanteos a partir de la siguiente ecuación:

$$Eres = dw \cos \theta + \frac{v_w^2}{2g} \quad \text{para flujo tipo A} \quad [40]$$

$$Eres = dw + \frac{v_w^2}{2g} \quad [41]$$

La experimentación llevada a cabo por Ohtsu et. Al. Se realizó con un modelo en el que la cresta del canal corresponde a la de un vertedero tipo WES, por lo que se considera necesaria la construcción de este mismo tipo de cresta en la estructura, empleando la siguiente ecuación para el perfil:

$$x^{1.85} = 2Hd^{0.85}y \quad [42]$$

Tomándose $Hd = dc$ y siendo "x" y "y" las coordenadas de la cresta

Para finalizar la descripción del funcionamiento hidráulico de la estructura se definen las características del resalto hidráulico que se produce en el extremo inferior de las escaleras definiendo la altura conjugada $Y2$ y la longitud de desarrollo del resalto, con las siguientes expresiones:

$$Y2 = \frac{Y1}{2} \left[-1 + \left(1 + 8 \frac{q^2}{gY1^3} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad [43]$$

$$\frac{L}{Y1} = 220 \tanh - \frac{F1 - 1}{22} \quad [44]$$

Siendo $Y1$ y $F1$, la altura y número de *Froude* en el inicio del resalto y g la aceleración de la gravedad.

Con las variables de funcionamiento hidráulico de la estructura de escalones, se revisa que las velocidades en el canal sean inferiores a las máximas permitidas en función del revestimiento seleccionado, que la altura de muros no sea desbordada por el flujo y la geometría y condiciones del canal de salida al final de la estructura.

1.4.2. Método de Chanson:

A grandes descargas, el agua fluye por un aliviadero escalonado como un flujo coherente que recorre el pseudo-fondo formado por los bordes del escalón. En las cavidades escalonadas, se desarrollan vórtices de recirculación y el movimiento de recirculación se mantiene a través de la transmisión de la tensión de corte desde el flujo principal. La mayor parte de la energía cinética turbulenta se disipa para mantener la circulación de la cavidad.

En el extremo aguas arriba de la rampa, la superficie libre del flujo de deslizamiento es suave y no se produce arrastre de aire. Una vez que el borde exterior de la capa límite en desarrollo interactúa con la superficie libre, el flujo se caracteriza por un fuerte arrastre de aire. Para un aliviadero escalonado no controlado, la ubicación del punto de inicio de la aireación de superficie libre puede derivarse de una expresión semianalítica del desarrollo de la capa límite turbulenta (Chanson 1994b, 1995):

$$\frac{L_l}{h \times \cos\theta} = 9.719 \times (\sin\theta)^{0.0796} \times F^{0.713} \quad [45]$$

Donde L_l es la distancia en sentido de las agujas de la cresta, el subíndice *uc* se refiere a un incontrolado cresta, θ es el ángulo entre la pendiente del canal ($\tan\theta = h / l$) y horizontal, y F^* es un número de *Froude* definido en términos de la altura de la rugosidad del paso:

$$F = \frac{q_w}{\sqrt{g \times \sin\theta \times (h \times \cos\theta)^3}} \quad [46]$$

Un razonamiento similar da una expresión de la profundidad del flujo al inicio

$$\frac{(d_l)_{uc}}{h \times \cos\theta} = 0.4034 \times \frac{F^{0.592}}{(\sin\theta)^{0.04}} \quad [47]$$

Para un aliviadero cerrado o una ingesta presurizada, las condiciones de flujo iniciales del desarrollo de la capa límite difieren, y los cálculos analíticos implican (Chanson 2006):

$$\left(\frac{(d_l)_{uc}}{h \times \cos\theta} \right)^{1.57} \times \frac{1}{1 + \frac{F^{2/3}}{(L_l)_{pi} \times \frac{(\sin\theta)^{1/3}}{h \times \cos\theta}} \times Fr_1^{-2/3} + 1/2 \times Fr_1} \quad [48]$$

donde el subíndice pi se refiere a las condiciones de admisión presurizadas y Fr_1 es el número de Froude del flujo de admisión. Las consideraciones básicas muestran que la ubicación del punto de inicio de la aireación de superficie libre se ubica aguas arriba en una rampa controlada o con una admisión presurizada, para un caudal, una pendiente y una altura de paso idénticos.

Energía de disipación

En el régimen de flujo de rasante generalmente considerado para el diseño de un aliviadero escalonado, se observa una fuerte transferencia de momento que consume energía entre el flujo de la cavidad del escalón y el flujo rasante. El cabezal de energía residual H_{res} está directamente relacionado con el factor de fricción f por

$$\frac{H_{res}}{H_{max}} = \frac{((f/(8 \times \sin\theta))^{1/3} + \alpha/2 \times (f/(8 \times \sin\theta))^{2/3})}{\frac{3}{2} + \frac{H_{dam}}{d_c}} \quad [49]$$

donde $H_{max} = H_{dam} + 3/2 \times d_c$ es la cabeza de energía máxima sobre el pie del canal, θ es el ángulo del canal y α es el factor de corrección de energía cinética teniendo en cuenta la distribución de la velocidad perpendicular al pseudo-fondo. Debido a la fuerte turbulencia, se encontró que α era aproximadamente 1.1 (Matos 2000, Boes y Hager 2003b). Cabe señalar que la ecuación anterior supone que se logrará un flujo de equilibrio casi uniforme (Chanson 1994c). Para diques más bajos, la energía residual debe calcularse basándose en la pendiente de fricción S_f

Los ingenieros de diseño deben ser conscientes de que la disipación total de energía nunca se puede lograr. Se pueden considerar varios diseños de disipadores de energía corriente abajo.

Comúnmente, se diseñan cuencas fijas desarrolladas para conductos de inversión suaves (Peterka 1958). Pero solo unos pocos estudios probaron su comportamiento hidráulico en combinación con vertederos escalonados (por ejemplo, Cardoso et al. 2007, Bung et al. 2012).

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Con base en los conceptos teóricos y los análisis experimentales desarrollados se plantea la siguiente metodología experimental, con el propósito de conocer el comportamiento del flujo en estructuras escalonadas, considerando variables como la sección transversal y la pendiente de la estructura, y de formular una metodología para su dimensionamiento.

- a. **DEFINIR LA ESTRUCTURA ESCALONADA A MODELAR.** Se analizan diferentes dimensiones de estructuras escalonadas para seleccionar las que mejor se adapten a las condiciones experimentales del laboratorio de hidráulica de la ECI.
- b. **SELECCIONAR UNA ESCALA ADECUADA PARA EL MODELO.** La escala será importante en tanto se quiera hacer la modelación de una estructura construida. El criterio de similitud dinámica y geométrica del modelo-prototipo a utilizar sería el número de Froude, por el dominio de las fuerzas gravitacionales.
- c. **REALIZAR UN MODELO DIGITAL 3D DE LA ESTRUCTURA.** Este se utilizará para realizar el despiece de la estructura, necesario para su construcción.
- d. **DEFINICIÓN DEL MONTAJE DEL MODELO.** EL montaje consiste en un sistema de recirculación con un tanque de agua superior, un tramo liso (sin escalones), la estructura escalonada, otro tramo liso horizontal, un vertedero para la medición del caudal, un depósito inferior y un sistema de bombeo.
- e. **CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE.** La estructura escalonada se construirá en acrílico principalmente. Se utilizarán otros materiales como arena y gravas finas para modificar la rugosidad de la estructura. Los materiales y dimensiones se definirán de acuerdo con la capacidad del laboratorio.
- f. **MEDICIONES.** Se realizarán mediciones de:
 - Caudal, utilizando un vertedero calibrado
 - presiones en diferentes puntos, utilizando un tablero piezométrico
- g. **ANÁLISIS DE LAS MEDICIONES.** Se analizarán los datos de las mediciones con base en los análisis teóricos realizados.
- h. **PROPUESTA DE EXPRESIONES GENERALES PARA EL DISEÑO.** Como resultados del trabajo se propondrán ecuaciones generales que permitan dimensionar estructuras escalonadas.

3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS MODELOS FÍSICOS

Para el dimensionamiento de los modelos físicos se tuvo en cuenta las recomendaciones hechas por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos para la modelación física de estructuras escalonadas, la capacidad del laboratorio de hidráulica de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y las metodologías de dimensionamiento reportadas por la literatura; también se realizó una exhaustiva revisión de los criterios utilizados en investigaciones similares. Se construyeron tres estructuras escalonadas de sección transversal rectangular de 25 cm de ancho, las tres tienen una caída total de 1,0 m con altura de las contrahuellas de 5cm, es decir, un total de 20 escalones. La diferencia entre las tres estructuras es la longitud de cada escalón: la primera estructura tiene escalones con longitud de 5 cm ($L/h = 1/1$), la segunda de 15 cm ($L/h = 3/1$) y la tercera de 25 cm ($L/h = 5/1$), para longitudes totales horizontales de 1 m, 3 m y 5 m, respectivamente. Todos los escalones son horizontales. El material de los modelos es acrílico, cuya rugosidad es representativa de una estructura de concreto, considerando el modelo físico a una escala 1:12,5.

3.1.1. Análisis dimensional modelo - prototipo

Para encontrar la relación entre los parámetros de flujo modelo - prototipo, se realiza un análisis dimensional en el que se establece como parámetro de semejanza el número de Froude, N_F , el cual, para una determinada condición de caudal y profundidad de flujo, debe ser el mismo tanto en el modelo como en el prototipo, es decir:

$$N_{FM} = N_{FP} \quad [50]$$

De acuerdo con la definición del número de Froude:

$$N_F = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad [51]$$

Donde,

N_F es el número de Froude

V es la velocidad de flujo (m/s)

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

D es la profundidad hidráulica (m)

Escribiendo la ecuación (1) como:

$$\frac{V_M}{D_M^{1/2}} = \frac{V_P}{D_P^{1/2}} \quad [52]$$

Se obtienen las relaciones de:

– Caudal:

$$Q_M = Q_P \frac{L_M H_M^{3/2}}{L_P H_P^{3/2}}$$
$$Q_M = Q_P * \left(\frac{1}{ESC} \right)^{5/2} \quad [53]$$

– Carga hidráulica:

$$H_M = H_P \left(\frac{Q_M L_P}{Q_P L_M} \right)^{2/3}$$

$$\mathbf{H_M = H_P * Esc} \quad [54]$$

– Velocidad:

$$V_M = V_P \frac{L_M H_M^{3/2} A_P}{L_P H_P^{3/2} A_M}$$

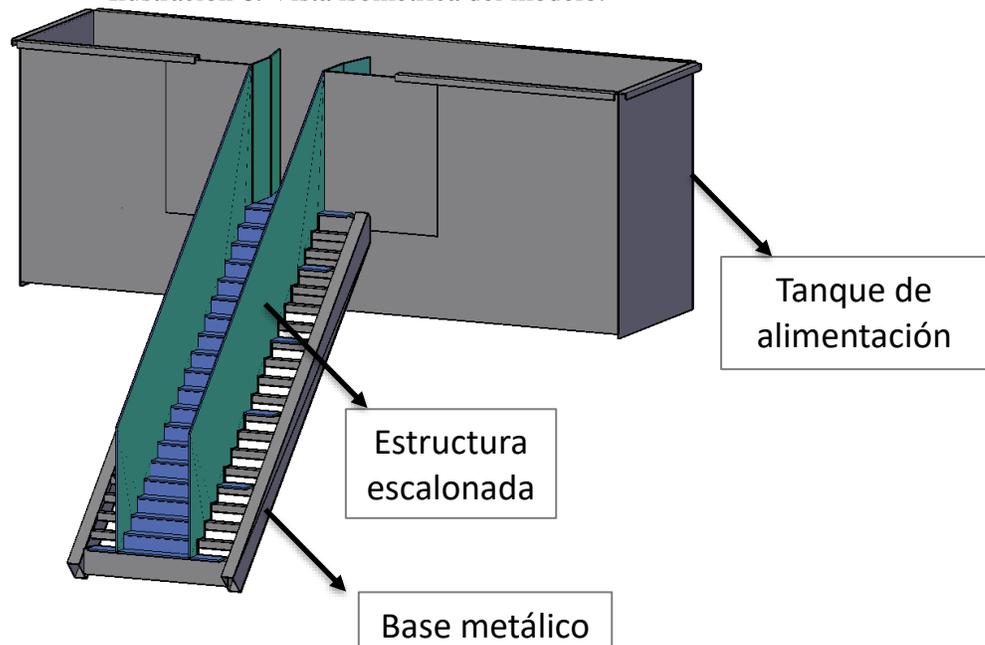
$$\mathbf{V_M = V_P * \left(\frac{1}{Esc} \right)^{1/2}} \quad [55]$$

4. MONTAJE EXPERIMENTAL

4.1.1. Modelo CAD 3D de la estructura a construir

Las tres estructuras se construirán de manera modular, utilizando acrílico como material para los escalones del fondo y para los muros. El modelo se soportará en una estructura metálica horizontal con superficie en lámina de alfajor, sobre la que se instalará otra base metálica para dar la pendiente a la estructura y para dar soporte a cada uno de los escalones. Lateralmente las paredes de la estructura se arriostrarán, utilizando láminas de acrílico colocadas sobre una extensión del escalón por fuera de la estructura de modo perpendicular a los muros. En la Ilustración 6 se presenta una vista isométrica del modelo a construir

Ilustración 6. Vista isométrica del modelo.



4.1.2. Definición del montaje

Para la alimentación del modelo se utilizará el sistema de recirculación de agua del laboratorio, que consiste en un tanque alto de nivel constante, un tanque bajo y un sistema de bombeo. La alimentación del modelo se realizará únicamente por gravedad desde el tanque alto, al cual se debe impulsar el mismo caudal requerido por el modelo, desde el tanque bajo.

El modelo se alimentará por medio de un sistema a presión. Para regular el caudal que entra al modelo, se dispone de una válvula de compuerta y de una tubería de disipación para garantizar una lámina de agua tranquila en el tanque de entrada al modelo.

Finalmente, la descarga del modelo es dirigida hacia el tanque bajo del sistema, por medio de un tanque de derivación lateral, que permite continuar con la recirculación. En la Ilustración 7 se muestra el sistema de alimentación del montaje y la válvula de regulación del caudal.

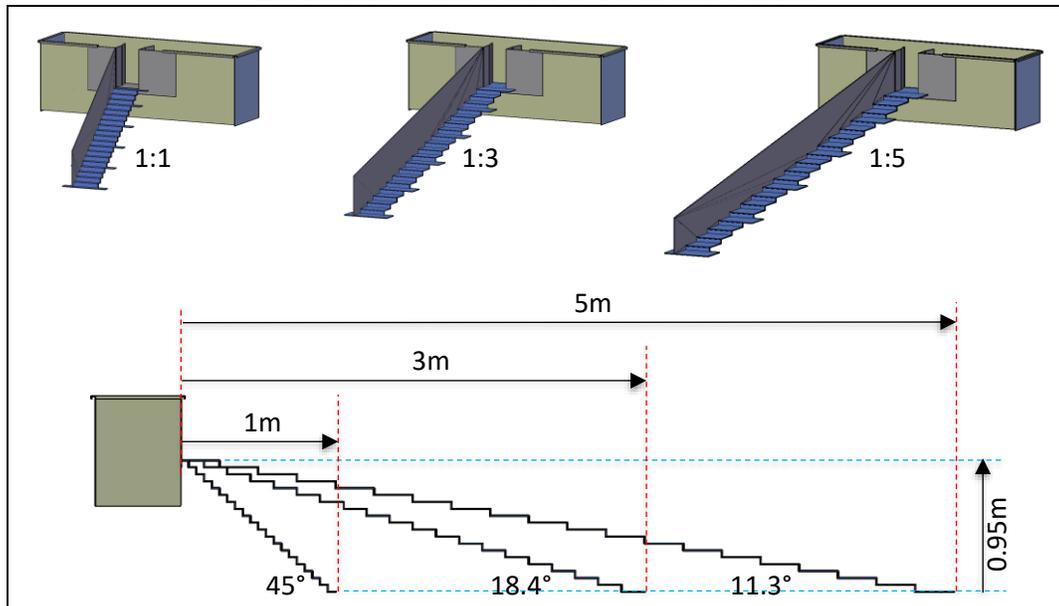
Ilustración 7. Sistema de alimentación. Válvula de regulación del caudal.



4.1.3. Construcción del modelo

A renglón seguido se presenta el isométrico y una vista lateral de las tres estructuras, donde se muestra el desarrollo de cada una. Puede evidenciarse que cada estructura tiene 20 escalones, que la altura de las contrahuellas de todos los escalones para las tres estructuras es de 5 cm y que la longitud de los escalones es de 5 cm (1:1), 15 cm (1:3) y 25 cm (1:5), generando pendientes de 45° , 18.4° y 11.3° , respectivamente. Se cubren ampliamente el rango de pendientes con que estas que estas estructuras se construyen en la práctica.

Ilustración 8. Vista lateral de los modelos físicos



En la Ilustración 9, la Ilustración 10 y la Ilustración 11 se presenta un registro fotográfico de los modelos construidos con relaciones h:L con valores 1:1, 1:3 y 1:5, respectivamente.

Ilustración 9. Fotografías del modelo físico con relación $h:L = 1:1$



Ilustración 10. Fotografías del modelo físico con relación $h:L = 1:3$

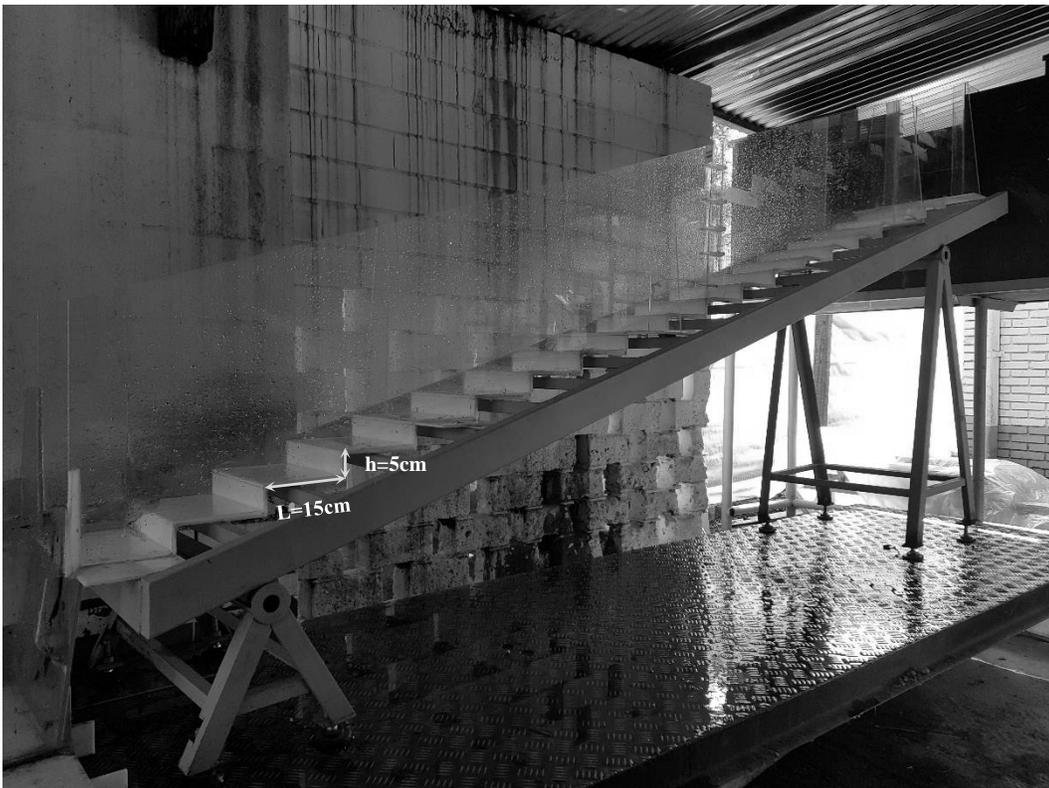


Ilustración 11. Fotografías del modelo físico con relación $h:L = 1:5$



4.1.4. Equipos e instrumentos de medición

4.1.4.1. Lecturas de profundidad de flujo

Para realizar las mediciones de profundidades de flujo en el modelo se utilizó una cuadrícula milimetrada pegada sobre las paredes de la estructura en cada escalón, de manera que por comparación directa se determinó la posición de la superficie del agua. La precisión de medida es de 1mm. En la Ilustración 12 se presenta una fotografía de la cuadrícula de medición para la estructura 5/1.

Ilustración 12. Instrumentos para la medición de las profundidades de flujo



4.1.4.2. Medición del caudal

Para la medición del caudal se instaló un medidor ultrasónico de flujo en la parte exterior de la tubería de alimentación del modelo. La precisión de medida es de 0.001 lps y funciona a partir de pulsos de ultrasonido que son distorsionados dependiendo de la velocidad del flujo en la tubería. Este instrumento fue calibrado para las características geométricas y el material de la tubería.

Ilustración 13. Instrumentos para la medición de las profundidades de flujo



5. CARACTERIZACIÓN CUALITATIVA DEL FLUJO

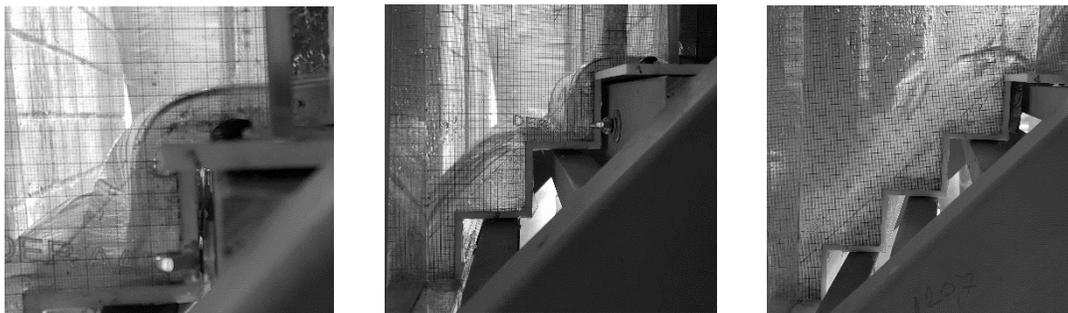
En este apartado se estudia el comportamiento del perfil de flujo para diferentes caudales en las diferentes estructuras y así validar las descripciones de los flujos escalón a escalón, rasante y de transición, reportadas en la literatura. El rango de caudales medidos para cada estructura fue desde los 0.5 lps hasta los 40 lps. El procedimiento propuesto es el siguiente:

1. Hacer circular un caudal pequeño (0.5 – 1 lps) por la estructura.
2. Mediante observación, describir el perfil de flujo desarrollado, observando el comportamiento de la superficie del agua, la presencia de cámaras de aire, el alcance del chorro y la presencia de zonas de flujo muerto. Registro fotográfico y de video.
3. Aumentar paulatinamente el caudal y observar los cambios en el comportamiento del flujo, hasta alcanzar el caudal máximo posible.

5.1. Flujo escalón a escalón

Este tipo de flujo se presenta para caudales relativamente pequeños y se caracteriza por la presencia de chorros con caída libre que impactan *escalón a escalón*. En el primer escalón se presenta un perfil de flujo gradualmente variado, H2. Debido a la caída hasta el siguiente escalón, el flujo se acelera, cambia de estado subcrítico a supercrítico y se desarrolla un perfil de flujo H3, en la medida que longitud de la huella del escalón lo permite. Otra característica de este tipo de flujo es la presencia de una cavidad de aire debajo de la vena líquida de descarga. Cuando la pendiente de la estructura es alta (estructura 1:1), el alcance del chorro es mayor que la longitud de la huella y el chorro puede saltar por encima de uno o varios escalones, sin tocarlos, lo que aumenta su altura de caída y le permitiría disipar más energía. En el caso de las estructuras 1:3 y 1:5, el flujo escalón a escalón golpea en todos los escalones. En la Ilustración 14 se presenta el perfil de flujo desarrollado sobre la estructura 1:1 para un caudal de 0.94 lps, en este caso, el perfil de flujo no toca todos los escalones, debido a que la trayectoria del flujo es parabólica. En la Ilustración 15 y en la Ilustración 16 se presentan los perfiles de flujo desarrollados en las estructuras 1:3 y 1:5, respectivamente. Puede verse que, por el aumento de la longitud de los escalones, el chorro de descarga golpea todos los escalones.

Ilustración 14. Perfil de flujo estructura 1:1. $Q = 0.94$ lps



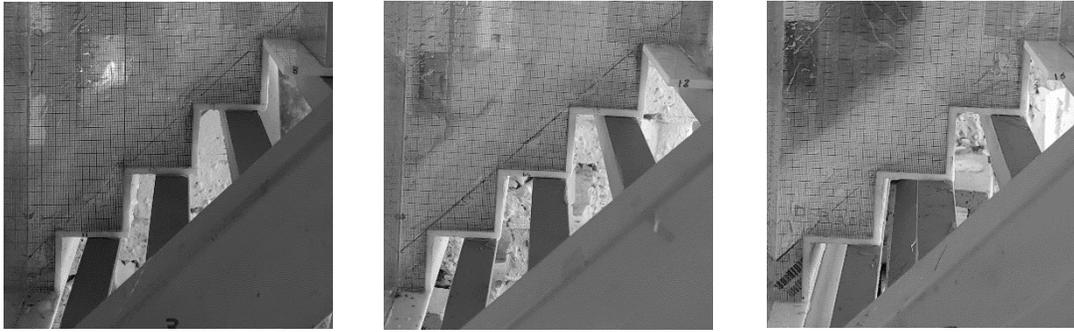
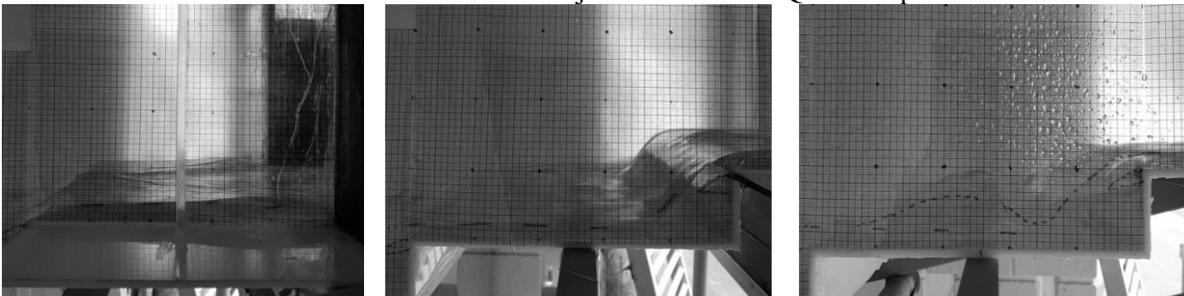
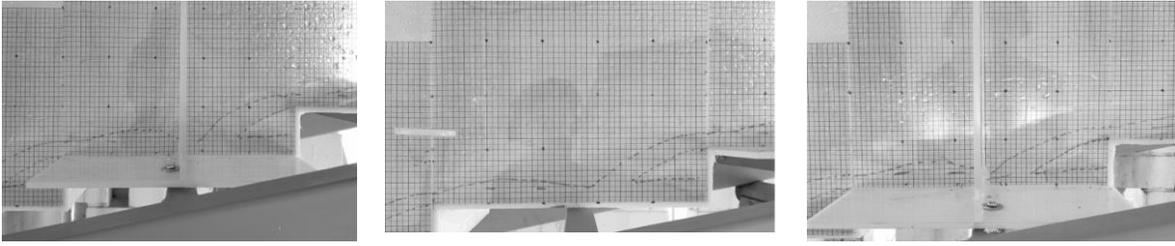


Ilustración 15. Perfil de flujo estructura 1:3. $Q = 0.94$ lps



Ilustración 16. Perfil de flujo estructura 1:5. $Q = 2.70$ lps



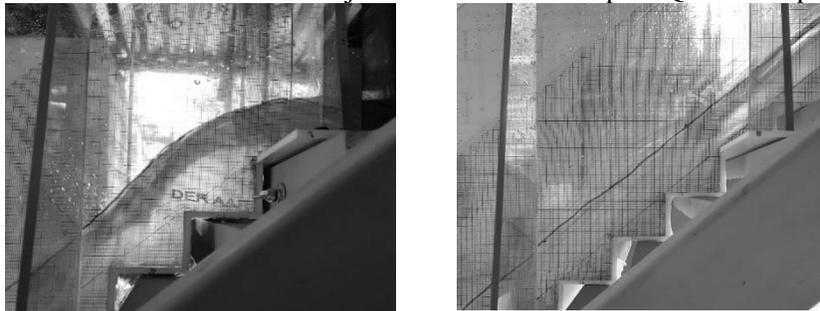


5.2. Flujo rasante

Este tipo de flujo se presenta cuando el caudal es relativamente grande y se caracteriza por la presencia de altas velocidades de flujo. Estas velocidades hacen que el flujo pierda la condición de caída escalón a escalón y en cambio, el flujo presenta una trayectoria aproximadamente recta sobre la línea imaginaria que une los vértices de los escalones, conformando un fondo falso (pseudo-fondo). Por debajo del pseudo-fondo se presenta un flujo circulatorio completamente sumergido, es decir, que ha desaparecido la cavidad de aire. El perfil de flujo en la estructura tiene un comportamiento similar al del flujo gradualmente variado, al inicio se presenta la curvatura típica de una estructura de rebose y la profundidad crítica, a medida que el perfil avanza en la dirección del flujo, éste se acelera hasta alcanzar una condición de flujo uniforme. En la estructura de mayor pendiente (1:1) se consigue rápidamente la condición de flujo uniforme, pero a medida que la pendiente disminuye, mayor es el número de escalones y el caudal requeridos para alcanzar la condición de flujo uniforme. Otra característica de este flujo es que en la superficie del agua se presenta un esponjamiento, algunas partículas de la superficie presentan saltación, debido al atrapamiento de aire.

En la Ilustración 17 se presenta el perfil de flujo desarrollado en la estructura 1:1 para un caudal de 14.70 lps. Se puede observar que el flujo alcanza rápidamente la condición uniforme, aproximadamente a partir del cuarto escalón.

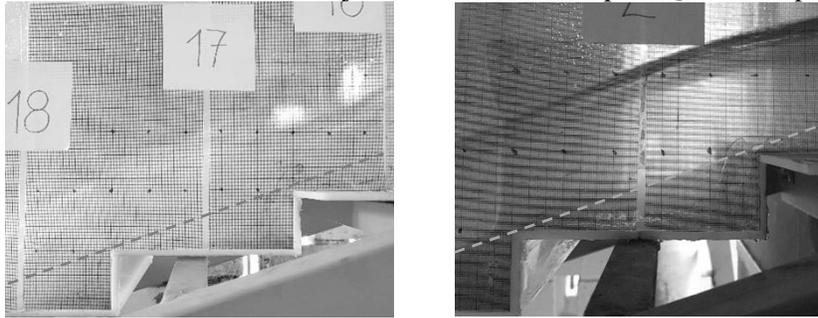
Ilustración 17. Perfil de flujo en la estructura 1:1 para $Q = 14.70$ lps



El pseudo fondo, definido como la línea que une los vértices de los escalones, determina la zona de flujo muerto. En el caso de la estructura con pendiente 1:1 (45°) el pseudo fondo es una línea recta y por tanto la superficie del perfil de flujo se ve paralela a esta recta, sin embargo, a medida que aumenta la longitud del escalón y disminuye la pendiente, el pseudo fondo deja de ser una línea recta y empieza a curvarse, con concavidad hacia arriba. Como consecuencia de lo anterior en flujo rasante en estructuras de pendiente pequeña no tiene una superficie recta sino curva u ondulada. Para caudales bastante grandes, se puede conseguir que el pseudo-fondo y la superficie del agua sean nuevamente rectas.

En la Ilustración 18 se presenta el perfil de flujo desarrollado en la estructura 1:3 (18.4°) para un caudal de 29.30 lps. Puede verse que se mantiene el comportamiento del flujo de la estructura 1:1 y que el pseudo fondo y la superficie son rectos, por la magnitud del caudal.

Ilustración 18. Perfil de flujo en la estructura 1:3 para $Q = 29.30$ lps



En la figura 8 se presenta el perfil de flujo desarrollado en la estructura 1:5 para un caudal de 30.0 lps, muy cercano al de la fotografía anterior, en el que puede verse que la superficie del flujo ya no es recta.

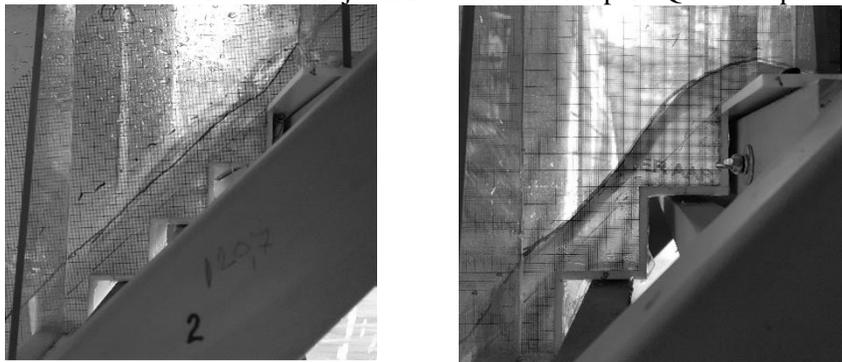
Ilustración 19. Perfil de flujo en la estructura 1:5 para $Q = 30.0$ lps



5.3. Flujo de transición

Este tipo de flujo representa la transición entre el flujo escalón a escalón y el flujo rasante y por ende se presenta para caudales intermedios y combina el comportamiento de ambos tipos de flujo. De igual manera que en el flujo rasante, las altas velocidades de flujo no permiten que se presente la condición de caída escalón a escalón y en cambio se presenta una trayectoria aproximadamente recta sobre el pseudo-fondo, cuando la longitud del escalón es relativamente corta, Ver Ilustración 20. Por otra parte, comparte con el flujo escalón a escalón la presencia de la cavidad de aire debajo del pseudo-fondo, es decir que todavía no se presenta el flujo circulatorio.

Ilustración 20. Perfil de flujo en la estructura 1:1 para $Q = 3.23$ lps



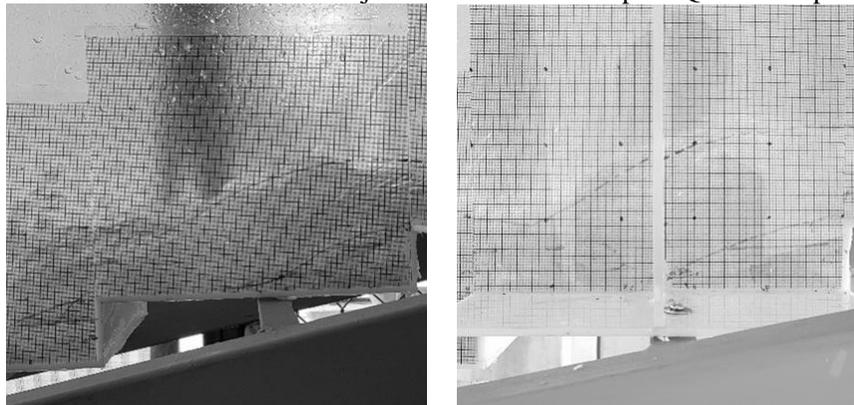
Cuando la longitud del escalón es mayor (estructura 1:3), tal como en el flujo rasante, la superficie libre no sigue la línea recta paralela al pseudo-fondo, sino que se curva un poco, como se muestra en la figura 11, que corresponde al perfil de flujo de la estructura 1:3 para un caudal de 9.62 lps.

Ilustración 21. Perfil de flujo en la estructura 1:3 para $Q = 9.62$ lps



En el caso de la estructura 1:5 (11.3°), para ningún caudal se consiguió que la superficie del agua fuera paralela al pseudo-fondo recto y que al mismo tiempo se presentara la cavidad de aire por debajo del chorro principal, debido a que la longitud del escalón es bastante grande. En la Ilustración 22 se presenta el perfil de flujo en la estructura 5 para un caudal de 12.02 lps, para el que la superficie no sigue la trayectoria de los vértices de los escalones. Para esta estructura, al aumentar el caudal hasta que la superficie sea recta y paralela al pseudo fondo, se genera la sumergencia del flujo y desaparece la cavidad de aire, lo que resulta en un flujo rasante. Por lo anterior se puede concluir que en estructuras con pendientes muy pequeñas (menores a 11.3°) no se puede conseguir un flujo de transición con la superficie paralela al pseudo-fondo recto.

Ilustración 22. Perfil de flujo en la estructura 1:5 para $Q = 12.02$ lps



6. CARACTERIZACIÓN CUANTITATIVA DEL FLUJO

Una vez caracterizados los flujos escalón a escalón, rasante y de transición, se encontrarán los límites de caudal para los que el flujo cambia su comportamiento de uno a otro, para esto se propone el siguiente procedimiento:

1. Iniciando con un caudal muy pequeño, para el que se tenga un flujo tipo escalón a escalón, abrirla paulatinamente la válvula hasta identificar el caudal máximo para el cual el flujo mantiene su condición escalón a escalón; una vez alcanzada esta condición abrir toda la válvula.
2. Iniciando con el caudal máximo posible, de modo que el flujo en la estructura sea rasante, cerrar paulatinamente la válvula hasta conseguir el caudal mínimo para el cual el flujo mantiene su condición de flujo rasante.
3. Repetir los pasos 1 y 2 diez veces.
4. Mediante un tratamiento estadístico de datos, determinar el límite del flujo escalón a escalón y el límite del flujo rasante, a partir de los 10 límites para cada tipo de flujo obtenidos en los numerales 1, 2 y 3.

6.1. Límites entre los tipos de flujo

Predecir el comportamiento del flujo en la estructura, con base en la caracterización del capítulo anterior, resulta importante a la hora de elegir la metodología para dimensionar la estructura. En este apartado se quiere establecer, conocida la geometría de la estructura (ancho **b**, altura **h** y longitud **l** de los escalones) y el caudal, qué tipo de perfil de flujo se tendrá en la estructura.

Como se mencionó, el procedimiento consistió en realizar varias maniobras de apertura y cierre de la válvula y mediante observación, identificar para que valor del caudal el flujo presenta el cambio de la condición de escalón a escalón a transición y de esta última a flujo rasante. En la Tabla 4 se presentan los caudales límites encontrados para las tres estructuras.

Tabla 4. Caudales límites entre los tipos de flujo, en lps

h/l	flujo de escalón flujo de transición	flujo de transición flujo rasante
1:1	2.00	6.00
1:3	5.91	10.15
1:5	6.45	14.45

Para expresar los valores encontrados de caudal límite de manera general, válidos para cualquier estructura, se utilizar la siguiente expresión adimensional:

$$\frac{y_c}{h} = \frac{1}{h} \sqrt[3]{\frac{q^2}{g/\alpha}} \quad [56]$$

Que tiene en cuenta el caudal, la altura del escalón y el ancho de la estructura. En la Tabla 5 se presenta el valor de caudal adimensional calculado, y_c/h .

Tabla 5. Caudales límites adimensionales entre los tipos de flujo

h/l	flujo de escalón flujo de transición	flujo de transición flujo rasante
1:1	0.37	0.78
1:3	0.77	1.10
1:5	0.82	1.40

Por último, para considerar la longitud del escalón, que define la pendiente de la estructura, en la Ilustración 23 se propone un gráfico que relaciona el caudal adimensional obtenido con la pendiente de la estructura, permitiendo identificar tres zonas de flujo. Como resultado se plantean las siguientes expresiones para el cálculo de los límites entre los tres tipos de flujo.

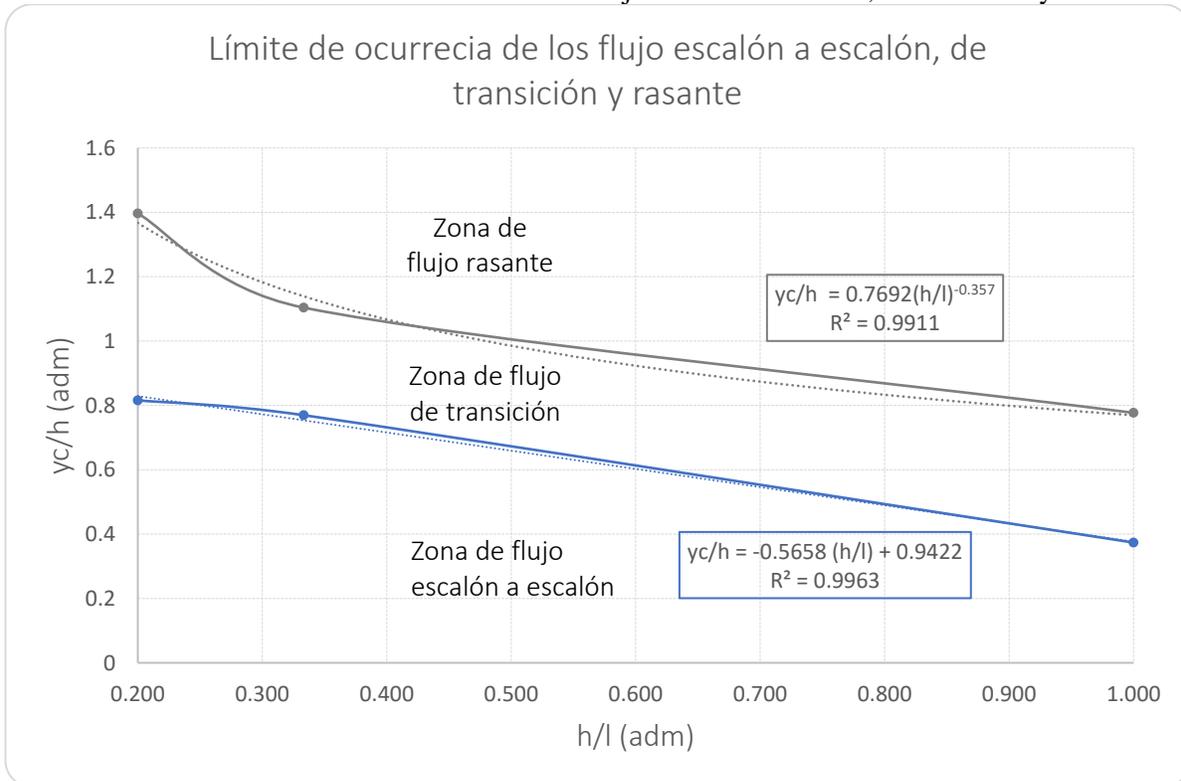
Límite entre el flujo escalón a escalón y el flujo de transición:

$$\frac{y_c}{h} = -0.5658 \frac{h}{l} + 0.9422 \quad [57]$$

Límite entre el flujo de transición y el flujo rasante:

$$\frac{y_c}{h} = 0.7692 \left(\frac{h}{l} \right)^{-0.357} \quad [58]$$

Ilustración 23. Límites de ocurrencia de los flujos escalón a escalón, de transición y rasante



6.2. Energía disipada y eficiencia de la estructura

En este capítulo se evalúa la eficiencia de la estructura como disipador de energía. Para esto se debe caracterizar la energía de cada escalón a partir de la mayor cantidad de mediciones que puedan realizarse sobre éste, la cual dependerá del caudal y de la pendiente de la estructura a analizar. Se propone el siguiente procedimiento:

1. Hacer circular un caudal pequeño por la estructura.
2. Clasificar visualmente el flujo en la estructura como flujo escalón a escalón, flujo de transición o flujo rasante, de acuerdo con el perfil de flujo.
3. Registrar todas las observaciones realizadas sobre el perfil de flujo. Registro fotográfico.
4. Dibujar el perfil de flujo sobre la pared de la estructura.
5. Con ayuda de la cuadrícula milimetrada, medir la profundidad de flujo en 5 puntos equidistantes a lo largo del eje de cada escalón. Debe tenerse presente que el punto dónde se realice la medición corresponda a una sección transversal con flujo paralelo, de modo que se tenga una distribución hidrostática de presiones y con esto:

$$\frac{P}{\gamma} = d \times \cos \theta \quad [59]$$

6. Calcular la velocidad de flujo en cada uno de los puntos de medición:

$$V = \frac{Q}{b \times d} \quad [60]$$

7. Calcular la energía total en cada uno de los puntos de medición:

$$H = z + \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g} \quad [61]$$

8. Calcular la energía disipada en cada escalón y la energía disipada por la estructura.
9. Repetir el procedimiento de los numerales 1 a 8 para diferentes caudales, aumentados de forma paulatina.

6.2.1. Estructura 1:1

Para esta estructura no fue posible medir ningún perfil de flujo con comportamiento escalón a escalón, debido a que este flujo es errático, presenta bastante saltación y no golpea todos los escalones. Se realizaron mediciones con caudales desde 3.23 lps, con comportamiento de transición, hasta 39.65 lps, con comportamiento de flujo rasante. Se evaluaron 3 caudales con comportamiento de transición y 7 caudales con flujo rasante. En la Tabla 6 se presentan los parámetros de flujo y geométricos del primer perfil evaluado en la estructura 1:1 con un caudal de 3.23 lps.

Tabla 6. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 3.23 lps (TR)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
3.23	0.00323	0.25	1	0.05	0.05	1	45	9.806

Para el cálculo de la energía en la estructura se realizaron mediciones de profundidad de flujo en 95 puntos a lo largo del eje de la estructura, en promedio 5 por cada escalón; sin embargo, por la extensión de la tabla de cálculo, en la Tabla 7 se presenta un resumen de la caracterización de la energía en cada escalón, utilizando la profundidad más aguas abajo de cada escalón.

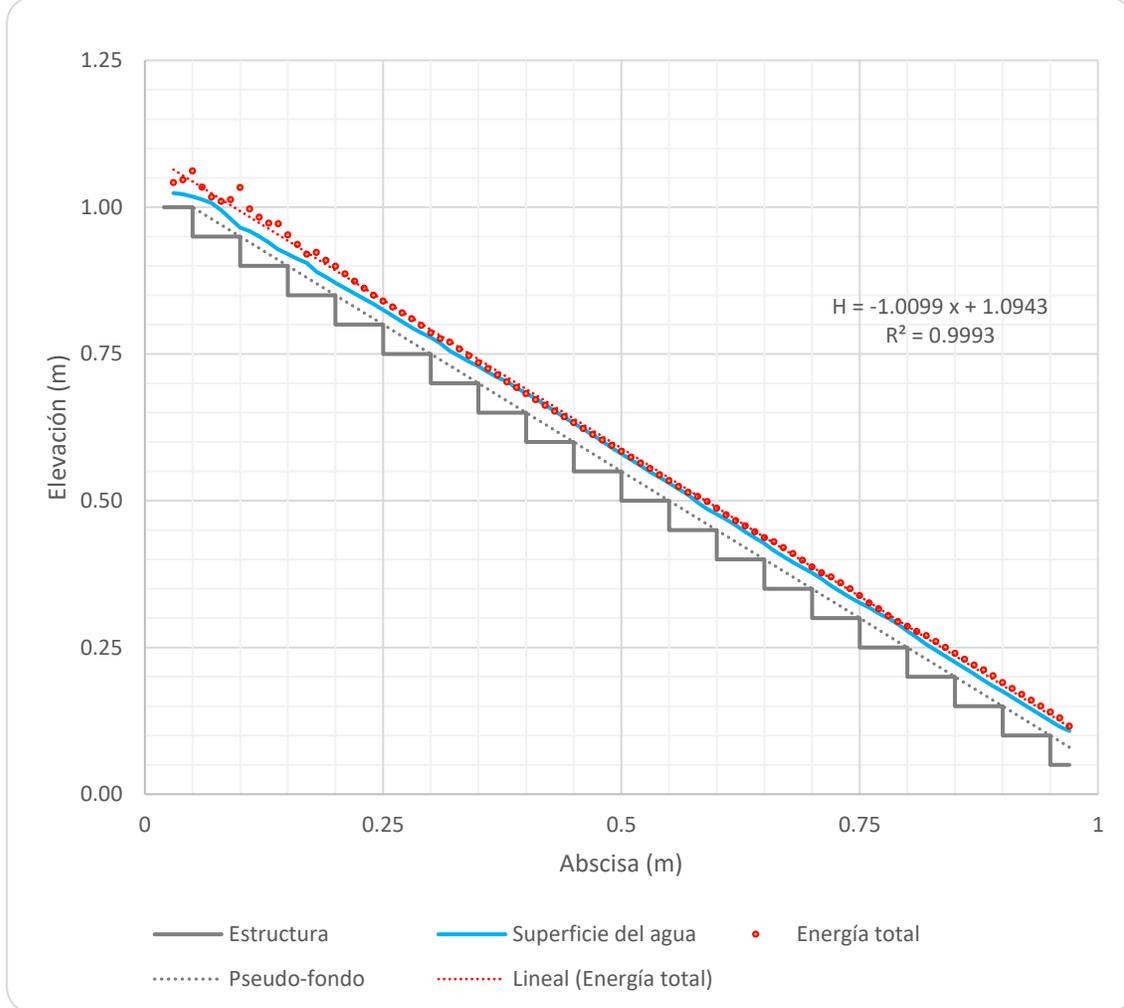
Las ecuaciones utilizadas para realizar los cálculos son las planteadas al inicio del apartado 6.2

Tabla 7. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 3.23 lps (TR)

Escalón	Abscisa	y	d	P/ γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.05	0.0180	0.0127	0.0090	0.0032	1.0151	0.0525	0.0615
2	0.10	0.0150	0.0106	0.0075	0.0027	1.2181	0.0757	0.0832
3	0.15	0.0200	0.0141	0.0100	0.0035	0.9136	0.0426	0.0526
4	0.20	0.0210	0.0148	0.0105	0.0037	0.8701	0.0386	0.0491
5	0.25	0.0250	0.0177	0.0125	0.0044	0.7309	0.0272	0.0397
6	0.30	0.0260	0.0184	0.0130	0.0046	0.7028	0.0252	0.0382
7	0.35	0.0270	0.0191	0.0135	0.0048	0.6767	0.0234	0.0369
8	0.40	0.0320	0.0226	0.0160	0.0057	0.5710	0.0166	0.0326
9	0.45	0.0320	0.0226	0.0160	0.0057	0.5710	0.0166	0.0326
10	0.50	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	0.6091	0.0189	0.0339
11	0.55	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	0.6091	0.0189	0.0339
12	0.60	0.0260	0.0184	0.0130	0.0046	0.7028	0.0252	0.0382
13	0.65	0.0270	0.0191	0.0135	0.0048	0.6767	0.0234	0.0369
14	0.70	0.0260	0.0184	0.0130	0.0046	0.7028	0.0252	0.0382
15	0.75	0.0250	0.0177	0.0125	0.0044	0.7309	0.0272	0.0397
16	0.80	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	0.6091	0.0189	0.0339
17	0.85	0.0250	0.0177	0.0125	0.0044	0.7309	0.0272	0.0397
18	0.90	0.0240	0.0170	0.0120	0.0042	0.7613	0.0296	0.0416
19	0.95	0.0250	0.0177	0.0125	0.0044	0.7309	0.0272	0.0397
20	1.00	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	0.6526	0.0217	0.0357

En la Ilustración 24 se presenta el perfil de flujo y la línea de energía utilizando las 95 mediciones.

Ilustración 24. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 3.23 lps (TR)



En la Tabla 8 se presenta el cálculo de la energía total disipada por la estructura, tomada como la diferencia entre la energía en la primera abscisa de la estructura y la energía estimada en la última abscisa de medición, con la pendiente de la línea de energía.

Tabla 8. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 3.23 lps (TR)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.02	1.04	0.93	88.99
20	0.97	0.11		

En la Tabla 9 se presentan los parámetros de flujo y geométricos de un perfil con flujo rasante evaluado en la estructura 1:1 para un caudal de 14.70 lps.

Tabla 9. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 14.70 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m³/s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s²
14.70	0.0147	0.25	1	0.05	0.05	1	45	9.806

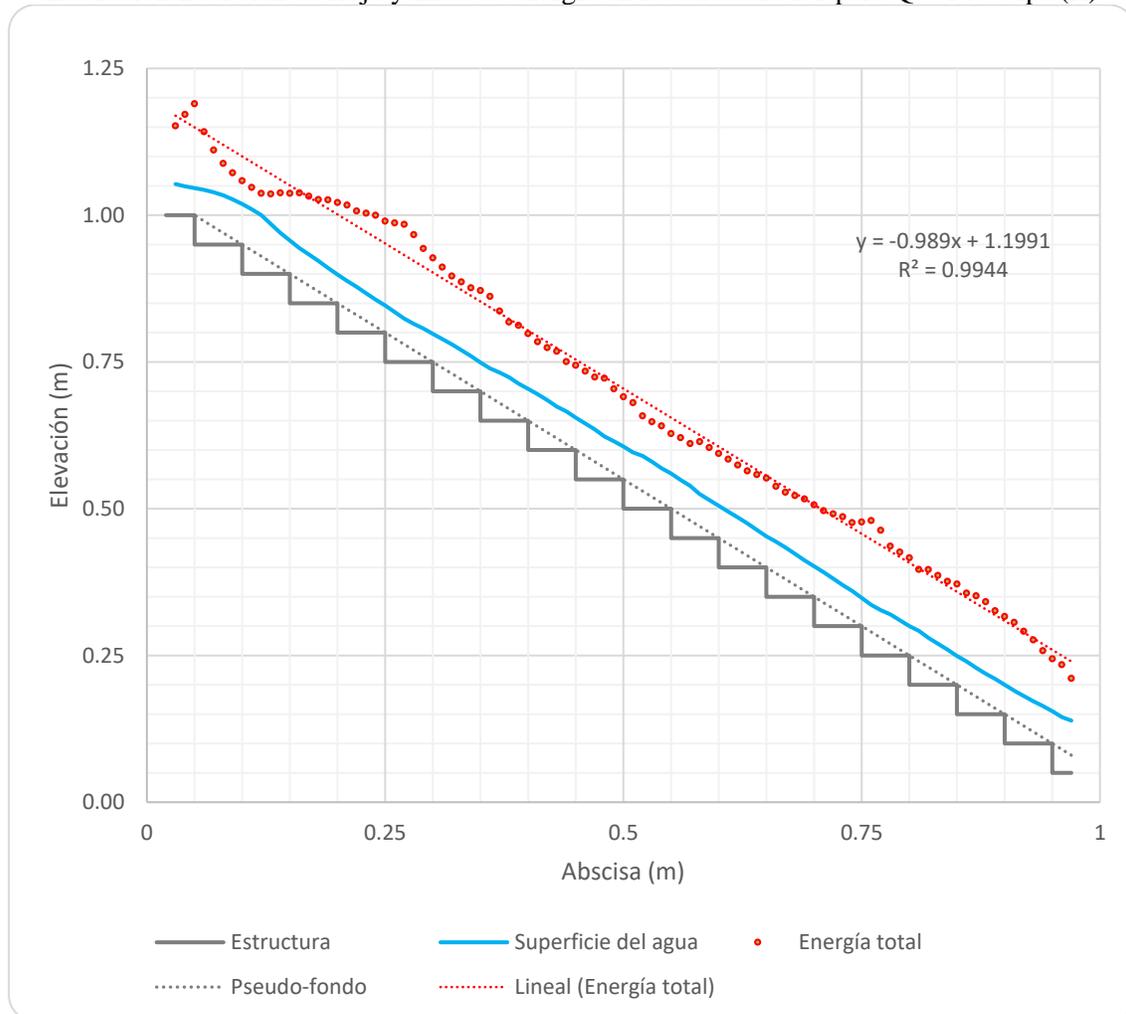
Para el cálculo de la energía en la estructura se realizaron mediciones de profundidad de flujo en 95 puntos a lo largo del eje de la estructura, en promedio 5 por cada escalón. En la Tabla 10 se presenta un resumen de la caracterización de la energía en cada escalón, utilizando la profundidad más aguas abajo de cada escalón.

Tabla 10. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para $Q = 14.70$ lps (R)

Escalón	Abscisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.05	0.0460	0.0325	0.0230	0.0081	1.8077	0.1666	0.1896
2	0.10	0.0690	0.0488	0.0345	0.0122	1.2052	0.0741	0.1086
3	0.15	0.0570	0.0403	0.0285	0.0101	1.4589	0.1085	0.1370
4	0.20	0.0500	0.0354	0.0250	0.0088	1.6631	0.1410	0.1660
5	0.25	0.0460	0.0325	0.0230	0.0081	1.8077	0.1666	0.1896
6	0.30	0.0470	0.0332	0.0235	0.0083	1.7693	0.1596	0.1831
7	0.35	0.0500	0.0354	0.0250	0.0088	1.6631	0.1410	0.1660
8	0.40	0.0530	0.0375	0.0265	0.0094	1.5690	0.1255	0.1520
9	0.45	0.0560	0.0396	0.0280	0.0099	1.4849	0.1124	0.1404
10	0.50	0.0550	0.0389	0.0275	0.0097	1.5119	0.1166	0.1441
11	0.55	0.0590	0.0417	0.0295	0.0104	1.4094	0.1013	0.1308
12	0.60	0.0550	0.0389	0.0275	0.0097	1.5119	0.1166	0.1441
13	0.65	0.0540	0.0382	0.0270	0.0095	1.5399	0.1209	0.1479
14	0.70	0.0520	0.0368	0.0260	0.0092	1.5991	0.1304	0.1564
15	0.75	0.0500	0.0354	0.0250	0.0088	1.6631	0.1410	0.1660
16	0.80	0.0500	0.0354	0.0250	0.0088	1.6631	0.1410	0.1660
17	0.85	0.0500	0.0354	0.0250	0.0088	1.6631	0.1410	0.1660
18	0.90	0.0500	0.0354	0.0250	0.0088	1.6631	0.1410	0.1660
19	0.95	0.0540	0.0382	0.0270	0.0095	1.5399	0.1209	0.1479
20	1.00	0.0590	0.0417	0.0295	0.0104	1.4094	0.1013	0.1308

En la Ilustración 25 se presenta el perfil de flujo y la línea de energía utilizando las 95 mediciones.

Ilustración 25. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 14.70 lps (R)



En la Tabla 11 se presenta el cálculo de la energía total disipada por la estructura, tomada como la diferencia entre la energía en la primera abscisa de la estructura y la energía estimada en la última abscisa de medición, con la pendiente de la línea de energía.

Tabla 11. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 14.70 lps (R)

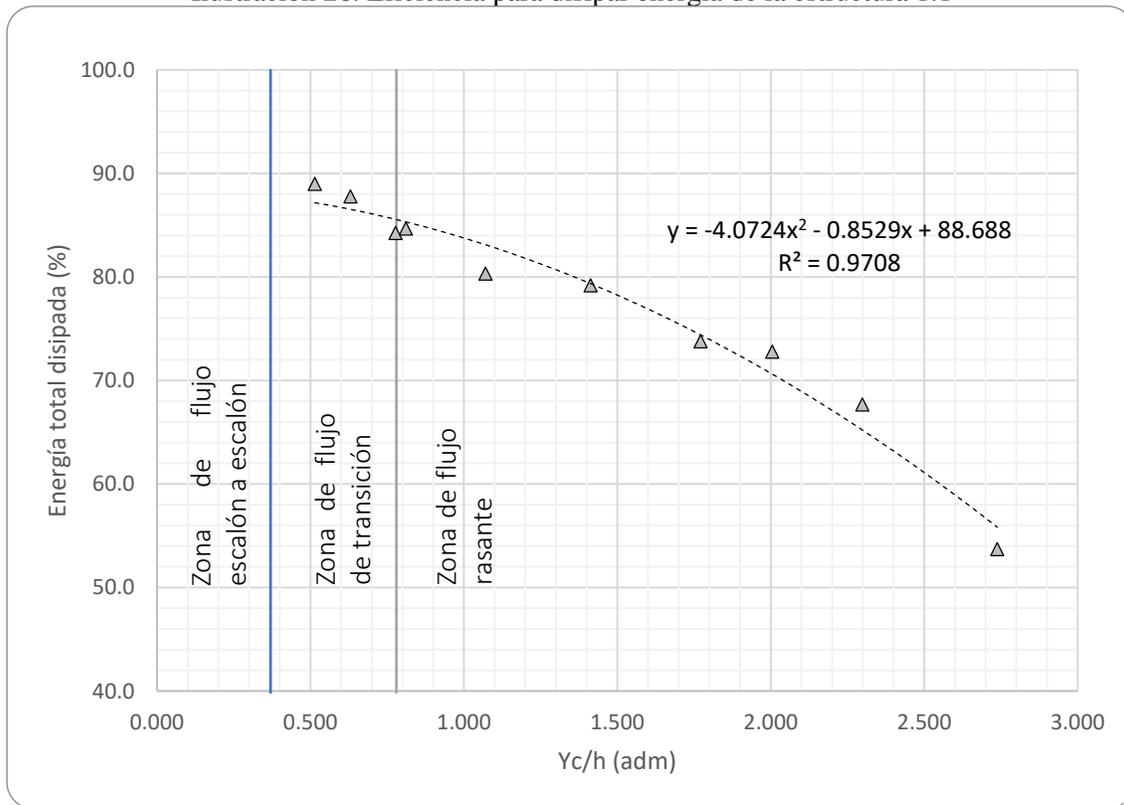
Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.02	1.15	0.91	79.19
20	0.97	0.24		

Comparando los perfiles de flujo para caudales de 3.23 lps y 14.70 lps en la estructura 1:1, se puede ver que con el aumento del caudal disminuye la eficiencia de disipación de energía de la estructura del 88.99% al 79.19%. En la Tabla 12 y en la Ilustración 26 se presenta la energía total disipada para cada uno de los 10 caudales evaluados para esta estructura. Las tablas de cálculo y los perfiles de flujo de los 8 caudales restantes se presentan como anexo.

Tabla 12. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:1

Q	Yc/h	Tipo de flujo	Energía disipada	
m³/s	m	EE, T, R	m	%
0.00323	0.514	T	0.927	89.0
0.00438	0.630	T	0.927	87.8
0.00600	0.777	T	0.900	84.2
0.00639	0.811	R	0.905	84.7
0.00969	1.070	R	0.887	80.3
0.01470	1.413	R	0.912	79.2
0.02063	1.771	R	0.874	73.8
0.02484	2.005	R	0.879	72.8
0.03050	2.298	R	0.815	67.7
0.03965	2.738	R	0.677	53.7

Ilustración 26. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:1



La curva de eficiencia de la estructura 1:1, está dada por la ecuación:

$$\Delta e = -4.09 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 - 0.9185 \left(\frac{y_c}{h}\right) + 89.061 \quad [62]$$

De esta manera, para un caudal diferente a los evaluado, se podrá predecir la eficiencia de la estructura.

6.2.2. Estructura 1:3

En esta estructura se realizaron mediciones con caudales desde 9.62 lps, con comportamiento de transición, hasta 40.38 lps, con comportamiento de flujo rasante. Se evaluó 1 caudal con comportamiento de transición y 8 caudales con flujo rasante. En la Tabla 13 se presentan los parámetros de flujo y geométricos del primer perfil evaluado en la estructura 1:3 con un caudal de 9.62 lps.

Tabla 13. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 9.62 lps (TR)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
9.62	0.00962	0.25	1	0.15	0.05	0.33	18	9.806

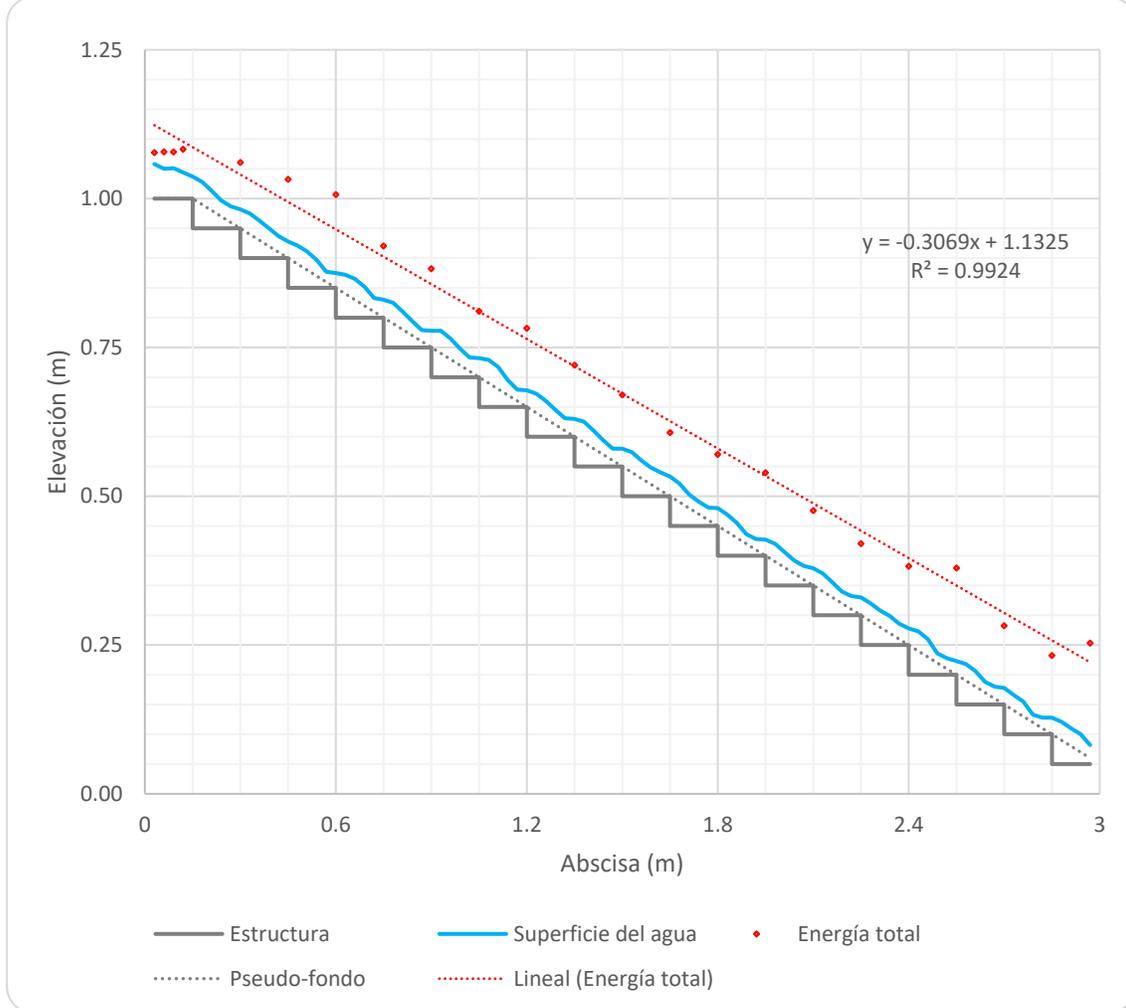
Para el cálculo de la energía en la estructura se realizaron mediciones de profundidad de flujo en 99 puntos a lo largo del eje de la estructura, en promedio 5 por cada escalón. En la Tabla 14 se presenta un resumen de la caracterización de la energía en cada escalón, utilizando la profundidad más aguas abajo de cada escalón.

Tabla 14. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 9.62 lps (TR)

Escalón	Abscisa	y	d	P/y	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.15	0.0370	0.0351	0.0333	0.0088	1.0963	0.0613	0.0946
2	0.30	0.0270	0.0256	0.0243	0.0064	1.5023	0.1151	0.1394
3	0.45	0.0270	0.0256	0.0243	0.0064	1.5023	0.1151	0.1394
4	0.60	0.0170	0.0161	0.0153	0.0040	2.3860	0.2903	0.3056
5	0.75	0.0230	0.0218	0.0207	0.0055	1.7635	0.1586	0.1793
6	0.90	0.0190	0.0180	0.0171	0.0045	2.1348	0.2324	0.2495
7	1.05	0.0230	0.0218	0.0207	0.0055	1.7635	0.1586	0.1793
8	1.20	0.0190	0.0180	0.0171	0.0045	2.1348	0.2324	0.2495
9	1.35	0.0210	0.0199	0.0189	0.0050	1.9315	0.1902	0.2091
10	1.50	0.0200	0.0190	0.0180	0.0047	2.0281	0.2097	0.2277
11	1.65	0.0300	0.0285	0.0270	0.0071	1.3520	0.0932	0.1202
12	1.80	0.0210	0.0199	0.0189	0.0050	1.9315	0.1902	0.2091
13	1.95	0.0180	0.0171	0.0162	0.0043	2.2534	0.2589	0.2751
14	2.10	0.0230	0.0218	0.0207	0.0055	1.7635	0.1586	0.1793
15	2.25	0.0220	0.0209	0.0198	0.0052	1.8437	0.1733	0.1931
16	2.40	0.0280	0.0266	0.0252	0.0066	1.4486	0.1070	0.1322
17	2.55	0.0230	0.0218	0.0207	0.0055	1.7635	0.1586	0.1793
18	2.70	0.0280	0.0266	0.0252	0.0066	1.4486	0.1070	0.1322
19	2.85	0.0280	0.0266	0.0252	0.0066	1.4486	0.1070	0.1322
20	2.97	0.0220	0.0209	0.0198	0.0052	1.8437	0.1733	0.1931

En la Ilustración 27 se presenta el perfil de flujo y la línea de energía utilizando las 99 mediciones.

Ilustración 27. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 9.62 lps (TR)



En la Tabla 15 se presenta el cálculo de la energía total disipada por la estructura, tomada como la diferencia entre la energía en la primera abscisa de la estructura y la energía estimada en la última abscisa de medición, con la pendiente de la línea de energía.

Tabla 15. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 9.62 lps (TR)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.03	1.08	0.86	79.48
20	2.97	0.22		

En la Tabla 16 se presentan los parámetros de flujo y geométricos de un perfil con flujo rasante evaluado en la estructura 1:3 para un caudal de 29.38 lps.

Tabla 16. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 29.38 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
29.38	0.02938	0.25	1	0.15	0.05	0.33	18	9.806

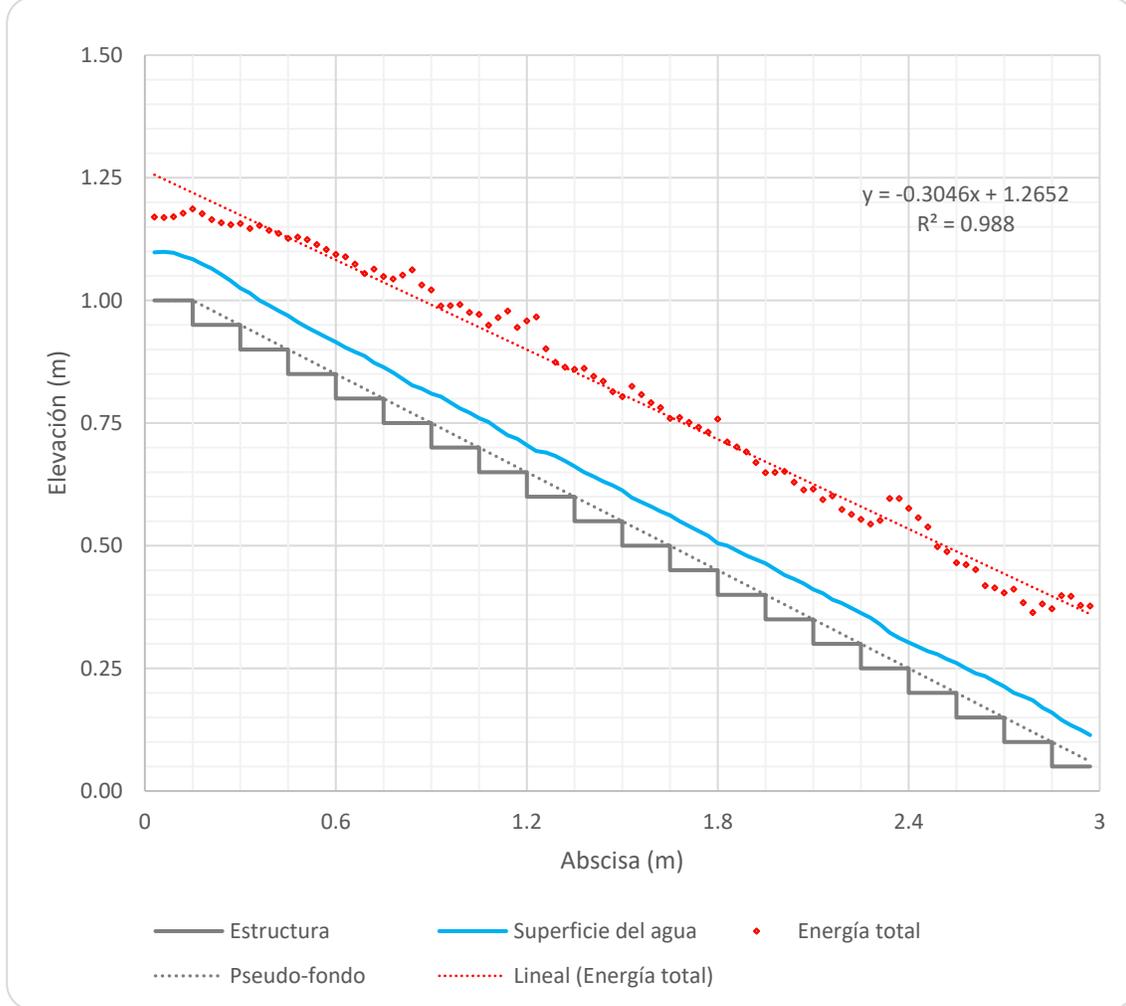
Para el cálculo de la energía en la estructura se realizaron mediciones de profundidad de flujo en 99 puntos a lo largo del eje de la estructura, en promedio 5 por cada escalón. En la Tabla 17 se presenta un resumen de la caracterización de la energía en cada escalón, utilizando la profundidad más aguas abajo de cada escalón.

Tabla 17. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para $Q = 29.38$ lps (R)

Escalón	Abscisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.15	0.0840	0.0797	0.0756	0.0199	1.4747	0.1109	0.1865
2	0.30	0.0800	0.0759	0.0720	0.0190	1.5485	0.1223	0.1943
3	0.45	0.0690	0.0655	0.0621	0.0164	1.7953	0.1643	0.2264
4	0.60	0.0650	0.0617	0.0585	0.0154	1.9058	0.1852	0.2437
5	0.75	0.0630	0.0598	0.0567	0.0149	1.9663	0.1971	0.2538
6	0.90	0.0600	0.0569	0.0540	0.0142	2.0646	0.2173	0.2713
7	1.05	0.0610	0.0579	0.0549	0.0145	2.0308	0.2103	0.2652
8	1.20	0.0580	0.0550	0.0522	0.0138	2.1358	0.2326	0.2848
9	1.35	0.0630	0.0598	0.0567	0.0149	1.9663	0.1971	0.2538
10	1.50	0.0630	0.0598	0.0567	0.0149	1.9663	0.1971	0.2538
11	1.65	0.0600	0.0569	0.0540	0.0142	2.0646	0.2173	0.2713
12	1.80	0.0600	0.0569	0.0540	0.0142	2.0646	0.2173	0.2713
13	1.95	0.0620	0.0588	0.0558	0.0147	1.9980	0.2036	0.2594
14	2.10	0.0630	0.0598	0.0567	0.0149	1.9663	0.1971	0.2538
15	2.25	0.0630	0.0598	0.0567	0.0149	1.9663	0.1971	0.2538
16	2.40	0.0530	0.0503	0.0477	0.0126	2.3373	0.2786	0.3263
17	2.55	0.0610	0.0579	0.0549	0.0145	2.0308	0.2103	0.2652
18	2.70	0.0630	0.0598	0.0567	0.0149	1.9663	0.1971	0.2538
19	2.85	0.0600	0.0569	0.0540	0.0142	2.0646	0.2173	0.2713
20	2.97	0.0540	0.0512	0.0486	0.0128	2.2940	0.2683	0.3169

En la Ilustración 28 se presenta el perfil de flujo y la línea de energía utilizando las 99 mediciones.

Ilustración 28. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 29.38 lps (R)



En la Tabla 18 se presenta el cálculo de la energía total disipada por la estructura, tomada como la diferencia entre la energía en la primera abscisa de la estructura y la energía estimada en la última abscisa de medición, con la pendiente de la línea de energía.

Tabla 18. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 29.38 lps (R)

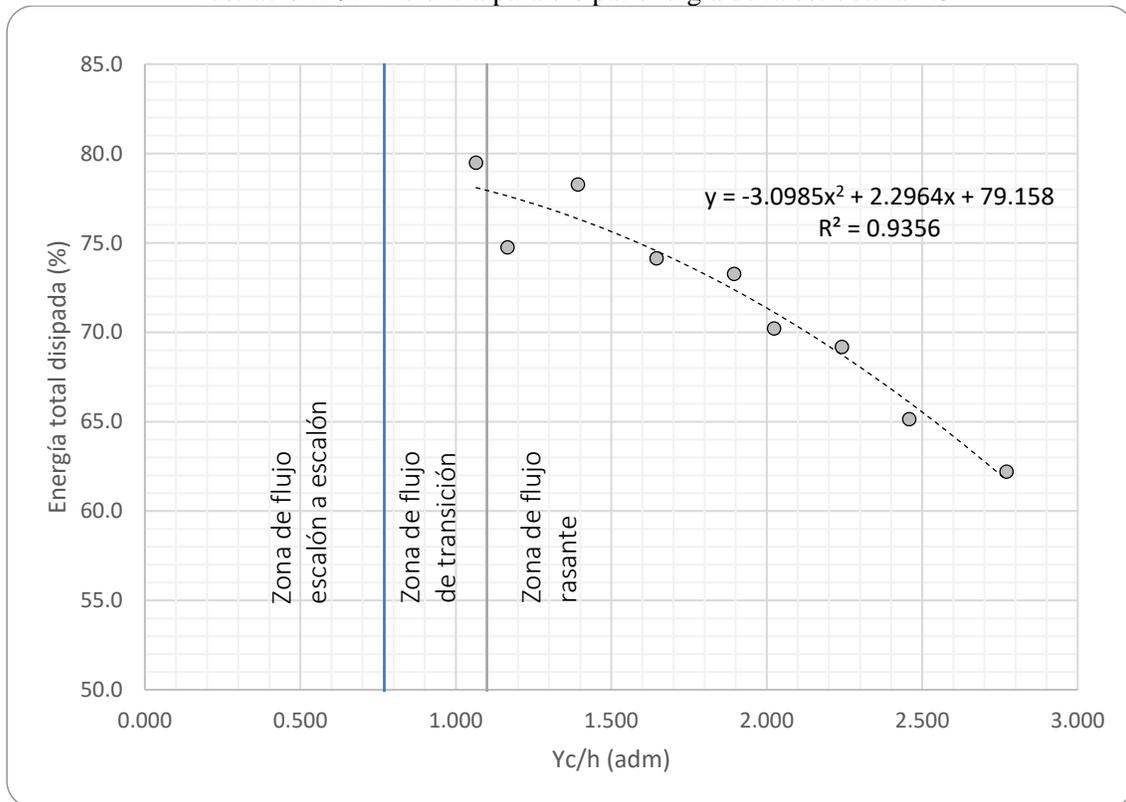
Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.01	1.17	0.81	69.18
20	2.97	0.36		

Comparando los perfiles de flujo para caudales de 9.62 lps y 29.38 lps en la estructura 1:3, se puede ver que con el aumento del caudal disminuye la eficiencia de disipación de energía de la estructura del 79.48% al 69.18%. En la Tabla 19 y en la Ilustración 26 se presenta la energía total disipada para cada uno de los 9 caudales evaluados para esta estructura. Las tablas de cálculo y los perfiles de flujo de los 7 caudales restantes se presentan como anexo.

Tabla 19. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:3

Q	Yc/h	Tipo de flujo	Energía disipada	
			m	%
0.00962	1.065	T	0.856	79.5
0.01103	1.167	R	0.811	74.7
0.01439	1.393	R	0.863	78.3
0.01848	1.646	R	0.834	74.1
0.02284	1.895	R	0.840	73.3
0.02520	2.024	R	0.808	70.2
0.02938	2.242	R	0.809	69.2
0.03374	2.458	R	0.770	65.1
0.04038	2.771	R	0.748	62.2

Ilustración 29. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:3



La curva de eficiencia de la estructura 1:3, está dada por la ecuación:

$$\Delta e = -3.0985 \left(\frac{y_c}{h}\right)^2 + 2.2964 \left(\frac{y_c}{h}\right) + 79.158 \quad [63]$$

De esta manera, para un caudal diferente a los evaluado, se podrá predecir la eficiencia de la estructura.

6.2.1. Estructura 1:5

En esta estructura se realizaron mediciones con caudales desde 2.70 lps, con comportamiento escalón a escalón, hasta 39.75 lps, con comportamiento de flujo rasante. En este caso sí fue posible medir perfiles de flujo con comportamiento escalón a escalón, debido a que la longitud de los escalones permitía el desarrollo del perfil de flujo H3 y su medición. Se evaluaron 2 caudales con flujo escalón a escalón, 2 caudales con comportamiento de transición y 6 caudales con flujo rasante. En la Tabla 20 se presentan los parámetros de flujo y geométricos del primer perfil evaluado en la estructura 1:5 con un caudal de 2.70 lps.

Tabla 20. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 2.70 lps (EE)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
2.7	0.0027	0.25	1	0.25	0.05	5	0	9.806

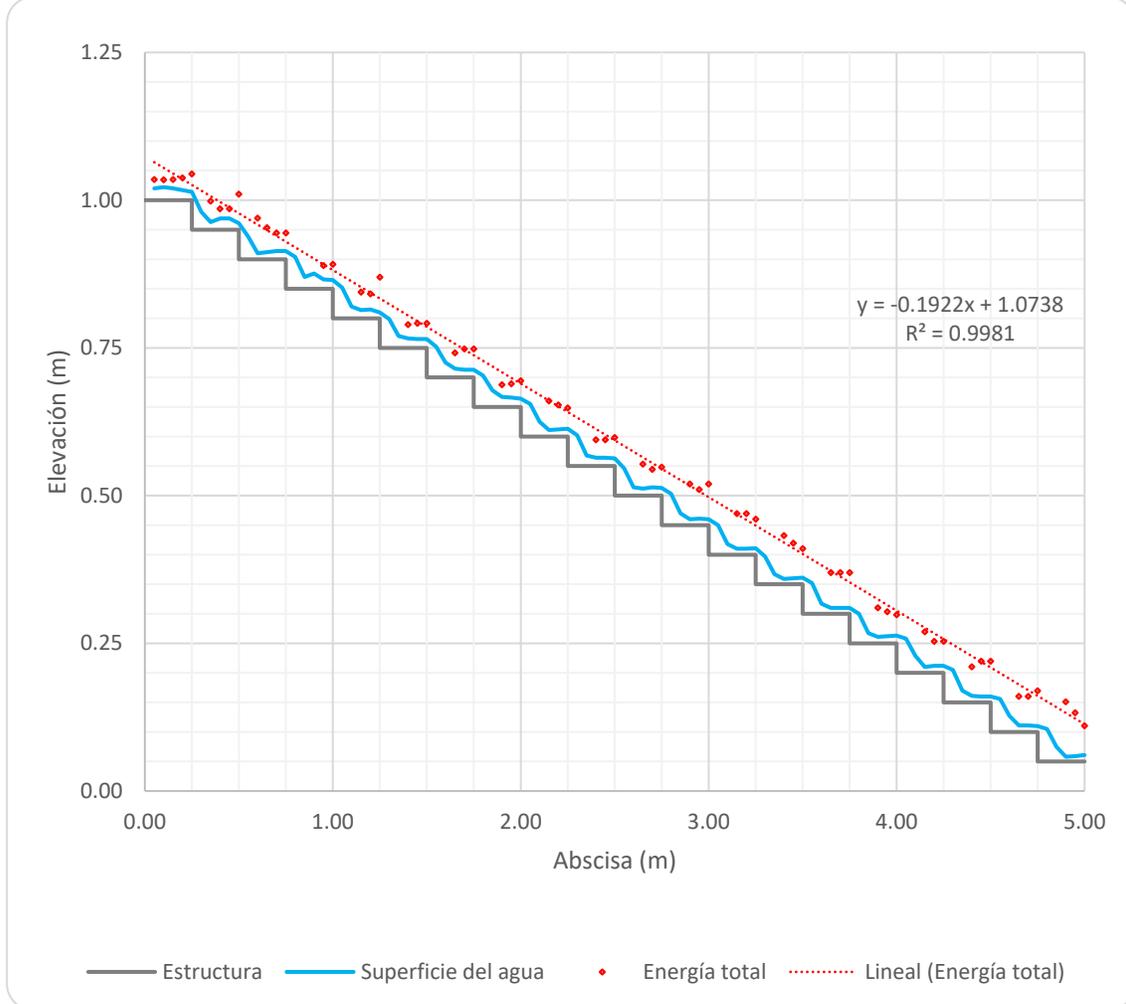
Para el cálculo de la energía en la estructura se realizaron mediciones de profundidad de flujo en 100 puntos a lo largo del eje de la estructura, 5 por cada escalón. En la Tabla 21 se presenta un resumen de la caracterización de la energía en cada escalón, utilizando la profundidad más aguas debajo de cada escalón.

Tabla 21. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 2.70 lps (EE)

Escalón	Abscisa	y	d	P/y	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.25	0.0140	0.0140	0.0140	0.0035	0.7714	0.0303	0.0443
2	0.50	0.0110	0.0110	0.0110	0.0028	0.9818	0.0492	0.0602
3	0.75	0.0140	0.0140	0.0140	0.0035	0.7714	0.0303	0.0443
4	1.00	0.0160	0.0160	0.0160	0.0040	0.6750	0.0232	0.0392
5	1.25	0.0150	0.0150	0.0150	0.0038	0.7200	0.0264	0.0414
6	1.50	0.0150	0.0150	0.0150	0.0038	0.7200	0.0264	0.0414
7	1.75	0.0130	0.0130	0.0130	0.0033	0.8308	0.0352	0.0482
8	2.00	0.0160	0.0160	0.0160	0.0040	0.6750	0.0232	0.0392
9	2.25	0.0130	0.0130	0.0130	0.0033	0.8308	0.0352	0.0482
10	2.50	0.0130	0.0130	0.0130	0.0033	0.8308	0.0352	0.0482
11	2.75	0.0130	0.0130	0.0130	0.0033	0.8308	0.0352	0.0482
12	3.00	0.0100	0.0100	0.0100	0.0025	1.0800	0.0595	0.0695
13	3.25	0.0110	0.0110	0.0110	0.0028	0.9818	0.0492	0.0602
14	3.50	0.0110	0.0110	0.0110	0.0028	0.9818	0.0492	0.0602
15	3.75	0.0100	0.0100	0.0100	0.0025	1.0800	0.0595	0.0695
16	4.00	0.0130	0.0130	0.0130	0.0033	0.8308	0.0352	0.0482
17	4.25	0.0120	0.0120	0.0120	0.0030	0.9000	0.0413	0.0533
18	4.50	0.0100	0.0100	0.0100	0.0025	1.0800	0.0595	0.0695
19	4.75	0.0100	0.0100	0.0100	0.0025	1.0800	0.0595	0.0695
20	5.00	0.0110	0.0110	0.0110	0.0028	0.9818	0.0492	0.0602

En la Ilustración 30 se presenta el perfil de flujo y la línea de energía utilizando las 100 mediciones.

Ilustración 30. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 2.70 lps (EE)



En la Tabla 22 se presenta el cálculo de la energía total disipada por la estructura, tomada como la diferencia entre la energía en la primera abscisa de la estructura y la energía estimada en la última abscisa de medición, con la pendiente de la línea de energía.

Tabla 22. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 2.70 lps (EE)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.05	1.03	0.92	89.10
20	5	0.11		

En la Tabla 23 se presentan los parámetros de flujo y geométricos de un perfil con flujo de transición evaluado en la estructura 1:5 para un caudal de 8.85 lps.

Tabla 23. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 - Q = 8.85 lps (TR)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
8.85	0.00885	0.25	1	0.25	0.05	5	0	9.806

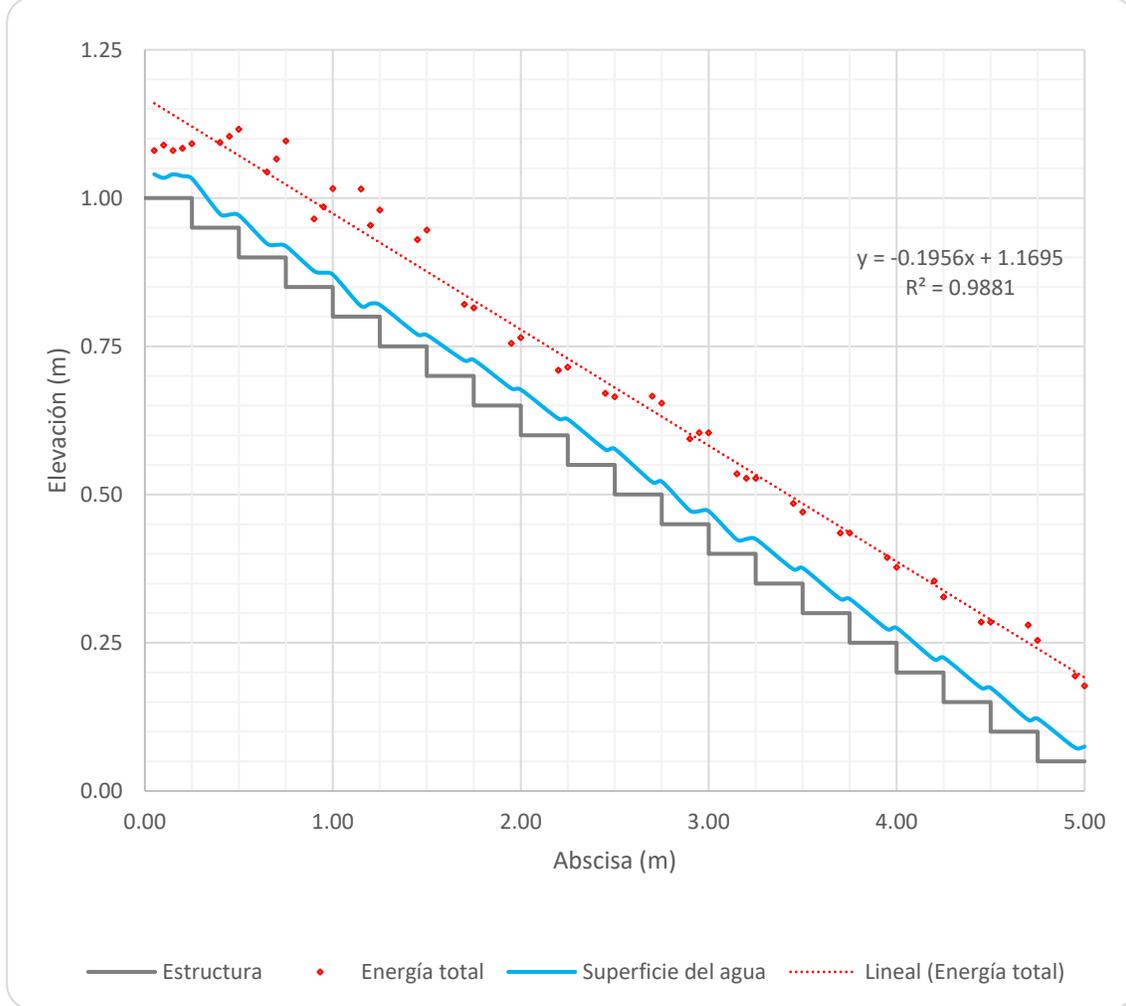
Para el cálculo de la energía en la estructura se realizaron mediciones de profundidad de flujo en 100 puntos a lo largo del eje de la estructura, 5 por cada escalón. En la Tabla 24 se presenta un resumen de la caracterización de la energía en cada escalón, utilizando la profundidad más aguas abajo de cada escalón.

Tabla 24. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para $Q = 8.85$ lps (TR)

Escalón	Abscisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.25	0.0330	0.0330	0.0330	0.0083	1.0727	0.0587	0.0917
2	0.50	0.0210	0.0210	0.0210	0.0053	1.6857	0.1449	0.1659
3	0.75	0.0210	0.0210	0.0210	0.0053	1.6857	0.1449	0.1659
4	1.00	0.0240	0.0240	0.0240	0.0060	1.4750	0.1109	0.1349
5	1.25	0.0220	0.0220	0.0220	0.0055	1.6091	0.1320	0.1540
6	1.50	0.0200	0.0200	0.0200	0.0050	1.7700	0.1597	0.1797
7	1.75	0.0260	0.0260	0.0260	0.0065	1.3615	0.0945	0.1205
8	2.00	0.0290	0.0290	0.0290	0.0073	1.2207	0.0760	0.1050
9	2.25	0.0270	0.0270	0.0270	0.0068	1.3111	0.0877	0.1147
10	2.50	0.0270	0.0270	0.0270	0.0068	1.3111	0.0877	0.1147
11	2.75	0.0220	0.0220	0.0220	0.0055	1.6091	0.1320	0.1540
12	3.00	0.0220	0.0220	0.0220	0.0055	1.6091	0.1320	0.1540
13	3.25	0.0250	0.0250	0.0250	0.0063	1.4160	0.1022	0.1272
14	3.50	0.0260	0.0260	0.0260	0.0065	1.3615	0.0945	0.1205
15	3.75	0.0240	0.0240	0.0240	0.0060	1.4750	0.1109	0.1349
16	4.00	0.0250	0.0250	0.0250	0.0063	1.4160	0.1022	0.1272
17	4.25	0.0250	0.0250	0.0250	0.0063	1.4160	0.1022	0.1272
18	4.50	0.0240	0.0240	0.0240	0.0060	1.4750	0.1109	0.1349
19	4.75	0.0220	0.0220	0.0220	0.0055	1.6091	0.1320	0.1540
20	5.00	0.0250	0.0250	0.0250	0.0063	1.4160	0.1022	0.1272

En la Ilustración 31 se presenta el perfil de flujo y la línea de energía utilizando las 100 mediciones.

Ilustración 31. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 8.85 lps (TR)



En la Tabla 25 se presenta el cálculo de la energía total disipada por la estructura, tomada como la diferencia entre la energía en la primera abscisa de la estructura y la energía estimada en la última abscisa de medición, con la pendiente de la línea de energía.

Tabla 25. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 8.85 lps (TR)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.05	1.08	0.89	82.27
20	5	0.19		

En la Tabla 26 se presentan los parámetros de flujo y geométricos de un perfil con flujo rasante evaluado en la estructura 1:5 para un caudal de 30.0 lps.

Tabla 26. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 30.0 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
30	0.03	0.25	1	0.25	0.05	5	0	9.806

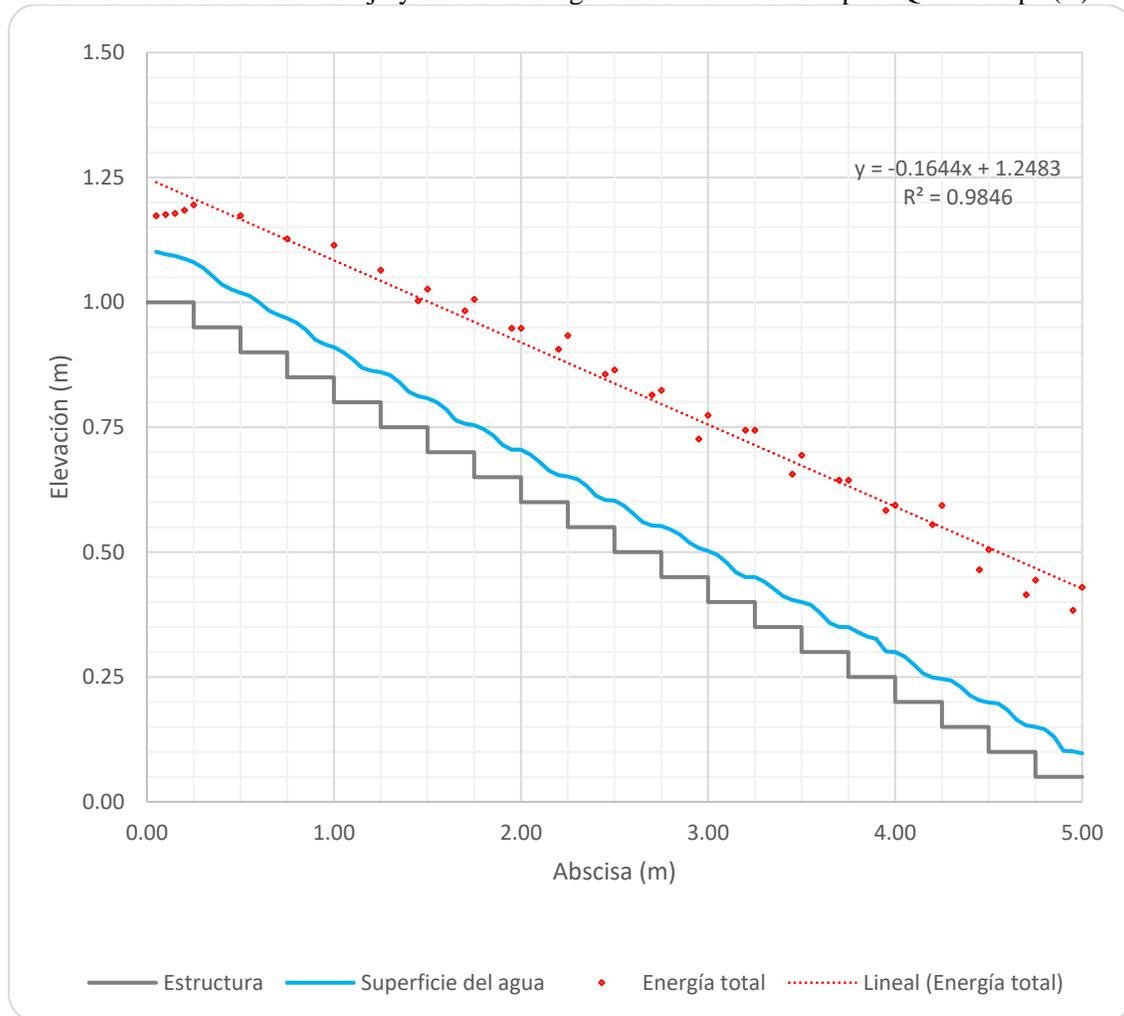
Para el cálculo de la energía en la estructura se realizaron mediciones de profundidad de flujo en 100 puntos a lo largo del eje de la estructura, 5 por cada escalón. En la Tabla 27 se presenta un resumen de la caracterización de la energía en cada escalón, utilizando la profundidad más aguas abajo de cada escalón.

Tabla 27. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para $Q = 30.0$ lps (R)

Escalón	Abscisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.25	0.0800	0.0800	0.0800	0.0200	1.5000	0.1147	0.1947
2	0.50	0.0690	0.0690	0.0690	0.0173	1.7391	0.1542	0.2232
3	0.75	0.0750	0.0750	0.0750	0.0188	1.6000	0.1305	0.2055
4	1.00	0.0660	0.0660	0.0660	0.0165	1.8182	0.1686	0.2346
5	1.25	0.0630	0.0630	0.0630	0.0158	1.9048	0.1850	0.2480
6	1.50	0.0620	0.0620	0.0620	0.0155	1.9355	0.1910	0.2530
7	1.75	0.0570	0.0570	0.0570	0.0143	2.1053	0.2260	0.2830
8	2.00	0.0550	0.0550	0.0550	0.0138	2.1818	0.2427	0.2977
9	2.25	0.0510	0.0510	0.0510	0.0128	2.3529	0.2823	0.3333
10	2.50	0.0530	0.0530	0.0530	0.0133	2.2642	0.2614	0.3144
11	2.75	0.0520	0.0520	0.0520	0.0130	2.3077	0.2715	0.3235
12	3.00	0.0520	0.0520	0.0520	0.0130	2.3077	0.2715	0.3235
13	3.25	0.0500	0.0500	0.0500	0.0125	2.4000	0.2937	0.3437
14	3.50	0.0500	0.0500	0.0500	0.0125	2.4000	0.2937	0.3437
15	3.75	0.0500	0.0500	0.0500	0.0125	2.4000	0.2937	0.3437
16	4.00	0.0500	0.0500	0.0500	0.0125	2.4000	0.2937	0.3437
17	4.25	0.0460	0.0460	0.0460	0.0115	2.6087	0.3470	0.3930
18	4.50	0.0490	0.0490	0.0490	0.0123	2.4490	0.3058	0.3548
19	4.75	0.0500	0.0500	0.0500	0.0125	2.4000	0.2937	0.3437
20	5.00	0.0470	0.0470	0.0470	0.0118	2.5532	0.3324	0.3794

En la Ilustración 32 se presenta el perfil de flujo y la línea de energía utilizando las 100 mediciones.

Ilustración 32. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 30.0 lps (R)



En la Tabla 28 se presenta el cálculo de la energía total disipada por la estructura, tomada como la diferencia entre la energía en la primera abscisa de la estructura y la energía estimada en la última abscisa de medición, con la pendiente de la línea de energía.

Tabla 28. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 30.0 lps (R)

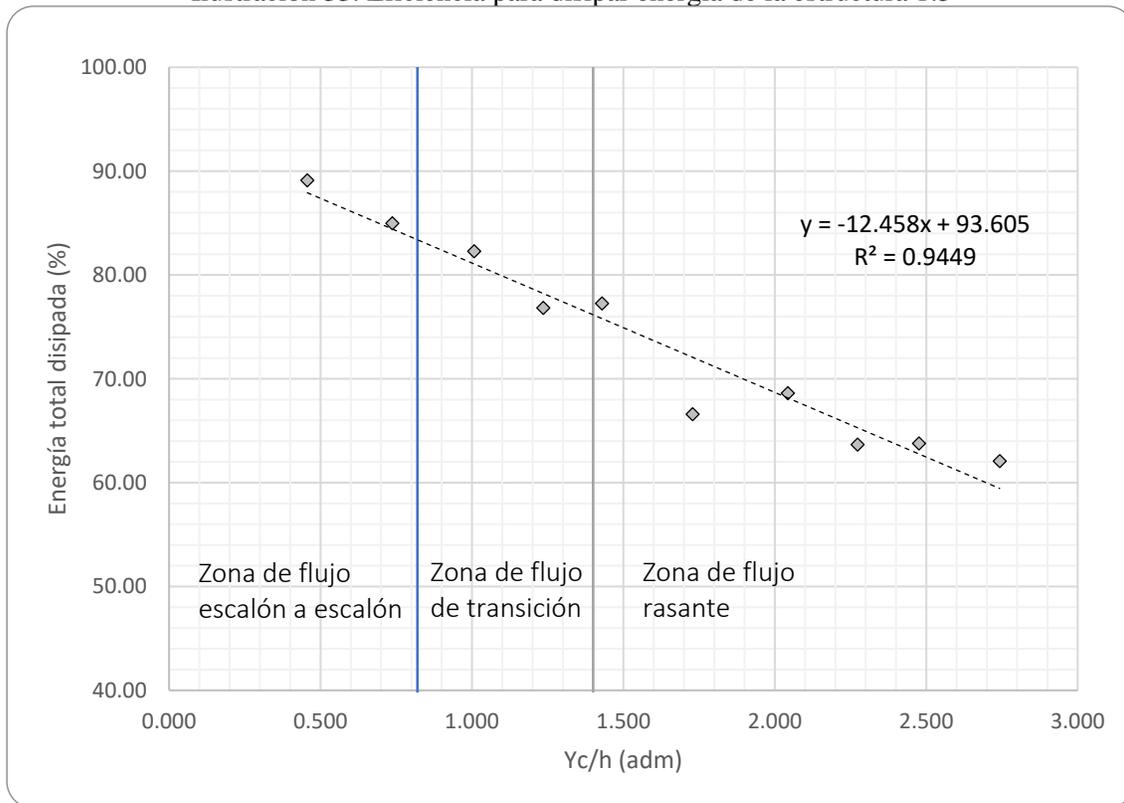
Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.05	1.17	0.75	63.66
20	5	0.43		

Comparando los perfiles de flujo para caudales de 2.70, 8.85 y 30.0 lps en la estructura 1:5, se puede ver que con el aumento del caudal disminuye la eficiencia de disipación de energía de la estructura de 89.10% a 82.27% y a 63.66%, respectivamente. En la Tabla 29 y en la Ilustración 33 se presenta la energía total disipada para cada uno de los 10 caudales evaluados para esta estructura. Las tablas de cálculo y los perfiles de flujo de los 7 caudales restantes se presentan como anexo.

Tabla 29. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:5

Q	Yc/h	Tipo de flujo	Energía disipada	
m³/s	m	E, T, R	m	%
0.00270	0.457	E	0.922	89.10
0.00554	0.737	E	0.898	85.0
0.00885	1.007	E	0.888	82.3
0.01202	1.235	E	0.843	76.8
0.01496	1.430	E	0.858	77.3
0.01989	1.728	E	0.755	66.6
0.02556	2.043	E	0.793	68.6
0.03000	2.273	E	0.747	63.7
0.03410	2.476	R	0.756	63.8
0.03975	2.742	R	0.749	62.1

Ilustración 33. Eficiencia para disipar energía de la estructura 1:5



La curva de eficiencia de la estructura 1:5, está dada por la ecuación:

$$\Delta e = -12.458 \left(\frac{Y_c}{h} \right) + 93.605 \quad [64]$$

De esta manera, para un caudal diferente a los evaluados, se podrá predecir la eficiencia de la estructura.

7. METODOLOGÍA DE DISEÑO PROPUESTA

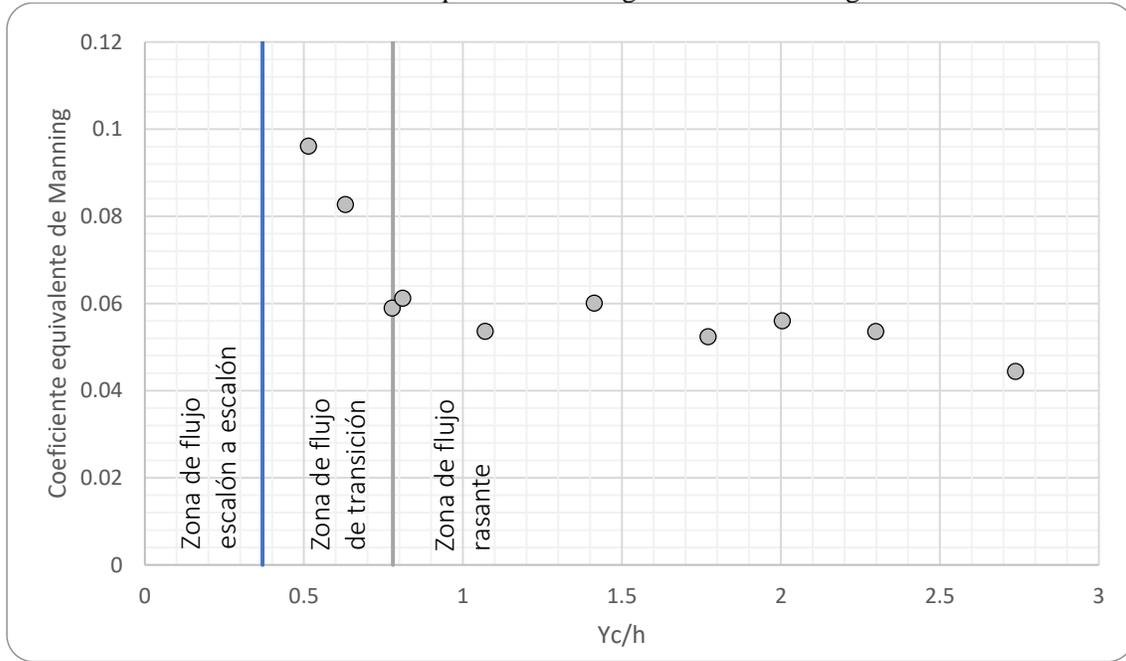
Como se mencionó en el capítulo de caracterización del flujo, cuando el caudal es lo suficientemente grande, el flujo tiene un comportamiento rasante. En este caso, el flujo tiene un comportamiento similar al de un flujo gradualmente variado en un canal de pendiente alta. Para todos los caudales en la zona de flujo rasante, al final del primer escalón se presenta la profundidad crítica y al final de la estructura el flujo alcanza una profundidad de flujo uniforme, como el perfil de F.G.V., S2. Por lo anterior se plantea tratar la estructura escalonada como un canal muy rugoso de pendiente alta, en la zona de flujo rasante.

Para cada estructura y para cada caudal se estimó un coeficiente equivalente de rugosidad de Manning, calculado con la profundidad de flujo medida en las secciones con flujo uniforme. En la Tabla 30 y en la Ilustración 34 se muestran los coeficientes equivalentes de rugosidad de Manning para la estructura 1:1. En la gráfica se puede ver que a medida que aumenta el caudal, el coeficiente disminuye, sin embargo, al entrar en la zona de flujo rasante, el coeficiente permanece casi constante con un valor de 0.055.

Tabla 30. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:1

Q	Yc/h	Tipo de flujo	Yn	n
m ³ /s	m	E, T, R	m	adm
0.00323	0.514	T	0.0191	0.096
0.00438	0.630	T	0.0211	0.083
0.00600	0.777	T	0.0207	0.059
0.00639	0.811	R	0.0221	0.061
0.00969	1.070	R	0.0265	0.054
0.01470	1.413	R	0.0375	0.060
0.02063	1.771	R	0.0429	0.052
0.02484	2.005	R	0.0509	0.056
0.03050	2.298	R	0.0568	0.054
0.03965	2.738	R	0.0598	0.044

Ilustración 34. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:1

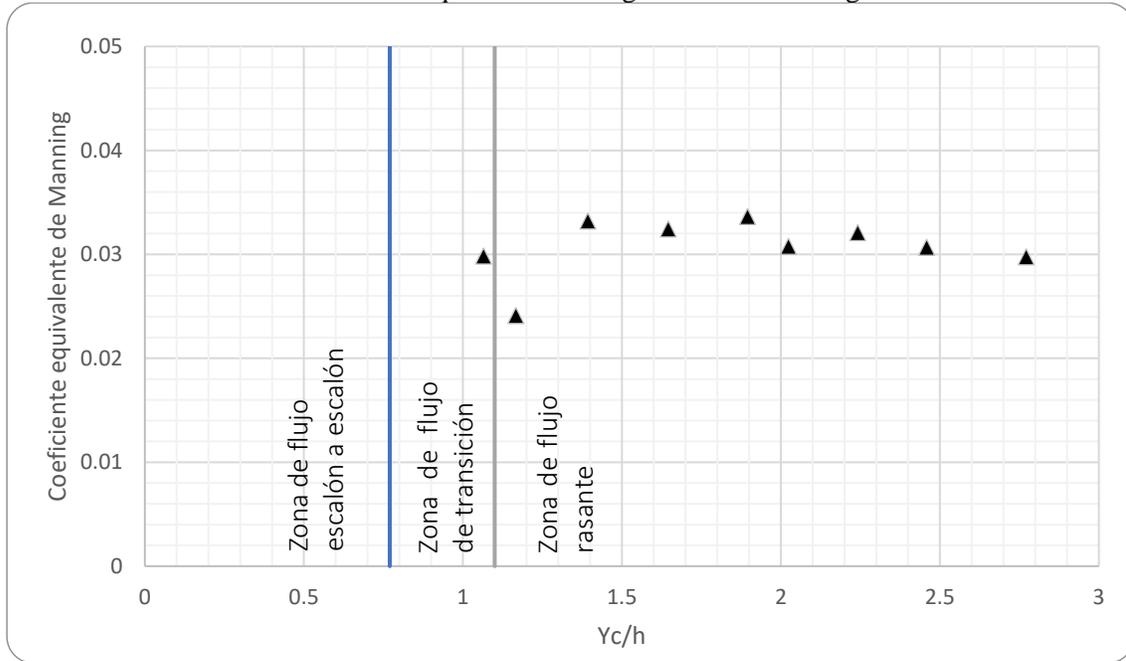


En la Tabla 31 y en la Ilustración 35 se presentan los coeficientes equivalentes de rugosidad de Manning para la estructura 1:3, en este caso solo se calculó un coeficiente en la zona de transición y los demás en la zona de flujo rasante, nuevamente en este caso, el coeficiente toma un valor casi constante en la zona de flujo rasante igual a 0.031.

Tabla 31. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:3

Q	Yc/h	Tipo de flujo	Yn	n
m ³ /s	m	E, T, R	m	adm
0.00962	1.065	T	0.0258	0.030
0.01103	1.167	R	0.0246	0.024
0.01439	1.393	R	0.0360	0.033
0.01848	1.646	R	0.0418	0.032
0.02284	1.895	R	0.0494	0.034
0.02520	2.024	R	0.0497	0.031
0.02938	2.242	R	0.0567	0.032
0.03374	2.458	R	0.0605	0.031
0.04038	2.771	R	0.0671	0.030

Ilustración 35. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:3

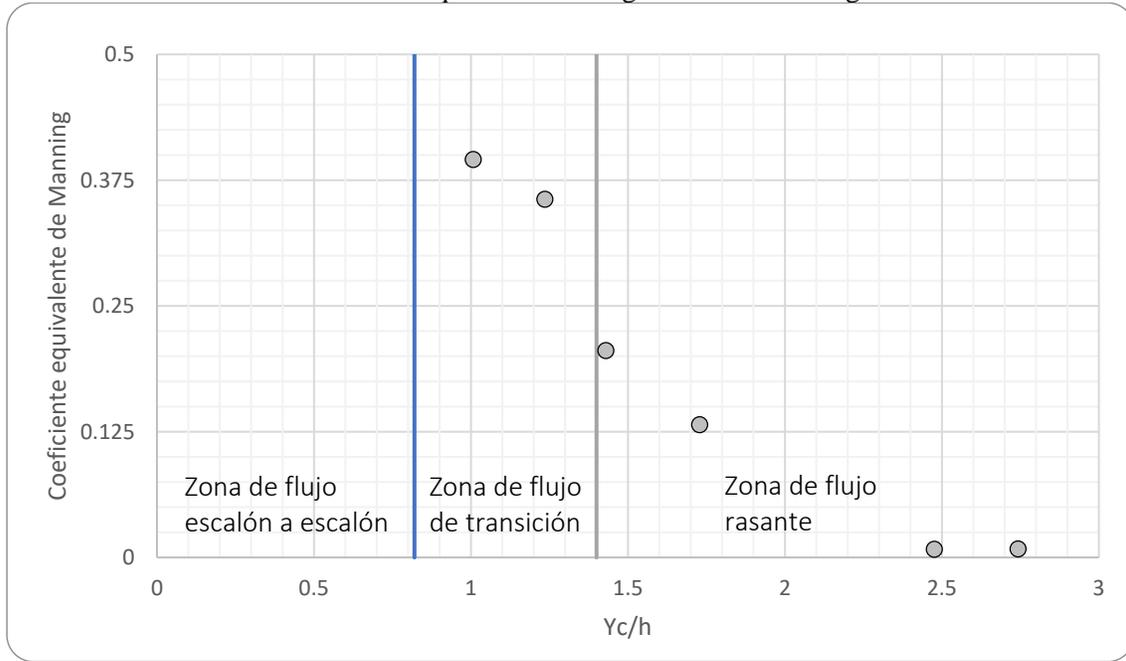


En la Tabla 32 y en la Ilustración 36 se presentan los coeficientes equivalentes de rugosidad de Manning para la estructura 1:5, en este caso se calculó el coeficiente en las tres zonas de flujo y se encontró un valor constante en la zona de flujo rasante de 0.01.

Tabla 32. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:5

Q	Yc/h	Tipo de flujo	Yn	n
m ³ /s	m	E, T, R	m	adm
0.00270	0.457	E	0.0216	0.313
0.00554	0.737	E	0.0367	0.345
0.00885	1.007	E	0.0551	0.395
0.01202	1.235	E	0.0633	0.356
0.01496	1.430	E	0.0505	0.206
0.01989	1.728	E	0.0454	0.132
0.02556	2.043	E	0.0565	0.142
0.03000	2.273	E	0.0681	0.158
0.03410	2.476	R	0.0108	0.008
0.03975	2.742	R	0.0121	0.008

Ilustración 36. Coeficiente equivalente de rugosidad de Manning. Estructura 1:5



En la Tabla 33 se resumen los coeficientes equivalentes de rugosidad de Manning, encontrados para cada estructura y en la Ilustración 37 se presenta la relación entre el coeficiente equivalente de Manning y la pendiente de la estructura, de la cual se obtiene la siguiente ecuación:

$$n_{eq} = 0.027 \ln S_o + 0.0563 \quad [65]$$

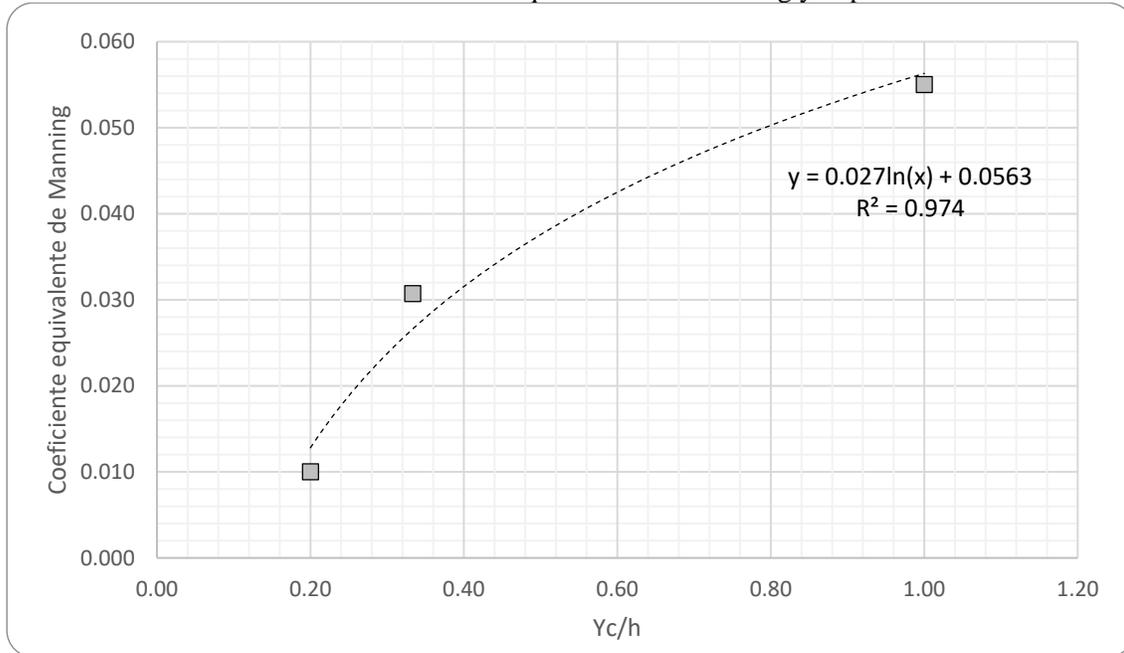
Donde

S_o es la pendiente de la estructura en m/m

Tabla 33. Coeficiente equivalente de Manning para cada estructura.

S_o	n
m/m	-
1.00	0.055
0.33	0.031
0.20	0.010

Ilustración 37. Relación entre el coeficiente equivalente de Manning y la pendiente de la estructura



Como resultado del trabajo anterior, se propone la siguiente metodología para el dimensionamiento de estructuras escalonadas con flujo rasante.

1. Definir la pendiente de la estructura con base en la topografía y el ancho en la base. La pendiente de la estructura debe estar entre 11.3° y 45° .
2. Establecer un valor para la huella, L , y la contrahuella, h , considerando la pendiente ya definida y la caída total de la estructura.
3. Verificar que el caudal de diseño se encuentra en la zona de flujo rasante, usando la siguiente ecuación:

$$\frac{y_c}{h} \geq 0.7692 \left(\frac{h}{L} \right)^{-0.357} \quad [66]$$

Donde

y_c es la profundidad crítica
 h es la altura de la contrahuella del escalón
 L es la longitud de la huella del escalón

4. Estimar el coeficiente equivalente de rugosidad de Manning, con la siguiente expresión:

$$n_{eq} = 0.027 \ln S_o + 0.0563 \quad [67]$$

Donde

S_o es la pendiente de la estructura en m/m

5. Calcular la profundidad de flujo en el extremo aguas arriba, y_c , y en el extremo aguas abajo, y_n , utilizando las ecuaciones de flujo crítico y uniforme, respectivamente.

- Flujo crítico

$$y_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g/\alpha}} \quad [68]$$

- Flujo uniforme
(Ecuación de Manning)

$$Q = \frac{1}{n_{eq.}} AR^{2/3} S^{1/2} \quad [69]$$

6. Calcular la altura de la estructura, considerando un borde libre, de acuerdo con las recomendaciones de la literatura.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El flujo en estructuras escalonadas presenta dos comportamientos principales: escalón a escalón y rasante, para caudales extremos mínimos y máximos, respectivamente. Para valores intermedios de caudal, el flujo presenta un comportamiento combinado de ambos flujos, denominado flujo de transición.

En el caso de caudales extremos mínimos, el flujo escalón a escalón se caracteriza por la presencia de una caída libre al final de cada escalón, que impacta en la huella del siguiente escalón. Debajo del chorro de descarga se presenta un volumen de aire. Generalmente, en el primer escalón se presenta un perfil de flujo gradualmente variado H2, cuando el escalón es horizontal, y debido a la caída libre hacia el siguiente escalón, el flujo se acelera y cambia a estado supercrítico, desarrollando un perfil de flujo H3 en el siguiente escalón; de ahí en adelante el perfil H3 se presenta en todos los escalones.

En el caso contrario, de caudales extremos máximos se presenta el flujo rasante que se caracteriza por la presencia de altas velocidades de flujo, que hacen que el flujo tenga una trayectoria aproximadamente recta, sobre la línea imaginaria que une los vértices de los escalones, (pseudo-fondo); por debajo de este pseudo fondo se presenta un flujo circulatorio completamente sumergido, es decir, que no existe el volumen de aire del flujo escalón a escalón.

El perfil del flujo rasante tiene un comportamiento similar al del flujo gradualmente variado en un canal de pendiente alta. Al inicio de la estructura, normalmente, al final del primer escalón, se presenta la profundidad crítica y a medida que el perfil avanza en la dirección del flujo, éste se acelera hasta alcanzar una condición similar a la del flujo uniforme.

Es importante resaltar que no siempre la superficie libre del flujo rasante es recta y paralela al pseudo fondo, como se reporta en la literatura. Por el contrario, a medida que disminuye la pendiente de la estructura, cuando la longitud del escalón es mucho mayor que la altura de la contrahuella, el flujo rasante presenta una superficie libre ondulada, sin embargo, el flujo sigue alcanzado una condición similar a la del flujo uniforme. En estas estructuras de pendiente pequeña es posible conseguir que la superficie libre sea recta y paralela al pseudo fondo solo para valores extremadamente grandes de caudal.

Para valores medios de caudal se presenta un flujo de transición entre el flujo escalón a escalón y el flujo rasante. Su comportamiento es muy parecido al del flujo rasante, excepto porque, como el flujo escalón a escalón, presenta un volumen de aire, en este caso debajo del pseudo-fondo. En el caso de la estructura con pendiente de 45° , todos los flujos de transición observados describían una trayectoria recta como el flujo rasante, mientras que para la estructura con pendiente de 11.3° , se describía una trayectoria ondulada.

Con el propósito de predecir el comportamiento que tendrá el flujo en una estructura escalonada, se han planteado dos expresiones para determinar el límite de caudal por encima del cual el flujo tendrá un comportamiento de flujo rasante (caudales máximos) y el límite por debajo del cual el flujo tendrá un comportamiento de flujo escalón a escalón (caudales mínimos); para caudales intermedios, el comportamiento del flujo será de transición y estará fuertemente condicionado por la pendiente de la estructura.

En cuanto a la eficiencia de la estructura, definida como su capacidad para disipar energía, se observó que, para caudales mínimos, resulta más eficiente la estructura de menor pendiente, ya que, al tener la mayor longitud de las huellas, permite el adecuado desarrollo del flujo escalón a escalón. En el caso de caudales máximos, es más eficiente la estructura de mayor pendiente, debido a que en esta la superficie libre es recta y paralela al pseudo fondo y así permite alcanzar la condición de flujo casi uniforme más

rápido que en las otras estructuras. Esto se comprobó comparando la energía disipada por las tres estructuras para los mismos caudales.

La metodología de diseño de estructuras escalonadas propuesta consiste en, conocida la pendiente y el caudal unitario, predecir el tipo flujo que se va a desarrollar en la estructura y estimar las profundidades de flujo máxima y mínima del perfil de flujo en una estructura con flujo rasante. Para definir la pendiente de la estructura (relación h/L) se sugiere un procedimiento de tanteo, en el que se tenga en cuenta la topografía de la zona del proyecto y el espacio disponible. Es importante resaltar que esta metodología es válida para el diseño de estructuras con pendientes dentro del rango de pendientes estudiadas en esta investigación ($18.4^\circ - 45^\circ$).

En esta metodología de diseño se da un tratamiento al flujo en estructuras escalonadas haciendo una semejanza con el flujo gradualmente variado desarrollado en un canal rugoso y de alta pendiente. Para esto, se evaluó un coeficiente de rugosidad de la estructura equivalente al coeficiente de rugosidad de Manning y se propone una ecuación para su cálculo en función de la pendiente de la estructura.

Los modelos físicos se construyeron en acrílico, material geoméricamente semejante al concreto si se considera el modelo a una escala 1:12,5. Resulta interesante, sobre la definición de flujo rasante, evaluar el efecto de la rugosidad del material modelo sobre el comportamiento del flujo.

9. PROPUESTAS DE INVESTIGACIONES FUTURAS

- Validar la aplicación de las ecuaciones plateadas y la metodología de diseño propuesta para estructuras de diferentes pendientes, particularmente una pendiente de 0.6 m/m, que correspondería a una estructura 1:1,7. Esta pendiente es clave para validar los resultados de la investigación realizada.
- Estudiar el efecto del cambio del material de la estructura en el comportamiento del flujo, los límites entre zonas de flujo, la eficiencia de disipación de energía y la metodología de diseño propuesta.
- Estudiar el efecto de la pendiente de los escalones en el comportamiento del flujo, los límites entre zonas de flujo, la eficiencia de disipación de energía y la metodología de diseño propuesta.
- Con base en la metodología de diseño propuesta, avanzar en el estudio del número mínimo de escalones necesarios para alcanzar la condición de flujo uniforme.
- Realizar la modelación numérica del flujo en estructuras escalonadas, de modo que permita evaluar más geometrías y materiales de la estructura. Para su calibración es necesario utilizar los resultados de la modelación física.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Cantillo, G. R. (2017). *Metodología para el diseño de canales escalonados, disipadores de energía, empleados en drenaje urbano, basada en modelación física*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Carvalho, R., & Martins, R. (2009). Stepped spillway with Hydraulic Jumps: Application of a numerical model to a scale model of a conceptual Prototype. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Chanson, H., & Toombes, L. (2002). Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. *Department of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane QLD*, 145-156.
- Chanson. (1994). Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulic Research*.
- Chanson, H. (2004). *The Hydraulics of open channel flow: An Introduction*. Great Britain: Elsevier.
- Chen, Q., & Liu, H. (2009). Volume of fluid model turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Chow. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Santa Fé de Bogotá: McGraw Hill.
- Christodouiou, G. (1993). Energy dissipation on stepped spillways. *Journal of hydraulic engineering*.
- Drummond Ltd. (2012). *Capítulo II. Estudio de Desviación definitiva del Arroyo el Zorro. Proyecto Carbonífero EL Descanso Zona Norte. Solicitud de Modificación de Licencia Ambiental*. Departamento del Cesar, Colombia.
- Felder, S., & Chanson, H. (2011). Energy dissipation down a stepped spillway with Nonuniform step heights. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Felder, S., & Chanson, H. (2011). Energy dissipation down a stepped spillway with nonuniform step heights. *Journal of hydraulic engineering*.
- Gonzalez, C., & Chanson, H. (2007). Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators for Embankment Dams. *Dam Engineering*, 233-244.
- Khatsuria. (2005). *Hydraulics of spillways and energy dissipators*. New York: Marcel Dekker.

- Meireles, I., Renna, F., Matos, J., & Bombardelli, F. (2012). Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over roller compacted concrete dams. *Journal of Hydraulic Engineering* , 870-877.
- Ohtsu, I., & Yasuda , Y. (1997). Characteristics of flows conditions on stepped channels. In 27th IARH Biennial Congress. 9.
- Ohtsu, I; Yasuda, Y; Takahashi. (2004). Flow Characteristics of skimming flows in stepped channels. *Journal of hydraulic engineering*, 860-869.
- Pegram, G., & Andrew, K. (1999). Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, 500-510.
- Peng, Y., Zhang, M., & Bail, Z. (2017). Three - Dimensional Turbulence Simulation of flow in a V-Shaped Spillway. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- R, S. (1985). Steep spillway hydraulic model investigation. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Rajaratnam. (1990). Skimming Flow in Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, , 587-591.
- Robert, M., & Sorensen . (1985). Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation. *J. Hydraulic Eng*, 1462-1472.
- Wu, J.-h., Zhang, B., & Ma, F. (2013). Inception point of air entrainment over stepped spillways. *Journal of Hydrodynamics*, 91-96.
- Yang. (2012). Discussion of " Depth- Averaged Shear Stress and Velocity in Open Channel Flows . *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Zhang, G., & Chanson, H. (2016). Gabion stepped spillway: Interactions between Free- Surface, Cavity, and Seepage Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*.

11. ANEXOS

11.1. Anexo de cálculos

A continuación, se presentan los parámetros de flujo y geométricos de los caudales evaluados, el cálculo resumido de la energía en cada escalón de la estructura, utilizando la profundidad más aguas abajo de cada escalón, el perfil de flujo y la línea de energía utilizando todas las mediciones y el cálculo de la energía total disipada por la estructura.

11.1.1. Estructura escalonada con pendiente 1:1

$Q = 4.38$ lps

Tabla 34. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ $Q = 4.38$ lps (T)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
4.38	0.00438	0.25	1	0.05	0.05	1	45	9.806

Tabla 35. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para $Q = 4.38$ lps (T)

Escalón	Abscisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.05	0.0230	0.0163	0.0115	0.0041	1.0773	0.0592	0.0707
2	0.10	0.0320	0.0226	0.0160	0.0057	0.7743	0.0306	0.0466
3	0.15	0.0220	0.0156	0.0110	0.0039	1.1262	0.0647	0.0757
4	0.20	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	0.8849	0.0399	0.0539
5	0.25	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	0.8259	0.0348	0.0498
6	0.30	0.0290	0.0205	0.0145	0.0051	0.8544	0.0372	0.0517
7	0.35	0.0290	0.0205	0.0145	0.0051	0.8544	0.0372	0.0517
8	0.40	0.0330	0.0233	0.0165	0.0058	0.7508	0.0287	0.0452
9	0.45	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	0.8259	0.0348	0.0498
10	0.50	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	0.8259	0.0348	0.0498
11	0.55	0.0290	0.0205	0.0145	0.0051	0.8544	0.0372	0.0517
12	0.60	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	0.8259	0.0348	0.0498
13	0.65	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	0.8849	0.0399	0.0539
14	0.70	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	0.8259	0.0348	0.0498
15	0.75	0.0310	0.0219	0.0155	0.0055	0.7993	0.0326	0.0481
16	0.80	0.0330	0.0233	0.0165	0.0058	0.7508	0.0287	0.0452
17	0.85	0.0310	0.0219	0.0155	0.0055	0.7993	0.0326	0.0481
18	0.90	0.0290	0.0205	0.0145	0.0051	0.8544	0.0372	0.0517
19	0.95	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	0.8849	0.0399	0.0539
20	1.00	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	0.8849	0.0399	0.0539

Ilustración 38. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 4.38 lps (T)

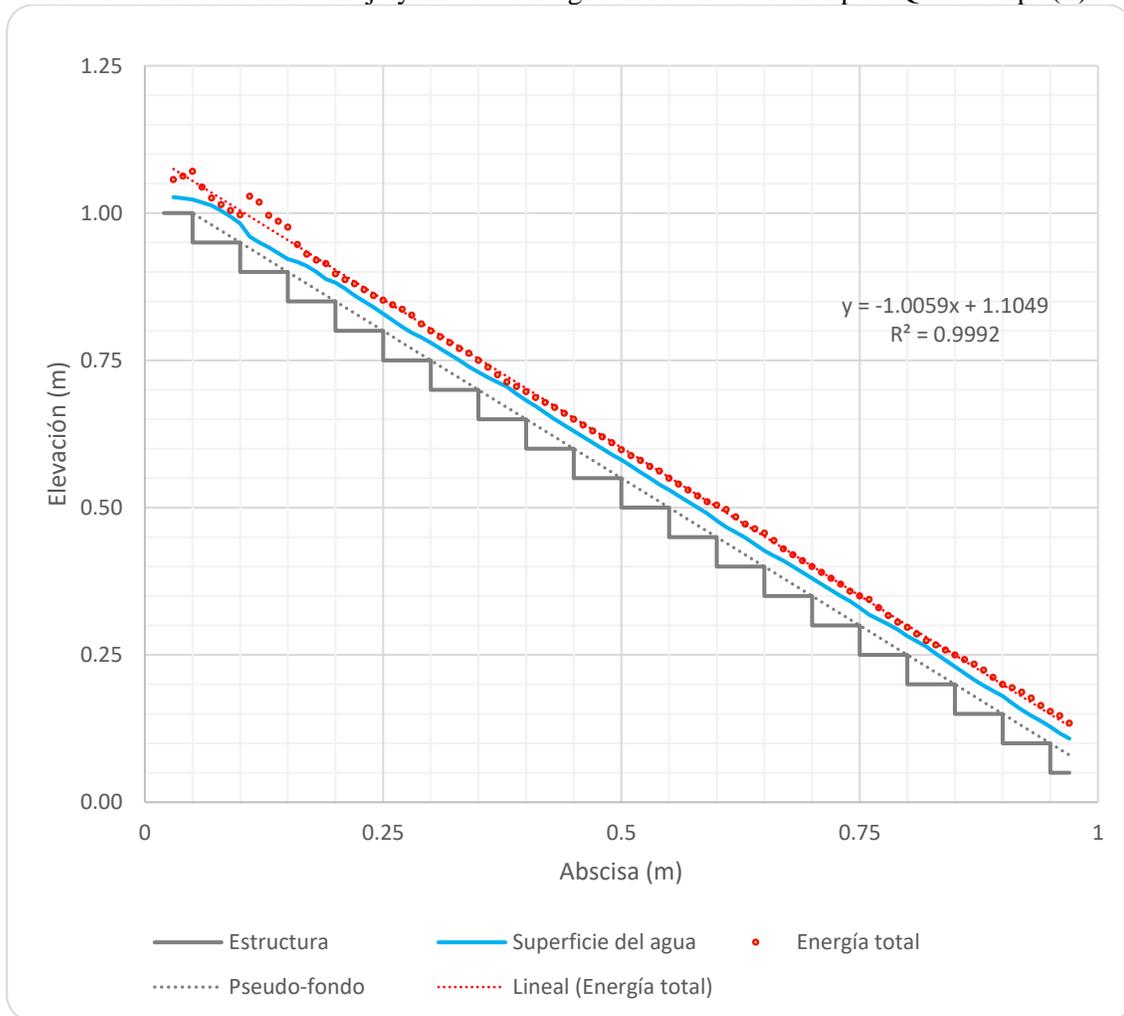


Tabla 36. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 4.38 lps (T)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.02	1.06	0.93	87.77
20	0.97	0.13		

Q = 6.00 lps

Tabla 37. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 6.00 lps (T)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
6.00	0.006	0.25	1	0.05	0.05	1	45	9.806

Tabla 38. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 6.00 lps (T)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.05	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	1.1314	0.0653	0.0803
2	0.10	0.0440	0.0311	0.0220	0.0078	0.7714	0.0303	0.0523
3	0.15	0.0290	0.0205	0.0145	0.0051	1.1704	0.0698	0.0843
4	0.20	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	1.2122	0.0749	0.0889
5	0.25	0.0250	0.0177	0.0125	0.0044	1.3576	0.0940	0.1065
6	0.30	0.0290	0.0205	0.0145	0.0051	1.1704	0.0698	0.0843
7	0.35	0.0340	0.0240	0.0170	0.0060	0.9983	0.0508	0.0678
8	0.40	0.0310	0.0219	0.0155	0.0055	1.0949	0.0611	0.0766
9	0.45	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	1.2122	0.0749	0.0889
10	0.50	0.0260	0.0184	0.0130	0.0046	1.3054	0.0869	0.0999
11	0.55	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	1.1314	0.0653	0.0803
12	0.60	0.0310	0.0219	0.0155	0.0055	1.0949	0.0611	0.0766
13	0.65	0.0310	0.0219	0.0155	0.0055	1.0949	0.0611	0.0766
14	0.70	0.0320	0.0226	0.0160	0.0057	1.0607	0.0574	0.0734
15	0.75	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	1.1314	0.0653	0.0803
16	0.80	0.0330	0.0233	0.0165	0.0058	1.0285	0.0539	0.0704
17	0.85	0.0310	0.0219	0.0155	0.0055	1.0949	0.0611	0.0766
18	0.90	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	1.2122	0.0749	0.0889
19	0.95	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	1.2122	0.0749	0.0889
20	1.00	0.0250	0.0177	0.0125	0.0044	1.3576	0.0940	0.1065

Ilustración 39. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 6.00 lps (T)

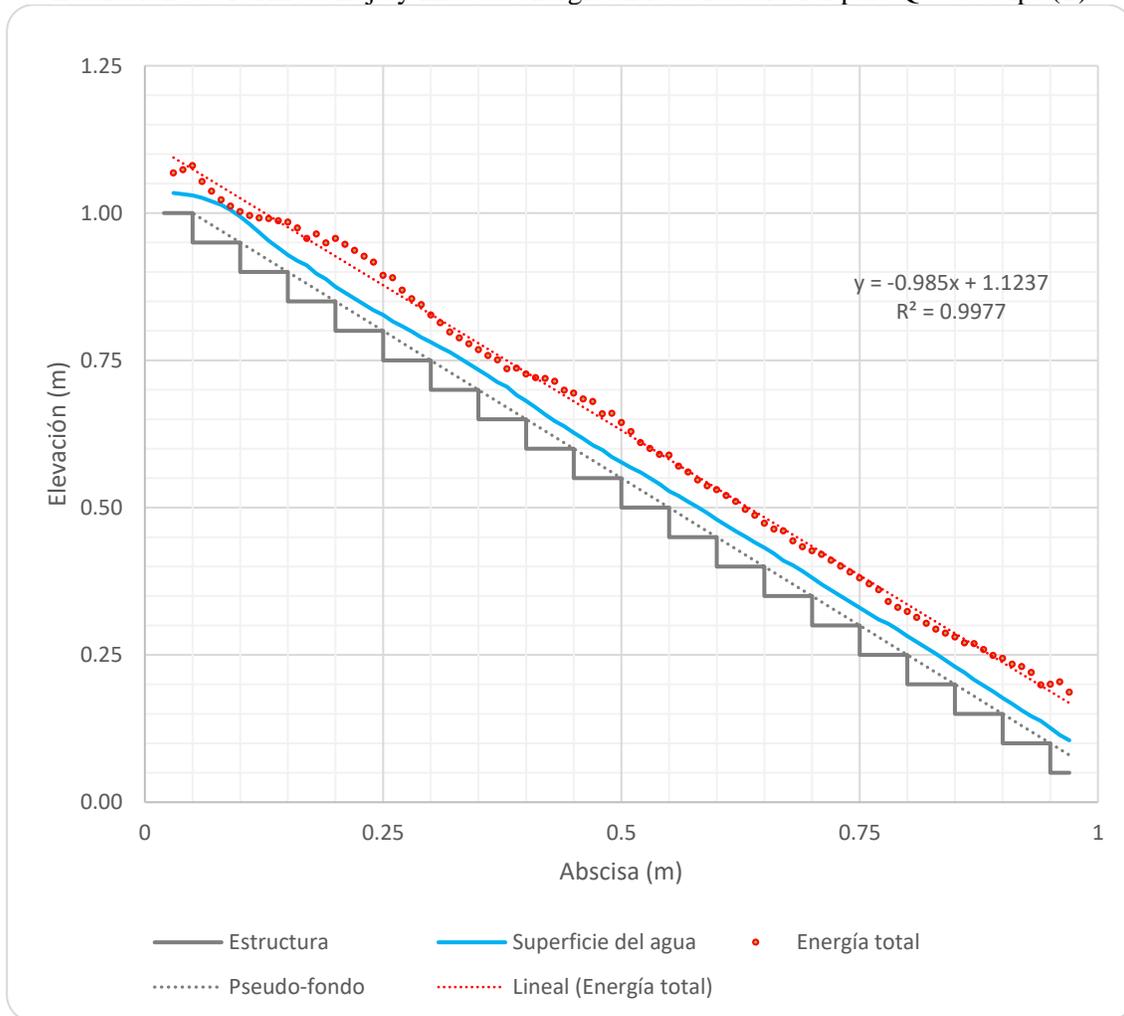


Tabla 39. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 6.00 lps (T)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.02	1.07	0.90	84.24
20	0.97	0.17		

Q = 6.39 lps

Tabla 40. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 6.39 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
6.39	0.00639	0.25	1	0.05	0.05	1	45	9.806

Tabla 41. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 6.39 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.05	0.0310	0.0219	0.0155	0.0055	1.1660	0.0693	0.0848
2	0.10	0.0450	0.0318	0.0225	0.0080	0.8033	0.0329	0.0554
3	0.15	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	1.2910	0.0850	0.0990
4	0.20	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	1.2910	0.0850	0.0990
5	0.25	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	1.2049	0.0740	0.0890
6	0.30	0.0280	0.0198	0.0140	0.0049	1.2910	0.0850	0.0990
7	0.35	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	1.2049	0.0740	0.0890
8	0.40	0.0350	0.0247	0.0175	0.0062	1.0328	0.0544	0.0719
9	0.45	0.0270	0.0191	0.0135	0.0048	1.3388	0.0914	0.1049
10	0.50	0.0290	0.0205	0.0145	0.0051	1.2465	0.0792	0.0937
11	0.55	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	1.2049	0.0740	0.0890
12	0.60	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	1.2049	0.0740	0.0890
13	0.65	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	1.2049	0.0740	0.0890
14	0.70	0.0300	0.0212	0.0150	0.0053	1.2049	0.0740	0.0890
15	0.75	0.0290	0.0205	0.0145	0.0051	1.2465	0.0792	0.0937
16	0.80	0.0330	0.0233	0.0165	0.0058	1.0954	0.0612	0.0777
17	0.85	0.0330	0.0233	0.0165	0.0058	1.0954	0.0612	0.0777
18	0.90	0.0330	0.0233	0.0165	0.0058	1.0954	0.0612	0.0777
19	0.95	0.0350	0.0247	0.0175	0.0062	1.0328	0.0544	0.0719
20	1.00	0.0380	0.0269	0.0190	0.0067	0.9512	0.0461	0.0651

Ilustración 40. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 6.39 lps (R)

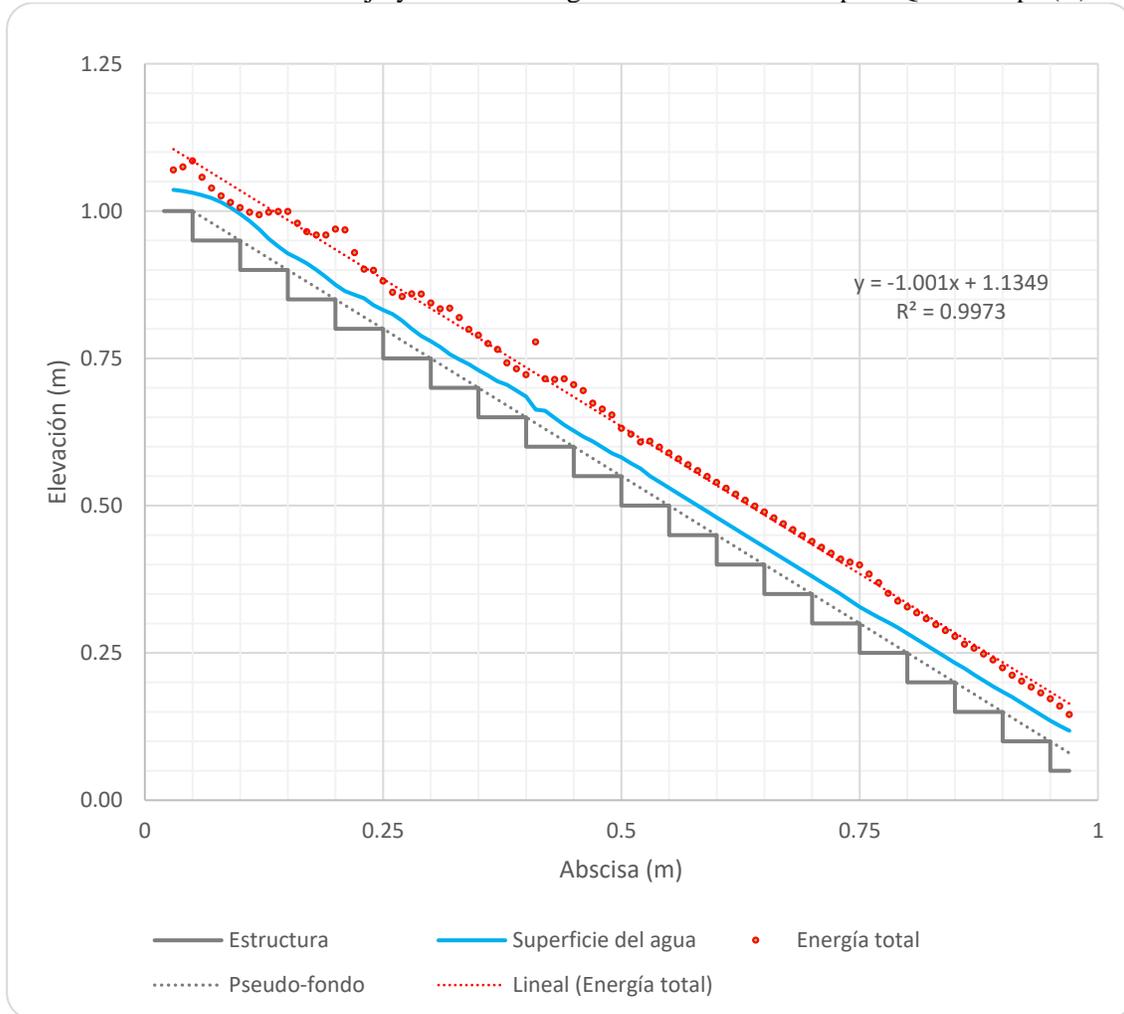


Tabla 42. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 6.39 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.02	1.07	0.91	84.67
20	0.97	0.16		

Q = 9.69 lps

Tabla 43. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 9.69 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
9.69	0.00969	0.25	1	0.05	0.05	1	45	9.806

Tabla 44. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 9.69 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.05	0.0390	0.0276	0.0195	0.0069	1.4055	0.1007	0.1202
2	0.10	0.0600	0.0424	0.0300	0.0106	0.9136	0.0426	0.0726
3	0.15	0.0410	0.0290	0.0205	0.0072	1.3369	0.0911	0.1116
4	0.20	0.0400	0.0283	0.0200	0.0071	1.3704	0.0958	0.1158
5	0.25	0.0400	0.0283	0.0200	0.0071	1.3704	0.0958	0.1158
6	0.30	0.0430	0.0304	0.0215	0.0076	1.2748	0.0829	0.1044
7	0.35	0.0430	0.0304	0.0215	0.0076	1.2748	0.0829	0.1044
8	0.40	0.0420	0.0297	0.0210	0.0074	1.3051	0.0869	0.1079
9	0.45	0.0380	0.0269	0.0190	0.0067	1.4425	0.1061	0.1251
10	0.50	0.0370	0.0262	0.0185	0.0065	1.4815	0.1119	0.1304
11	0.55	0.0340	0.0240	0.0170	0.0060	1.6122	0.1325	0.1495
12	0.60	0.0380	0.0269	0.0190	0.0067	1.4425	0.1061	0.1251
13	0.65	0.0380	0.0269	0.0190	0.0067	1.4425	0.1061	0.1251
14	0.70	0.0370	0.0262	0.0185	0.0065	1.4815	0.1119	0.1304
15	0.75	0.0380	0.0269	0.0190	0.0067	1.4425	0.1061	0.1251
16	0.80	0.0400	0.0283	0.0200	0.0071	1.3704	0.0958	0.1158
17	0.85	0.0380	0.0269	0.0190	0.0067	1.4425	0.1061	0.1251
18	0.90	0.0380	0.0269	0.0190	0.0067	1.4425	0.1061	0.1251
19	0.95	0.0380	0.0269	0.0190	0.0067	1.4425	0.1061	0.1251
20	1.00	0.0350	0.0247	0.0175	0.0062	1.5661	0.1251	0.1426

Ilustración 41. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 9.69 lps (R)

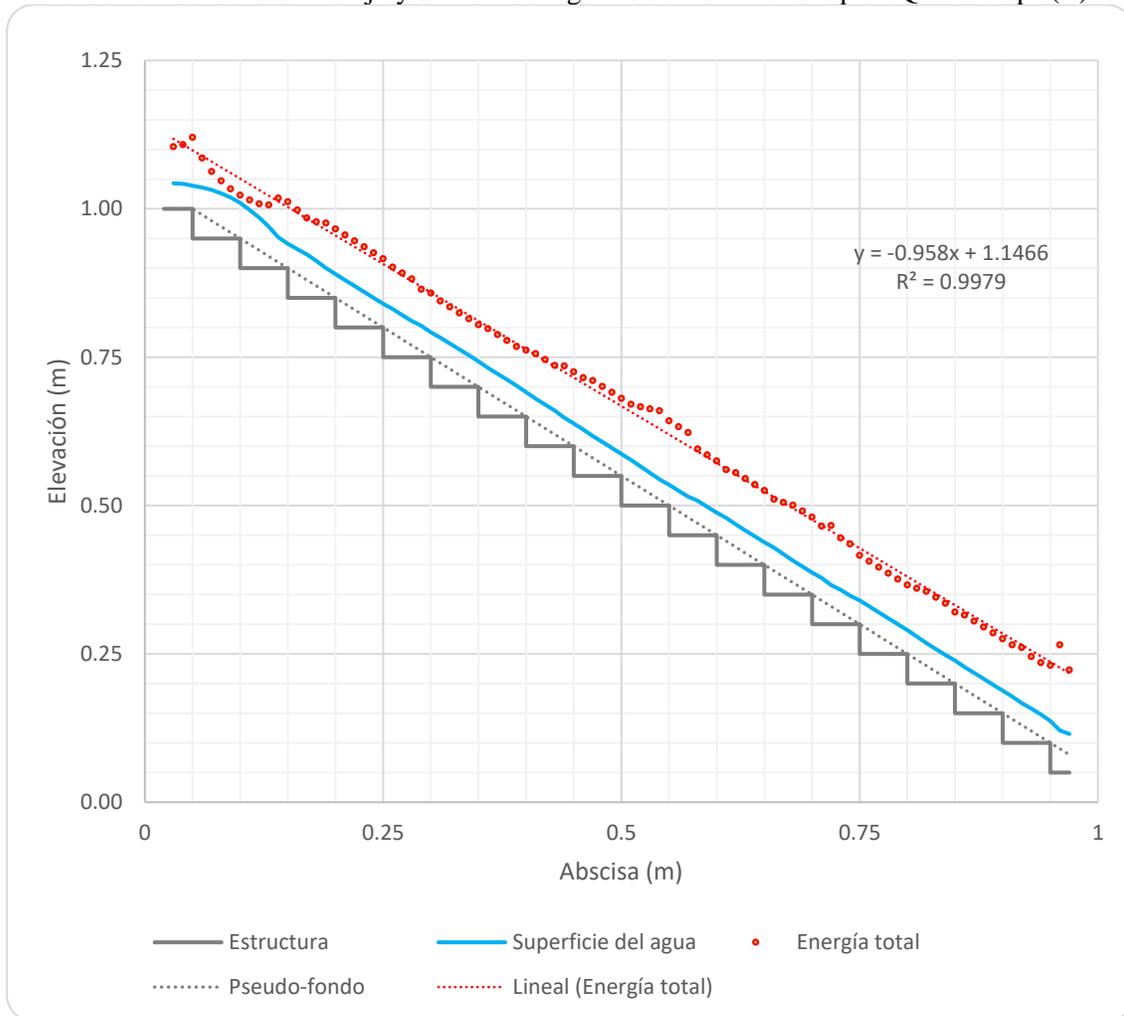


Tabla 45. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 9.69 lps (R)

Escalón N.	Abscisa m	H m	Δe	
			m	%
1	0.02	1.10	0.89	80.32
20	0.97	0.22		

Q = 20.63 lps

Tabla 46. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 20.63 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
20.63	0.02063	0.25	1	0.05	0.05	1	45	9.806

Tabla 47. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 20.63 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.05	0.0620	0.0438	0.0310	0.0110	1.8823	0.1807	0.2117
2	0.10	0.0860	0.0608	0.0430	0.0152	1.3570	0.0939	0.1369
3	0.15	0.0950	0.0672	0.0475	0.0168	1.2284	0.0769	0.1244
4	0.20	0.0810	0.0573	0.0405	0.0143	1.4408	0.1058	0.1463
5	0.25	0.0700	0.0495	0.0350	0.0124	1.6672	0.1417	0.1767
6	0.30	0.0680	0.0481	0.0340	0.0120	1.7162	0.1502	0.1842
7	0.35	0.0650	0.0460	0.0325	0.0115	1.7954	0.1644	0.1969
8	0.40	0.0660	0.0467	0.0330	0.0117	1.7682	0.1594	0.1924
9	0.45	0.0690	0.0488	0.0345	0.0122	1.6913	0.1459	0.1804
10	0.50	0.0690	0.0488	0.0345	0.0122	1.6913	0.1459	0.1804
11	0.55	0.0710	0.0502	0.0355	0.0126	1.6437	0.1378	0.1733
12	0.60	0.0650	0.0460	0.0325	0.0115	1.7954	0.1644	0.1969
13	0.65	0.0610	0.0431	0.0305	0.0108	1.9131	0.1866	0.2171
14	0.70	0.0590	0.0417	0.0295	0.0104	1.9780	0.1995	0.2290
15	0.75	0.0590	0.0417	0.0295	0.0104	1.9780	0.1995	0.2290
16	0.80	0.0630	0.0445	0.0315	0.0111	1.8524	0.1750	0.2065
17	0.85	0.0600	0.0424	0.0300	0.0106	1.9450	0.1929	0.2229
18	0.90	0.0600	0.0424	0.0300	0.0106	1.9450	0.1929	0.2229
19	0.95	0.0600	0.0424	0.0300	0.0106	1.9450	0.1929	0.2229
20	1.00	0.0620	0.0438	0.0310	0.0110	1.8823	0.1807	0.2117

Ilustración 42. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 20.63 lps (R)

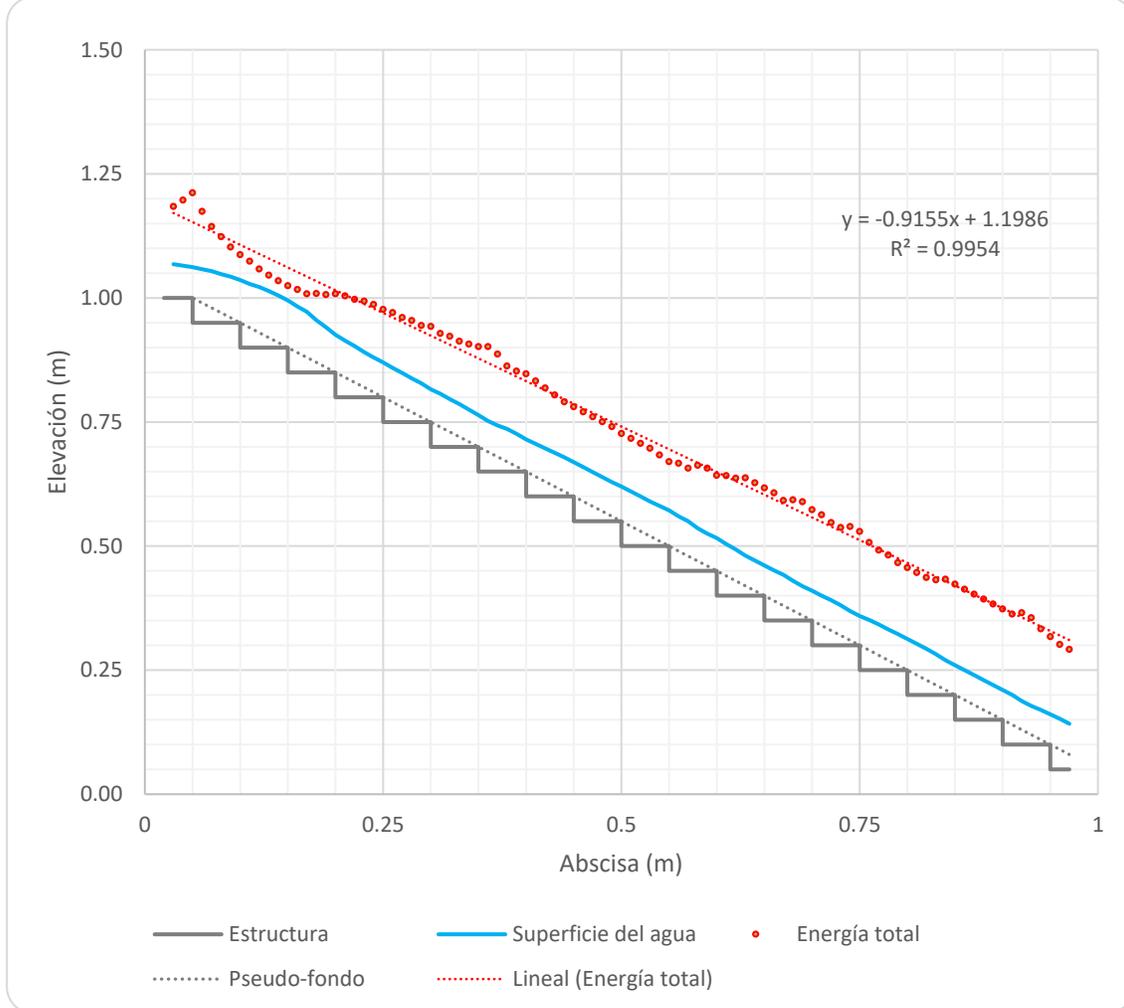


Tabla 48. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 20.63 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.02	1.18	0.87	73.77
20	0.97	0.31		

Q = 24.84 lps

Tabla 49. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 24.84 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
24.84	0.02484	0.25	1	0.05	0.05	1	45	9.806

Tabla 50. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 24.84 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.05	0.0710	0.0502	0.0355	0.0126	1.9791	0.1997	0.2352
2	0.10	0.0990	0.0700	0.0495	0.0175	1.4194	0.1027	0.1522
3	0.15	0.1080	0.0764	0.0540	0.0191	1.3011	0.0863	0.1403
4	0.20	0.1090	0.0771	0.0545	0.0193	1.2891	0.0847	0.1392
5	0.25	0.0850	0.0601	0.0425	0.0150	1.6531	0.1393	0.1818
6	0.30	0.0690	0.0488	0.0345	0.0122	2.0365	0.2115	0.2460
7	0.35	0.0680	0.0481	0.0340	0.0120	2.0664	0.2177	0.2517
8	0.40	0.0660	0.0467	0.0330	0.0117	2.1290	0.2311	0.2641
9	0.45	0.0680	0.0481	0.0340	0.0120	2.0664	0.2177	0.2517
10	0.50	0.0700	0.0495	0.0350	0.0124	2.0074	0.2055	0.2405
11	0.55	0.0720	0.0509	0.0360	0.0127	1.9516	0.1942	0.2302
12	0.60	0.0720	0.0509	0.0360	0.0127	1.9516	0.1942	0.2302
13	0.65	0.0740	0.0523	0.0370	0.0131	1.8989	0.1839	0.2209
14	0.70	0.0720	0.0509	0.0360	0.0127	1.9516	0.1942	0.2302
15	0.75	0.0680	0.0481	0.0340	0.0120	2.0664	0.2177	0.2517
16	0.80	0.0700	0.0495	0.0350	0.0124	2.0074	0.2055	0.2405
17	0.85	0.0730	0.0516	0.0365	0.0129	1.9249	0.1889	0.2254
18	0.90	0.0740	0.0523	0.0370	0.0131	1.8989	0.1839	0.2209
19	0.95	0.0740	0.0523	0.0370	0.0131	1.8989	0.1839	0.2209
20	1.00	0.0730	0.0516	0.0365	0.0129	1.9249	0.1889	0.2254

Ilustración 43. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 24.84 lps (R)

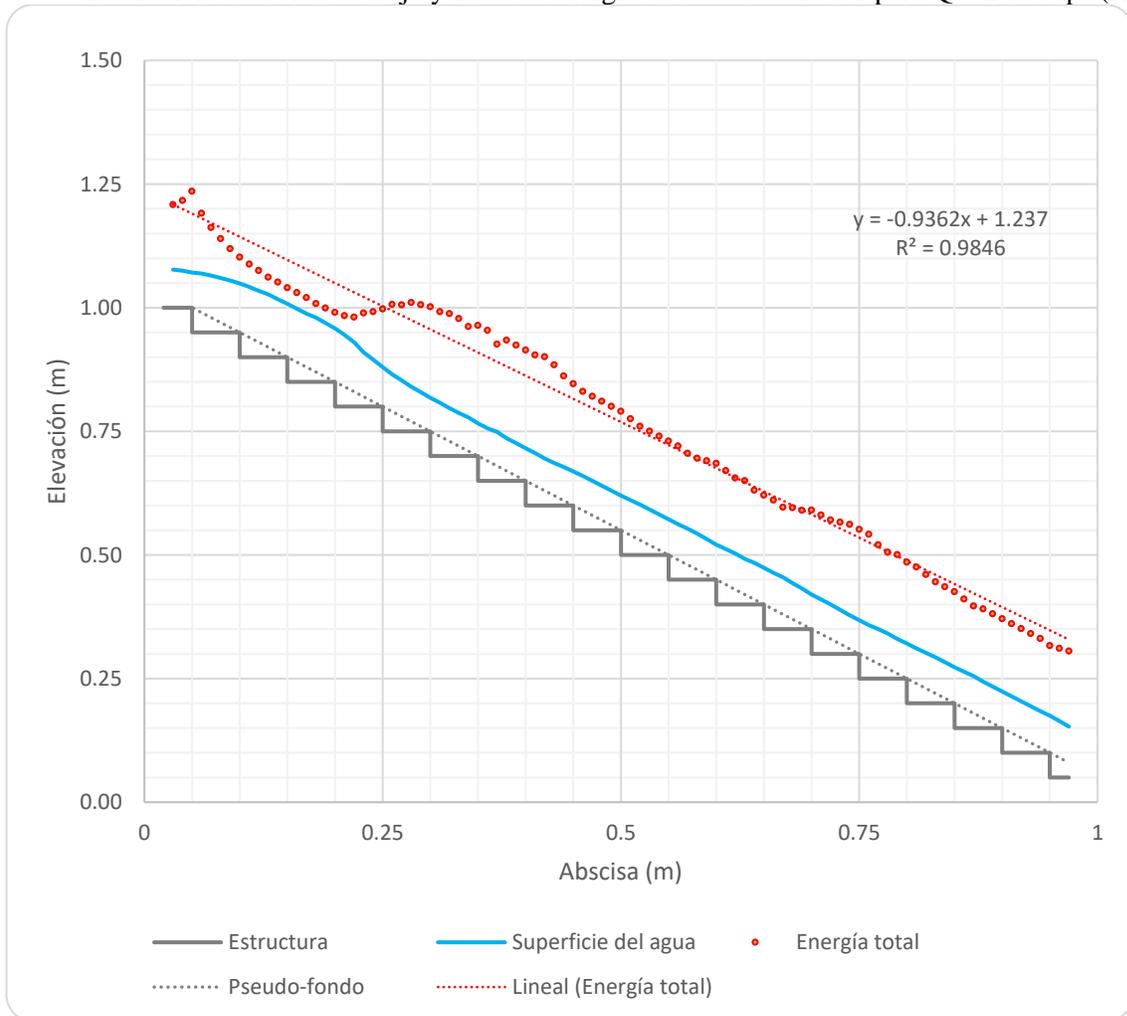


Tabla 51. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 24.84 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.02	1.21	0.88	72.78
20	0.97	0.33		

Q = 30.50 lps

Tabla 52. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 30.50 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
30.50	0.0305	0.25	1	0.05	0.05	1	45	9.806

Tabla 53. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 30.50 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.05	0.0840	0.0594	0.0420	0.0148	2.0540	0.2151	0.2571
2	0.10	0.1020	0.0721	0.0510	0.0180	1.6915	0.1459	0.1969
3	0.15	0.1300	0.0919	0.0650	0.0230	1.3272	0.0898	0.1548
4	0.20	0.1300	0.0919	0.0650	0.0230	1.3272	0.0898	0.1548
5	0.25	0.1180	0.0834	0.0590	0.0209	1.4622	0.1090	0.1680
6	0.30	0.0950	0.0672	0.0475	0.0168	1.8161	0.1682	0.2157
7	0.35	0.0820	0.0580	0.0410	0.0145	2.1041	0.2257	0.2667
8	0.40	0.0850	0.0601	0.0425	0.0150	2.0298	0.2101	0.2526
9	0.45	0.0830	0.0587	0.0415	0.0147	2.0787	0.2203	0.2618
10	0.50	0.0800	0.0566	0.0400	0.0141	2.1567	0.2372	0.2772
11	0.55	0.0800	0.0566	0.0400	0.0141	2.1567	0.2372	0.2772
12	0.60	0.0850	0.0601	0.0425	0.0150	2.0298	0.2101	0.2526
13	0.65	0.0820	0.0580	0.0410	0.0145	2.1041	0.2257	0.2667
14	0.70	0.0770	0.0544	0.0385	0.0136	2.2407	0.2560	0.2945
15	0.75	0.0740	0.0523	0.0370	0.0131	2.3315	0.2772	0.3142
16	0.80	0.0780	0.0552	0.0390	0.0138	2.2120	0.2495	0.2885
17	0.85	0.0780	0.0552	0.0390	0.0138	2.2120	0.2495	0.2885
18	0.90	0.0800	0.0566	0.0400	0.0141	2.1567	0.2372	0.2772
19	0.95	0.0810	0.0573	0.0405	0.0143	2.1301	0.2313	0.2718
20	1.00	0.0810	0.0573	0.0405	0.0143	2.1301	0.2313	0.2718

Ilustración 44. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 30.50 lps (R)

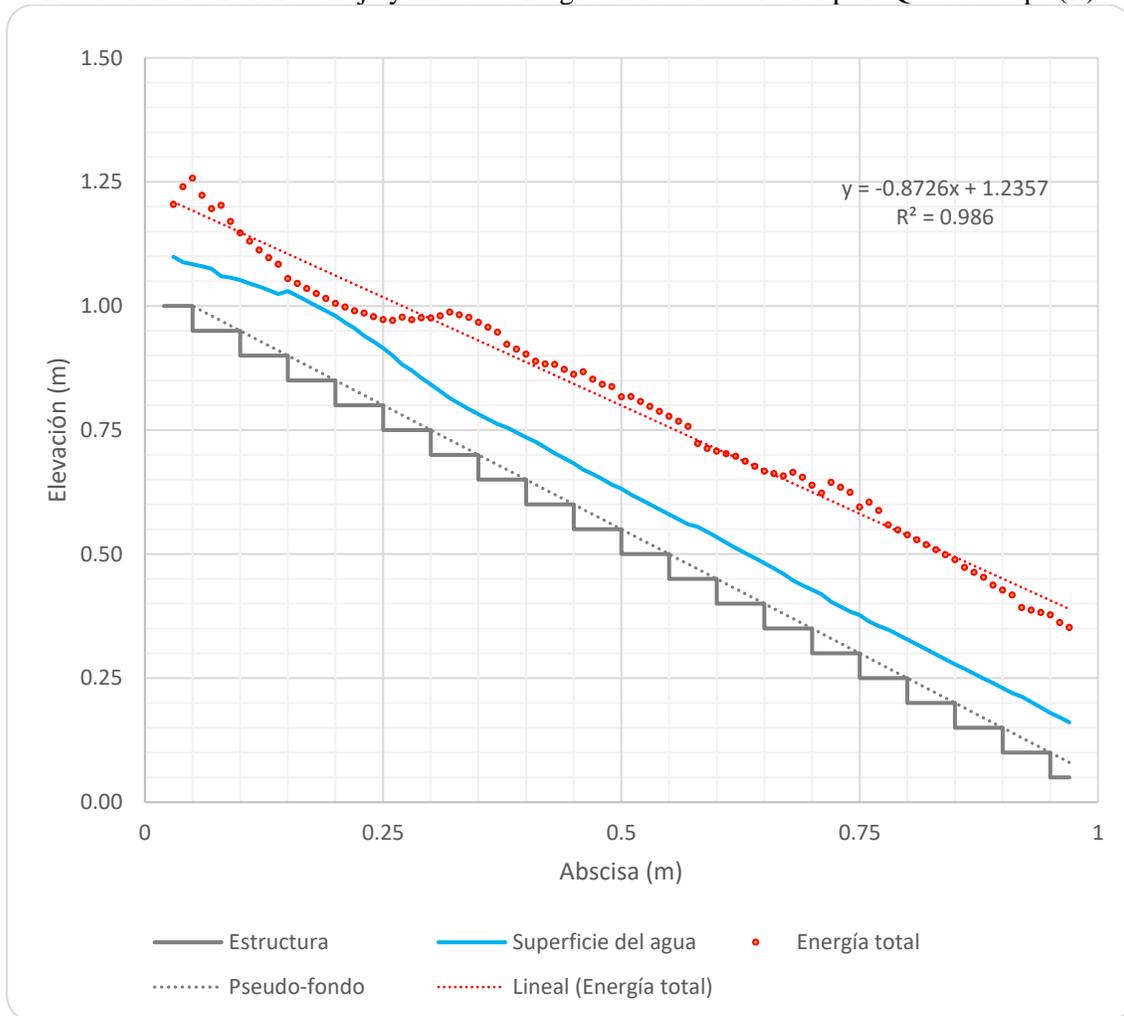


Tabla 54. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 30.50 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.02	1.20	0.82	67.68
20	0.97	0.39		

Q = 39.65 lps

Tabla 55. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:1 _ Q = 39.65 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
39.65	0.03965	0.25	1	0.05	0.05	1	45	9.806

Tabla 56. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:1 para Q = 39.65 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.05	0.1090	0.0771	0.0545	0.0193	2.0577	0.2159	0.2704
2	0.10	0.1350	0.0955	0.0675	0.0239	1.6614	0.1407	0.2082
3	0.15	0.1500	0.1061	0.0750	0.0265	1.4953	0.1140	0.1890
4	0.20	0.1600	0.1131	0.0800	0.0283	1.4018	0.1002	0.1802
5	0.25	0.1550	0.1096	0.0775	0.0274	1.4471	0.1068	0.1843
6	0.30	0.1350	0.0955	0.0675	0.0239	1.6614	0.1407	0.2082
7	0.35	0.1050	0.0742	0.0525	0.0186	2.1361	0.2327	0.2852
8	0.40	0.0960	0.0679	0.0480	0.0170	2.3364	0.2783	0.3263
9	0.45	0.0920	0.0651	0.0460	0.0163	2.4380	0.3031	0.3491
10	0.50	0.0920	0.0651	0.0460	0.0163	2.4380	0.3031	0.3491
11	0.55	0.0900	0.0636	0.0450	0.0159	2.4922	0.3167	0.3617
12	0.60	0.0900	0.0636	0.0450	0.0159	2.4922	0.3167	0.3617
13	0.65	0.0880	0.0622	0.0440	0.0156	2.5488	0.3312	0.3752
14	0.70	0.0860	0.0608	0.0430	0.0152	2.6081	0.3468	0.3898
15	0.75	0.0800	0.0566	0.0400	0.0141	2.8037	0.4008	0.4408
16	0.80	0.0810	0.0573	0.0405	0.0143	2.7691	0.3910	0.4315
17	0.85	0.0790	0.0559	0.0395	0.0140	2.8392	0.4110	0.4505
18	0.90	0.0750	0.0530	0.0375	0.0133	2.9906	0.4560	0.4935
19	0.95	0.0750	0.0530	0.0375	0.0133	2.9906	0.4560	0.4935
20	1.00	0.0760	0.0537	0.0380	0.0134	2.9512	0.4441	0.4821

Ilustración 45. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:1 para Q = 39.65 lps (R)

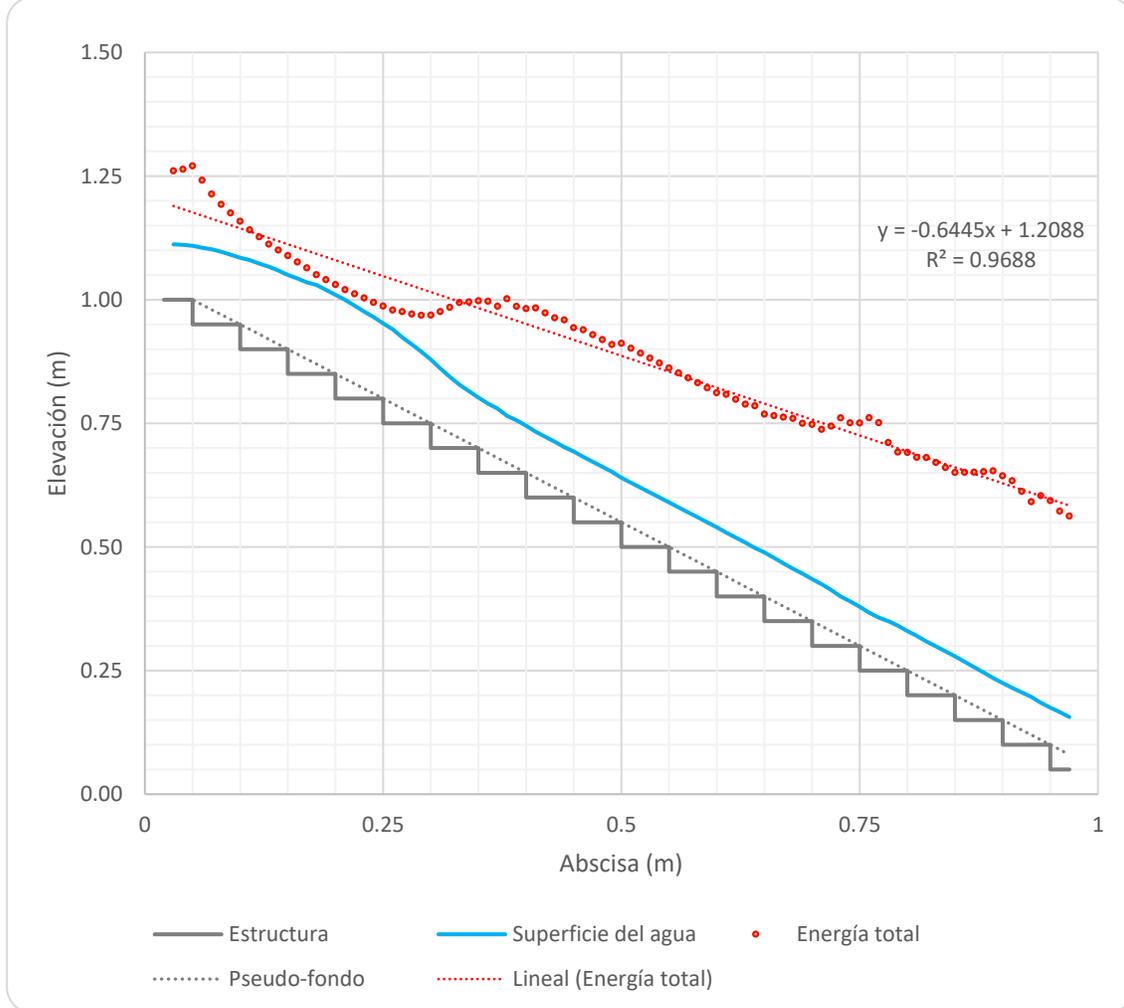


Tabla 57. Energía total disipada en la estructura 1:1 para Q = 39.65 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.02	1.26	0.68	53.70
20	0.97	0.58		

11.1.1. Estructura escalonada con pendiente 1:3

Q = 11.03 lps

Tabla 58. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 - Q = 11.03 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
11.03	0.01103	0.25	1	0.15	0.05	0.33	18	9.806

Tabla 59. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 11.03 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.15	0.0420	0.0398	0.0378	0.0100	1.1073	0.0625	0.1003
2	0.30	0.0300	0.0285	0.0270	0.0071	1.5502	0.1225	0.1495
3	0.45	0.0320	0.0304	0.0288	0.0076	1.4533	0.1077	0.1365
4	0.60	0.0320	0.0304	0.0288	0.0076	1.4533	0.1077	0.1365
5	0.75	0.0370	0.0351	0.0333	0.0088	1.2569	0.0806	0.1139
6	0.90	0.0300	0.0285	0.0270	0.0071	1.5502	0.1225	0.1495
7	1.05	0.0230	0.0218	0.0207	0.0055	2.0220	0.2085	0.2292
8	1.20	0.0260	0.0247	0.0234	0.0062	1.7887	0.1631	0.1865
9	1.35	0.0220	0.0209	0.0198	0.0052	2.1139	0.2279	0.2477
10	1.50	0.0230	0.0218	0.0207	0.0055	2.0220	0.2085	0.2292
11	1.65	0.0320	0.0304	0.0288	0.0076	1.4533	0.1077	0.1365
12	1.80	0.0230	0.0218	0.0207	0.0055	2.0220	0.2085	0.2292
13	1.95	0.0280	0.0266	0.0252	0.0066	1.6609	0.1407	0.1659
14	2.10	0.0270	0.0256	0.0243	0.0064	1.7225	0.1513	0.1756
15	2.25	0.0260	0.0247	0.0234	0.0062	1.7887	0.1631	0.1865
16	2.40	0.0220	0.0209	0.0198	0.0052	2.1139	0.2279	0.2477
17	2.55	0.0270	0.0256	0.0243	0.0064	1.7225	0.1513	0.1756
18	2.70	0.0280	0.0266	0.0252	0.0066	1.6609	0.1407	0.1659
19	2.85	0.0280	0.0266	0.0252	0.0066	1.6609	0.1407	0.1659
20	2.97	0.0150	0.0142	0.0135	0.0036	3.1004	0.4901	0.5036

Ilustración 46. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 11.03 lps (R)

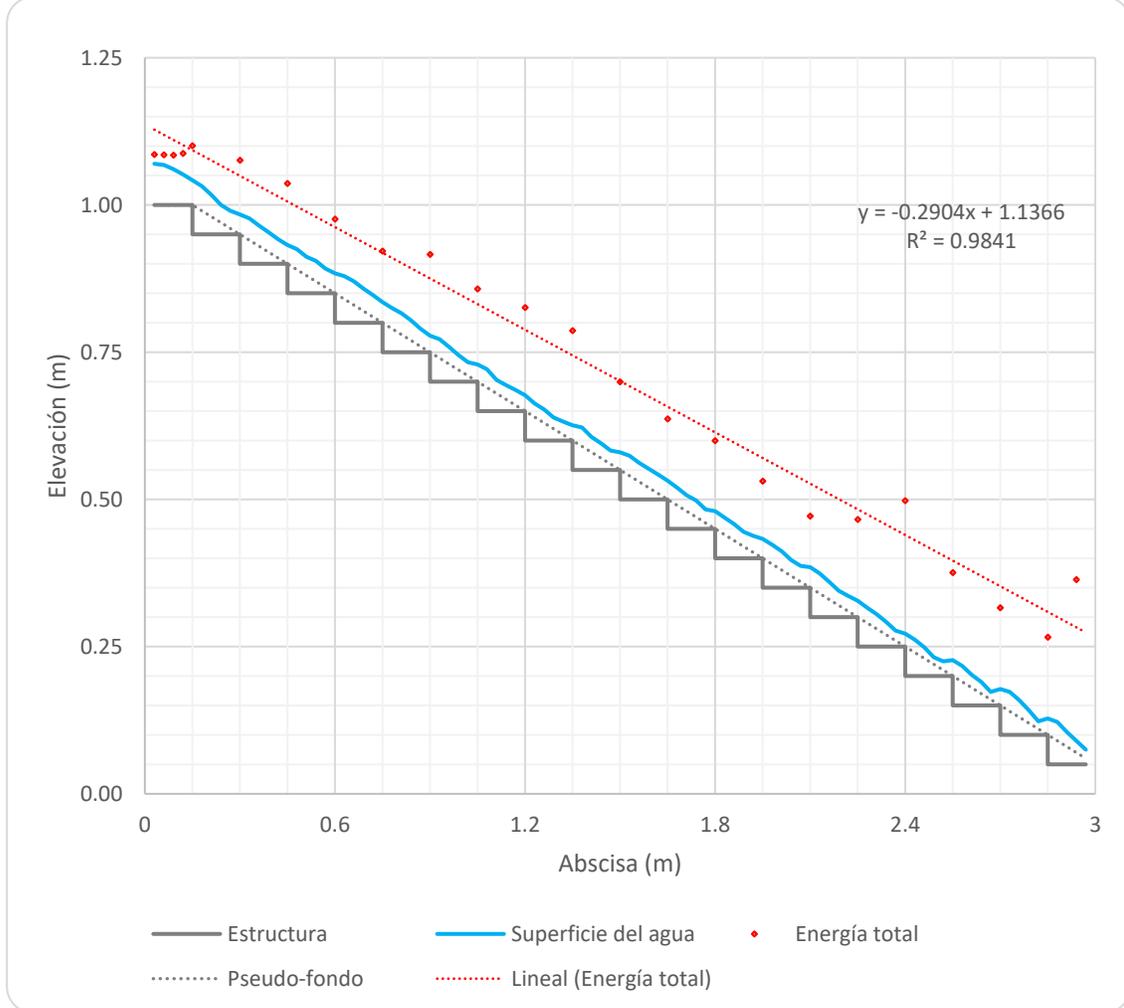


Tabla 60. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 11.03 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.01	1.09	0.81	74.75
20	2.97	0.27		

Q = 14.39 lps

Tabla 61. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 14.39 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
14.39	0.01439	0.25	1	0.15	0.05	0.33	18	9.806

Tabla 62. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 14.39 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.15	0.0540	0.0512	0.0486	0.0128	1.1236	0.0644	0.1130
2	0.30	0.0450	0.0427	0.0405	0.0107	1.3483	0.0927	0.1332
3	0.45	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.5168	0.1173	0.1533
4	0.60	0.0330	0.0313	0.0297	0.0078	1.8386	0.1724	0.2021
5	0.75	0.0420	0.0398	0.0378	0.0100	1.4446	0.1064	0.1442
6	0.90	0.0340	0.0323	0.0306	0.0081	1.7845	0.1624	0.1930
7	1.05	0.0480	0.0455	0.0432	0.0114	1.2640	0.0815	0.1247
8	1.20	0.0300	0.0285	0.0270	0.0071	2.0225	0.2086	0.2356
9	1.35	0.0470	0.0446	0.0423	0.0111	1.2909	0.0850	0.1273
10	1.50	0.0360	0.0342	0.0324	0.0085	1.6854	0.1448	0.1772
11	1.65	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.5168	0.1173	0.1533
12	1.80	0.0290	0.0275	0.0261	0.0069	2.0922	0.2232	0.2493
13	1.95	0.0450	0.0427	0.0405	0.0107	1.3483	0.0927	0.1332
14	2.10	0.0320	0.0304	0.0288	0.0076	1.8960	0.1833	0.2121
15	2.25	0.0380	0.0360	0.0342	0.0090	1.5967	0.1300	0.1642
16	2.40	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.5168	0.1173	0.1533
17	2.55	0.0380	0.0360	0.0342	0.0090	1.5967	0.1300	0.1642
18	2.70	0.0330	0.0313	0.0297	0.0078	1.8386	0.1724	0.2021
19	2.85	0.0320	0.0304	0.0288	0.0076	1.8960	0.1833	0.2121
20	2.97	0.0320	0.0304	0.0288	0.0076	1.8960	0.1833	0.2121

Ilustración 47. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 14.39 lps (R)

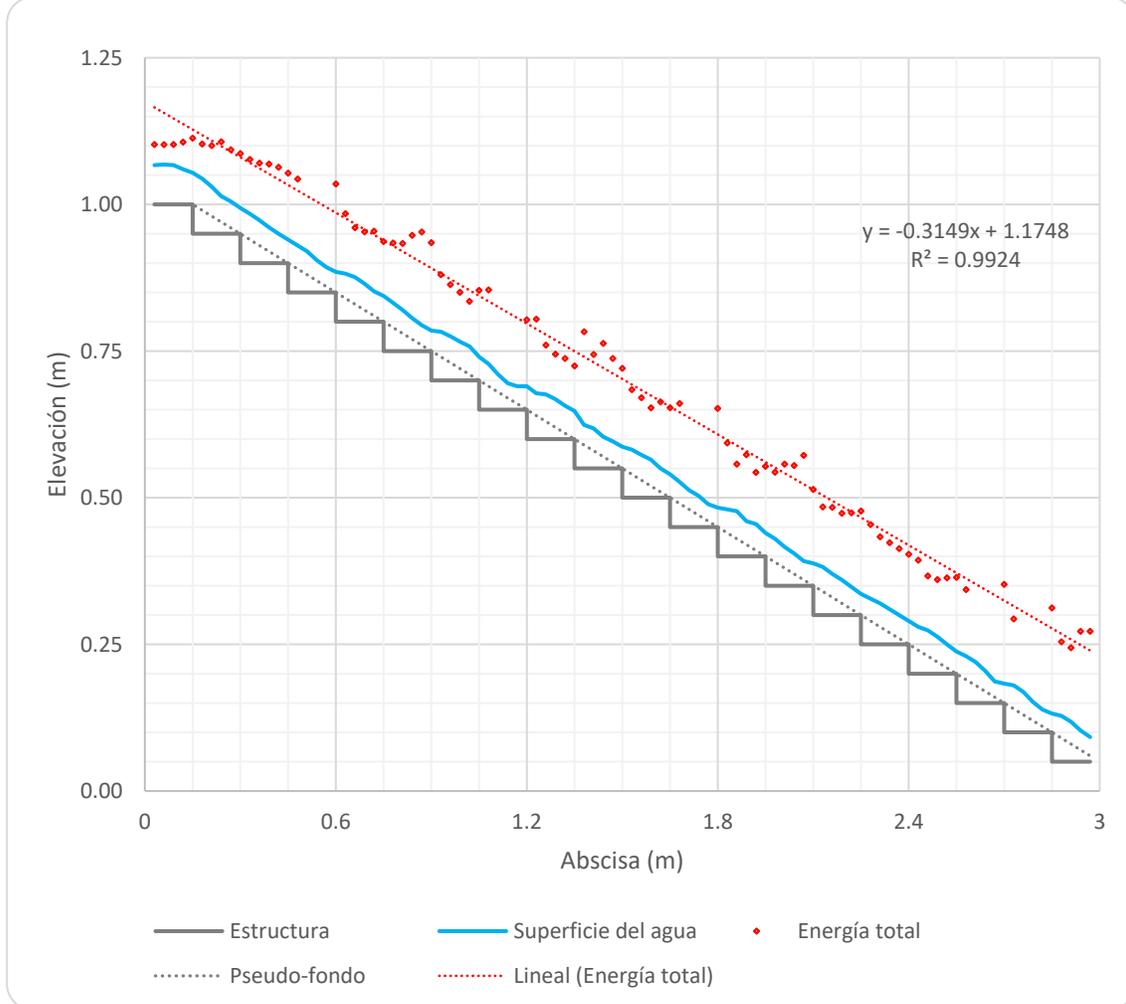


Tabla 63. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 14.39 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.01	1.10	0.86	78.26
20	2.97	0.24		

Q = 18.48 lps

Tabla 64. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 18.48 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
18.48	0.01848	0.25	1	0.15	0.05	0.33	18	9.806

Tabla 65. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 18.48 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.15	0.0630	0.0598	0.0567	0.0149	1.2368	0.0780	0.1347
2	0.30	0.0550	0.0522	0.0495	0.0130	1.4167	0.1023	0.1518
3	0.45	0.0490	0.0465	0.0441	0.0116	1.5902	0.1289	0.1730
4	0.60	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.9480	0.1935	0.2295
5	0.75	0.0460	0.0436	0.0414	0.0109	1.6939	0.1463	0.1877
6	0.90	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.9480	0.1935	0.2295
7	1.05	0.0520	0.0493	0.0468	0.0123	1.4984	0.1145	0.1613
8	1.20	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.9480	0.1935	0.2295
9	1.35	0.0510	0.0484	0.0459	0.0121	1.5278	0.1190	0.1649
10	1.50	0.0350	0.0332	0.0315	0.0083	2.2262	0.2527	0.2842
11	1.65	0.0480	0.0455	0.0432	0.0114	1.6233	0.1344	0.1776
12	1.80	0.0380	0.0360	0.0342	0.0090	2.0505	0.2144	0.2486
13	1.95	0.0480	0.0455	0.0432	0.0114	1.6233	0.1344	0.1776
14	2.10	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.9480	0.1935	0.2295
15	2.25	0.0460	0.0436	0.0414	0.0109	1.6939	0.1463	0.1877
16	2.40	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.9480	0.1935	0.2295
17	2.55	0.0420	0.0398	0.0378	0.0100	1.8552	0.1755	0.2133
18	2.70	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.9480	0.1935	0.2295
19	2.85	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.9480	0.1935	0.2295
20	2.97	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	1.9480	0.1935	0.2295

Ilustración 48. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 18.48 lps (R)

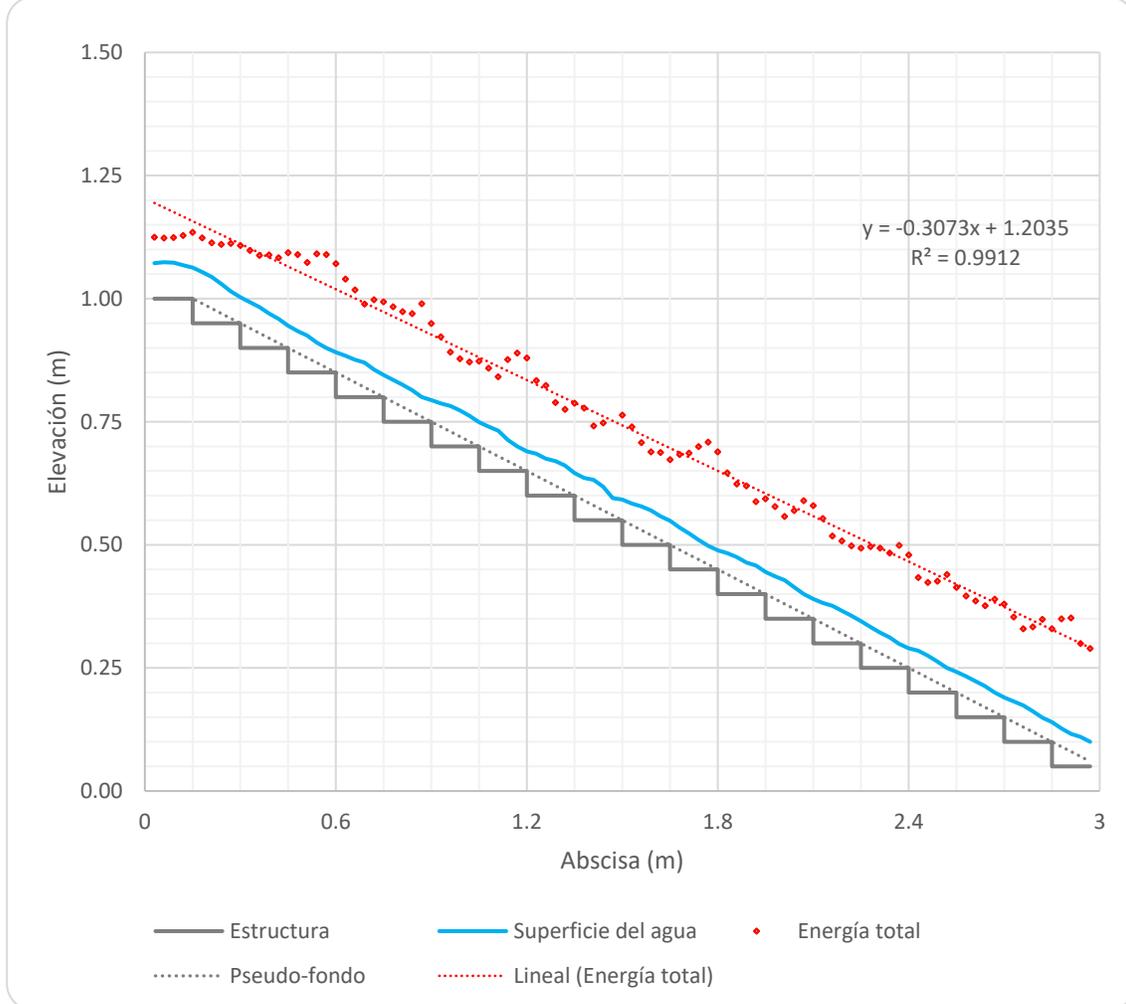


Tabla 66. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 18.48 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.01	1.12	0.83	74.14
20	2.97	0.29		

Q = 22.84 lps

Tabla 67. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 22.84 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
22.84	0.02284	0.25	1	0.15	0.05	0.33	18	9.806

Tabla 68. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 22.84 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.15	0.0700	0.0664	0.0630	0.0166	1.3757	0.0965	0.1595
2	0.30	0.0640	0.0607	0.0576	0.0152	1.5047	0.1154	0.1730
3	0.45	0.0600	0.0569	0.0540	0.0142	1.6050	0.1314	0.1854
4	0.60	0.0480	0.0455	0.0432	0.0114	2.0063	0.2052	0.2484
5	0.75	0.0520	0.0493	0.0468	0.0123	1.8520	0.1749	0.2217
6	0.90	0.0420	0.0398	0.0378	0.0100	2.2929	0.2681	0.3059
7	1.05	0.0550	0.0522	0.0495	0.0130	1.7509	0.1563	0.2058
8	1.20	0.0500	0.0474	0.0450	0.0119	1.9260	0.1892	0.2342
9	1.35	0.0530	0.0503	0.0477	0.0126	1.8170	0.1683	0.2160
10	1.50	0.0580	0.0550	0.0522	0.0138	1.6604	0.1406	0.1928
11	1.65	0.0600	0.0569	0.0540	0.0142	1.6050	0.1314	0.1854
12	1.80	0.0550	0.0522	0.0495	0.0130	1.7509	0.1563	0.2058
13	1.95	0.0530	0.0503	0.0477	0.0126	1.8170	0.1683	0.2160
14	2.10	0.0470	0.0446	0.0423	0.0111	2.0490	0.2141	0.2564
15	2.25	0.0550	0.0522	0.0495	0.0130	1.7509	0.1563	0.2058
16	2.40	0.0480	0.0455	0.0432	0.0114	2.0063	0.2052	0.2484
17	2.55	0.0540	0.0512	0.0486	0.0128	1.7834	0.1622	0.2108
18	2.70	0.0460	0.0436	0.0414	0.0109	2.0935	0.2235	0.2649
19	2.85	0.0520	0.0493	0.0468	0.0123	1.8520	0.1749	0.2217
20	2.97	0.0430	0.0408	0.0387	0.0102	2.2396	0.2557	0.2944

Ilustración 49. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 22.84 lps (R)

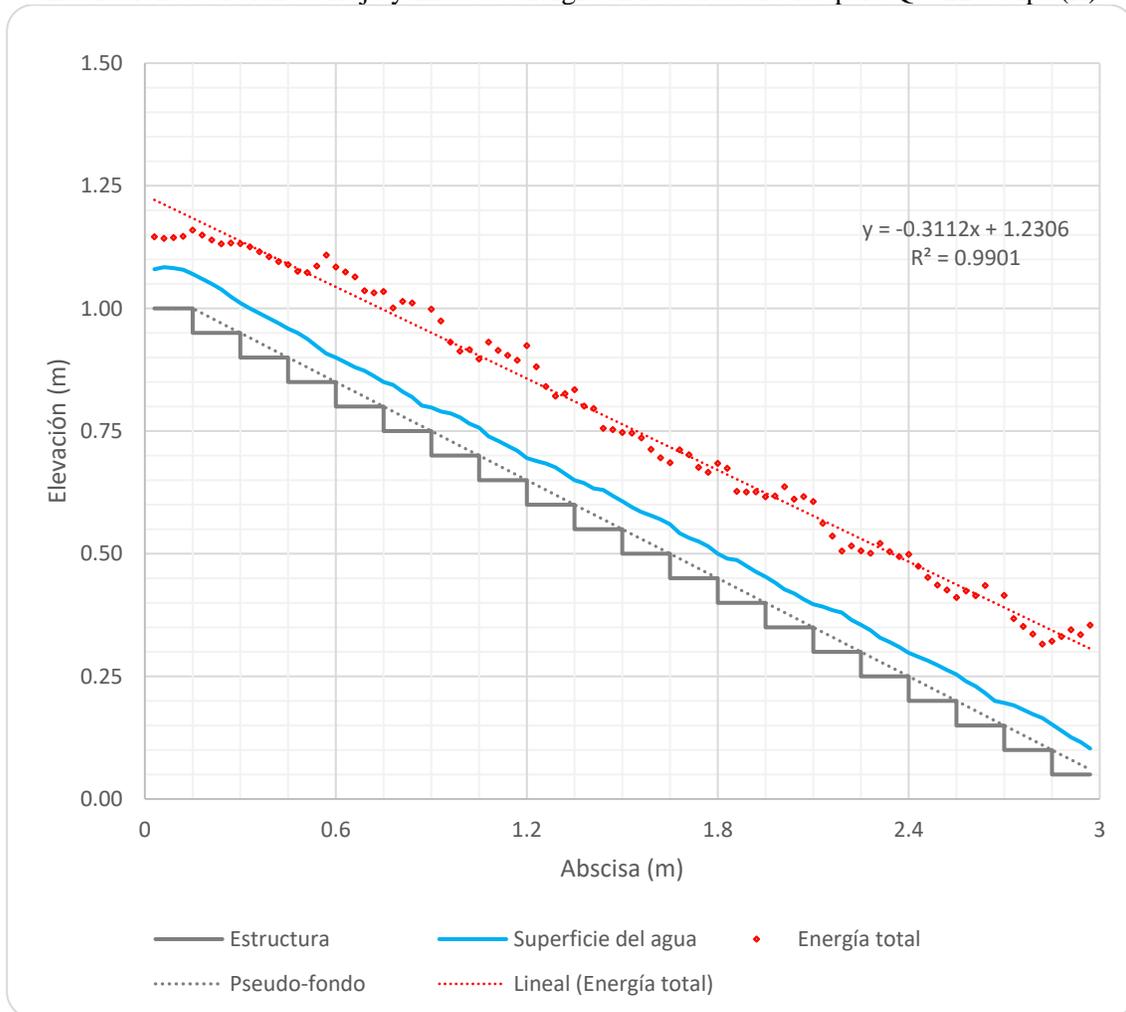


Tabla 69. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 22.84 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.01	1.15	0.84	73.27
20	2.97	0.31		

Q = 25.20 lps

Tabla 70. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 25.20 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
25.2	0.0252	0.25	1	0.15	0.05	0.33	18	9.806

Tabla 71. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 25.20 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.15	0.0770	0.0730	0.0693	0.0183	1.3799	0.0971	0.1664
2	0.30	0.0680	0.0645	0.0612	0.0161	1.5625	0.1245	0.1857
3	0.45	0.0610	0.0579	0.0549	0.0145	1.7418	0.1547	0.2096
4	0.60	0.0600	0.0569	0.0540	0.0142	1.7709	0.1599	0.2139
5	0.75	0.0610	0.0579	0.0549	0.0145	1.7418	0.1547	0.2096
6	0.90	0.0550	0.0522	0.0495	0.0130	1.9319	0.1903	0.2398
7	1.05	0.0500	0.0474	0.0450	0.0119	2.1251	0.2303	0.2753
8	1.20	0.0510	0.0484	0.0459	0.0121	2.0834	0.2213	0.2672
9	1.35	0.0500	0.0474	0.0450	0.0119	2.1251	0.2303	0.2753
10	1.50	0.0500	0.0474	0.0450	0.0119	2.1251	0.2303	0.2753
11	1.65	0.0500	0.0474	0.0450	0.0119	2.1251	0.2303	0.2753
12	1.80	0.0600	0.0569	0.0540	0.0142	1.7709	0.1599	0.2139
13	1.95	0.0620	0.0588	0.0558	0.0147	1.7138	0.1498	0.2056
14	2.10	0.0530	0.0503	0.0477	0.0126	2.0048	0.2049	0.2526
15	2.25	0.0540	0.0512	0.0486	0.0128	1.9676	0.1974	0.2460
16	2.40	0.0530	0.0503	0.0477	0.0126	2.0048	0.2049	0.2526
17	2.55	0.0550	0.0522	0.0495	0.0130	1.9319	0.1903	0.2398
18	2.70	0.0500	0.0474	0.0450	0.0119	2.1251	0.2303	0.2753
19	2.85	0.0500	0.0474	0.0450	0.0119	2.1251	0.2303	0.2753
20	2.97	0.0400	0.0379	0.0360	0.0095	2.6563	0.3598	0.3958

Ilustración 50. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 25.20 lps (R)

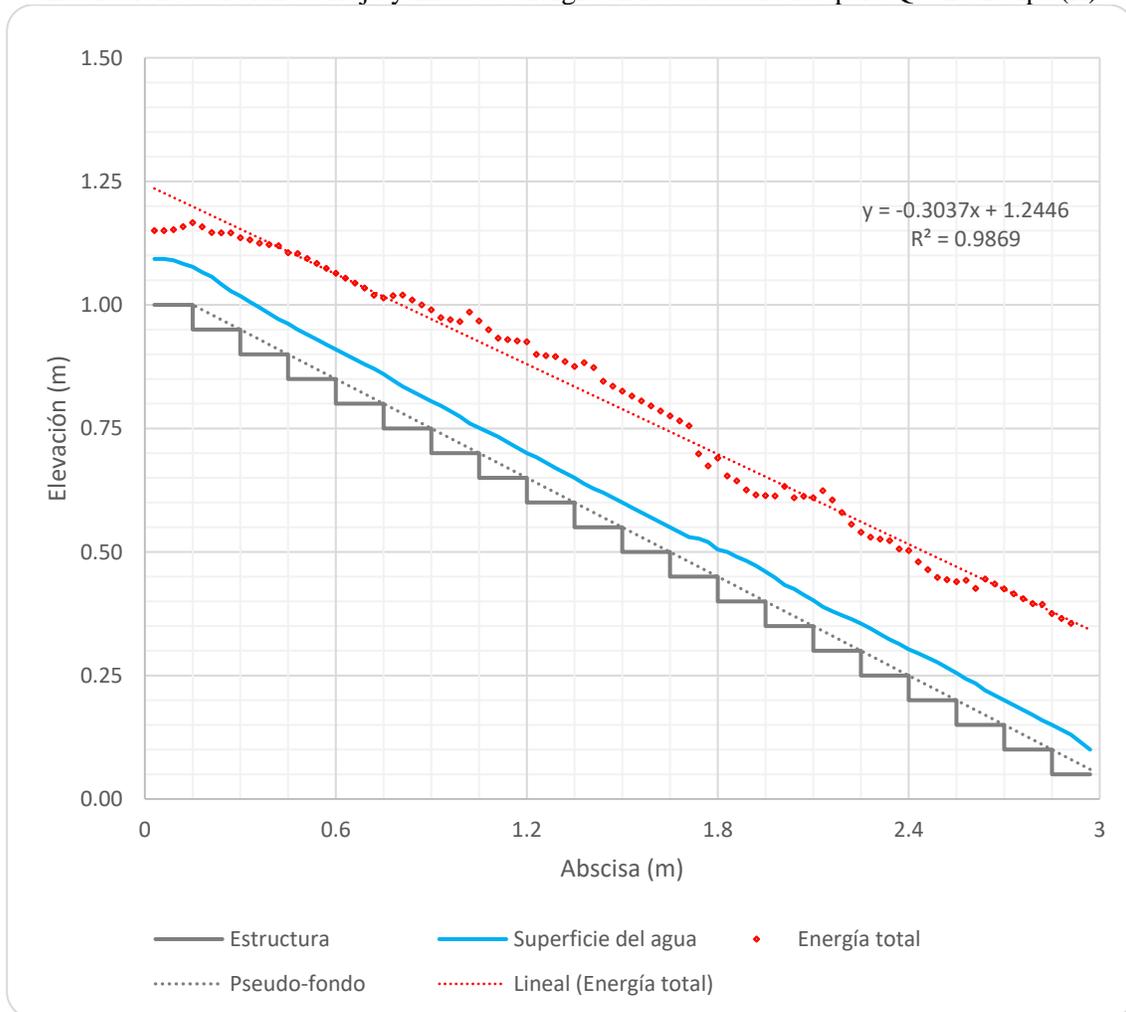


Tabla 72. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 25.20 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.01	1.15	0.81	70.21
20	2.97	0.34		

Q = 33.74 lps

Tabla 73. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 33.74 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
33.74	0.03374	0.25	1	0.15	0.05	0.33	18	9.806

Tabla 74. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 33.74 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.15	0.0940	0.0892	0.0846	0.0223	1.5134	0.1168	0.2014
2	0.30	0.0840	0.0797	0.0756	0.0199	1.6936	0.1462	0.2218
3	0.45	0.0770	0.0730	0.0693	0.0183	1.8475	0.1740	0.2433
4	0.60	0.0750	0.0712	0.0675	0.0178	1.8968	0.1835	0.2510
5	0.75	0.0730	0.0693	0.0657	0.0173	1.9488	0.1936	0.2593
6	0.90	0.0650	0.0617	0.0585	0.0154	2.1886	0.2442	0.3027
7	1.05	0.0620	0.0588	0.0558	0.0147	2.2945	0.2684	0.3242
8	1.20	0.0600	0.0569	0.0540	0.0142	2.3710	0.2866	0.3406
9	1.35	0.0640	0.0607	0.0576	0.0152	2.2228	0.2519	0.3095
10	1.50	0.0630	0.0598	0.0567	0.0149	2.2581	0.2600	0.3167
11	1.65	0.0660	0.0626	0.0594	0.0157	2.1555	0.2369	0.2963
12	1.80	0.0680	0.0645	0.0612	0.0161	2.0921	0.2232	0.2844
13	1.95	0.0700	0.0664	0.0630	0.0166	2.0323	0.2106	0.2736
14	2.10	0.0660	0.0626	0.0594	0.0157	2.1555	0.2369	0.2963
15	2.25	0.0650	0.0617	0.0585	0.0154	2.1886	0.2442	0.3027
16	2.40	0.0640	0.0607	0.0576	0.0152	2.2228	0.2519	0.3095
17	2.55	0.0650	0.0617	0.0585	0.0154	2.1886	0.2442	0.3027
18	2.70	0.0600	0.0569	0.0540	0.0142	2.3710	0.2866	0.3406
19	2.85	0.0580	0.0550	0.0522	0.0138	2.4528	0.3068	0.3590
20	2.97	0.0550	0.0522	0.0495	0.0130	2.5866	0.3411	0.3906

Ilustración 51. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 33.74 lps (R)

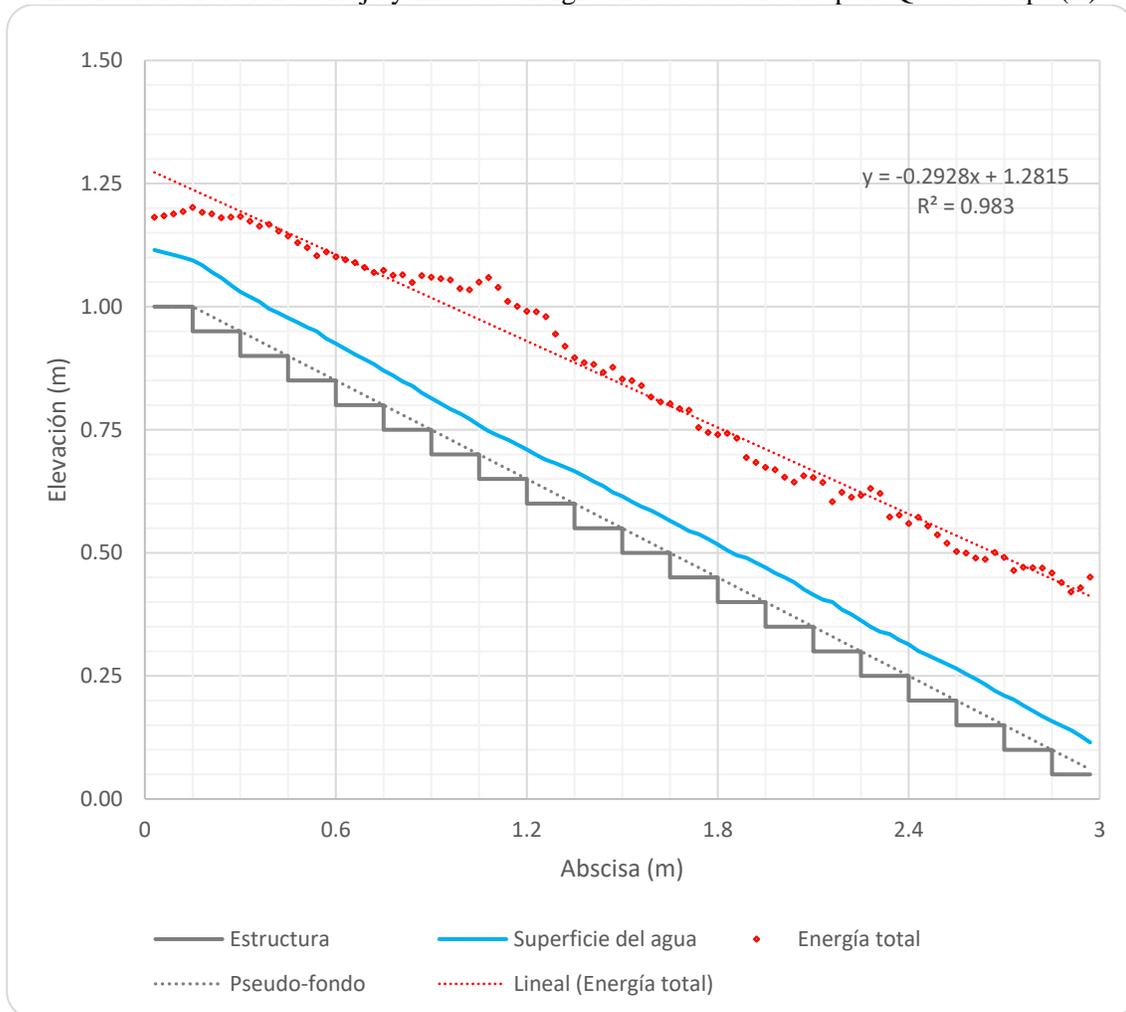


Tabla 75. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 33.74 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.01	1.18	0.77	65.14
20	2.97	0.41		

Q = 40.38 lps

Tabla 76. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:3 _ Q = 40.38 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
40.38	0.04038	0.25	1	0.15	0.05	0.33	18	9.806

Tabla 77. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:3 para Q = 40.38 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.15	0.1100	0.1044	0.0990	0.0261	1.5478	0.1222	0.2212
2	0.30	0.1060	0.1006	0.0954	0.0251	1.6062	0.1315	0.2269
3	0.45	0.0900	0.0854	0.0810	0.0213	1.8917	0.1825	0.2635
4	0.60	0.0700	0.0664	0.0630	0.0166	2.4322	0.3016	0.3646
5	0.75	0.0780	0.0740	0.0702	0.0185	2.1828	0.2429	0.3131
6	0.90	0.0730	0.0693	0.0657	0.0173	2.3323	0.2774	0.3431
7	1.05	0.0720	0.0683	0.0648	0.0171	2.3647	0.2851	0.3499
8	1.20	0.0700	0.0664	0.0630	0.0166	2.4322	0.3016	0.3646
9	1.35	0.0700	0.0664	0.0630	0.0166	2.4322	0.3016	0.3646
10	1.50	0.0690	0.0655	0.0621	0.0164	2.4675	0.3104	0.3725
11	1.65	0.0730	0.0693	0.0657	0.0173	2.3323	0.2774	0.3431
12	1.80	0.0690	0.0655	0.0621	0.0164	2.4675	0.3104	0.3725
13	1.95	0.0700	0.0664	0.0630	0.0166	2.4322	0.3016	0.3646
14	2.10	0.0660	0.0626	0.0594	0.0157	2.5797	0.3393	0.3987
15	2.25	0.0700	0.0664	0.0630	0.0166	2.4322	0.3016	0.3646
16	2.40	0.0720	0.0683	0.0648	0.0171	2.3647	0.2851	0.3499
17	2.55	0.0730	0.0693	0.0657	0.0173	2.3323	0.2774	0.3431
18	2.70	0.0740	0.0702	0.0666	0.0176	2.3008	0.2699	0.3365
19	2.85	0.0740	0.0702	0.0666	0.0176	2.3008	0.2699	0.3365
20	2.97	0.0700	0.0664	0.0630	0.0166	2.4322	0.3016	0.3646

Ilustración 52. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:3 para Q = 40.38 lps (R)

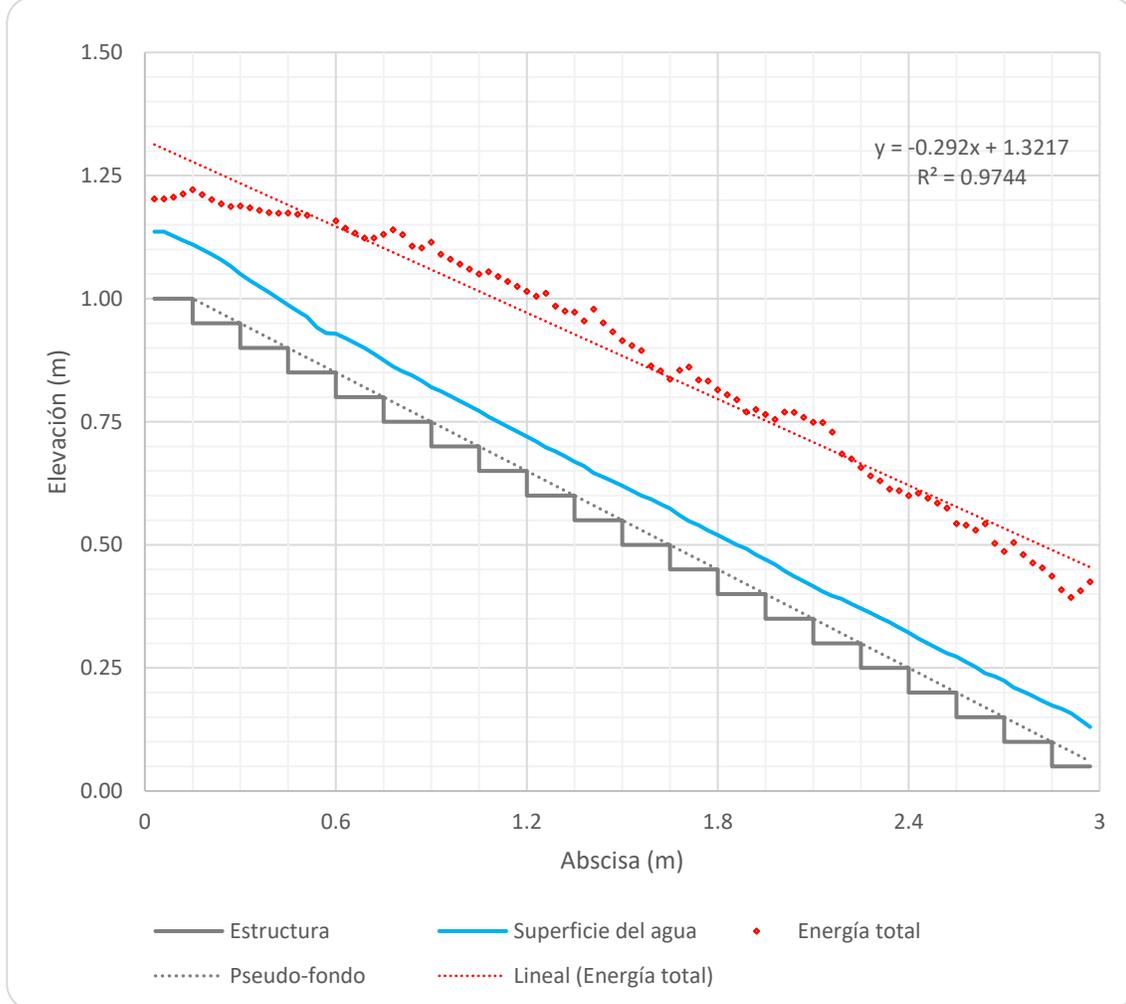


Tabla 78. Energía total disipada en la estructura 1:3 para Q = 40.38 lps (R)

Escalón N.	Abscisa m	H m	Δe	
			m	%
1	0.01	1.20	0.75	62.20
20	2.97	0.45		

11.1.1. Estructura escalonada con pendiente 1:5

Q = 5.54 lps

Tabla 79. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 5.54 lps (E)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m³/s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s²
5.54	0.00554	0.25	1	0.25	0.05	5	0	9.806

Tabla 80. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 5.54 lps (E)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.25	0.0210	0.0210	0.0210	0.0053	1.0552	0.0568	0.0778
2	0.50	0.0180	0.0180	0.0180	0.0045	1.2311	0.0773	0.0953
3	0.75	0.0200	0.0200	0.0200	0.0050	1.1080	0.0626	0.0826
4	1.00	0.0170	0.0170	0.0170	0.0043	1.3035	0.0866	0.1036
5	1.25	0.0190	0.0190	0.0190	0.0048	1.1663	0.0694	0.0884
6	1.50	0.0150	0.0150	0.0150	0.0038	1.4773	0.1113	0.1263
7	1.75	0.0160	0.0160	0.0160	0.0040	1.3850	0.0978	0.1138
8	2.00	0.0180	0.0180	0.0180	0.0045	1.2311	0.0773	0.0953
9	2.25	0.0170	0.0170	0.0170	0.0043	1.3035	0.0866	0.1036
10	2.50	0.0190	0.0190	0.0190	0.0048	1.1663	0.0694	0.0884
11	2.75	0.0170	0.0170	0.0170	0.0043	1.3035	0.0866	0.1036
12	3.00	0.0130	0.0130	0.0130	0.0033	1.7046	0.1482	0.1612
13	3.25	0.0190	0.0190	0.0190	0.0048	1.1663	0.0694	0.0884
14	3.50	0.0200	0.0200	0.0200	0.0050	1.1080	0.0626	0.0826
15	3.75	0.0170	0.0170	0.0170	0.0043	1.3035	0.0866	0.1036
16	4.00	0.0180	0.0180	0.0180	0.0045	1.2311	0.0773	0.0953
17	4.25	0.0140	0.0140	0.0140	0.0035	1.5829	0.1278	0.1418
18	4.50	0.0170	0.0170	0.0170	0.0043	1.3035	0.0866	0.1036
19	4.75	0.0180	0.0180	0.0180	0.0045	1.2311	0.0773	0.0953
20	5.00	0.0200	0.0200	0.0200	0.0050	1.1080	0.0626	0.0826

Ilustración 53. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 5.54 lps (E)

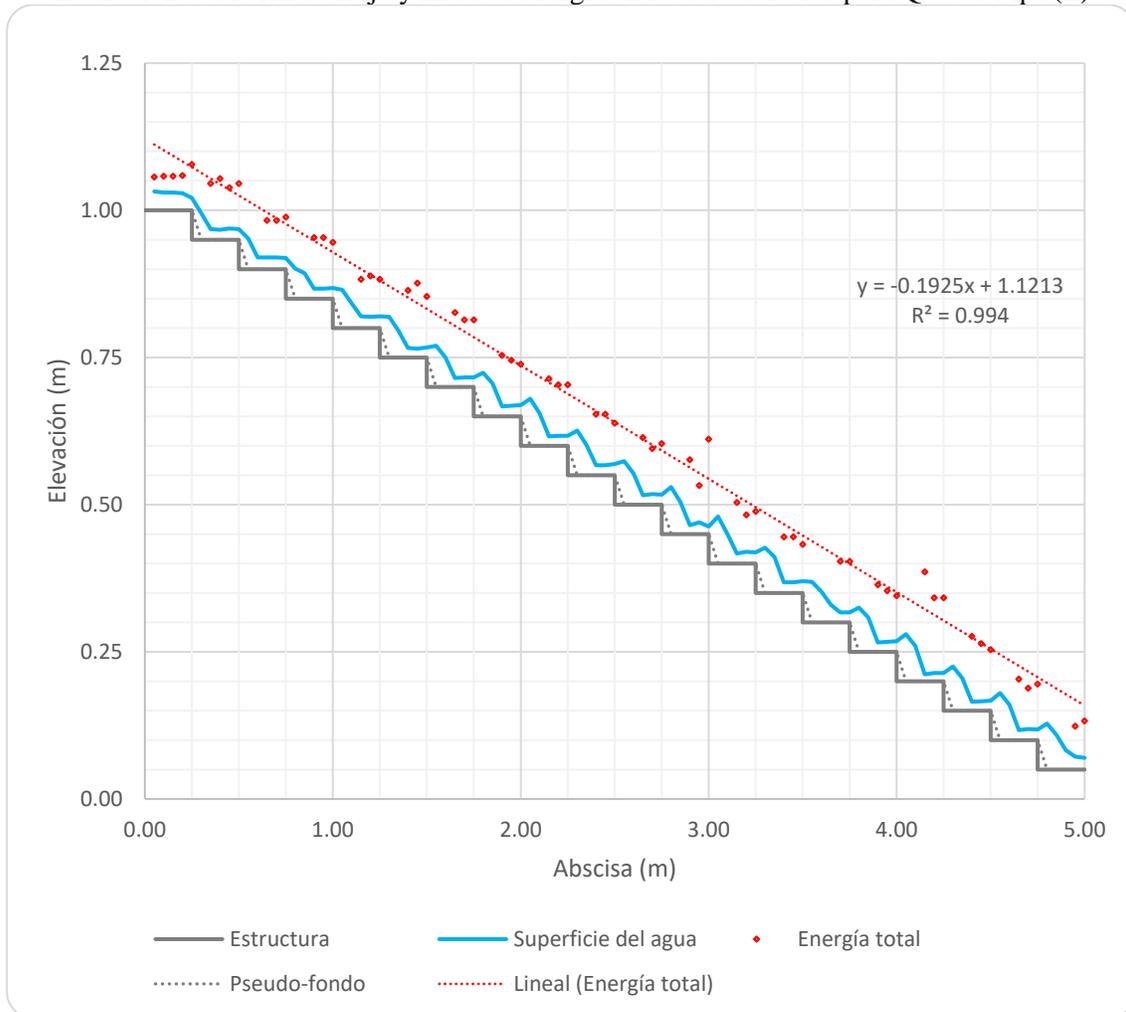


Tabla 81. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 5.54 lps (E)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.05	1.06	0.90	84.97
20	5	0.16		

Q = 12.02 lps

Tabla 82. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 12.02 lps (T)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
12.02	0.01202	0.25	1	0.25	0.05	5	0	9.806

Tabla 83. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 12.02 lps (T)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.25	0.0420	0.0420	0.0420	0.0105	1.1448	0.0668	0.1088
2	0.50	0.0330	0.0330	0.0330	0.0083	1.4570	0.1082	0.1412
3	0.75	0.0360	0.0360	0.0360	0.0090	1.3356	0.0909	0.1269
4	1.00	0.0320	0.0320	0.0320	0.0080	1.5025	0.1151	0.1471
5	1.25	0.0260	0.0260	0.0260	0.0065	1.8492	0.1744	0.2004
6	1.50	0.0260	0.0260	0.0260	0.0065	1.8492	0.1744	0.2004
7	1.75	0.0310	0.0310	0.0310	0.0078	1.5510	0.1227	0.1537
8	2.00	0.0300	0.0300	0.0300	0.0075	1.6027	0.1310	0.1610
9	2.25	0.0320	0.0320	0.0320	0.0080	1.5025	0.1151	0.1471
10	2.50	0.0270	0.0270	0.0270	0.0068	1.7807	0.1617	0.1887
11	2.75	0.0290	0.0290	0.0290	0.0073	1.6579	0.1402	0.1692
12	3.00	0.0300	0.0300	0.0300	0.0075	1.6027	0.1310	0.1610
13	3.25	0.0300	0.0300	0.0300	0.0075	1.6027	0.1310	0.1610
14	3.50	0.0290	0.0290	0.0290	0.0073	1.6579	0.1402	0.1692
15	3.75	0.0330	0.0330	0.0330	0.0083	1.4570	0.1082	0.1412
16	4.00	0.0250	0.0250	0.0250	0.0063	1.9232	0.1886	0.2136
17	4.25	0.0260	0.0260	0.0260	0.0065	1.8492	0.1744	0.2004
18	4.50	0.0300	0.0300	0.0300	0.0075	1.6027	0.1310	0.1610
19	4.75	0.0250	0.0250	0.0250	0.0063	1.9232	0.1886	0.2136
20	5.00	0.0300	0.0300	0.0300	0.0075	1.6027	0.1310	0.1610

Ilustración 54. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 12.02 lps (T)

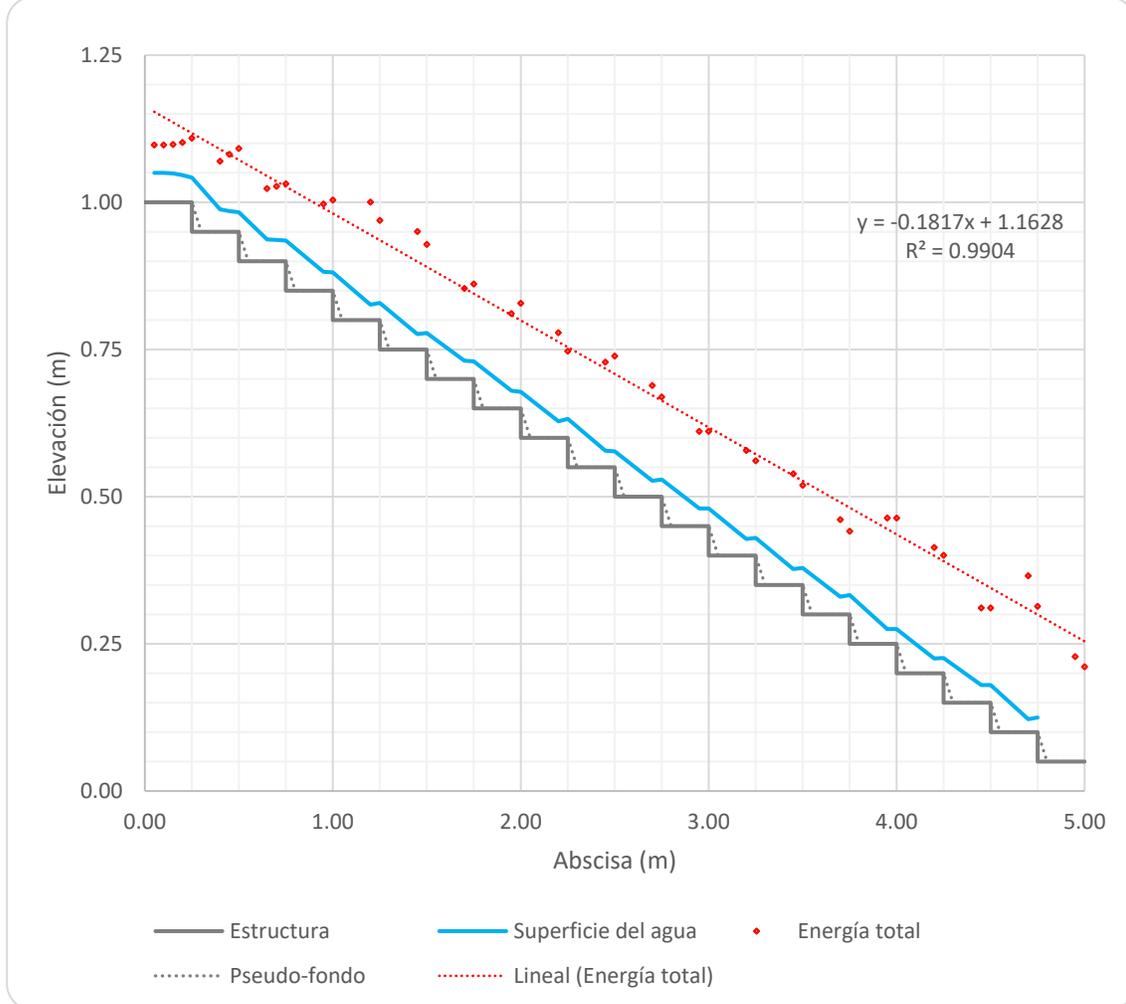


Tabla 84. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 12.02 lps (T)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.05	1.10	0.84	76.82
20	5	0.25		

Q = 14.96 lps

Tabla 85. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 14.96 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
14.96	0.01496	0.25	1	0.25	0.05	5	0	9.806

Tabla 86. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 14.96 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.25	0.0500	0.0500	0.0500	0.0125	1.1968	0.0730	0.1230
2	0.50	0.0410	0.0410	0.0410	0.0103	1.4595	0.1086	0.1496
3	0.75	0.0400	0.0400	0.0400	0.0100	1.4960	0.1141	0.1541
4	1.00	0.0390	0.0390	0.0390	0.0098	1.5344	0.1200	0.1590
5	1.25	0.0380	0.0380	0.0380	0.0095	1.5747	0.1264	0.1644
6	1.50	0.0470	0.0470	0.0470	0.0118	1.2732	0.0827	0.1297
7	1.75	0.0390	0.0390	0.0390	0.0098	1.5344	0.1200	0.1590
8	2.00	0.0400	0.0400	0.0400	0.0100	1.4960	0.1141	0.1541
9	2.25	0.0400	0.0400	0.0400	0.0100	1.4960	0.1141	0.1541
10	2.50	0.0370	0.0370	0.0370	0.0093	1.6173	0.1334	0.1704
11	2.75	0.0380	0.0380	0.0380	0.0095	1.5747	0.1264	0.1644
12	3.00	0.0380	0.0380	0.0380	0.0095	1.5747	0.1264	0.1644
13	3.25	0.0350	0.0350	0.0350	0.0088	1.7097	0.1490	0.1840
14	3.50	0.0360	0.0360	0.0360	0.0090	1.6622	0.1409	0.1769
15	3.75	0.0400	0.0400	0.0400	0.0100	1.4960	0.1141	0.1541
16	4.00	0.0300	0.0300	0.0300	0.0075	1.9947	0.2029	0.2329
17	4.25	0.0330	0.0330	0.0330	0.0083	1.8133	0.1677	0.2007
18	4.50	0.0350	0.0350	0.0350	0.0088	1.7097	0.1490	0.1840
19	4.75	0.0330	0.0330	0.0330	0.0083	1.8133	0.1677	0.2007
20	5.00	0.0330	0.0330	0.0330	0.0083	1.8133	0.1677	0.2007

Ilustración 55. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 14.96 lps (R)

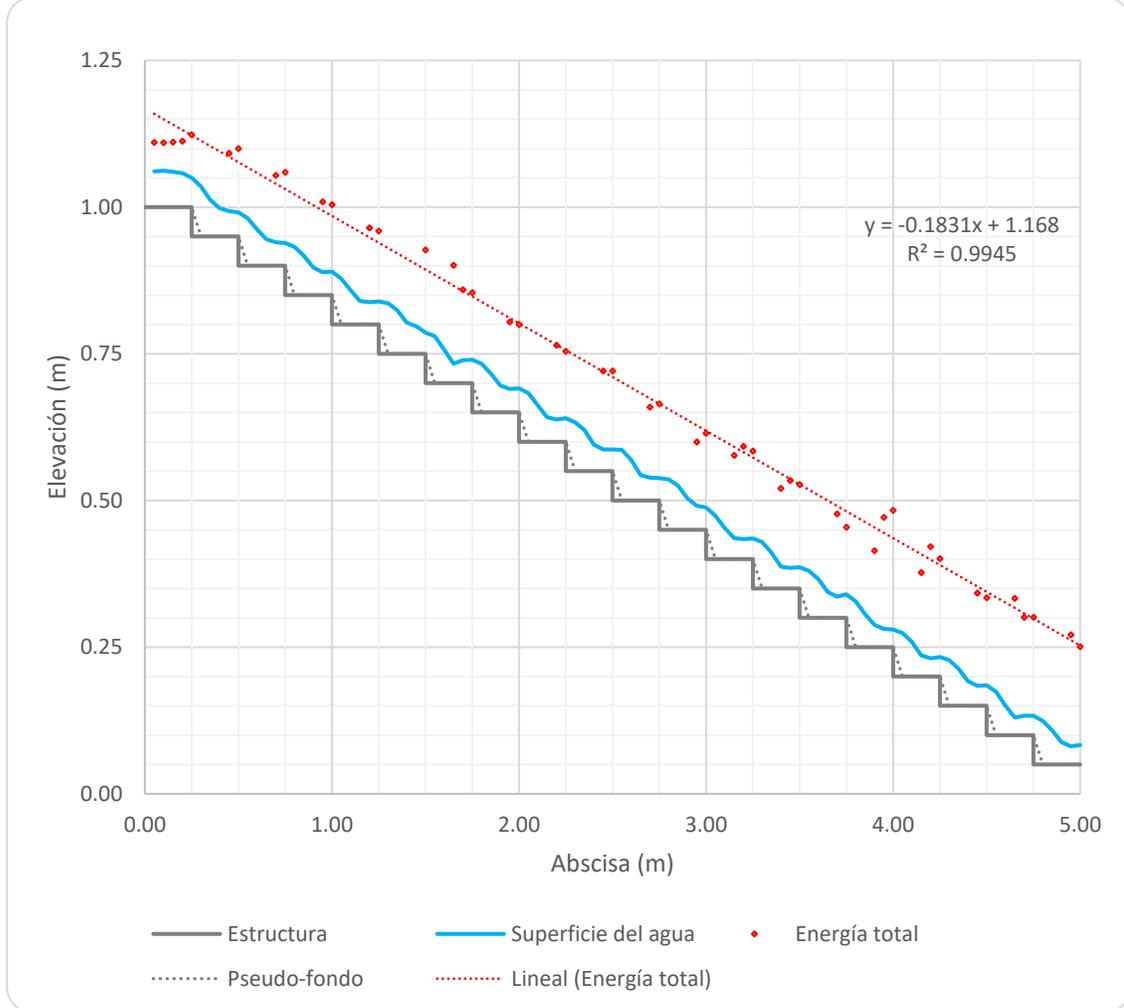


Tabla 87. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 14.96 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.05	1.11	0.86	77.25
20	5	0.25		

Q = 19.89 lps

Tabla 88. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 19.89 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
19.89	0.01989	0.25	1	0.25	0.05	5	0	9.806

Tabla 89. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 19.89 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.25	0.0600	0.0600	0.0600	0.0150	1.3260	0.0897	0.1497
2	0.50	0.0530	0.0530	0.0530	0.0133	1.5011	0.1149	0.1679
3	0.75	0.0550	0.0550	0.0550	0.0138	1.4465	0.1067	0.1617
4	1.00	0.0500	0.0500	0.0500	0.0125	1.5912	0.1291	0.1791
5	1.25	0.0470	0.0470	0.0470	0.0118	1.6928	0.1461	0.1931
6	1.50	0.0390	0.0390	0.0390	0.0098	2.0400	0.2122	0.2512
7	1.75	0.0340	0.0340	0.0340	0.0085	2.3400	0.2792	0.3132
8	2.00	0.0340	0.0340	0.0340	0.0085	2.3400	0.2792	0.3132
9	2.25	0.0350	0.0350	0.0350	0.0088	2.2731	0.2635	0.2985
10	2.50	0.0350	0.0350	0.0350	0.0088	2.2731	0.2635	0.2985
11	2.75	0.0350	0.0350	0.0350	0.0088	2.2731	0.2635	0.2985
12	3.00	0.0410	0.0410	0.0410	0.0103	1.9405	0.1920	0.2330
13	3.25	0.0420	0.0420	0.0420	0.0105	1.8943	0.1830	0.2250
14	3.50	0.0350	0.0350	0.0350	0.0088	2.2731	0.2635	0.2985
15	3.75	0.0350	0.0350	0.0350	0.0088	2.2731	0.2635	0.2985
16	4.00	0.0400	0.0400	0.0400	0.0100	1.9890	0.2017	0.2417
17	4.25	0.0340	0.0340	0.0340	0.0085	2.3400	0.2792	0.3132
18	4.50	0.0340	0.0340	0.0340	0.0085	2.3400	0.2792	0.3132
19	4.75	0.0380	0.0380	0.0380	0.0095	2.0937	0.2235	0.2615
20	5.00	0.0400	0.0400	0.0400	0.0100	1.9890	0.2017	0.2417

Ilustración 56. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 19.89 lps (R)

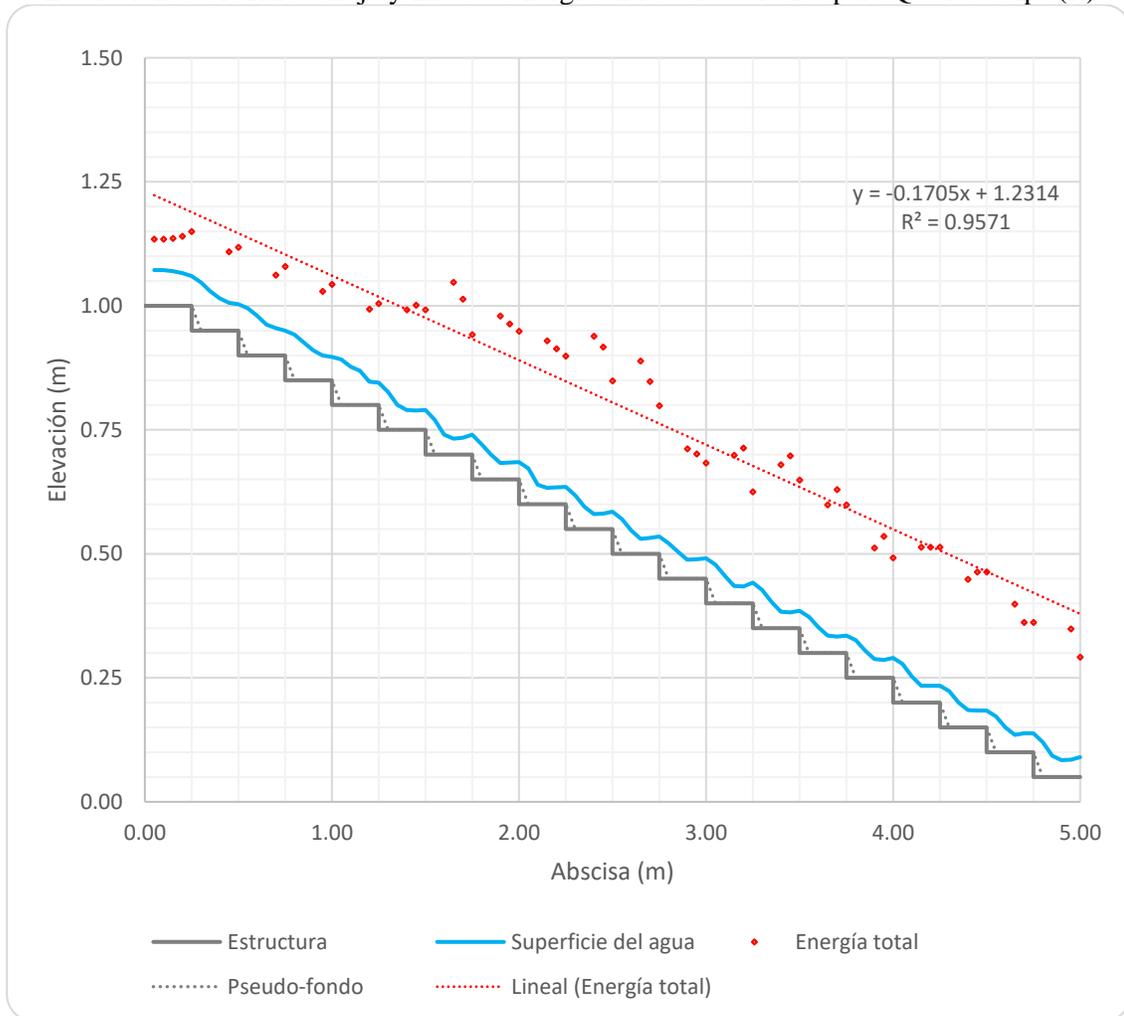


Tabla 90. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 19.89 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.05	1.13	0.76	66.59
20	5	0.38		

Q = 25.56 lps

Tabla 91. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 25.56 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
25.56	0.02556	0.25	1	0.25	0.05	5	0	9.806

Tabla 92. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 25.56 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.25	0.0710	0.0710	0.0710	0.0178	1.4400	0.1057	0.1767
2	0.50	0.0600	0.0600	0.0600	0.0150	1.7040	0.1481	0.2081
3	0.75	0.0700	0.0700	0.0700	0.0175	1.4606	0.1088	0.1788
4	1.00	0.0550	0.0550	0.0550	0.0138	1.8589	0.1762	0.2312
5	1.25	0.0550	0.0550	0.0550	0.0138	1.8589	0.1762	0.2312
6	1.50	0.0460	0.0460	0.0460	0.0115	2.2226	0.2519	0.2979
7	1.75	0.0430	0.0430	0.0430	0.0108	2.3777	0.2883	0.3313
8	2.00	0.0400	0.0400	0.0400	0.0100	2.5560	0.3331	0.3731
9	2.25	0.0390	0.0390	0.0390	0.0098	2.6215	0.3504	0.3894
10	2.50	0.0400	0.0400	0.0400	0.0100	2.5560	0.3331	0.3731
11	2.75	0.0400	0.0400	0.0400	0.0100	2.5560	0.3331	0.3731
12	3.00	0.0410	0.0410	0.0410	0.0103	2.4937	0.3171	0.3581
13	3.25	0.0450	0.0450	0.0450	0.0113	2.2720	0.2632	0.3082
14	3.50	0.0500	0.0500	0.0500	0.0125	2.0448	0.2132	0.2632
15	3.75	0.0450	0.0450	0.0450	0.0113	2.2720	0.2632	0.3082
16	4.00	0.0470	0.0470	0.0470	0.0118	2.1753	0.2413	0.2883
17	4.25	0.0470	0.0470	0.0470	0.0118	2.1753	0.2413	0.2883
18	4.50	0.0480	0.0480	0.0480	0.0120	2.1300	0.2313	0.2793
19	4.75	0.0460	0.0460	0.0460	0.0115	2.2226	0.2519	0.2979
20	5.00	0.0510	0.0510	0.0510	0.0128	2.0047	0.2049	0.2559

Ilustración 57. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 25.56 lps (R)

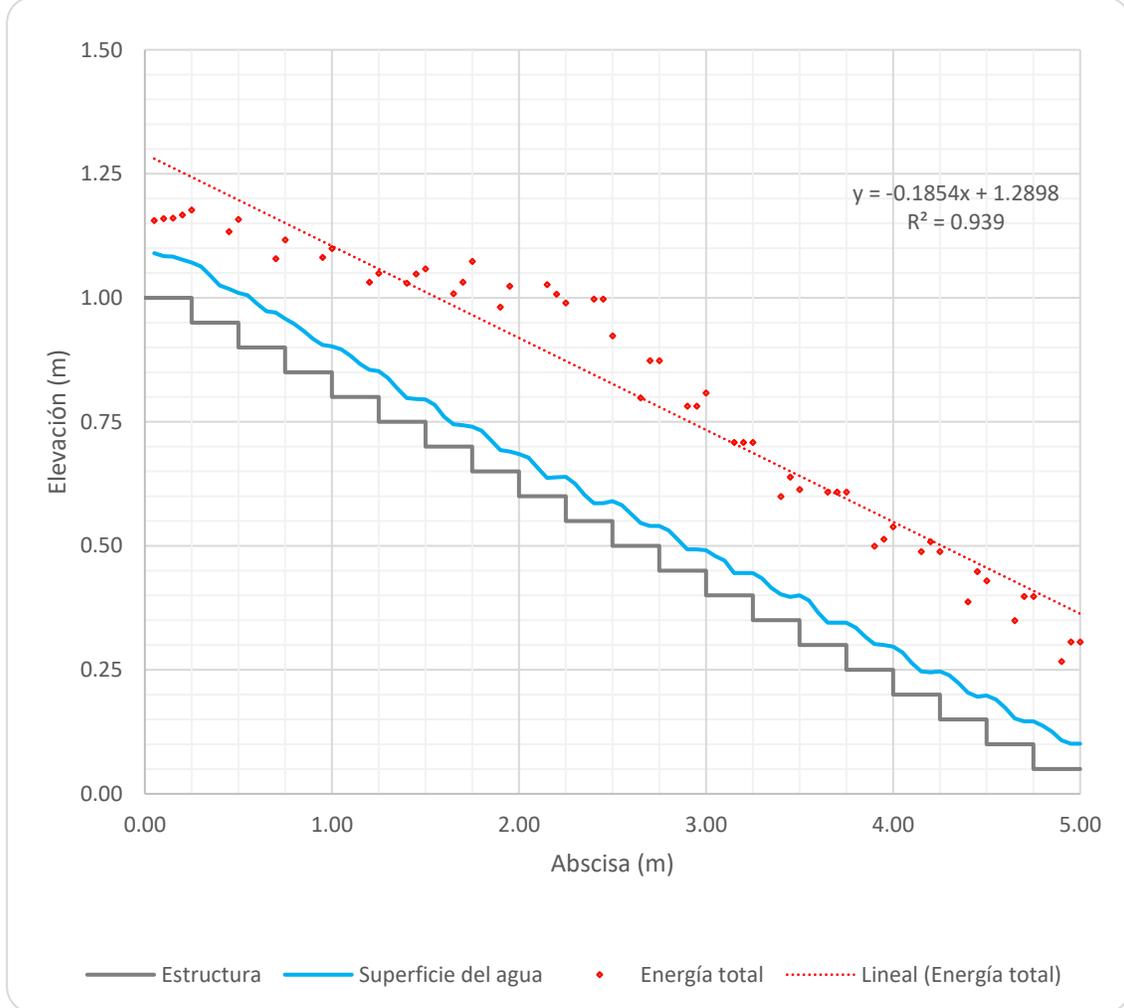


Tabla 93. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 25.56 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.05	1.16	0.79	68.61
20	5	0.36		

Q = 34.10 lps

Tabla 94. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 34.10 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
34.1	0.0341	0.25	1	0.25	0.05	5	79	9.806

Tabla 95. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 34.10 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.25	0.0900	0.0900	0.0900	0.0225	1.5156	0.1171	0.2071
2	0.50	0.0770	0.0151	0.0030	0.0193	1.7714	0.1600	0.1751
3	0.75	0.0720	0.0141	0.0028	0.0180	1.8944	0.1830	0.1971
4	1.00	0.0650	0.0127	0.0025	0.0163	2.0985	0.2245	0.2373
5	1.25	0.0620	0.0122	0.0024	0.0155	2.2000	0.2468	0.2589
6	1.50	0.0600	0.0118	0.0023	0.0150	2.2733	0.2635	0.2753
7	1.75	0.0570	0.0112	0.0022	0.0143	2.3930	0.2920	0.3032
8	2.00	0.0550	0.0108	0.0021	0.0138	2.4800	0.3136	0.3244
9	2.25	0.0600	0.0118	0.0023	0.0150	2.2733	0.2635	0.2753
10	2.50	0.0580	0.0114	0.0022	0.0145	2.3517	0.2820	0.2934
11	2.75	0.0570	0.0112	0.0022	0.0143	2.3930	0.2920	0.3032
12	3.00	0.0600	0.0118	0.0023	0.0150	2.2733	0.2635	0.2753
13	3.25	0.0550	0.0108	0.0021	0.0138	2.4800	0.3136	0.3244
14	3.50	0.0570	0.0112	0.0022	0.0143	2.3930	0.2920	0.3032
15	3.75	0.0540	0.0106	0.0021	0.0135	2.5259	0.3253	0.3359
16	4.00	0.0550	0.0108	0.0021	0.0138	2.4800	0.3136	0.3244
17	4.25	0.0540	0.0106	0.0021	0.0135	2.5259	0.3253	0.3359
18	4.50	0.0550	0.0108	0.0021	0.0138	2.4800	0.3136	0.3244
19	4.75	0.0550	0.0108	0.0021	0.0138	2.4800	0.3136	0.3244
20	5.00	0.0550	0.0108	0.0021	0.0138	2.4800	0.3136	0.3244

Ilustración 58. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 34.10 lps (R)

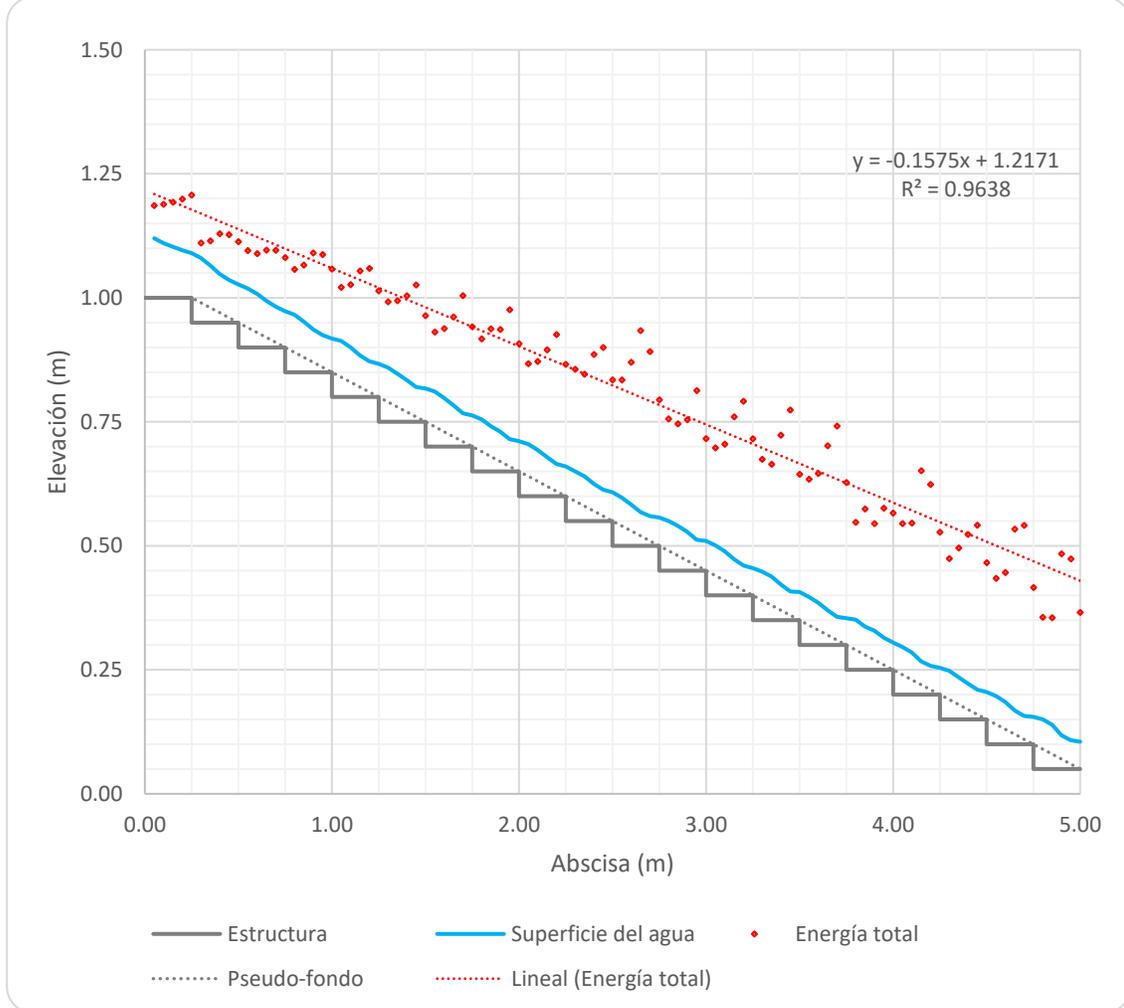


Tabla 96. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 34.10 lps (R)

Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.05	1.19	0.76	63.77
20	5	0.43		

Q = 39.75 lps

Tabla 97. Parámetros geométricos y de flujo. Estructura 1:5 _ Q = 39.75 lps (R)

Q	Q	b	α	L	h	So	θ	g
lps	m ³ /s	m	adm	m	m	m/m	°	m/s ²
39.75	0.03975	0.25	1	0.25	0.05	5	79	9.806

Tabla 98. Cálculo de la energía específica por escalón en la estructura 1:5 para Q = 39.75 lps (R)

Escalón	Abcisa	y	d	P/γ	A	V	$\alpha V^2/2g$	E
N.	m	m	m	m	m ²	m/s	m	m
1	0.25	0.1000	0.1000	0.1000	0.0250	1.5900	0.1289	0.2289
2	0.50	0.0850	0.0167	0.0033	0.0213	1.8706	0.1784	0.1951
3	0.75	0.0820	0.0161	0.0032	0.0205	1.9390	0.1917	0.2078
4	1.00	0.0790	0.0155	0.0030	0.0198	2.0127	0.2065	0.2220
5	1.25	0.0690	0.0135	0.0027	0.0173	2.3043	0.2708	0.2843
6	1.50	0.0650	0.0127	0.0025	0.0163	2.4462	0.3051	0.3178
7	1.75	0.0650	0.0127	0.0025	0.0163	2.4462	0.3051	0.3178
8	2.00	0.0700	0.0137	0.0027	0.0175	2.2714	0.2631	0.2768
9	2.25	0.0610	0.0120	0.0023	0.0153	2.6066	0.3464	0.3584
10	2.50	0.0630	0.0124	0.0024	0.0158	2.5238	0.3248	0.3371
11	2.75	0.0630	0.0124	0.0024	0.0158	2.5238	0.3248	0.3371
12	3.00	0.0650	0.0127	0.0025	0.0163	2.4462	0.3051	0.3178
13	3.25	0.0620	0.0122	0.0024	0.0155	2.5645	0.3353	0.3475
14	3.50	0.0640	0.0126	0.0025	0.0160	2.4844	0.3147	0.3273
15	3.75	0.0580	0.0114	0.0022	0.0145	2.7414	0.3832	0.3946
16	4.00	0.0600	0.0118	0.0023	0.0150	2.6500	0.3581	0.3698
17	4.25	0.0600	0.0118	0.0023	0.0150	2.6500	0.3581	0.3698
18	4.50	0.0600	0.0118	0.0023	0.0150	2.6500	0.3581	0.3698
19	4.75	0.0590	0.0116	0.0023	0.0148	2.6949	0.3703	0.3819
20	5.00	0.0580	0.0114	0.0022	0.0145	2.7414	0.3832	0.3946

Ilustración 59. Perfil de flujo y línea de energía en la estructura 1:5 para Q = 39.75 lps (R)

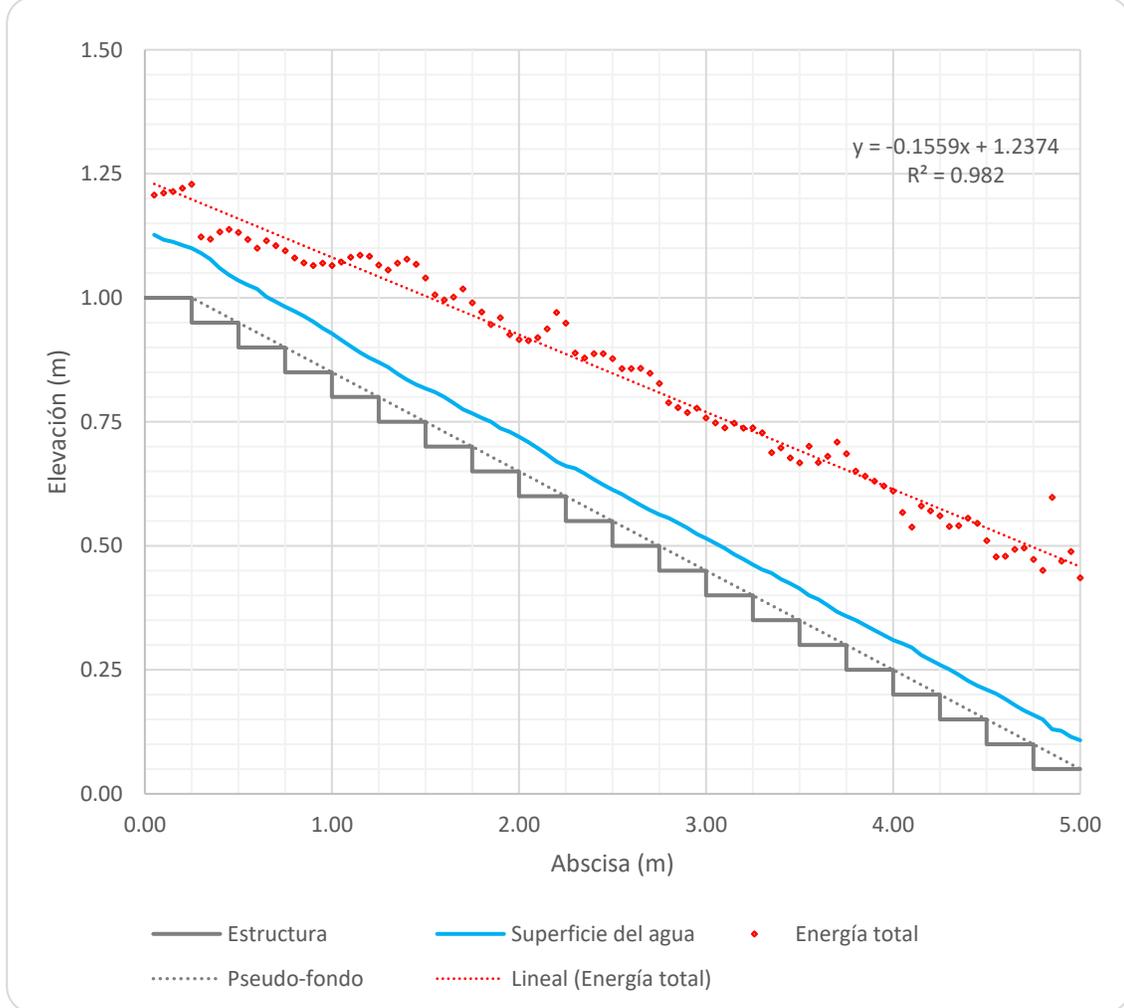


Tabla 99. Energía total disipada en la estructura 1:5 para Q = 39.75 lps (R)

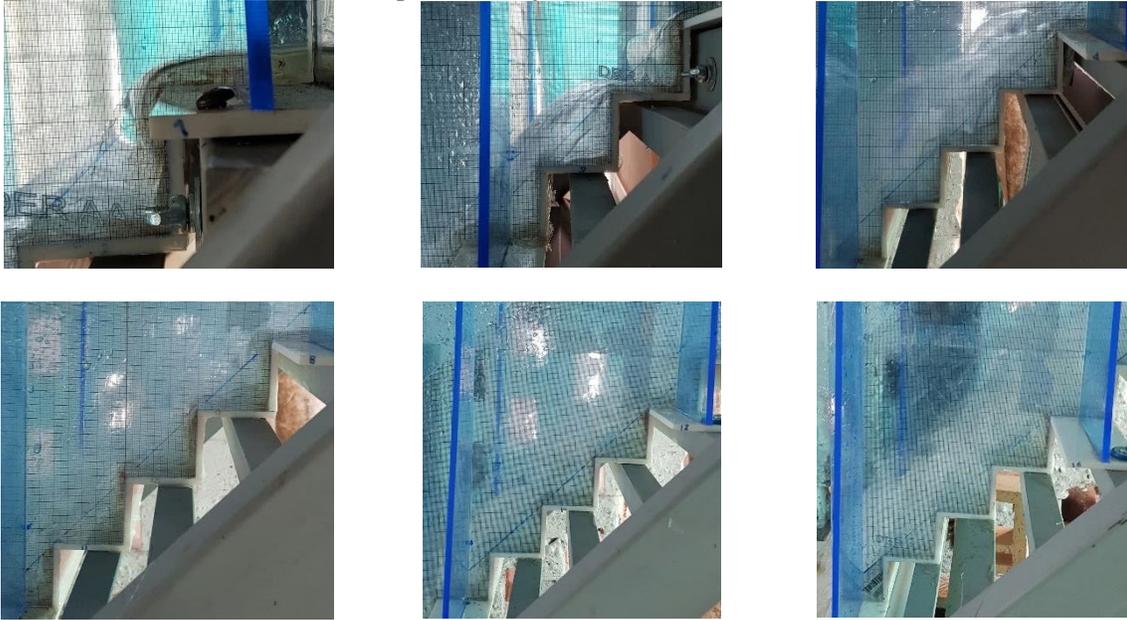
Escalón	Abscisa	H	Δe	
N.	m	m	m	%
1	0.05	1.21	0.75	62.06
20	5	0.46		

11.1. Anexo fotográfico.

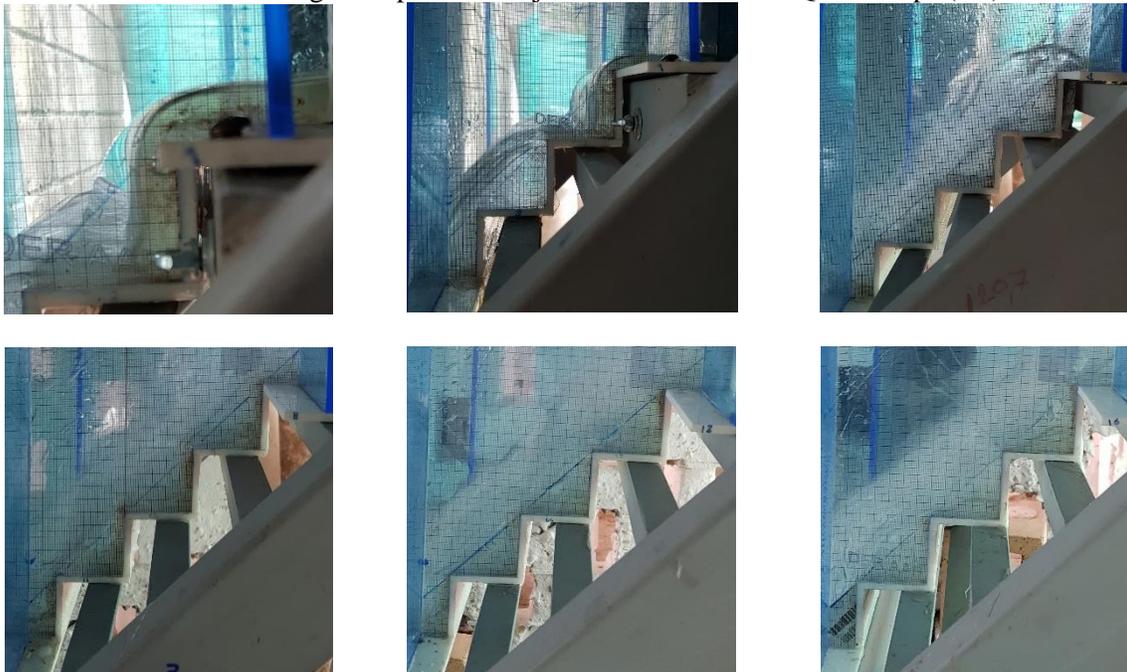
A continuación, se presenta el registro fotográfico de los perfiles de flujo evaluados en cada uno de los tres modelos físicos.

11.1.1. Estructura escalonada con pendiente 1:1

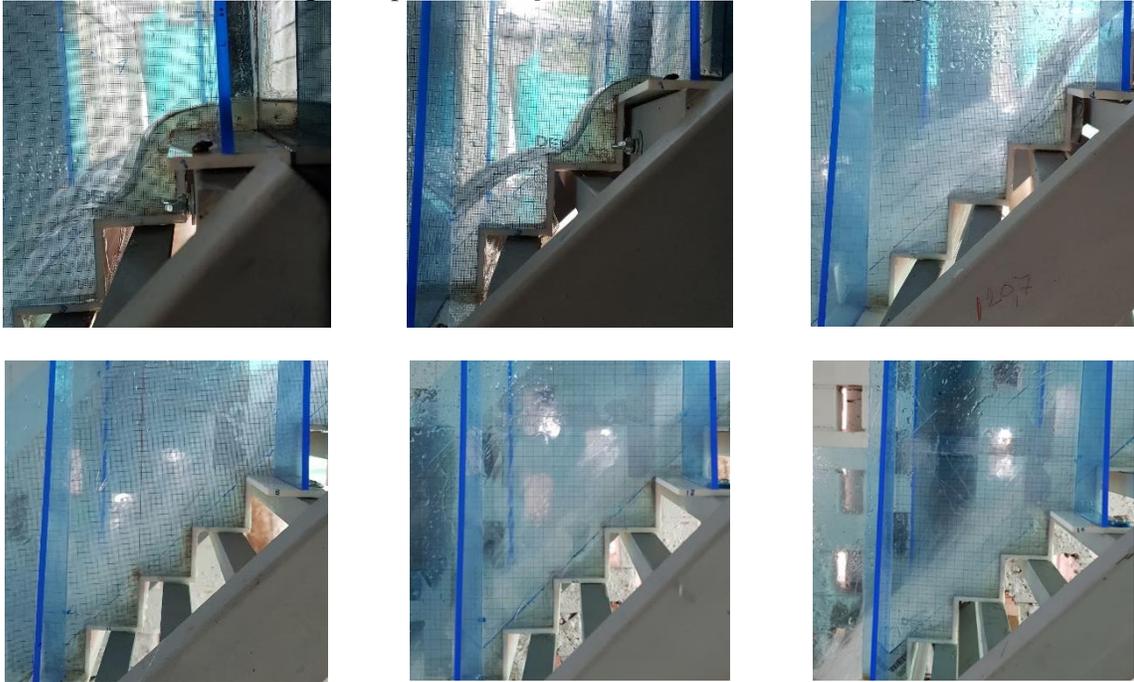
Anexo 1. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 0.65$ lps (EE)



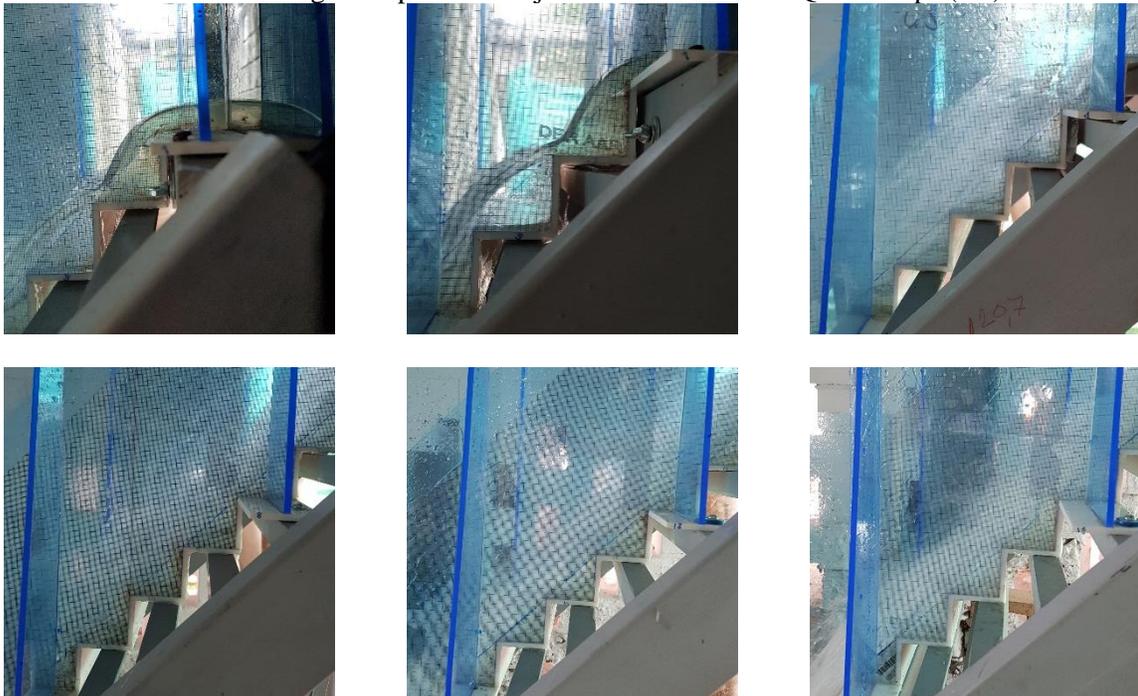
Anexo 2. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 0.94$ lps (EE)



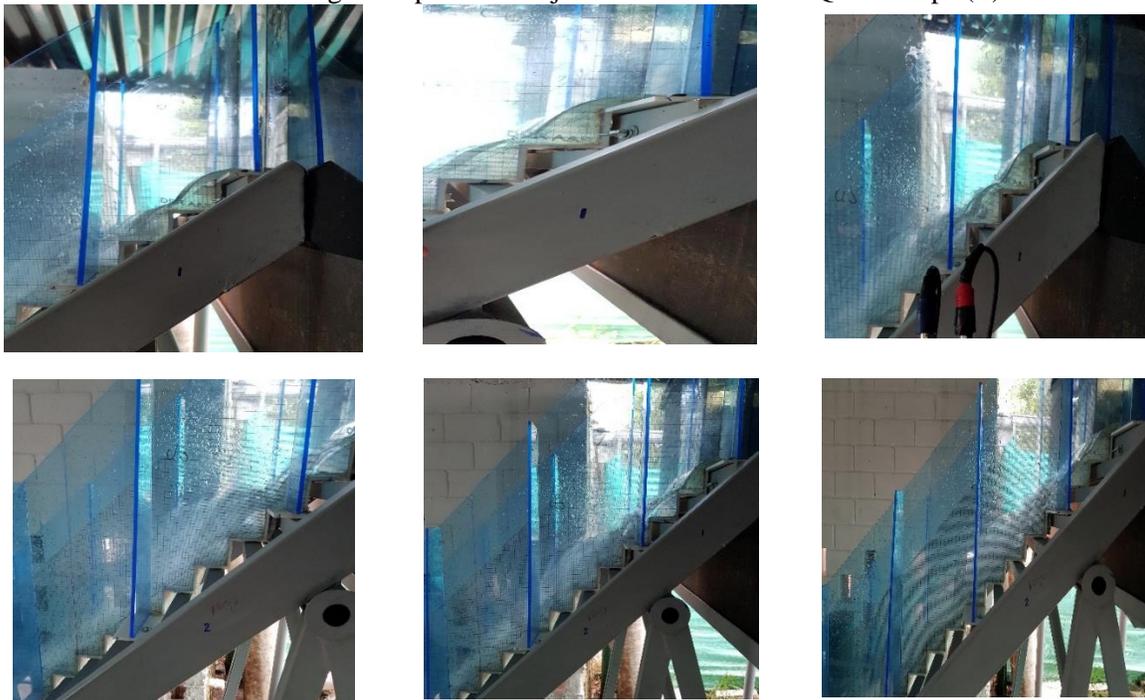
Anexo 3. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 1.54$ lps (EE)



Anexo 4. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 1.98$ lps (EE)



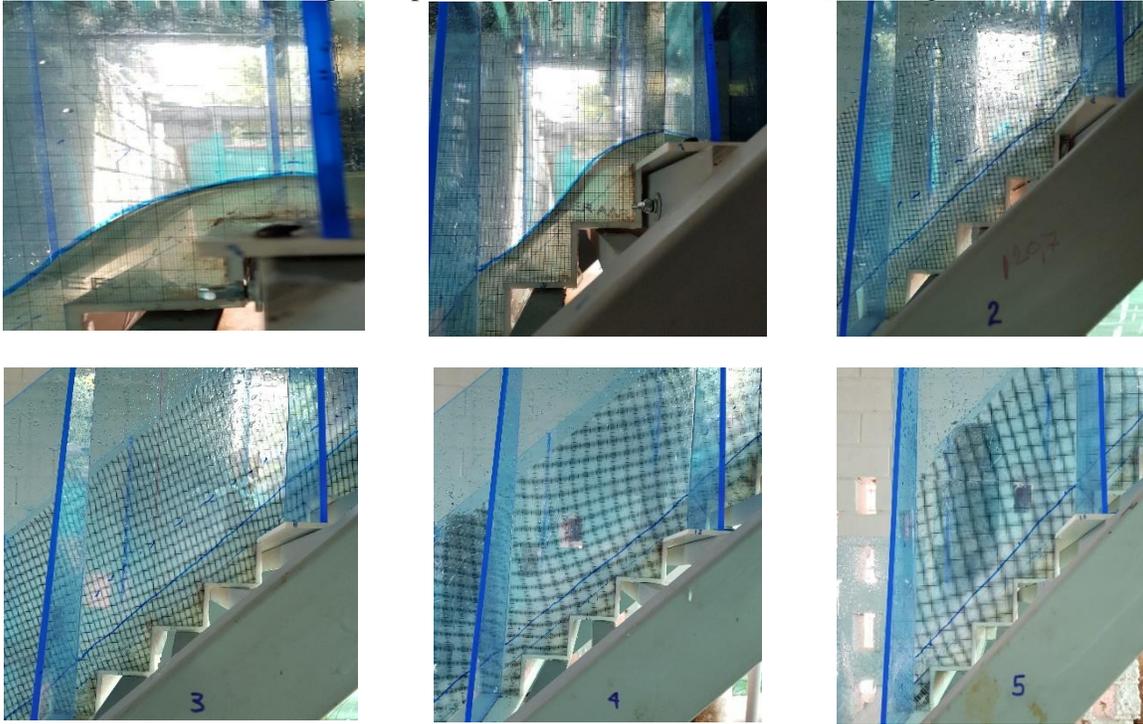
Anexo 5. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 2.00$ lps (T)



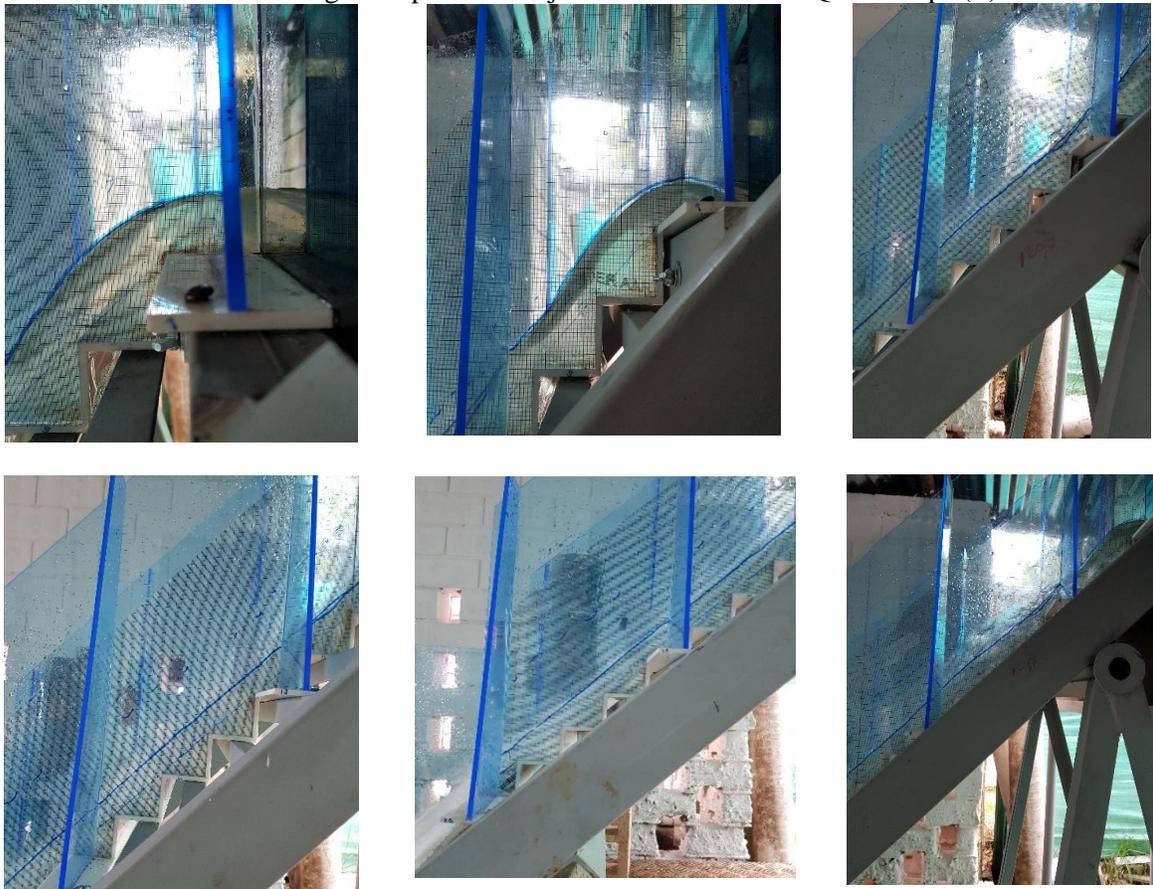
Anexo 6. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 3.23$ lps (T)



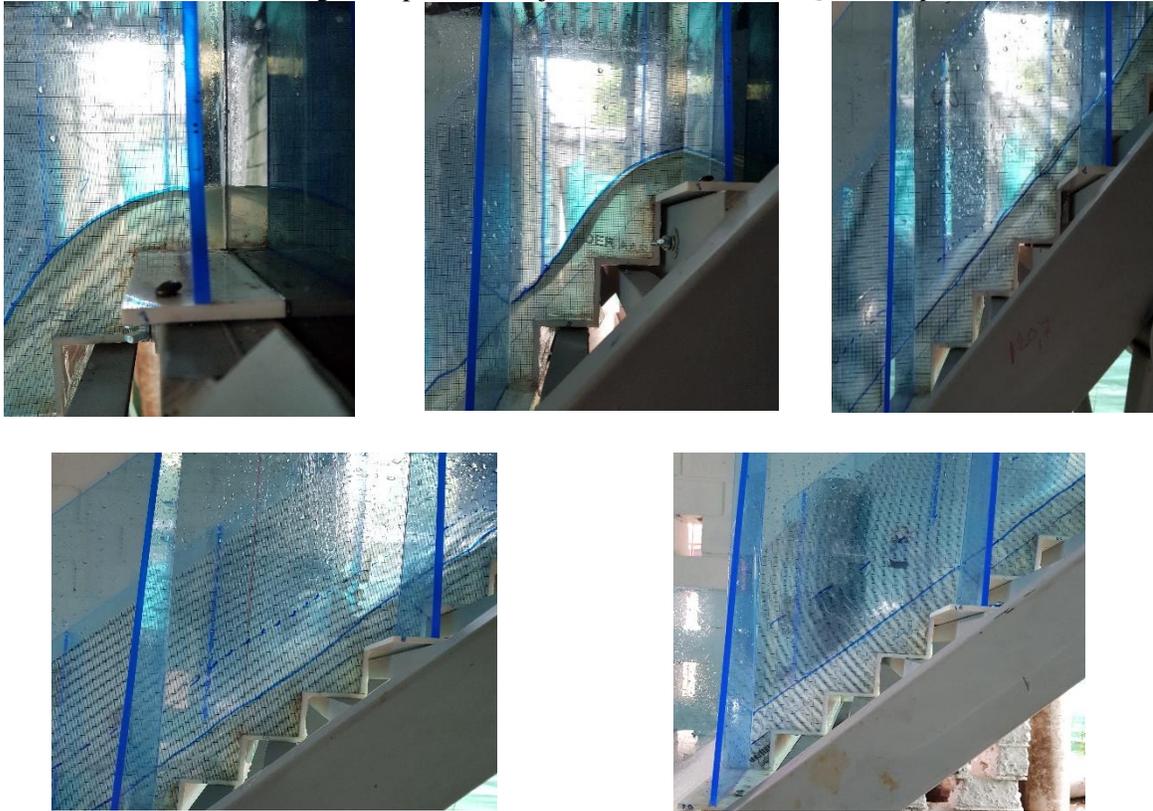
Anexo 7. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 4.38$ lps (T)



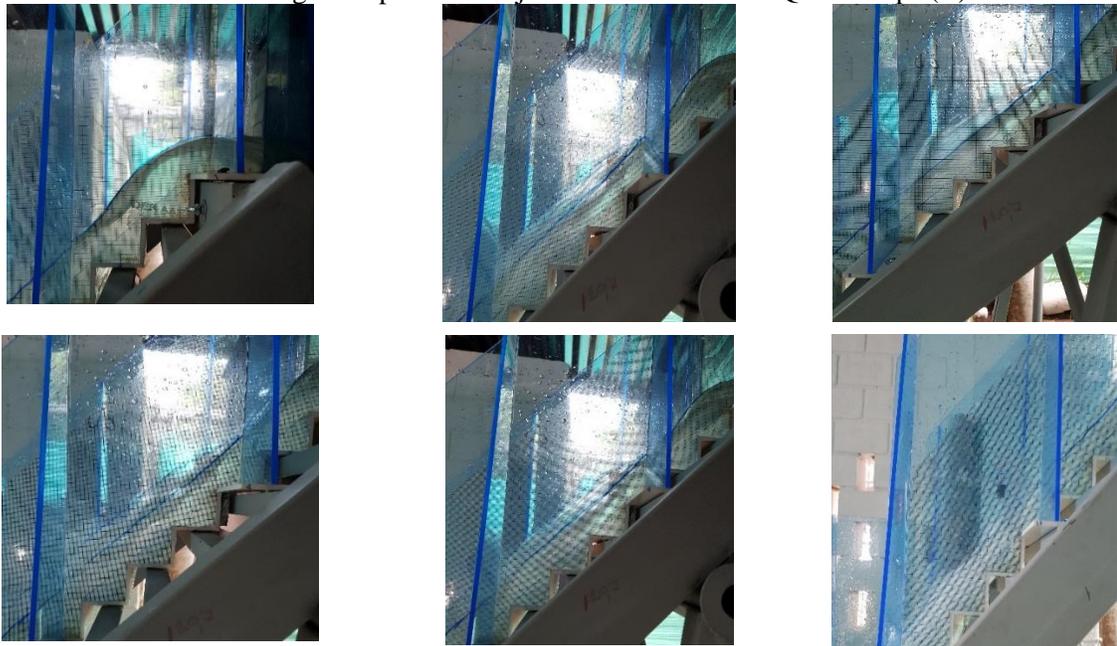
Anexo 8. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 6.00$ lps (T)



Anexo 9. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 6.39$ lps (R)



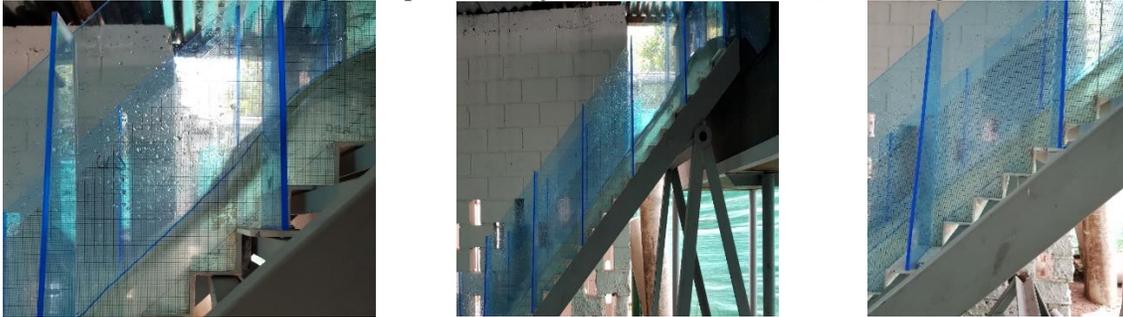
Anexo 10. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 9.69$ lps (R)



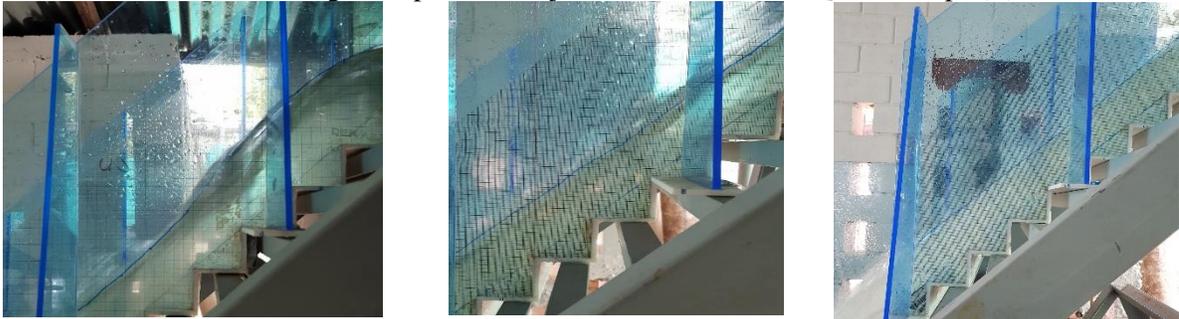
Anexo 11. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 14.70$ lps (R)



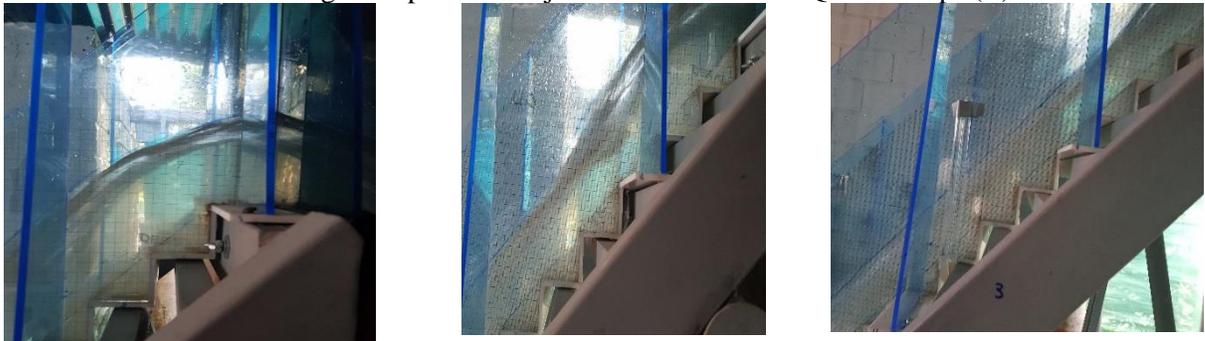
Anexo 12. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 20.63$ lps (R)



Anexo 13. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 24.84$ lps (R)



Anexo 14. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 30.50$ lps (R)





Anexo 15. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:1 $Q = 39.56$ lps (R)



11.1.2. Estructura escalonada con pendiente 1:3

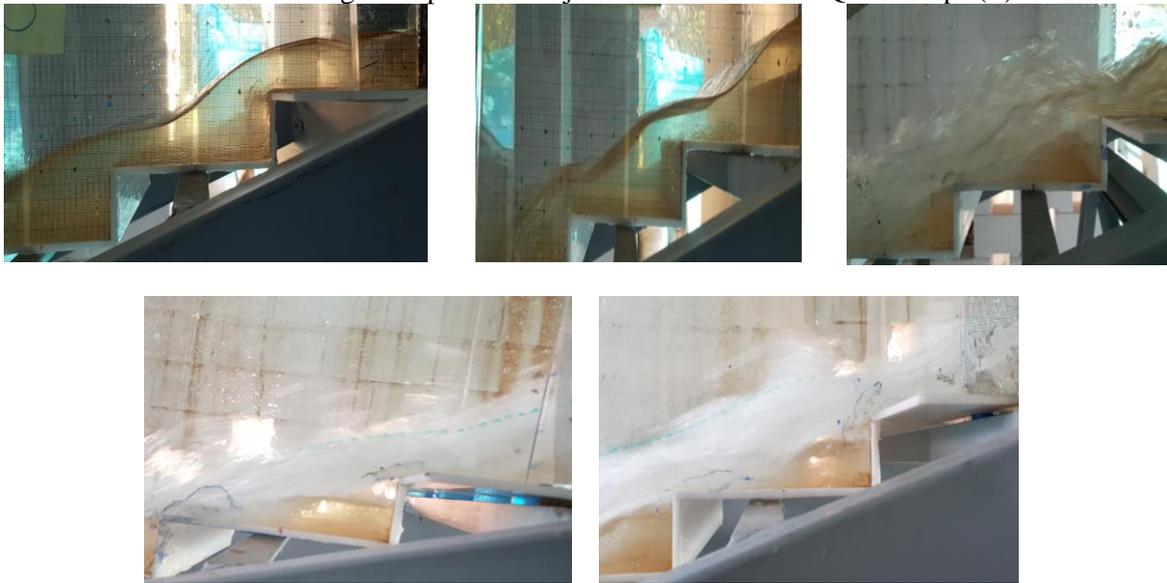
Anexo 16. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 $Q = 0.94$ lps (EE)



Anexo 17. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 $Q = 3.62$ lps (EE)

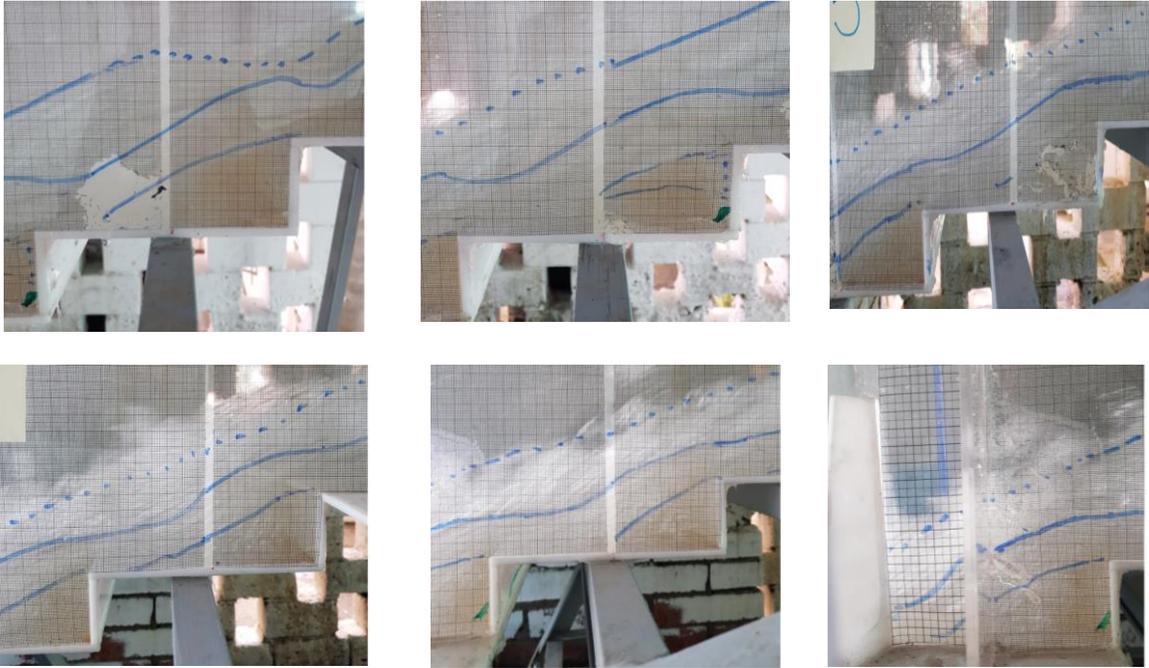


Anexo 18. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 $Q = 7.50$ lps (T)



Anexo 19. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 $Q = 9.55$ lps (T)





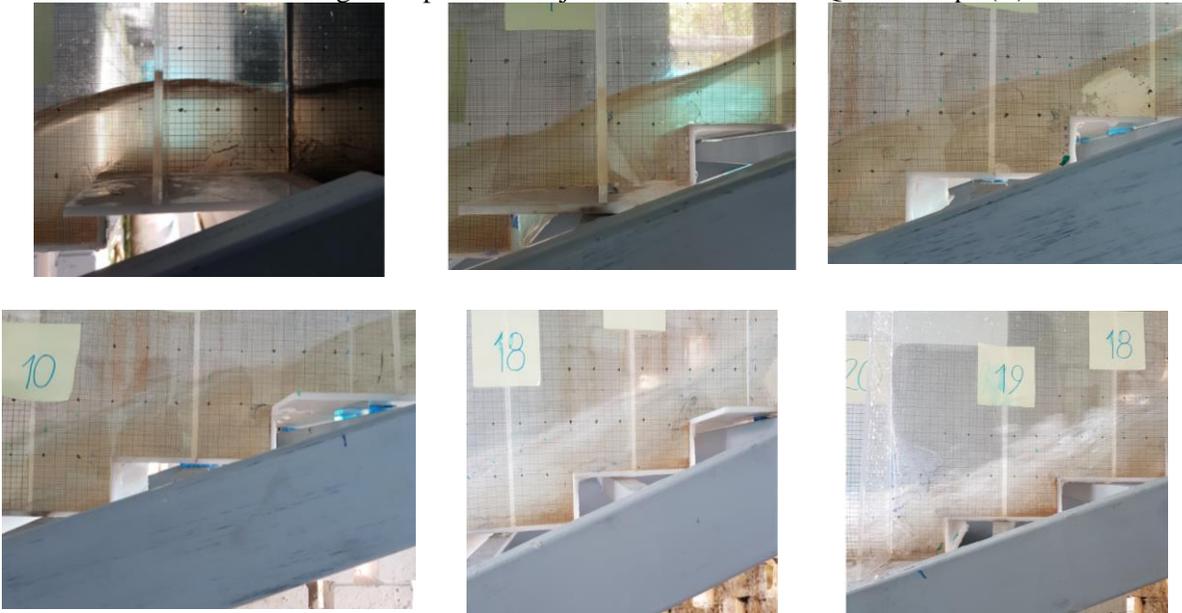
Anexo 20. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 $Q = 11.02$ lps (R)



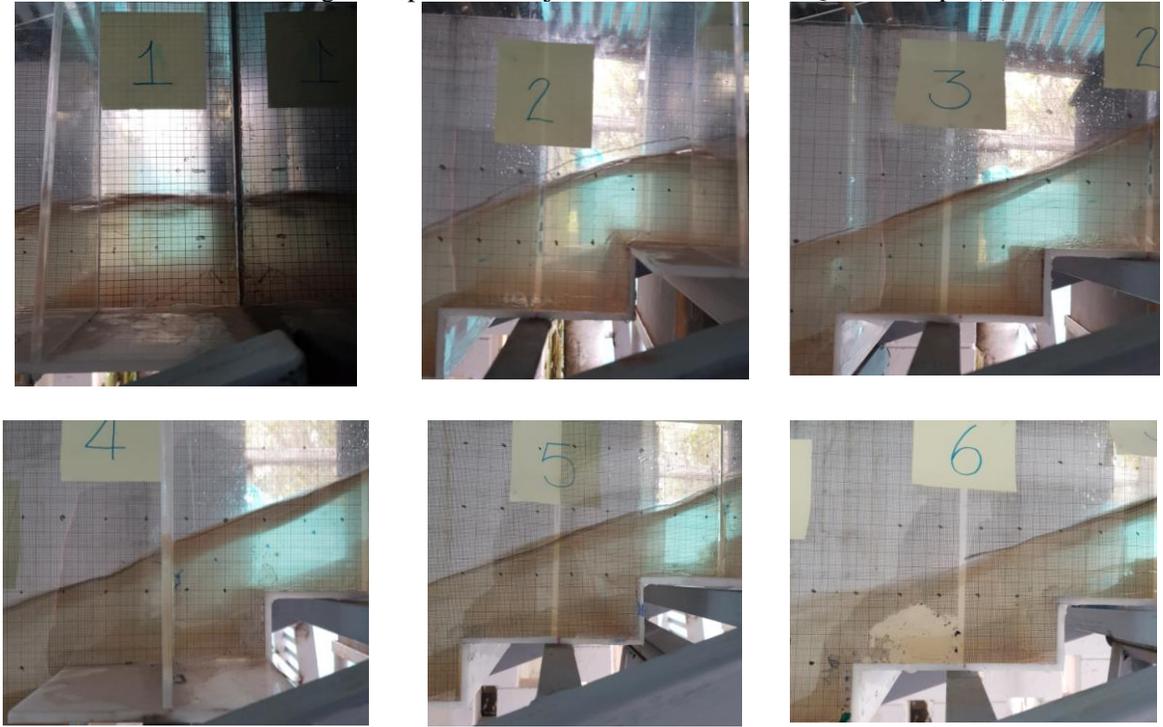
Anexo 21 Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 $Q = 14.39$ lps (R)

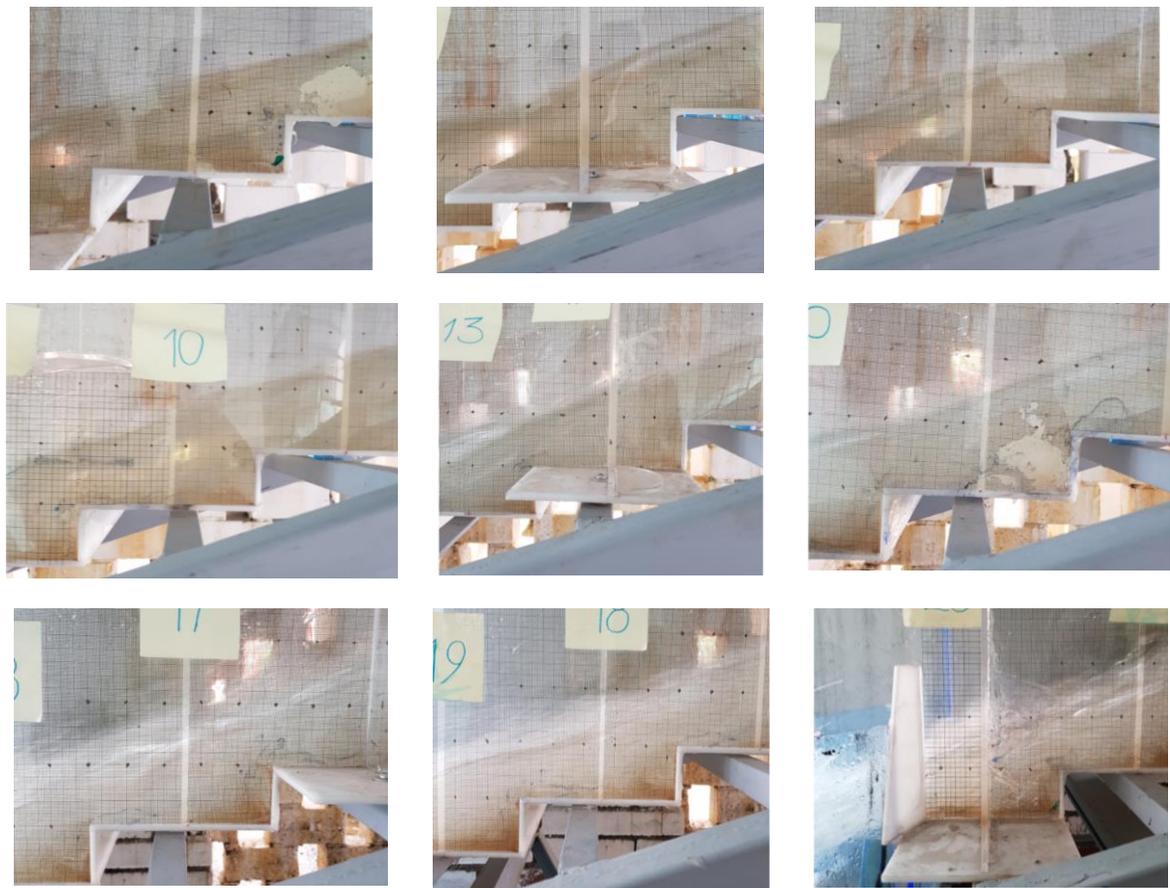


Anexo 22 Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 18.48 lps (R)

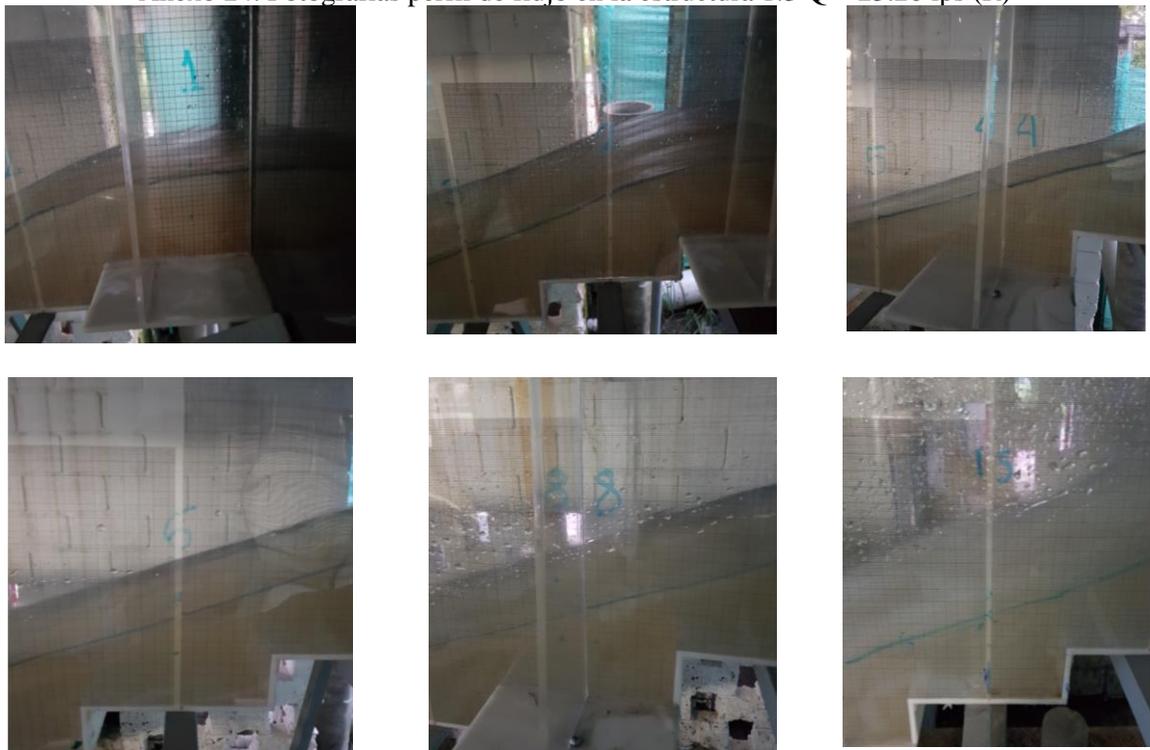


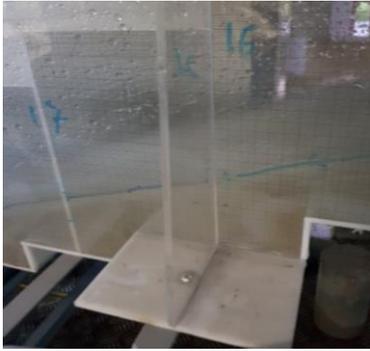
Anexo 23. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 Q = 22.84 lps (R)



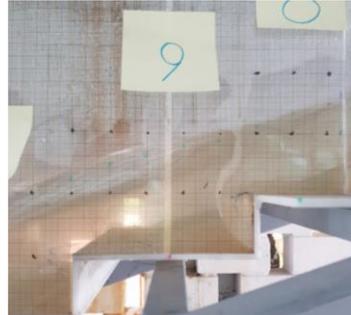
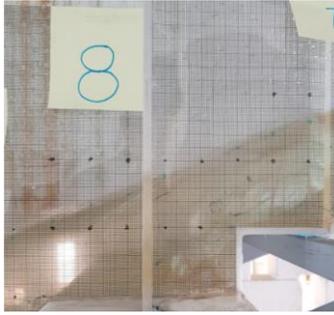
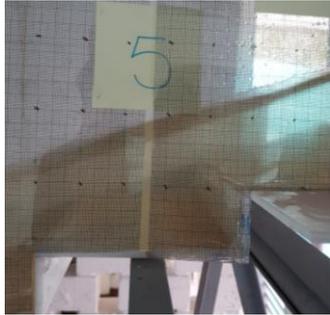
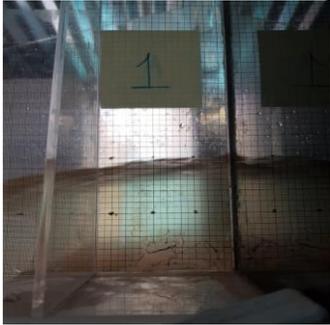


Anexo 24. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 $Q = 25.20$ lps (R)





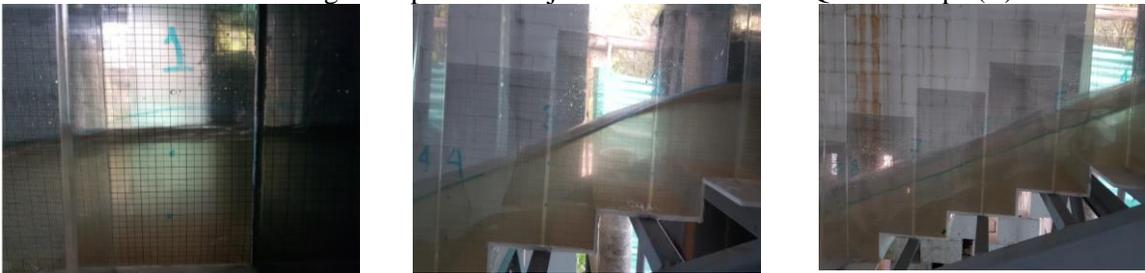
Anexo 25. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 $Q = 29.38$ lps (R)

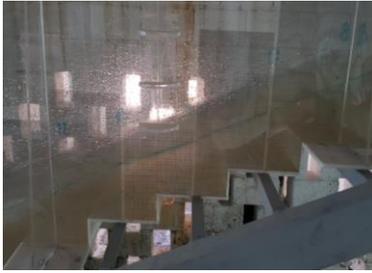


Anexo 26. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 $Q = 33.74$ lps (R)



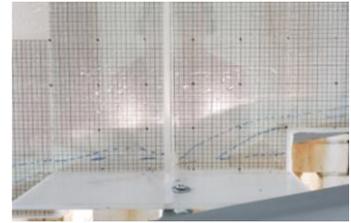
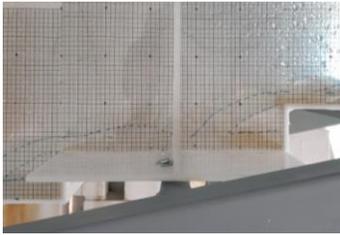
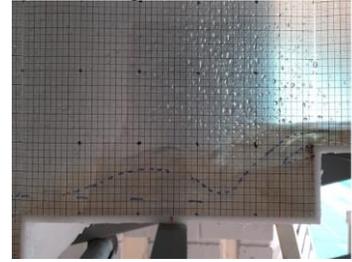
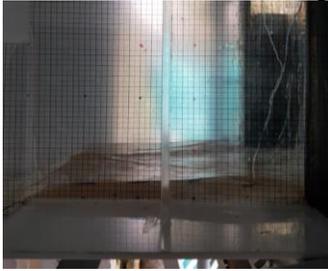
Anexo 27. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:3 $Q = 40.38$ lps (R)



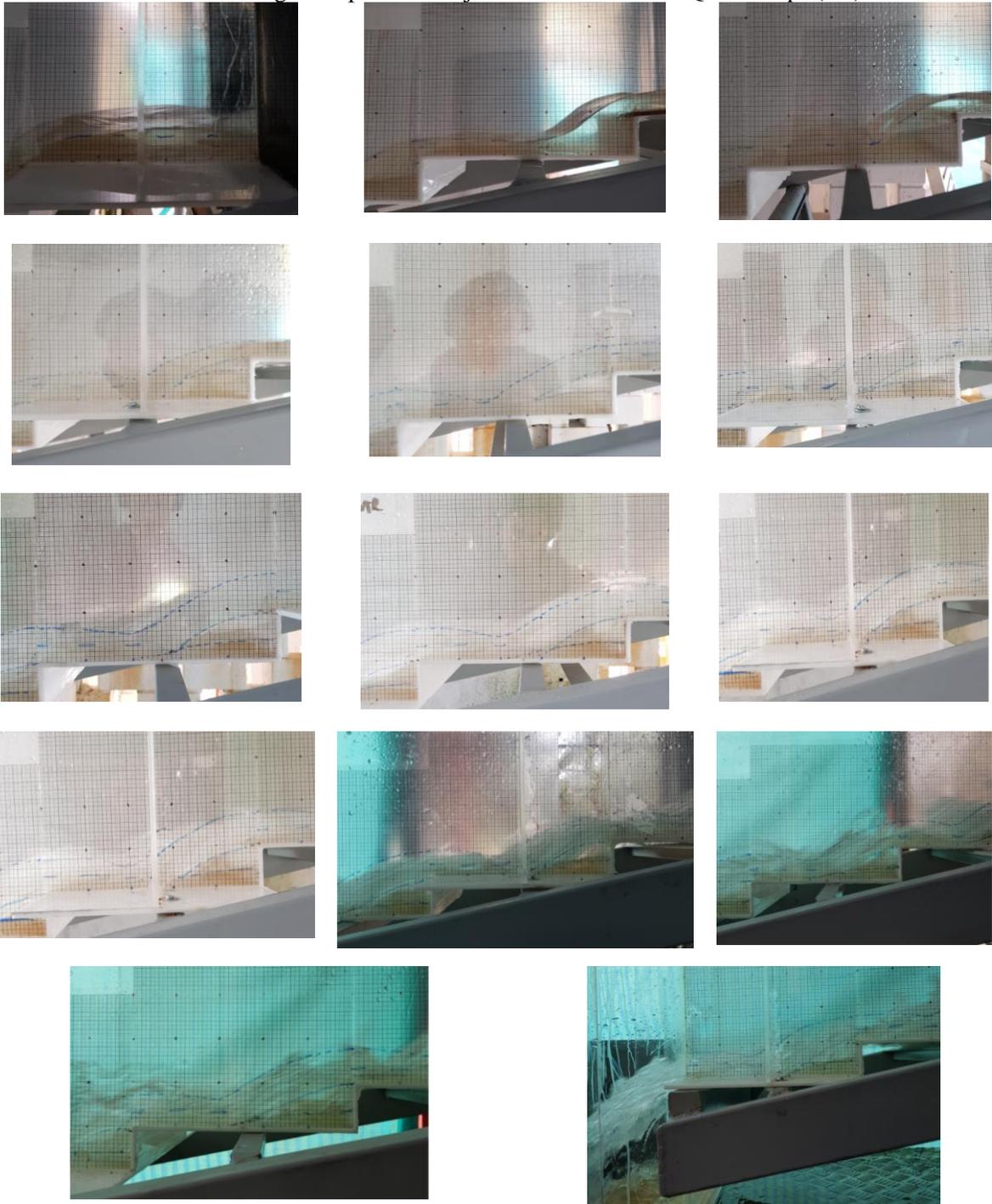


11.1.3. Estructura escalonada con pendiente 1:5

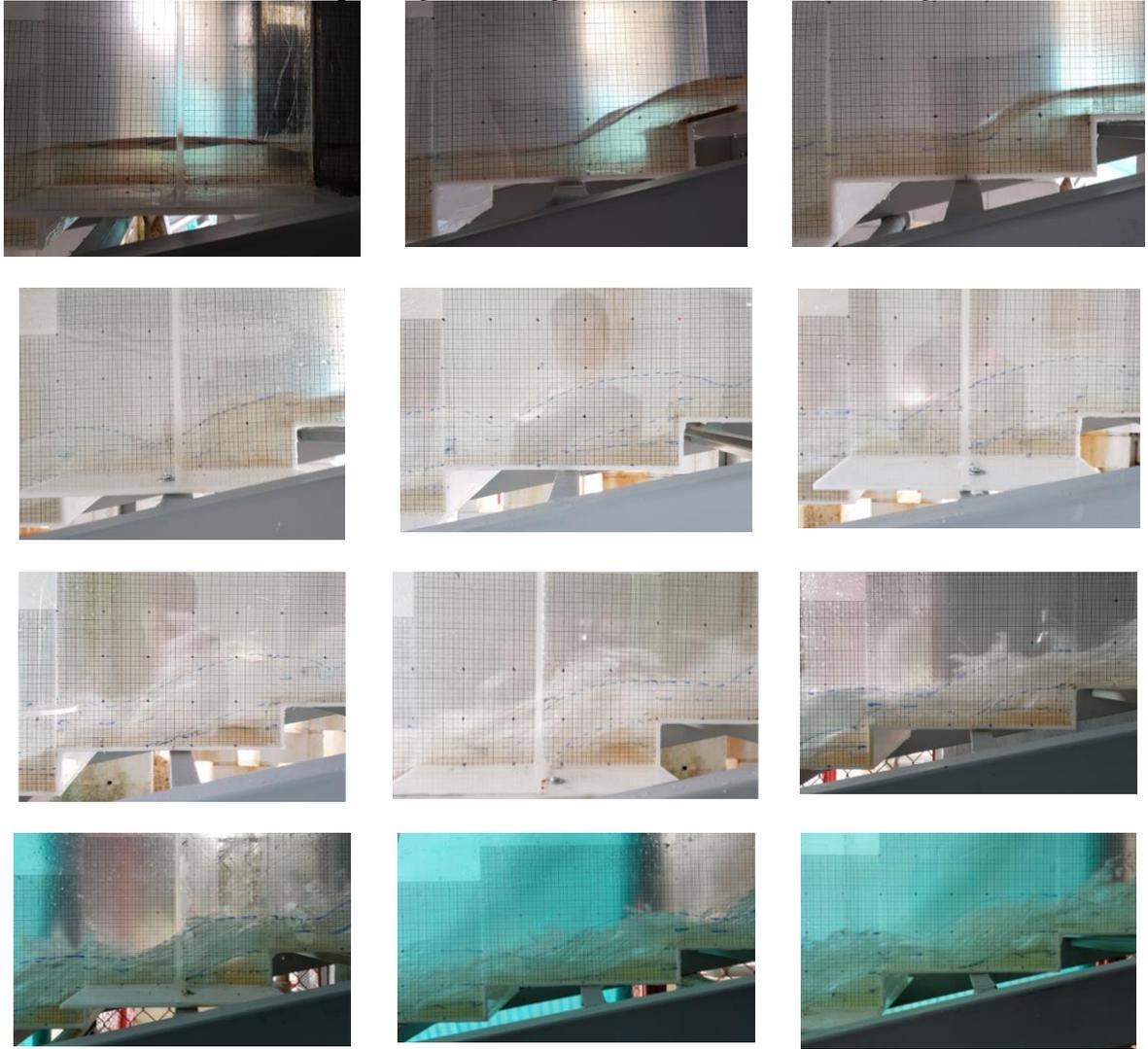
Anexo 28. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 $Q = 2.70$ lps (EE)



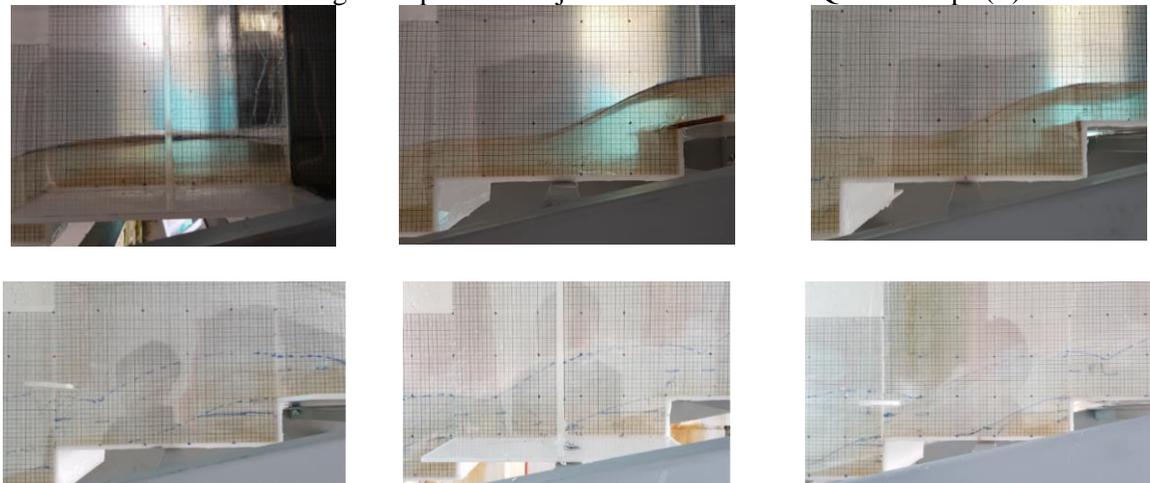
Anexo 29. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 $Q = 5.54$ lps (EE)

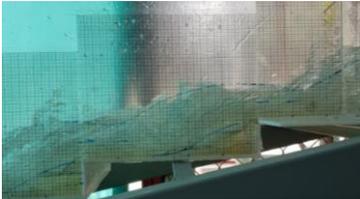


Anexo 30. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 $Q = 8.85$ lps (T)

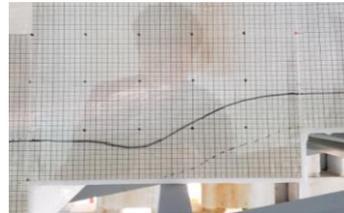
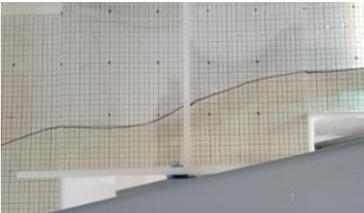
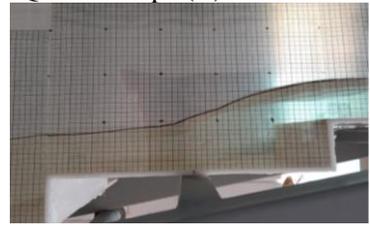


Anexo 31. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 $Q = 12.02$ lps (T)

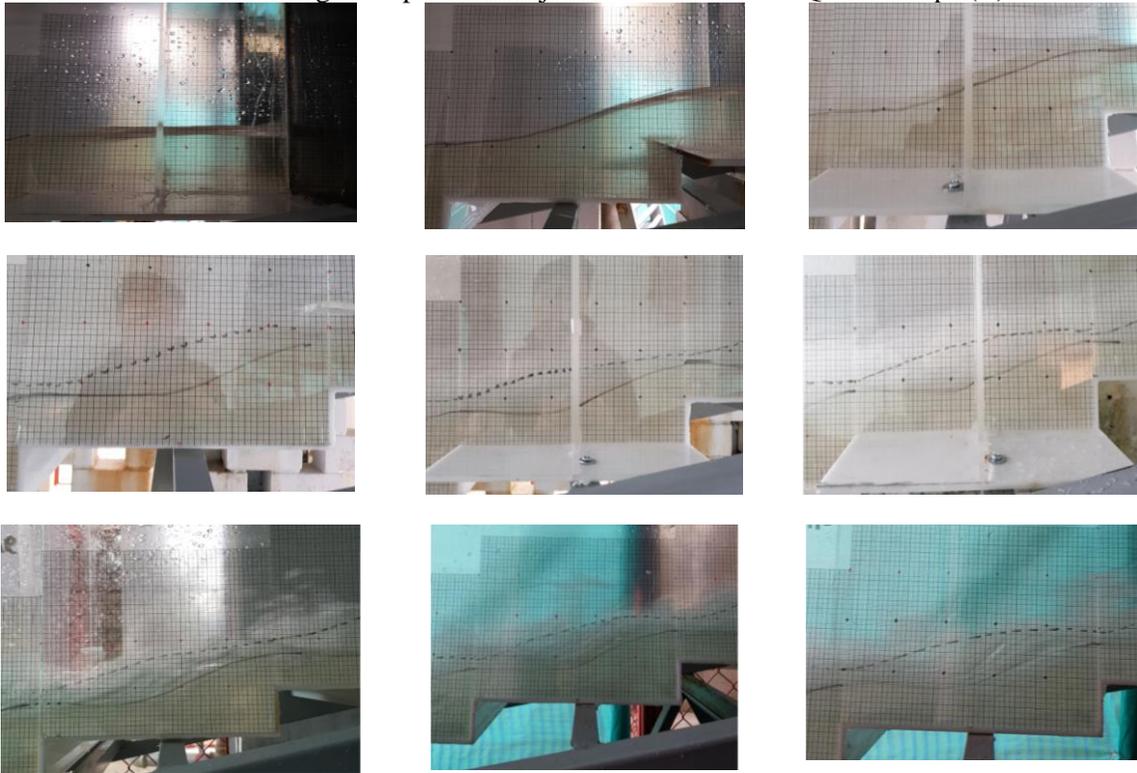




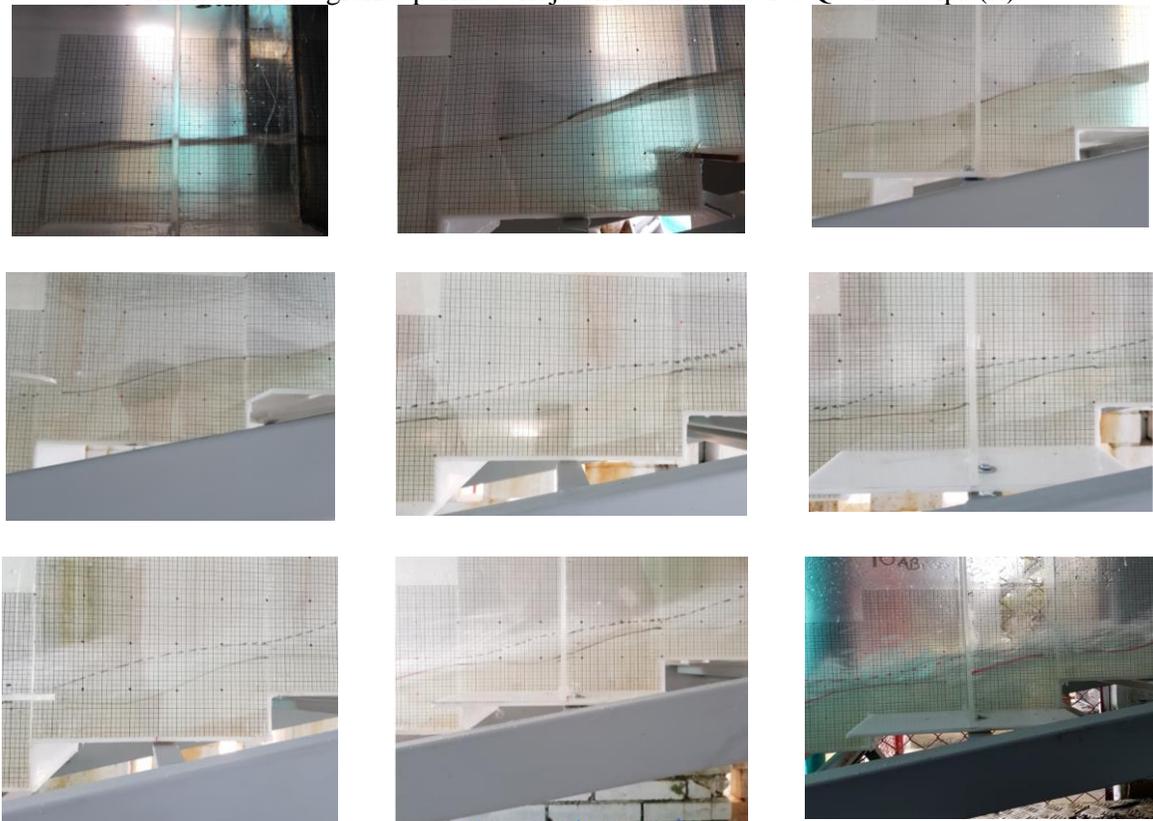
Anexo 32. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 $Q = 14.96 \text{ lps (R)}$

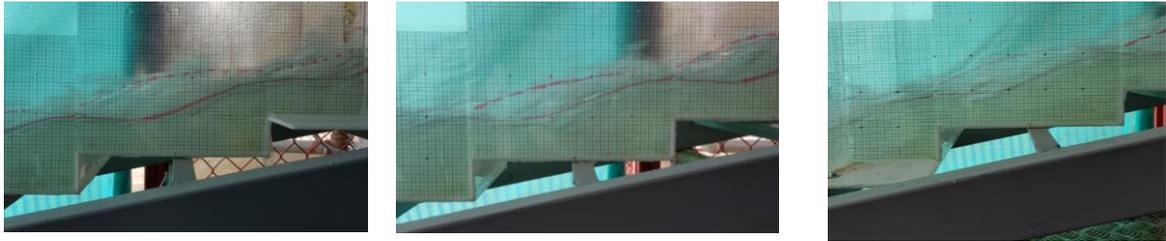


Anexo 33. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 $Q = 19.89$ lps (R)

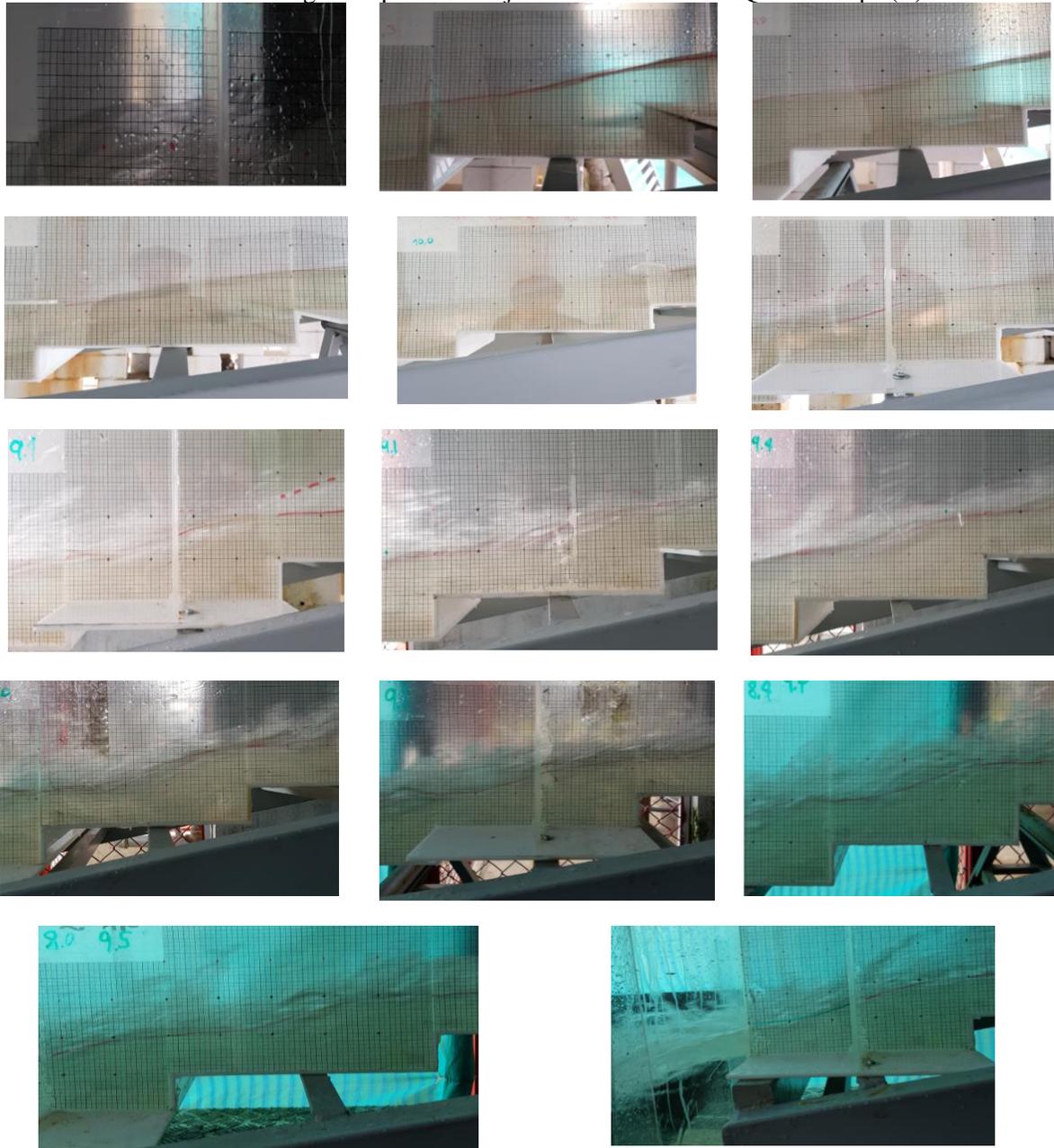


Anexo 34. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 $Q = 25.56$ lps (R)

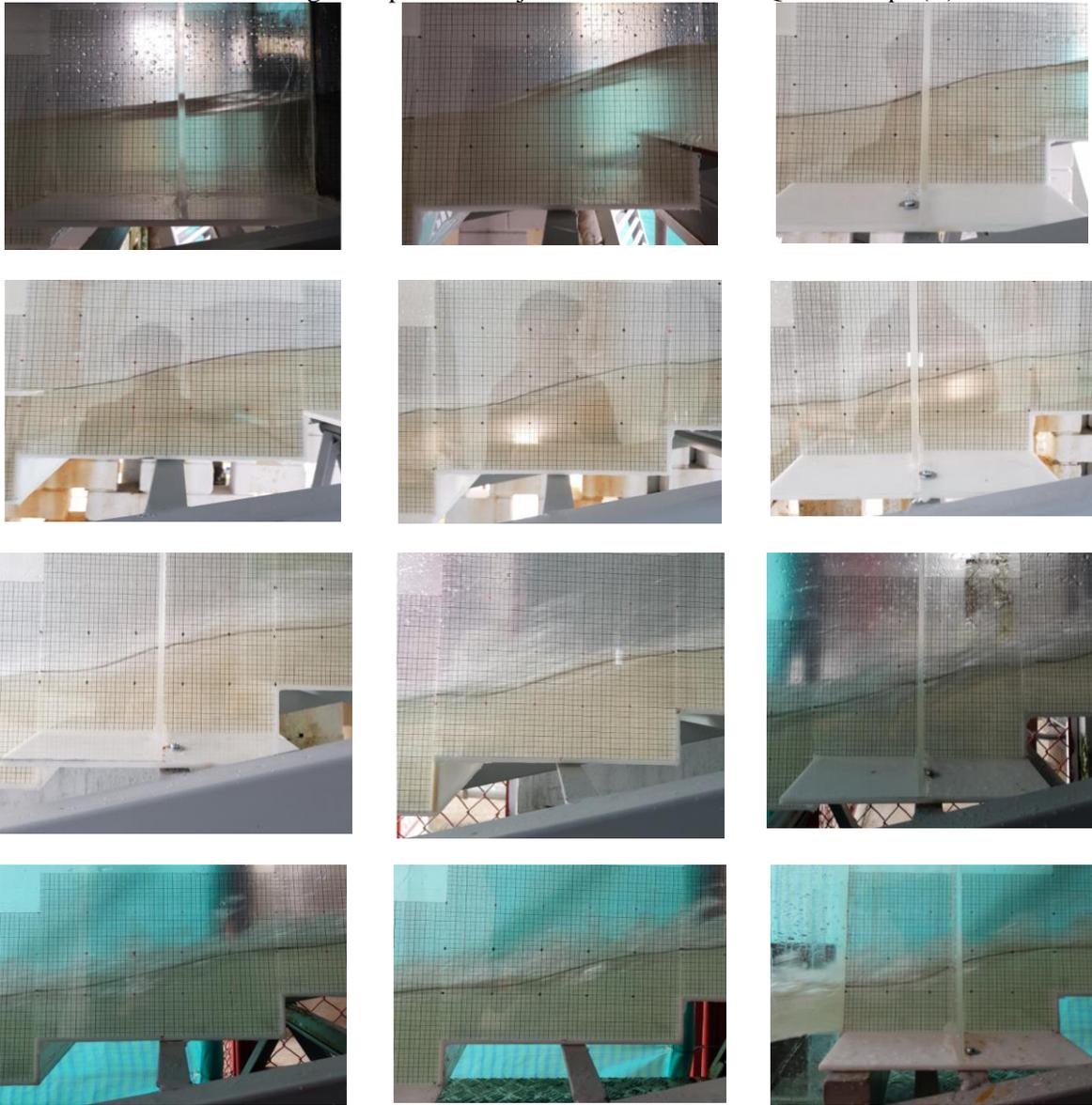




Anexo 35. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 $Q = 25.56$ lps (R)



Anexo 36. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 $Q = 34.10$ lps (R)



Anexo 37. Fotografías perfil de flujo en la estructura 1:5 $Q = 39.75$ lps (R)



