

**EFFECTO DE ALTAS CONCENTRACIONES Y GRANULOMETRÍA DE LOS
SEDIMENTOS EN LA PENDIENTE CRÍTICA DE DEPÓSITO Y EN LA PÉRDIDA
DE ENERGÍA EN CANALES ABIERTOS DE SECCIÓN CIRCULAR,
TRIANGULAR Y RECTANGULAR**

**OSCAR ERMINSUL CERÓN ROMO
GUIDO FERNANDO OJEDA BURBANO**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO, NOVIEMBRE DE 2008**

**EFFECTO DE ALTAS CONCENTRACIONES Y GRANULOMETRÍA DE LOS
SEDIMENTOS EN LA PENDIENTE CRÍTICA DE DEPÓSITO Y EN LA PÉRDIDA
DE ENERGÍA EN CANALES ABIERTOS DE SECCIÓN CIRCULAR,
TRIANGULAR Y RECTANGULAR**

**OSCAR ERMINSUL CERÓN ROMO
GUIDO FERNANDO OJEDA BURBANO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Civil**

**Director:
HERNÁN JAVIER GÓMEZ ZAMBRANO
Ingeniero Civil
Magíster en Recursos Hidráulicos**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO, NOVIEMBRE DE 2008**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones del presente trabajo son de responsabilidad exclusiva de sus autores

Artículo 1 de acuerdo N° 324 de octubre de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño

Nota de aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

San Juan de Pasto, Octubre de 2008

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

Hernán Gómez Zambrano: I.C. Msc. En Recursos Hidráulicos. Profesor titular de la Universidad de Nariño, por su gran colaboración, orientación y motivación.

Roberto García C: I.A., Auxiliar de laboratorio de la Universidad de Nariño, por sus atenciones, y su gran disposición en momentos de necesidad.

Gustavo Ponce: Auxiliar de laboratorio de la Universidad de Nariño, por su colaboración desinteresada y disposición.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	
DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	27
Planteamiento del problema	27
Descripción del problema	27
OBJETIVOS	27
Objetivo general	27
Objetivos específicos	28
HIPÓTESIS	28
1. MARCO REFERENCIAL	29
1.1 GENERALIDADES	29
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS	29
1.2.1 Modos de transporte	30
1.2.2 Uniformidad de los sedimentos	31
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS	31
1.4 PÉRDIDA DE ENERGÍA EN CANALES	32
1.4.1 Factor de fricción de la mezcla (f_m)	32
1.4.2 Coeficiente de Chezy, (Ch), modificado para la mezcla	33
1.5 PENDIENTE CRÍTICA DE DEPÓSITO	34
1.6 VELOCIDAD LÍMITE DE DEPÓSITO (VL)	34

1.7 AFORO POR PLACAS DE ORIFICIO	38
1.7.1 Tomas de presión	38
1.7.2 Regresión lineal múltiple variable	43
1.8 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE SECCIONES DE CANALES	44
2. ADECUACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE MEZCLAS	45
2.1 INSTALACIONES HIDRÁULICAS	45
2.1.2 Adecuación de estructura existente	50
3. ADECUACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE CANALES DE ENSAYOS	52
3.1 CANAL CIRCULAR	52
3.1.1 Montaje del canal circular en la viga-soporte	53
3.2 CANAL RECTANGULAR Y TRIANGULAR	53
3.2.1 Montaje del canal triangular en la viga-soporte	53
3.2.2 Montaje del canal rectangular en la viga-soporte	55
3.3 CONSTRUCCIÓN CANAL RECTANGULAR (5CM * 25CM * 6M DE LONGITUD)	55
3.3.1 Montaje del canal rectangular 5cm en la viga-soporte	55
4. ENSAYOS DE SUELOS Y CALIBRACIÓN DE EQUIPOS	56
4.1 ENSAYO DE SUELOS	56
4.1.1 Ensayos de gravedad específica	56
4.1.2 Ensayos de granulometría	59
4.3.1 Dosificador de sólidos	65
5. PROCEDIMIENTO PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO	70
5.1 TOMA DE DATOS DEL MODELO DE LABORATORIO	70

5.1.1 Recopilacion de datos	70
5.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	71
5.2.1 Variables a analizar en la regresión lineal múltiple-variable	73
6. ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	74
6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS	74
6.1.1 Descripción del proceso del análisis	74
6.1.2 Resultados obtenidos para pérdida de energía en canales abiertos	74
6.1.3 Deducción de fórmulas para Pérdida de energía en canales Rectangulares	85
6.1.4 Resultados obtenidos para pendiente crítica en canales abiertos	130
6.1.5 Efecto de la alta concentración y la granulometría sobre el coeficiente de fricción de la mezcla y pendiente crítica en canales abiertos	140
7. CONCLUSIONES	147
8. RECOMENDACIONES	149
9. BIBLIOGRAFIA	150

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Tomas de presión aforo por orificio	38
Figura 2. Aforo de caudales	39
Figura 3. Instalación tubería de 4" presión	45
Figura 4. Aseguramiento de la tubería con abrazadera	45
Figura 5. Rotura accesorio macho 4	46
Figura 6. Recuperación de accesorios	46
Figura 7. Instalación accesorio macho y pega de accesorios recuperados	47
Figura 8. Accesorio T 4" presión para aliviar el exceso de caudal al tanque elevado	47
Figura 3. Apertura de orificios en el fondo del desarenador	48
Figura 4. Ampliación orificio de salida de 2/1" a 4	48
Figura 5. Instalación de accesorio macho y hembra de 4" al orificio de Salida	48
Figura 6. Instalación tubería sanitaria desde el desarenador al reservorio	49
Figura 7. Corte del mezclador para hacerlo funcionar como vertedero	49
Figura 8. Adaptación niple para desalojar el agua del tanque	50
Figura 9. Ajuste de la tubería del tanque de cabeza constante al tanque inclinado con manguera de lona 2	50
Figura 16. Nuevas abrazaderas metálicas	51
Figura 10. Adaptación de guía metálica y de cinta métrica	51
Figura 11. Canal circular sin modificar	52
Figura 19. Canal circular modificado	52
Figura 20. Construcción canal en acrílico	54

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Clasificación de sedimentos naturales según su tamaño. Según La American Society of Testing Material (ASTM). Dada por Lane (Yang 1996)	30
Cuadro 2. Calibración manómetro en U para medir caudales	40
Cuadro 3. Elementos geométricos de secciones de canales	44
Cuadro 4. Toma de datos y resultados gravedad específica	58
Cuadro 5. Factor de corrección por temperatura	58
Cuadro 6. Análisis granulométrico de la arena tipo I	60
Cuadro 7. Análisis granulométrico de la arena tipo II	60
Cuadro 8. Análisis granulométrico de la arena tipo III	60
Cuadro 9. Análisis granulométrico de arena tipo IV	61
Cuadro 10. Análisis granulométrico de arena tipo V	61
Cuadro 11. Arena tipo	64
Cuadro 12. Arena tipo 2	64
Cuadro 13. Arena tipo 3	64
Cuadro 14. Arena tipo 4	65
Cuadro 15. Arena tipo 5	65
Cuadro 16. Calibración dosificador arena tipo 1	66
Cuadro 17. Calibración dosificador arena tipo 2	67
Cuadro 18. Calibración dosificador arena tipo 3	68
Cuadro 19. Calibración dosificador arena tipo 4	68
Cuadro 20. Calibración dosificador arena tipo 5	69

Cuadro 21.	Pérdida de energía según la ecuación no 42, Pérdida de energía experimental en canales circulares abiertos y porcentaje de error	79
Cuadro 22.	Pérdida de energía según la ecuación [42], diámetro adimensional de partículas por ecuación [43] en canales circulares abiertos	80
Cuadro 23.	Pérdida de energía por ecuación [42] y coeficiente de arrastre de partículas por ecuación [44] en canales circulares abiertos	81
Cuadro 24.	Datos experimentales de pérdida de energía en canal rectangular 10 cm arena tipo I	86
Cuadro 25.	Datos experimentales de pérdida de energía en canal rectangular 10 cm arena tipo II	87
Cuadro 26.	Datos experimentales de pérdida de energía en canal rectangular 10 cm arena tipo III	88
Cuadro 27.	Datos experimentales de pérdida de energía en canal rectangular 10 cm arena tipo IV	88
Cuadro 28.	Datos experimentales de pérdida de energía en canal rectangular 10 cm arena tipo V	89
Cuadro 29.	Datos experimentales de pérdida de energía para altas concentraciones en canal rectangular 10 cm	90
Cuadro 30.	Datos experimentales de pérdida de energía para bajas concentraciones en canal rectangular 10 cm.	92
Cuadro 31.	Datos experimentales de pérdida de energía ajustados por regresión lineal para altas concentraciones en canal rectangular 10cm.	94
Cuadro 32.	Datos experimentales de pérdida de energía ajustados por regresión lineal para bajas concentraciones en canal rectangular 10cm.	96
Cuadro 33.	Datos experimentales de pérdida de energía con el coeficiente de arrastre de partículas para bajas	

	concentraciones en canal rectangular 10 cm.	97
Cuadro 34.	Datos experimentales de pérdida de energía con el coeficiente de arrastre de partículas para altas concentraciones en canal rectangular 10 cm.	99
Cuadro 35.	Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo I en canal rectangular 5 cm.	110
Cuadro 36.	Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo II en canal rectangular 5cm.	111
Cuadro 37.	Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo III en canal rectangular 5cm.	112
Cuadro 38.	Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo IV en canal rectangular 5cm.	113
Cuadro 39.	Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo II en canal rectangular 5cm.	115
Cuadro 40.	Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo II con alta concentraciones en canal rectangular 5cm.	117
Cuadro 41.	Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo II con baja concentraciones en canal rectangular 5cm.	121
Cuadro 42.	Datos experimentales de pérdida de energía en canal triangular	127
Cuadro 43.	Datos experimentales de pérdida de energía con diámetro adimensional de partículas en canales triangulares abiertos	128
Cuadro 44.	Datos experimentales de pérdida de energía con coeficiente de arrastre de partículas en canales triangulares abiertos	129
Cuadro 45.	Datos experimentales para pendiente crítica, coeficiente	

	de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas en canales circulares	132
Cuadro 46.	Datos experimentales para pendiente crítica, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas en canal rectangular de base 10 cm.	134
Cuadro 47.	Datos experimentales para pendiente crítica, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas en canal rectangular de base 5 cm.	136
Cuadro 48.	Datos experimentales para pendiente crítica, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas en canal triangular	139

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Curva de calibración Placa de Orificio	42
Gráfica 12. Curva granulométrica para arena tipo 1	62
Gráfica 3. Curva granulométrica para arena tipo 2	62
Gráfica 4. Curva granulométrica para arena tipo 3	62
Gráfica 5. Curva granulométrica para arena tipo 4	63
Gráfica 6. Curva granulométrica para arena tipo 5	63
Gráfica 7. Línea de tendencia arena tipo 1	67
Gráfica 8. Línea de tendencia arena tipo 2	67
Gráfica 9. Línea de tendencia arena tipo 3	68
Gráfica 10. Línea de tendencia arena tipo 4	69
Gráfica 11. Línea de tendencia arena tipo 5	69
Gráfica 12. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo I canal circular	75
Gráfica 13. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo II canal circular	75
Gráfica 14. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo III canal circular	76
Gráfica 15. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo IV canal circular	76
Gráfica 16. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo V canal circular	77
Gráfica 17. Pérdida de energía obtenido de la ecuación no [42] vs pendiente crítica para arena tipo II canal circular	78

Gráfica 18. Comparación valor experimental vs valor teórico de pérdida de energía en canal circular	82
Gráfica 19. Valor experimental vs teórico de diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla en canal circular	82
Gráfica 20. Valor experimental vs teórico del coeficiente de arrastre de partículas en canal circular	83
Gráfica 21. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo I canal rectangular 10 cm	83
Gráfica 22. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo II canal rectangular 10 cm	84
Gráfica 23. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo III canal rectangular 10 cm	84
Gráfica 24. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo IV canal rectangular 10 cm	85
Gráfica 25. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo V canal rectangular 10 cm	85
Gráfica 26. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para la totalidad de resultados en canal rectangular	100
Gráfica 27. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para la totalidad de resultados	101
Gráfica 28. Valor experimental vs teórico del Coeficiente de arrastre de partículas para la totalidad de resultados	102
Gráfica 29. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para altas concentraciones de sólidos en canal rectangular	102
Gráfica 30. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para altas concentraciones	102
Gráfica 31. Valor experimental vs teórico del coeficiente de arrastre de partículas para altas concentraciones	103
Gráfica 32. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para bajas concentraciones de sólidos en canal rectangular	103

Gráfica 33. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para bajas concentraciones	104
Gráfica 34. Valor experimental vs teórico del coeficiente de arrastre de partículas para bajas concentraciones	104
Gráfica 35. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo I canal rectangular 5 cm	105
Gráfica 36. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo II canal rectangular 5 cm	105
Gráfica 37. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo III canal rectangular 5 cm	106
Gráfica 38. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo IV canal rectangular 5 cm	106
Gráfica 39. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo v canal rectangular 5 cm	107
Gráfica 40. Pérdida de energía ecuación [50] vs pendiente crítica ajustada por regresión lineal arena tipo I canal rectangular 5 cm	108
Gráfica 41. Pérdida de energía ecuación [50] vs pendiente crítica ajustada por regresión lineal arena tipo II canal rectangular 5 cm	108
Gráfica 42. Pérdida de energía ecuación [50] vs pendiente crítica ajustada por regresión lineal arena tipo III canal rectangular 5 cm	109
Gráfica 43. Pérdida de energía ecuación [50] vs pendiente crítica ajustada por regresión lineal arena tipo IV canal rectangular 5 cm	109
Gráfica 44. Pérdida de energía ecuación [50] vs pendiente crítica ajustada por regresión lineal arena tipo v canal rectangular 5 cm	110
Gráfica 45. Pérdida de energía [44] vs pendiente crítica para altas concentraciones de sólidos arena i canal rectangular 5 cm	115
Gráfica 46. Pérdida de energía [44] vs pendiente crítica para altas concentraciones de sólidos arena II canal rectangular 5cm	115
Gráfica 47. Pérdida de energía vs pendiente crítica para alta concentración de sólidos arena III canal rectangular 5cm	115

Gráfica 48. Pérdida de energía [44] vs pendiente crítica para alta concentración de sólidos arena IV canal rectangular 5cm	116
Gráfica 49. Pérdida de energía [44] vs pendiente crítica para alta concentración de sólidos arena V canal rectangular 5cm	116
Gráfica 50. Pérdida de energía [47] vs pendiente crítica para baja concentración de sólidos arena tipo I canal rectangular 5cm	119
Gráfica 51. Pérdida de energía [47] vs pendiente crítica para baja concentración de sólidos arena tipo II canal rectangular 5cm	119
Gráfica 52. Pérdida de energía [47] vs pendiente crítica para baja concentración de sólidos arena tipo III canal rectangular 5cm	119
Gráfica 53. Pérdida de energía [47] vs pendiente crítica para baja concentración de sólidos arena tipo IV canal rectangular 5cm	120
Gráfica 54. Pérdida de energía [47] vs pendiente crítica para baja concentración de sólidos arena tipo V canal rectangular 5cm	120
Gráfica 55. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para la totalidad de resultados	122
Gráfica 56. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para la totalidad de resultados	123
Gráfica 57. Valor experimental vs teórico del Coeficiente de arrastre de partículas para la totalidad de resultados	123
Gráfica 58. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para altas concentraciones de sólidos en canal rectangular	123
Gráfica 59. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para altas concentraciones	124
Gráfica 60. Valor experimental vs teórico del Coeficiente de arrastre de partículas para altas concentraciones	124
Gráfica 61. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para bajas concentraciones de sólidos en canal rectangular	124

Gráfica 62. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para bajas concentraciones	125
Gráfica 63. Valor experimental vs teórico del Coeficiente de arrastre de partículas para bajas concentraciones	125
Gráfica 64. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo II canal triangular	126
Gráfica 65. Pérdida de energía vs pendiente crítica ajustados por regresión lineal con ecuación no. [51] arena tipo II canal triangular	126
Gráfica 66. Pérdida de energía con diámetro adimensional de partículas calculado con ecuación no. [52] en canales triangulares abiertos	126
Gráfica 67. Pérdida de energía con el coeficiente de arrastre de partículas calculado con ecuación no. [53] en canales triangulares abiertos	127
Gráfica 68. Comparación valor experimental vs valor teórico de pérdida de energía en canal triangular	129
Gráfica 69. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla en canal triangular	130
Gráfica 70. Valor experimental vs teórico del Coeficiente de arrastre de partículas en canal triangular	130
Gráfica 71. Pendiente crítica experimental vs concentración de mezcla para canal circular	131
Gráfica 72. Pendiente crítica vs concentración de mezcla ajustado por regresión lineal con ecuación No. [54] en canal circular	131
Gráfica 73. Valor Teórico vs valor experimental con desviación estándar y concentración de la mezcla en canales circulares	132
Gráfica 74. Pendiente crítica experimental vs concentración de mezcla para canal rectangular base 10cm.	133
Gráfica 75. Pendiente crítica vs concentración de mezcla ajustado por regresión lineal con ecuación No. [58], canal	

	rectangular 10 cm.	133
Gráfica 76.	Comparación Datos Teórico vs Datos experimentales con desviación estándar y concentración en canal rectangular 10 cm.	135
Gráfica 77.	Pendiente crítica experimental vs concentración de mezcla para canal rectangular base 5cm	135
Gráfica 78.	Pendiente crítica vs concentración de mezcla ajustada por regresión lineal con ecuación No. [42] en canal rectangular 5 cm.	136
Gráfica 79.	Comparación Datos Teórico vs Datos experimentales con desviación estándar y concentración en canal rectangular 5 cm.	138
Gráfica 80.	Pendiente crítica experimental vs concentración de mezcla para canal triangular	138
Gráfica 81.	Pendiente crítica vs concentración de mezcla ajustada por regresión lineal con la ecuación No. [66] en canal triangular	139
Gráfica 82.	Comparación Datos Teórico vs Datos experimentales con desviación estándar y concentración en canal triangular abierto	140
Gráfica 83.	Pendiente crítica vs coeficiente de uniformidad en canales cíclicos	140
Gráfica 84.	Pendiente crítica vs coeficiente de curvatura en canales cíclicos	141
Gráfica 85.	Coeficiente de uniformidad vs factor de fricción de la mezcla en canales cíclicos	141
Gráfica 86.	Coeficiente de curvatura del sedimento vs factor de fricción de la mezcla en canales cíclicos	142
Gráfica 87.	Pendiente crítica vs coeficiente de uniformidad en canales rectangulares 10 cm de espesor	142
Gráfica 88.	Pendiente crítica vs coeficiente de curvatura en canales rectangulares 10 cm de espesor	143

Gráfica 89. Coeficiente de uniformidad vs factor de fricción de la mezcla en canales rectangulares 10 cm de espesor	143
Gráfica 90. Coeficiente de curvatura del sedimento vs factor de fricción de la mezcla en canales rectangulares 10 cm de espesor	144
Gráfica 91. Pendiente crítica vs coeficiente de uniformidad en canales rectangulares 5 de espesor	144
Gráfica 92. Pendiente crítica vs coeficiente de curvatura en canales rectangulares 5 de espesor	145
Gráfica 93. Coeficiente de uniformidad vs factor de fricción de la mezcla en canales rectangulares 5 cm de espesor	145
Gráfica 94. Coeficiente de curvatura del sedimento vs factor de fricción de la mezcla en canales rectangulares 5 cm de espesor.	146

RESUMEN

LA PRESENTE PROPUESTA FORMA PARTE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN DENOMINADO “ESTUDIO DEL TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MEZCLAS AGUA-SÓLIDOS EN CANALES ABIERTOS”, APROBADO POR LA VIPRI DE LA UNIVERSIDAD DE NARIÑO, EL CUAL ESTÁ SIENDO DESARROLLADO A TRAVÉS DE PROYECTOS DE GRADO EN MODALIDAD DE INVESTIGACIÓN.

DE ESTE MODO EL TEMA INCLUYE EL ESTUDIO DEL EFECTO QUE TENDRÍAN LAS ALTAS CONCENTRACIONES DE PARTÍCULAS SÓLIDAS DISCRETAS, ENTRE ARENA MUY FINA Y GRAVA FINA, POR UN LADO Y LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA, POR EL OTRO, EN LA PENDIENTE CRÍTICA DE DEPÓSITO Y LA PÉRDIDA DE ENERGÍA EN EL TRANSPORTE HIDRÁULICO DE SEDIMENTOS EN CANALES ABIERTOS DE SECCIÓN CIRCULAR, TRIANGULAR Y RECTANGULAR. LOS PARÁMETROS A ESTUDIAR SON LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA DEBIDO A AL FLUJO DE ESTAS MEZCLAS Y LAS PENDIENTES A LAS CUALES SE PRODUCE LA DEPOSITACIÓN.

LAS MEZCLAS DE MATERIAL ALUVIAL, ESTÁN CONSTITUIDAS POR AGUA Y SEDIMENTOS, LAS CUALES SON MUY COMUNES EN LA NATURALEZA. EN LA MINERÍA SE MANEJAN COMÚNMENTE MEZCLAS DE MINERALES EN MATRICES ALUVIALES Y AGUA. GÓMEZ-ORDÓÑEZ (2002B)¹, REALIZAN UN ANÁLISIS TEÓRICO PARA LA VELOCIDAD MÍNIMA DE DEPOSITACIÓN EN CANALES ABIERTOS, PERO SU EXPRESIÓN CARECE DE COMPROBACIÓN EXPERIMENTAL. GÓMEZ (2004)², ESTUDIA EL EFECTO QUE TIENE LA CONCENTRACIÓN DE ARENAS Y LA PENDIENTE EN EL FLUJO DE AGUA-ARENA EN CANALES ABIERTOS, AUNQUE SU ESTUDIO ES LIMITADO A UN SOLO TAMAÑO DE ARENA EN UN CANAL DE ANCHO 3 CM, PROPORCIONA DATOS QUE PUEDEN SER USADOS COMO BASE PARA ADELANTAR UN ESTUDIO DE MAYOR ALCANCE. SE ESPERA ESTABLECER DESARROLLOS MATEMÁTICOS QUE EXPLIQUEN EL COMPORTAMIENTO DE LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA Y LAS PENDIENTES CRÍTICAS DE DEPÓSITO EN CANALES ABIERTOS, POR MEDIO DE LA TÉCNICA DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL, USANDO LOS DATOS EXPERIMENTALES DE LABORATORIO Y EVALUAR PROCEDIMIENTOS MATEMÁTICOS EXISTENTES. DE ESTE MODO PODER SELECCIONAR LOS QUE BRINDEN MAYOR SEGURIDAD EN EL CÁLCULO COMPARADOS CON LOS DATOS EXPERIMENTALES.

1 GÓMEZ, Z. Hernán. J., ORDÓÑEZ, O.J.I., “Velocidad Crítica de Depositación en el Transporte de Sedimentos en Tubos Horizontales a Presión”, XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana, Cuba, Octubre de 2002.

2 GÓMEZ, Z. Hernán. J. (2004). “Efecto de la Concentración de Partículas de Sedimentos Naturales en la Velocidad Mínima de Transporte en Canales Abiertos”. XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica”. São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil, octubre 18 al 22 de 2004.de 2004.

ABSTRACT

THE PROPOSED PRESENT IS PART OF THE DENOMINATED INVESTIGATION PROJECT "STUDY OF THE HYDRAULIC TRANSPORT OF MIXTURES WATER-SOLIDS IN OPEN CHANNELS", APPROVED BY THE VIPRI OF THE UNIVERSITY OF NARIÑO, WHICH IS BEING DEVELOPED THROUGH GRADE PROJECTS IN MODALITY OF INVESTIGATION.

THIS WAY THE TOPIC INCLUDES THE STUDY OF THE EFFECT THAT YOU/THEY WOULD HAVE THE HIGH CONCENTRATIONS OF DISCREET ACCUSTOMED TO PARTICLES, BETWEEN VERY FINE SAND AND FINE GRAVEL, ON ONE HAND AND THE SIZE DISTRIBUTION, FOR THE OTHER ONE, IN THE CRÍTICAL SLOPE OF DEPOSIT AND THE ENERGY LOSS IN THE HYDRAULIC TRANSPORT OF SILTS IN CHANNELS OPEN OF CIRCULAR, TRIANGULAR AND RECTANGULAR SECTION. THE PARAMETERS TO STUDY ARE THE ENERGY LOSSES DUE TO THE FLOW OF THESE MIXTURES AND THE SLOPES TO WHICH THE DEPOSIT TAKES PLACE.

THE MIXTURES OF ALLUVIAL MATERIAL, THEY ARE CONSTITUTED BY WATER AND SILTS, WHICH ARE VERY COMMON IN THE NATURE. IN THE MINING THEY ARE COMMONLY MANAGED MIXTURES OF MINERALS IN ALLUVIAL WOMBS AND IT DILUTES.

GÓMEZ-ORDÓÑEZ (2002B)³, THEY CARRY OUT A THEORETICAL ANALYSIS FOR THE MINIMUM SPEED OF DEPOSIT IN OPEN CHANNELS, BUT THEIR EXPRESSION LACKS EXPERIMENTAL CONFIRMATION. GÓMEZ(2004)⁴, THE STUDIES THE EFFECT THAT HAS THE CONCENTRATION OF SANDS AND THE SLOPE IN THE FLOW OF WATER-SAND IN OPEN CHANNELS, ALTHOUGH THEIR STUDY IS LIMITED TO A SINGLE SIZE OF SAND IN A CHANNEL OF WIDE 3 CM, IT PROVIDES DATA THAT CAN BE USED AS BASE TO ADVANCE A STUDY OF MORE REACH.

IT IS HOPED TO ESTABLISH MATHEMATICAL DEVELOPMENTS THAT EXPLAIN THE BEHAVIOR OF THE ENERGY LOSSES AND THE CRÍTICAL SLOPES OF DEPOSIT IN OPEN CHANNELS, BY MEANS OF THE TECHNIQUE OF THE DIMENSIONAL ANALYSIS, USING THE EXPERIMENTAL DATA OF LABORATORY AND TO EVALUATE EXISTENT MATHEMATICAL PROCEDURES. THIS WAY TO BE ABLE TO SELECT THOSE THAT OFFER BIGGER SECURITY IN THE CALCULATION COMPARED WITH THE EXPERIMENTAL DATA.

3 GÓMEZ, Z. Hernán. J., ORDÓÑEZ, O.J.I., "Crítical speed of Deposit in the Transport of Silts in Horizontal Tubes to Pressure", XX Latin American Congress of Hydraulics, Havana, Cuba, October of 2002.

4 GÓMEZ, Z. Hernán. J. (2004). "Effect of the Concentration of Particles of Natural Silts in the Minimum Speed of Transport in Open Channels". XXI Latin American Congress of Hydraulics". São Pedro, State of São Paulo, Brazil, October 18 at the 22 of 2004.de 2004.

SIMBOLOGÍA

En presente avance en el trabajo de investigación se utilizaron los siguientes símbolos.

$V_D = V_{min}$ = Velocidad crítica de depósito.

R_H = Radio hidráulico de la sección mojada transversal del canal.

ρ_s = Densidad del sólido en la mezcla.

ρ_m = Densidad de la mezcla (sólido + agua).

d_{85} = Diámetro de la partícula.

J = Parámetro de adimensional "viscosidad dinámica en la velocidad del depósito".

g = Aceleración de la gravedad.

μ_m = Viscosidad dinámica de la muestra.

C'_D = Coeficiente de arrastre de partículas afectadas por la mezcla.

V_m = Velocidad de asentamiento de partículas afectadas por la mezcla.

N = Coeficiente de fricción de Manning.

C = Concentración volumétrica de partículas.

R_m = Número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla.

d^* = Diámetro adimensional de partícula individual.

d^* = Diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla.

d = Diámetro de partícula de sedimento o sólido transportado.

Δ = Gravedad específica sumergida.

Δ' = Gravedad específica sumergida pro efecto de la mezcla.

ν_m = Viscosidad dinámica de la mezcla.

S_s = Gravedad Específica de los Sólidos.

ν_f = Viscosidad dinámica del fluido.

V_s = Velocidad de asentamiento de partículas individuales

n = Exponente del efecto de la concentración sobre la velocidad de asentamiento de las partículas.

R_s = Número de Reynolds de la partícula para sedimentos naturales.

INTRODUCCIÓN

El transporte hidráulico de sólidos, a través de canales, constituye una operación ampliamente utilizada desde hace varios años en numerosas industrias y especialmente en el campo de la minería. El agua es el fluido más común para transportar sólidos, y si la instalación opera en forma continua, el proceso es capaz de transportar grandes cantidades de sólidos

El movimiento de materiales finos dentro de una operación minera, constituye un factor determinante dentro de la operación de una industria minera. Este problema se ve agravado en Colombia, por la localización cordillerana de nuestros principales yacimientos, obligando a construir los sistemas para efectuar el transporte antes señalado sobre una topografía desventajosa y capacitarlos para soportar factores climáticos adversos.

Por otra parte, en nuestro país la ubicación de los yacimientos ofrece condiciones de pendientes y balances hidrológicos favorables que hacen pensar de inmediato en el transporte mediante un sistema hidráulico, consistente en el movimiento gravitacional y/o forzado de suspensiones sólido – líquido ya sea en tuberías o canales.

La explicación del creciente interés por esta alternativa para transportar materiales de tamaño reducido, es principalmente de índole económico, y son varios los factores destacados:

- Bajo costo y economía de escala.
- Proporciona un flujo continuo de sólidos y fácil implementación de control automático
- Puesta en marcha de la explotación de yacimientos mineros, cuya localización hace que tal actividad no sea económica por medio del transporte tradicional.
- Simplicidad de la instalación. El factor operacional es ventajoso, por cuanto es bajo el número de operarios requeridos para hacer funcionar el sistema.
- Bajo consumo de energía
- Posibilidad de transportar varios productos
- No se produce daño ni se altera el medio ambiente.

- Permitir la elección de la vía más corta entre dos puntos al atacar cualquier tipo de pendientes.
- Eliminar la influencia de factores climáticos como temporales, neblina, etc.
- Poder alcanzar ritmos de transportes imposibles de realizar con otro tipo de sistema.

La primera patente relacionada con el transporte hidráulico de sólidos, de tipo industrial, data del año 1891, y se relaciona con el transporte de carbón mediante bombeo de una suspensión preparada con agua como fluido transportador.

El rango de aplicación del transporte hidráulico de sólidos en la industria minera es muy amplio, tanto para el cobre como para toda la minería metálica

A partir de la optimización del transporte de sólidos en canales abiertos con ayuda del agua se crea formas de hacer que dicho líquido sea conservado ya que todas las formas de vida conocidas dependen del agua. El agua es parte vital de muchos procesos metabólicos en el cuerpo. Y es que ante una situación de escasez del agua la amenaza se cierne sobre tres aspectos fundamentales del bienestar humano: la producción de alimentos, la salud y la estabilidad política y social.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Planteamiento del problema. ¿Cuál es el efecto que tiene las altas concentraciones y la distribución granulométrica de los sedimentos naturales en la pérdida de energía y las pendientes críticas de depósito, en el flujo de una mezcla compuestas por arena y grava, con agua?

Descripción del problema. Los pocos procedimientos conocidos para evaluar la resistencia del flujo de una mezcla en canales abiertos, datan de 1971, cuando (Graf, 1971)⁵ presentó la relación Graf-Acoraglu, la cual no ha sido revaluada hasta el presente y los datos experimentales con los cuales se obtuvo dicha relación, desafortunadamente nunca fueron publicados. (Abulnaga, 2002)⁶. Los estudios existentes, no explican claramente en qué condiciones de laboratorio fueron realizados, ni presentan los datos de laboratorio obtenidos, lo que limita su aplicación a un caso práctico. Por otro lado la ecuación de Graf-Acoraglu, solo es aplicable cuando en el fondo del canal hay un lecho móvil de sedimentos, lo que impide su aplicación en la presente investigación.

5 GRAF, H. W. (1971) "Hydraulics of Sediment Transport". New York: McGraw-Hill. 1792. p. 447.

6 ABULNAGA, Baha E., P.E. "Slurry Systems Handbook". New York: McGraw Hill. 2002. p 634.

Por otro lado no existe una metodología de diseño del flujo de mezclas, que proporcione seguridad en el cálculo para efectos de aplicación en la ingeniería práctica. Es así que (Domínguez, 1996), presenta una comparación de los datos experimentales de varios investigadores con los procedimientos teóricos, encontrando una gran discrepancia entre ellos.

Los procedimientos existentes no tienen en cuenta algunas variables como el efecto de la concentración de partículas sobre el proceso de sedimentación y la pérdida de energía, ni el efecto de la granulometría de los sedimentos. Aunque estas variables ofrecen gran complejidad de estudio, es posible incluirlas para cuantificar el efecto sobre la pérdida de energía y sobre las pendientes críticas de depósito.

OBJETIVOS

Objetivo general. Estudiar las pérdidas de energía y velocidad crítica de depósito en el flujo de mezclas sedimentables (arena y grava), y la pérdida de energía de mezclas no sedimentables, (Agua y finos), por medio de ensayos prácticos en laboratorio en canales abiertos de sección: circular, triangular y rectangular, en las condiciones más desfavorables para dichos parámetros.

Objetivos específicos

- Adecuar el montaje de laboratorio, construido inicialmente en las etapas uno y dos, del proyecto de investigación, para medir los parámetros en la presente propuesta.
- Conocer las pérdidas de energía que sufre un flujo de mezclas sedimentables y no sedimentables, por medio de experimentos prácticos en laboratorio en canales abiertos con las secciones ya mencionadas.
- Identificar y cuantificar las pendientes críticas de depósito dentro del flujo de mezclas sedimentables, por medio de experimentos prácticos en laboratorio.
- El material que se utilizara será de diferente gradación buscando que la mezcla a utilizar no sea uniforme. El tamaño máximo a utilizar será el retenido en el tamiz N° 5 (grava media = 16 mm), y el tamaño mínimo será el retenido en el tamiz 230 (arena muy fina = 0.062 mm); para cada mezcla que se realice procurar que la desviación estándar sea diferente.
- Elaborar una metodología de diseño para efectos prácticos en ingeniería.

HIPÓTESIS

- La inclusión de materiales sólidos al fluido, modifica la viscosidad y densidad del mismo.
- Las ecuaciones de Manning y Darcy-Weisbach, pueden ser aplicadas al flujo de una mezcla en canales, incluyendo el coeficiente de Manning (n_m) y de fricción (f_m), modificados para una mezcla.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 GENERALIDADES

Dentro del flujo de mezclas agua-sólido en canales abiertos, los parámetros a evaluar son la pérdida de energía del flujo de la mezcla y la pendiente de depósito. Según (Wilson, 1980) nombrado por (Abulnaga, 2002), presenta el concepto de pendientes críticas las cuales separa los diferentes tipos de flujo que ocurren en el transporte de mezclas, como son el flujo con depósito, el flujo heterogéneo y flujo homogéneo. En el presente estudio solamente se tratará la pendiente que separa el flujo con depósito y el flujo heterogéneo.

El hidrotransporte de material sólido implica varios modos de transporte, desde flujo con lecho deslizante hasta partículas completamente suspendidas. El cambio de un modo a otro depende de las *propiedades de la mezcla* como su *velocidad media* y *concentración*; *propiedades de los sólidos* como *tamaño*, *forma*, *densidad*, *gradación*; *propiedades del fluido* como *densidad* y *viscosidad* y *propiedades de la tubería* como *diámetro*, *pendiente* y *rugosidad*.

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SEDIMENTOS

Según Gómez (2002), los sedimentos son partículas sólidas que resultan de la disgregación de una roca por efecto de intemperización, teniendo por lo tanto origen inorgánico. Los sedimentos pueden ser clasificados según su tamaño, definiendo un diámetro de partícula, el cual establece la base para su clasificación.

Si son partículas muy grandes se miden métricamente. Si son medianas se miden por medio de tamices y se les asigna el diámetro de la abertura por el cual pasa, denominándose *diámetro de tamiz*. Si las partículas son muy pequeñas el tamaño se determina mediante la velocidad de sedimentación, asignándoles el *diámetro de sedimentación*, el cual corresponde al diámetro de una esfera de igual volumen que el de la partícula de sedimento. De acuerdo a estos criterios se presenta el cuadro 1 de clasificación de sedimentos según La American Society of Testing Material (ASTM) la cual será referencia para el desarrollo de la presente investigación.

Cuadro 1. Clasificación de sedimentos naturales según su tamaño. Según La American Society of Testing Material (ASTM). Dada por Lane (Yang 1996)⁷.

DIÁMETRO DE PARTÍCULA [mm]	CLASE DE PARTÍCULA	Nº de TAMIZ Estándar	TIPO DE MEZCLA
64-32	Grava Muy Gruesa		Sedimentable
32-16	Grava Gruesa		Sedimentable
16-8	Grava Media		Sedimentable
8-4	Grava Fina	5 - +	Sedimentable
4-2	Grava Muy fina	10 -5	Sedimentable
2-1	Arena Muy Gruesa	18 - 10	Sedimentable
1-0.5	Arena gruesa	35 - 18	Sedimentable
0.5-0.25	Arena Media	60 - 35	Sedimentable
0.25-0.125	Arena Fina	120 - 60	Sedimentable
0.125-0.062	Arena Muy Fina	230 - 120	Sedimentable
0.062-0.034	Limo grueso		No-Sedimentable
0.034-0.016	Limo Medio		No-Sedimentable
0.016-0.008	Limo Fino		No-Sedimentable
0.008-0.004	Limo muy fino		No-Sedimentable
0.004-0.002	Arcilla Gruesa		No-Sedimentable
0.002-0.001	Arcilla Media		No-Sedimentable
0.001-0.0005	Arcilla Fina		No-Sedimentable
0.0005-0.00024	Arcilla Muy Fina		No-Sedimentable

Fuente: American Society of Testing Material (ASTM). Dada por Lane (Yang 1996)

1.2.1 Modos de transporte. El movimiento de los sólidos dentro de un fluido se realiza mediante diferentes modos de transporte; dependiendo de las características de los sólidos se definen los siguientes modos de transporte:

RODAMIENTO Y ARRASTRE. Estos modos suceden cuando las partículas de sedimentos son soportadas la mayor parte del tiempo por el fondo del conducto, rodando, arrastrándose o deslizándose sobre el fondo, cuando el fondo del tubo está cubierto por una capa de sedimentos en reposo, este modo de transporte genera las formas del lecho comúnmente conocidas como *rizos* y *dunas*. Las partículas que se mueven con este modo forman lo que se denominan *carga de contacto*.

SALTACIÓN. En este modo las partículas se mueven saltando y cayendo repetidamente al fondo del tubo siguiendo trayectorias balísticas, en parte soportadas por el fondo y en parte por el fluido; forma la *carga de saltación*.

⁷ YANG, Chih Ted. "Sediment Transport: Theory and Practice". McGraw-Hill. Series in Water Resources and Environmental Engineering. New York. 1996. p 118.

Sobre este modo de transporte, Lee (1994), realiza un estudio detallado, proponiendo un modelo matemático con comprobación experimental, formulando expresiones para encontrar la longitud, altura del salto y velocidad de la partícula en función de la velocidad media del flujo.

SUSPENSIÓN. Son las partículas que están soportadas en su totalidad por el fluido y viajan suspendidas permanentemente con el agua. Las partículas que se mueven con este modo forman la carga en suspensión.

LECHO DESLIZANTE, (sliding bed). Este modo es particular del transporte de sedimentos sobre tubos o canales artificiales con superficies lisas, en el cual las partículas se mueven en conjunto una vez han alcanzado el fondo del tubo, sin formar un depósito estacionario de partículas. Se supone que la energía necesaria para mover el bloque de partículas es transmitida por fricción del fluido sobre la superficie del depósito, sin que la fricción, entre la superficie del tubo y las partículas sea suficiente para resistir el desplazamiento inducido por el fluido en movimiento.

1.2.2 Uniformidad de los sedimentos. Para cuantificar la uniformidad de los sedimentos es común usar la desviación estándar geométrica de los sedimentos σ_g y el coeficiente de uniformidad C_u , los cuales se describen a continuación.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR GEOMÉTRICA DE LOS SEDIMENTOS σ_g Esta relaciona los diámetros d_{84} , d_{16} y d_{50} , como $\sigma_g = d_{84}/d_{50} \approx d_{84}/d_{16} \approx d_{50}/d_{16}$, si su valor es mayor 1.3 el sedimento es no uniforme.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD, C_u . Su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta, los suelos con $C_u < 3$ se consideran muy uniformes; aun las arenas naturales muy uniformes rara vez tienen un $C_u > 2$. $C_u = d_{60}/d_{10}$.

1.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS

Tomando la definición general que se tiene para una mezcla⁸, esta se produce cuando dos o más sustancias puras se mezclan y no se combinan químicamente. Una mezcla puede ser separada en sus componentes (sustancias) simplemente por métodos físicos. Estas pueden ser clasificadas en homogéneas y heterogéneas.

Mezclas heterogéneas: No son uniformes; en algunos casos, puede observarse la discontinuidad a simple vista (sal y carbón, por ejemplo); en otros casos, debe usarse una mayor resolución para observar la discontinuidad. El límite a partir del cual se distinguen los sistemas heterogéneos de los sistemas homogéneos lo

⁸<http://www.unlu.edu.ar/~qui10017/Quimica%20COU%20muestra%20para%20IQ10017/Cap%A1tu%20Vla.htm>

constituye precisamente el ultramicroscopio. Los diferentes sistemas homogéneos que constituyen el sistema heterogéneo se denominan fases.

Mezclas homogéneas: Son totalmente uniformes (no presentan discontinuidades al ultramicroscopio) y presentan iguales propiedades y composición en todo el sistema, algunos ejemplos son la salmuera, el aire. Estas mezclas homogéneas se denominan soluciones.

Existen gran número de métodos para separar los componentes que forman una mezcla; en realidad, cada mezcla implicará el uso de uno o más métodos particulares para su separación en los componentes individuales. Se describió brevemente solo algunos de estos métodos:

Es de anotar que en el flujo de mezclas no es muy común usar los términos generalizados de heterogéneas y homogéneas, sino de sedimentables y no sedimentables, aunque es posible hacer la equivalencia ya que las homogéneas suelen tener comportamiento de no sedimentables y las heterogéneas de sedimentables. Aunque una mezcla heterogénea en reposo es posible que se comporte como una mezcla homogénea en movimiento, especialmente en altas velocidades del flujo.

1.4 PÉRDIDA DE ENERGÍA EN CANALES

La resistencia al flujo en una mezcla sólido líquido que fluye por un canal puede ser considerablemente mayor que la resistencia que en un líquido puro.

La pérdida de carga puede ser por:

El aumento de concentración, para una velocidad dada, implica un aumento en la energía gastada en mantener las partículas sólidas en suspensión.

El aumento de la velocidad homogeniza la suspensión y la mezcla tiende a comportarse como un líquido puro.

Al producir depositación, el choque de las partículas contra la pared provoca una disipación muy fuerte de energía, y la pérdida de carga aumenta considerablemente aunque la velocidad del flujo disminuya.

Para la evaluación de la pérdida de energía se puede estimar por medio del uso de dos métodos, uno es usando la ecuación de Darcy-Weisbach junto con el factor de fricción para la mezcla y el otro usando la ecuación de Manning modificada para una mezcla:

1.4.1 Factor de fricción de la mezcla (f_m). El factor de fricción de la mezcla se calcula con la ecuación de fricción de Darcy-Weisbach, dada como,

$$[1] \quad f_m = 8 \left(\frac{u_*}{V_m} \right)^2$$

Donde u_* es la velocidad de corte, V_m es la velocidad promedio de la mezcla. La velocidad de corte está dada como:

$$[2] \quad U_* = \sqrt{gR_H S_m}$$

En un canal R_H es el radio hidráulico de la sección mojada correspondiente a la mezcla. En este caso el valor de U_* y V_m , pueden ser medidas en laboratorio, por lo tanto se obtendrá el valor del factor de fricción con ecuación 1. Por otro lado, se relaciona el factor de fricción de la mezcla por medio de una relación funcional adimensional con otros parámetros que incluyen las propiedades del agua, los sedimentos y la mezcla, para lo cual se propone la siguiente expresión:

$$[3] \quad f(f_m, f_w, C, C_{Dm}, \sigma_g, C_u) = 0$$

Donde f_w es el factor de fricción para agua limpia, calculado con la ecuación de Colebrook-white; C es la concentración volumétrica medida en laboratorio; C_{Dm} es el coeficiente de arrastre calculado por medio de la metodología dada por (Cheng, 1997a,b) quién realizó una exhaustiva investigación sobre este coeficiente. De este modo se relaciona el coeficiente con las variables que representan las propiedades de los sedimentos y las del agua.

1.4.2 Coeficiente de Chezy, (Ch), modificado para la mezcla. Usando el valor medido del factor de fricción, f_m ; se relaciona para calcular el coeficiente de Chezy, Ch_m y el coeficiente de Mannig, n_m ; de la siguiente manera:

$$[4] \quad Ch = \sqrt{\frac{8g}{f_m}}$$

$$[5] \quad n_m = \frac{R_H^{1/6}}{\sqrt{\frac{8g}{f_m}}}$$

Obteniéndose una relación entre n_m y C_{Dm} , σ_g , dada como:

$$[6] \quad n_m = \frac{R_H^{1/6}}{\sqrt{\frac{8g}{f(f_m, f_w, C, C_{Dm}, \sigma_g, C_u)}}}$$

1.5 PENDIENTE CRÍTICA DE DEPÓSITO

La pendiente crítica de depósito S_{CD} , es la pendiente correspondiente a la inclinación del canal, la cual separa el flujo heterogéneo y el flujo con depósito, o dicho de otra forma la pendiente a la cual las partículas que viajan en suspensión, comienzan a depositarse en el fondo del canal. La pendiente se puede medir en laboratorio directamente y se relaciona con las características del canal y del flujo por medio de la ecuación de Darcy-Weisbach y de Manning, (se parte de la hipótesis de que la ecuación de Manning puede ser adaptada al flujo de una mezcla).

Si los datos para obtener ecuaciones [3] y [6], se miden para condiciones de depósito, se obtendrá las pendientes críticas de depósito las cuales se relacionan, a continuación:

Por ecuación de Darcy-Weisbach:

$$[7] \quad S_{CD} = f_d \frac{V_d^2}{8gR_{Hd}}$$

Donde f_d es el coeficiente de fricción, pero medido para condiciones de depósito.

Por ecuación de Manning:

$$[8] \quad S_{CD} = \left(\frac{n_d V_d}{R_{Hd}^{2/3}} \right)^2$$

Donde V_d , n_d y R_{Hd} , son la velocidad, el coeficiente de fricción de Manning y el radio hidráulico para la condición de depósito, respectivamente.

1.6 VELOCIDAD LÍMITE DE DEPÓSITO (VL)

Como su nombre lo indica, la velocidad límite es la mínima velocidad de flujo para que no exista riesgo de depósito y obstrucción del canal abierto. La velocidad crítica de depósito, es uno de los parámetros importantes en el diseño de sistemas de alcantarillado y de canales que transportan material sólido suspendido y no pueden formar depósitos en el fondo; a pesar de su importancia, sin embargo, no existen estudios satisfactorios para su predicción, limitándose la literatura únicamente a dar valores fijos puntuales, de velocidades mínimas para diseño en alcantarillados.

La definición más usada y de fácil determinación experimental es aquella que identifica como la velocidad a la cual los sólidos gruesos permanecen detenidos por periodos importantes en el fondo de la tubería (formación de dunas móviles y/o lecho fijo de fondo).

La velocidad límite en transporte hidráulico de sólidos depende fundamentalmente de las siguientes variables.

- Granulometría de las partículas sólidas.
- Densidad relativa de las partículas sólidas.
- Diámetro de la tubería o altura de escurrimiento en un canal.
- Concentración de sólidos en la mezcla.
- Pendiente de la canaleta

En menor grado, VL también depende de:

- Factor de forma de las partículas sólidas.
- Temperatura de la mezcla.
- Influencia de la granulometría

Domínguez¹ (1996) publicó una ecuación de la velocidad de depósito basada en datos experimentales medidos en Codelco Chile y el Centro de Investigación de Minería y Metalurgia. Para los casos en que los efectos de la viscosidad son insignificantes.

$$[9] \quad V_D = 1.833 \left[\frac{8gR_H(\rho_S - \rho_m)}{\rho_m} \right]^{1/2} \left(\frac{d_{85}}{R_H} \right)^{0.158}$$

Sin embargo, en los casos en que la viscosidad dinámica del líquido portador es experimental, como con agua alcalina, Domínguez. (1996) deriva la siguiente ecuación:

$$[10] \quad V_D = 1.833 \left[\frac{8gR_H(\rho_S - \rho_m)}{\rho_m} \right]^{1/2} \left(\frac{d_{85}}{R_H} \right)^{0.158} 1.2^{(3,100/J)}$$

Dónde

$$[11] \quad J = R_H(gR_H)^{1/2} / \mu_m$$

μ_m = Viscosidad absoluta de la mezcla

Gómez, Z- H.J. (2002) publicó una ecuación de la velocidad de depósito basada en datos teóricos quedando así.

$$[12] \quad V_{\min} = \left\{ 3 \frac{C'_D V_m^2}{N^2} \frac{C}{(1-C)} \frac{R_H^{1/3}}{g} \right\}^{1/2}$$

Donde las variables implicadas en la Ec. 4 se calculan así:

El valor del coeficiente de arrastre afectado por la mezcla es calculado con la siguiente expresión.

$$[13] \quad C'_D = \left[\left(\frac{32}{R_m} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2}$$

Número de Reynolds de partículas afectadas por la mezcla se define como:

$$[14] \quad R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d_s^*)^2)} - 5 \right)^{1.5}$$

Y el diámetro adimensional de partícula con concentración, dada como:

$$[15] \quad d_s^* = \left(\frac{\Delta' g}{v_m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3} \right)} d$$

Y el coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla de agua-sólido, se calcula así:

$$[16] \quad \Delta' = \frac{(1-C)\Delta}{1+C\Delta}$$

La gravedad específica sumergida, se define como

$$[17] \quad \Delta = (S_s - 1)$$

La viscosidad de la mezcla, como

$$[18] \quad v_m = \frac{2v_f}{2-3C}$$

Y siguiendo con las variables de la ecuación principal la Velocidad de asentamiento de partículas afectadas por la mezcla es calculada con la siguiente expresión

$$[19] \quad V_m = V_s (1 - C)^n$$

La Ec. 12 es para calcular la velocidad de asentamiento dada en la Teoría de la Sedimentación Cheng, (1997a,b) para partículas individuales.

$$[20] \quad V_s = \frac{R_s v_f}{d}$$

n es un exponente que cuantifica el efecto de la concentración. Cheng (1997b) presenta un estudio detallado para evaluar el valor de n , procediendo de manera similar que para una partícula individual, pero incluyendo la viscosidad y densidad de la mezcla en vez de las propiedades de agua limpia.

De este modo se da la siguiente expresión para n :

$$[21] \quad n = \frac{\text{Ln} \left[\frac{(2 - 2C)}{(2 - 3C)} \right] + \text{Ln} \left[\frac{Rm}{Rs} \right]}{\text{Ln} [1 - C]}$$

Donde R_s es el Número de Reynolds de partículas individuales y se define como:

$$[22] \quad R_s = \left(\sqrt{(25 + 1.2d_*^2)} - 5 \right)^{1.5}$$

El diámetro adimensional de partícula d_* , se definido como:

$$[23] \quad d_* = \left(\frac{(\Delta)g}{\nu^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d$$

La Concentración volumétrica C esta dado por el caudal sólido entre el caudal líquido.

$$[24] \quad C = Q_s/Q_l$$

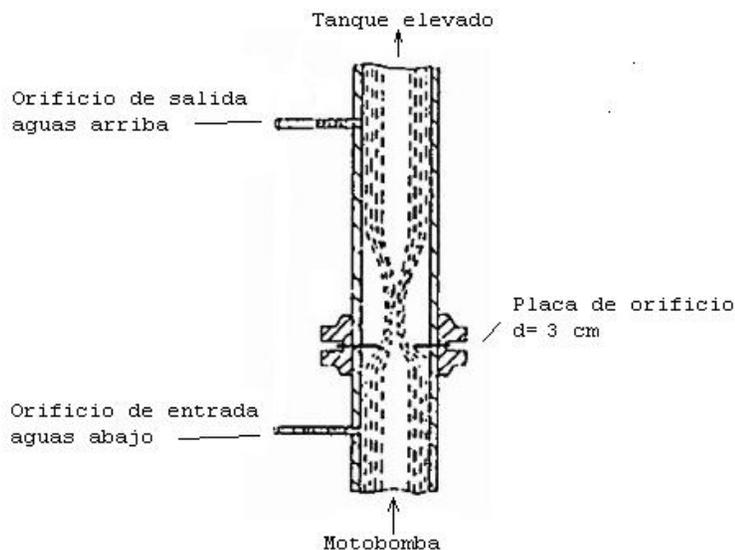
1.7 AFORO POR PLACAS DE ORIFICIO

En el desarrollo de esta investigación se usó los diafragmas de orificio concéntrico o placas de orificio como método para calcular el caudal utilizado en la práctica de los ensayos efectuados. El suministrado del caudal debe ser permanente de fluido limpio y homogéneo (líquido, gas o vapor) en el campo de caudales turbulentos normales para los cuáles el número de Reynolds alcanza un valor superior a 5.000. Se han establecido coeficientes para tuberías desde 1½" (40 mm) a 14" (350 mm) y números de Reynolds desde 5.000 a 10.000.000. Con el fin de obtener una buena medida del caudal, la construcción y el empleo de placas de orificio deben responder a las siguientes condiciones esenciales:

- La arista exterior del orificio debe ser viva y neta. No son tolerables defectos mecánicos tales como rebabas, ranuras o salientes.
- La placa del diafragma (o placa de orificio), se fija entre bridas y debe ser completamente plana, con una tolerancia de 0,01 mm.
- La relación de diámetros del orificio y la tubería d/D , habitualmente denominada relación de apertura β , debe estar comprendida, para una medida correcta, entre 0,2 y 0,7.

1.7.1 Tomas de presión. La presión diferencial generada por la inserción del diafragma en la tubería, se recoge mediante dos tomas instaladas en la tubería. Tiene la ventaja de que permiten la instalación de una placa de orificio para medida de caudal donde exista una brida, y reúne además otras características necesarias, como tramos rectos anterior y posterior.

Figura 1. Tomas de presión aforo por orificio



La fórmula para encontrar el caudal, cuando se trabaja con agua limpia es la (25).

En la figura 1 se representa el corte longitudinal de una tubería con sistema de aforo por medio de orificio, con algunos detalles sobre su geometría.

[25]

$$Q_m = Cd \frac{A_2}{\left(1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right)^{0.5}} \cdot \left(2g(\Delta H) \frac{\gamma_{HG}}{\gamma_m}\right)^{1/2}$$

Procedimiento aforo de manómetro de mercurio para medición de caudal líquido.

- Se prende la motobomba y se purga las mangueras conectadas al manómetro.
- Se coloca un recipiente aforado a la salida del canal para recibir el agua y esto sincronizado con un cronometro.
- Se toman unos tres datos de cada caudal y se registra la lectura del manómetro.
- Se analiza los datos obtenidos de los cual se deduce una curva representativa de la medición del manómetro y por lo tanto obtener una ecuación.

Figura 2. Aforo de caudales



Cuadro 2. Calibración manómetro en U para medir caudales

DATOS INICIALES	
Diámetro Tubo (cm.)	5,46
Diámetro Orificio (cm)	3
Espesor placa (Mm.)	0,3
Área Tubo A1 (m2)	0,002341398
Área Orificio A2(m2)	0,000706858
Peso Especifico del mercurio (g/cm3)	13,56
Temperatura del agua (°C)	16

Giros de válvula	1	
Volumen (Lts)	18	
Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)
1	43,4	0,25
2	43,66	0,25
3	43,7	0,25
4	43,67	0,25
Promedio	43,61	0,25
Caudal (LPS)	0,41	

Giros de válvula	1 1/2	Giros de válvula	2		
Volumen (Lts)	18	Volumen (Lts)	18		
Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)	Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)
1	22,52	1,2	1	15,39	2,5
2	22,69	1,3	2	15,38	2,5
3	22,62	1,1	3	15,38	2,4
4	22,70	1,2	4	15,40	2,6
Promedio	22,63	1,20	Promedio	15,39	2,50
Caudal (LPS)	0,80		Caudal (LPS)	1,17	

Giros de válvula	2 1/2	Giros de válvula	3		
Volumen (Lts)	18	Volumen (Lts)	18		
Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)	Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)
1	11,91	4,2	1	9,95	5,8
2	11,96	4,2	2	10,00	5,9
3	11,96	4,1	3	10,02	5,8
4	12,00	4,3	4	10,01	5,7
Promedio	11,96	4,20	Promedio	10,00	5,80
Caudal (LPS)	1,51		Caudal (LPS)	1,80	

Continuación cuadro 2

Giros de válvula		3 1/2	Giros de válvula		4
Volumen (Lts)		18	Volumen (Lts)		18
Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)	Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)
1	8,82	7,3	1	7,91	9,1
2	8,86	7,4	2	7,86	9,0
3	8,86	7,3	3	7,82	9,2
4	8,83	7,2	4	7,89	9,1
Promedio	8,84	7,30	Promedio	7,87	9,10
Caudal (LPS)	2,04		Caudal (LPS)	2,29	

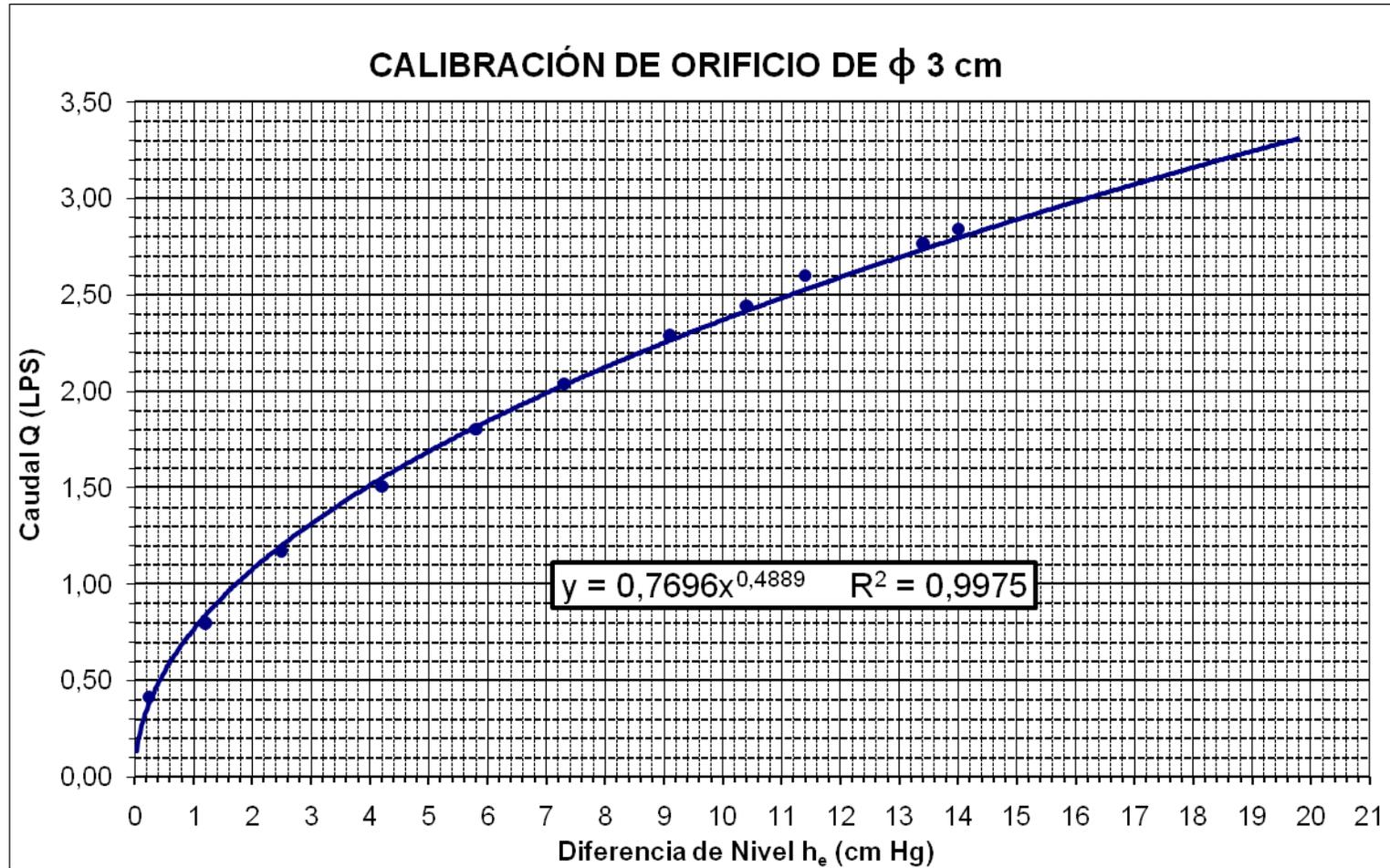
Giros de válvula		4 1/2	Giros de válvula		5
Volumen (Lts)		18	Volumen (Lts)		18
Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)	Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)
1	7,44	10,4	1	7,01	11,4
2	7,41	10,5	2	7,02	11,4
3	7,41	10,3	3	6,85	11,3
4	7,23	10,4	4	6,85	11,5
Promedio	7,37	10,40	Promedio	6,93	11,40
Caudal (LPS)	2,44		Caudal (LPS)	2,60	

Giros de válvula		5 1/2	Giros de válvula		6
Volumen (Lts)		18	Volumen (Lts)		18
Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)	Prueba	Tiempo (s)	Diferencia de nivel (cm)
1	6,50	13,3	1	6,38	14,0
2	6,51	13,5	2	6,33	14,1
3	6,51	13,4	3	6,33	14,0
4	6,53	13,4	4	6,33	13,9
Promedio	6,51	13,40	Promedio	6,34	14,00
Caudal (LPS)	2,76		Caudal (LPS)	2,84	

RESULTADOS

DIFERENCIA DE NIVEL he (cm Hg)	CAUDAL Q (LPS)	CAUDAL Q Calculado (LPS)	ERROR (%)
0,25	0,41	0,39	5,33
1,20	0,80	0,84	5,79
2,50	1,17	1,20	2,97
4,20	1,51	1,55	3,12
5,80	1,80	1,82	0,93
7,30	2,04	2,03	0,08
9,10	2,29	2,27	0,95
10,40	2,44	2,42	0,95
11,40	2,60	2,53	2,59
13,40	2,76	2,74	0,97
14,00	2,84	2,80	1,46

Gráfica 1. Curva de calibración Placa de Orificio



donde Y es un vector columna n dimensional, X es una matriz $n \times p'$, con $p'=p+1$, b es el vector de coeficientes de regresión a ser estimados, su dimensión es p' y e es un vector columna aleatorio de dimensión n por ahora, las únicas suposiciones que se requieren son que $E(e)=0$ y que la matriz de varianzas-covarianzas de los errores está dada por $Var(e)=\sigma^2 I_n$, donde I_n es la matriz identidad de orden n .

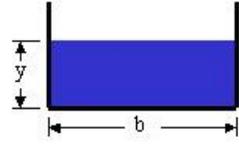
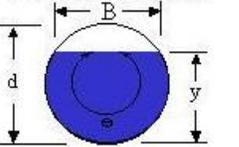
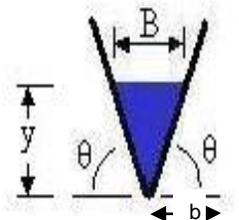
Para poder resolver se puede utilizar programas informáticos como AD+, SPSS y Minitab y Excel

1.8 ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE SECCIONES DE CANALES

Como para la presente investigación se propone usar secciones de canal, rectangular, circular y triangular, se expone a continuación los parámetros geométricos de estas secciones:

- Área hidráulica (A_c): es el área de la sección transversal del flujo.
- Perímetro mojado (P): es la longitud de la línea que es la interface entre el fluido y el contorno del canal.
- Radio hidráulico (R_H): es la relación entre el área hidráulica y el perímetro mojado $R_H=A_c/P$.

Cuadro 3. Elementos geométricos de secciones de canales

Tipo de canal	Angulo (θ)	Área (A_c)	Perímetro mojado (P)
	-	$A_c = y \cdot b$	$P = 2y + b$
	$\theta = 2 \cdot \cos^{-1}\left(1 - \frac{2 \cdot y}{d}\right)$	$A_c = \frac{d^2}{8}(\theta - \text{sen}\theta)$	$P = \frac{\theta d}{2}$
	$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{a}{b}\right)$	$A_c = \frac{y^2}{\tan \theta}$	$P = \frac{2y}{\text{sen}\theta}$

2. ADECUACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL MONTAJE DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE MEZCLAS

2.1 INSTALACIONES HIDRÁULICAS

Instalación de tubería de 4" presión para bombeo desde el reservorio hasta el tanque elevado con la finalidad de mantener una cabeza máxima y constante en el tanque ya que con la otra motobomba no se logra dicha capacidad.

Figura 3. Instalación tubería de 4" presión



Figura 4. Aseguramiento de la tubería con abrazadera



Ya que la motobomba estaba fuera de funcionamiento el accesorio “adaptador macho de 4” sufrió pudrición por el oxido del metal y se fracturo al poner en funcionamiento la motobomba como se indica en la figura 4.

Figura 5. Rotura accesorio macho 4



Los accesorios fueron solicitados por caja menor a la universidad y como no daban respuesta oportuna se decidió recuperar los accesorios como se indica en la figura 5.

Figura 6. Recuperación de accesorios



Una vez recuperado el accesorio codo de 4” se procedió a su instalación en la motobomba de 2 HP como se indica en la figura 6.

Figura 7. Instalación accesorio macho y pega de accesorios recuperados



Con la entrada en funcionamiento de la motobomba de 2 HP se incremento el caudal y el tanque elevado no está en capacidad de soportar tal caudal se decidió entonces instalar una “T” y una válvula de compuerta en el recorrido desde la motobomba hasta el tanque para aliviar el exceso de caudal y retornarlo al reservorio.

Figura 8. Accesorio T 4” presión para aliviar el exceso de caudal al tanque elevado



El desarenador instalado no estaba en capacidad de manejar el nuevo caudal por lo que se realizó una reevaluación del diseño del mismo, ampliando los orificios del fondo y el orificio de desagüe de salida; en los orificios del fondo se perforo un nuevo orificio cuyo diámetro es de 9 cm quedando 3 orificios del mismo diámetro (figura 8), en el diámetro de salida se amplio de 2½” a 4” (Figura 9)

Figura 9. Apertura de orificios en el fondo del desarenador



Figura 10. Ampliación orificio de salida de 2/1" a 4"



Después de perforar la lamina de salida en el desarenador se limó y se pintó con pintura anticorrosiva para proceder a instalar un accesorio macho y una hembra de 4" como parte de la conducción al tanque de reservorio, indicado así en la figura 10 y 11 respectivamente.

Figura 131. Instalación de accesorio macho y hembra de 4" al orificio de salida



Figura 12. Instalación tubería sanitaria desde el desarenador al reservorio



Para eliminar la turbulencia a la entrada del canal se optó por modificar el tanque receptor de fondo inclinado, haciéndole un corte en su parte lateral y superior esta lámina se dobló para crear una pantalla que funcione como vertedero. Se hizo necesario la instalación de un desagüe en el fondo del tanque para eliminar el agua almacenada después de cada ensayo esto con el fin de eliminar que este se oxide a pesar que fue recubierto en su interior con pintura anticorrosiva, como se indica en la figura 12 y 13.

Figura 13. Corte del mezclador para hacerlo funcionar como vertedero



Figura 14. Adaptación niple para desalojar el agua del tanque



Debido a la modificación del tanque inclinado se procedió a realizar ajustes en la tubería que hace la entrega de agua en dicho tanque

Figura 15. Ajuste de la tubería del tanque de cabeza constante al tanque inclinado con manguera de lona 2



2.1.2 Adecuación de estructura existente. Como se tenía planificado en el anteproyecto de este trabajo de grado se cambio las abrazaderas plásticas que habían sido utilizadas como soportes y guía del canal por unas abrazaderas metálicas hechas en lamina galvanizada de $e= 3/16$ " estas nuevas abrazaderas

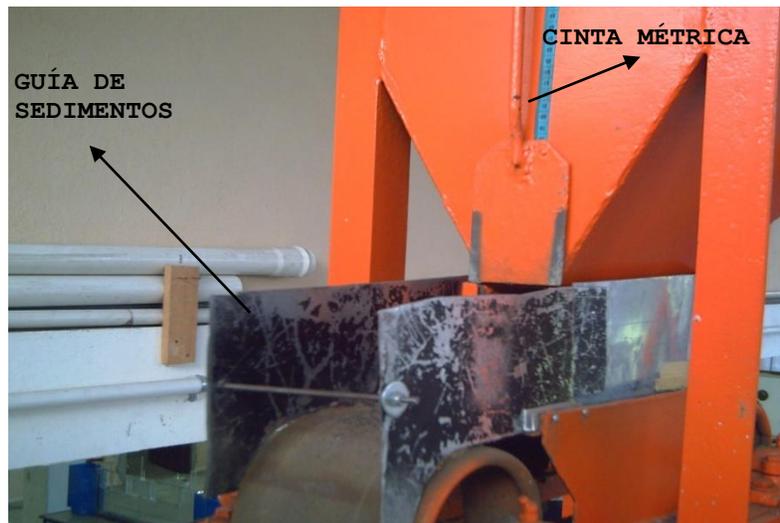
soportan de forma ideal el esfuerzo al cual están sometidas y permiten la manipulación del canal de una forma más eficiente.

Figura 16. Nuevas abrazaderas metálicas



En la tolva de sedimentos se hizo necesario adaptar una cinta métrica para la medición de la apertura del la tolva y así poder calibrar; también se adaptó una guía metálica para guiar el sedimento que sale de la tolva al tanque inclinado ya que sin esta guía el sedimento se dispersaba por los lados, esto se indica en la figura 17

Figura 17. Adaptación de guía metálica y de cinta métrica



3. ADECUACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE CANALES DE ENSAYOS

3.1 CANAL CIRCULAR

El canal circular actual como estaba montado se realizó varios ensayos, dando un error en la toma de mediciones de concentración ya que en el tubo de PVC montado al inicio tiene una diferente rugosidad a la de vidrio dando así una más rápida sedimentación en este tramo. Y por lo tanto los datos obtenidos no eran precisos.

Figura 18. Canal circular sin modificar



Se decidió cortar el tubo de PVC dejando 10 cm desde la base y se acopla los dos tubos de vidrio consecutivamente y después de esto se instala el tubo de PVC para llegar a los 6 metros y evacuar el agua al desarenador.

Figura 19. Canal circular modificado



3.1.1 Montaje del canal circular en la viga-soporte. Para el montaje se procede con los siguientes pasos

- Se aplica silicona para juntas de expansión en los bordes de la cámara de entrada y se coloca la tapa de acrílico fijándola con tornillos y así se reparte la silicona por toda la superficie de contacto.
- Se ubica el tubo de PVC de 10 cm en el orificio de la lámina de acrílico y se aplica silicona alrededor del orificio realizando un sello hermético.
- Se colocan los tubos de vidrio y para unirlos se ponen bandas de neumáticos.
- Se aseguran los tubos con abrazaderas de aluminio estas atornilladas a la viga de soporte.

3.2 CANAL RECTANGULAR Y TRIANGULAR

Al igual que en el canal circular. Estos dos canales venían funcionando de manera similar es decir primero se montaba a la viga de soporte la parte del canal metálico y luego la de acrílico donde se toman los datos por lo que hay un error en la toma de datos por la diferencia de coeficientes de fricción.

Se decidió cambiar la parte del canal fabricado en acrílico a la parte inicial y luego montar el canal metálico; por lo que se tuvo que hacer modificaciones a los mismos.

Se construyeron tapas en acrílico de 9 mm para instalar el canal al tanque inclinado.

Se cortó la tapa que tenían los canales metálicos los cuales se unían con tornillos al tanque inclinado ya que no tenían las dimensiones para entrar en la cámara de salida.

3.2.1 Montaje del canal triangular en la viga-soporte

- Se aplica silicona para juntas de expansión en los bordes de la cámara de entrada y se coloca la primera parte del canal (la que tiene la tapa en acrílico) se fija con tornillos y así se reparte la silicona por toda la superficie de contacto realizándose un sello hermético.
- Después se unen las secciones de acrílico con tornillos de $\frac{1}{4}$ de pulgada para su sellado se utiliza silicona.
- Se acopla el canal triangular metálico con el de acrílico se aseguran por medio de tornillos y silicona para su sellado.

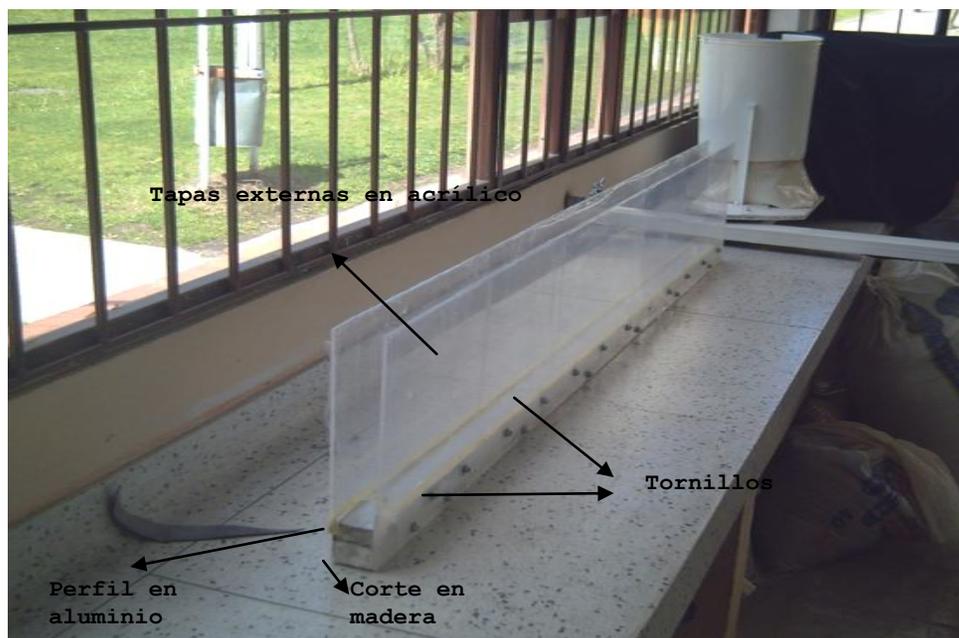
- Para impedir un desplazamiento horizontal y vertical del canal triangular se aseguran las costillas de refuerzo en las secciones de acrílico por medio de platinas angulares en acrílico de 3 cm. x 3 cm.
- Para finalizar se centra el canal para evitar eventuales desvíos que afecten las mediciones y se repasan nuevamente las uniones con silicona.

3.2.2 Montaje del canal rectangular en la viga-soporte. El canal rectangular se monto de la misma forma que el triangular.

3.3 CONSTRUCCIÓN CANAL RECTANGULAR (5CM * 25CM * 6M DE LONGITUD)

La construcción se realizó en acrílico de 4 mm de espesor y la base de 5 cm se compone de un perfil de aluminio de 5 * 2,5 cm pegado a un listón de madera de 5 * 2,5 cm para que la pared de acrílico se sustente sobre una mayor área de contacto y así evitar que se parta al manipularlo, y al mismo tiempo darle una mayor rigidez; el corte de madera se inmunizó y se pintó, y este se unió al perfil de aluminio para esto se utilizo silicona para juntas de expansión, y se dejo secar 24 horas, luego de esto se procedió a pegar el acrílico con la misma silicona y para un mayor aseguramiento se decidió colocar tornillos en todo el largo del canal.

Figura 20. Construcción canal en acrílico



El canal esta construido en tres partes para unirlos se decidio utilizr el mismo metodo de los anteriores canales. Que consiste en usar tapas perpendiculares en

los extremos de cada canal para asegurar este con el siguiente mediante el uso de tornillos.

3.3.1 Montaje del canal rectangular 5cm en la viga-soporte

- Se aplica silicona para juntas de expansión en los bordes de la cámara de entrada y se coloca la primera parte del canal (la que tiene la tapa en acrílico) se fija con tornillos y así se reparte la silicona por toda la superficie de contacto realizándose un sello hermético.
- Después se unen las secciones de acrílico con tornillos de $\frac{1}{4}$ de pulgada para su sellado se utiliza silicona.
- Se acopla las otras partes del canal en acrílico se aseguran por medio de tornillos y silicona para su sellado.
- Para impedir un desplazamiento horizontal y vertical del canal rectangular 5 cm se aseguran las costillas de refuerzo en las secciones de acrílico por medio de platinas angulares en acrílico de 3 cm. x 3 cm.
- Para finalizar se centra el canal para evitar eventuales desvíos que afecten las mediciones y se repasan nuevamente las uniones con silicona.

4. ENSAYOS DE SUELOS Y CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

4.1 ENSAYO DE SUELOS

4.1.1 Ensayos de gravedad específica. Se realiza el ensayo de peso específico o gravedad específica para los rangos de tamaños de sedimentos estipulados en el proyecto, estos se indican en el cuadro 1.

Se hace el ensayo de peso específico de agregados finos según (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS: 1998) I.N.V. E – 222 y otras referencias correspondientes:

- ASTM C 128
- AASHTO T 84
- NLT 154

Equipo

- Picnómetros o balones volumétricos de 250 ml
- Balanza de precisión de 0.1 gr
- Bomba de vacío
- Termómetro
- Horno
- Molde de cono (tronco de cono recto)
- Varilla metálica para apisonar
- Pipeta
- Bandejas
- Recipientes de secado

Procedimiento

- Se toma una muestra de 1000 gr del material y se pone a saturar por 24 horas.
- El material saturado se extiende sobre una bandeja y se pone a secar hasta que este SSS*, esto se verifica realizando la prueba del cono la cual consiste en llenar el material en el cono en varias capas dándole 25 golpes, se dice que el material es SSS cuando el material conserva la altura del cono y solo sus paredes se desmoronan.
- Se registra el peso de dos o tres balones volumétricos vacíos y se marcan para su posterior identificación.

* SSS = Saturado superficialmente seco

- Se pesan tres muestras de 100 gr de material y son adicionadas a los balones volumétricos respectivamente.
- Se adiciona agua desairada hasta tres cuartos de la marca de 250 ml indicada en los picnómetros.
- Los picnómetros aforados se ponen en baño maría aproximadamente 7 horas dependiendo del tipo de material para facilitar la salida de vacíos.
- Se conecta la bomba de vacio a los picnómetros durante 15 minutos o más tiempo hasta que se haya retirado la totalidad de vacíos.
- Después de este proceso se completa con agua desairada hasta llegar a las marcas de los balones las cuales indican 250 ml.
- Se registra el peso del picnómetro con la muestra de suelo y agua, también se registra la temperatura.
- Se retira el contenido de los picnómetros en los recipientes de secado pesados con anterioridad y se llevan al horno.
- Después de 24 horas se retiran los recipientes del horno y se registra su peso.
- Se determina el peso de los balones volumétricos llenos con agua desairada hasta la marca de 250 ml. El agua debe estar a 20° centígrados.

CÁLCULO Y RESULTADOS: la gravedad específica se calcula como sigue.

[29]

$$G_s = \frac{W_s}{V_s}$$

[30]

$$V_s = W_{pa} - (W_{pas} - W_s)$$

Donde:

Gs = Gravedad específica del suelo a 20 °C.

Ws = Peso de la muestra seca.

Wpa = Peso del picnómetro lleno con agua a temperatura Tx.

Wpas = Peso del picnómetro lleno con agua y suelo a temperatura Tx.

Vs = Volumen de sólidos

Cuadro 4. Toma de datos y resultados gravedad especifica

ARENA TIPO	1		2		3		4		5	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
PRUEBA N°	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
PESO RECIPIENTE	140,2	140,8	145,3	141,7	145,3	141,7	145,3	141,7	145,3	141,7
TEMPERATURA °C	18	18	22	22	22	22	22	22	21	21
Wsss (gr)	500	250	500	200	250	250	250	250	250	500
Wpas (gr)	1950	1017	1962	1013	1038	1028,7	1034,6	998,2	1056,2	2068,4
Wpa (gr)	1710	890,3	1728	914	891,8	883,4	883,1	846,6	916,8	1773
Ws (gr)	418,5	221,8	447,7	190,1	249,1	247,5	246	245,5	238,9	504,9
Vs = cm3	178,5	95,1	213,7	91,1	102,9	102,2	94,5	93,9	99,5	209,5
GS = Ws / Vs	2,3445	2,3322	2,0949	2,0867	2,4208	2,42172	2,6031	2,6144	2,40101	2,4100
K	1,0004	1,000	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9998	0,9998
Gs(20°C) =	2,3454	2,3332	2,0941	2,0858	2,41983	2,42075	2,6021	2,6134	2,40052	2,4095
PROMEDIO Gs	2,3393 gr/cm3		2,0900 gr/cm3		2,4203 gr/cm3		2,6078 gr/cm3		2,40503 gr/cm3	

Gs (20°C) = Gravedad específica del suelo a 20 °C.

K = Factor de corrección. (Se obtiene del cuadro 5)

Cuadro 5. Factor de corrección por temperatura

TEMPERATURA °C	K
18	1,0004
19	1,0002
20	1
21	0,9998
22	0,9996
23	0,9993
24	0,9993
25	0,9989
26	0,9986
27	0,9981
28	0,998
29	0,9977
30	0,9974
31	0,9971

4.1.2 Ensayos de granulometría. El análisis granulométrico tiene como objetivo la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.

Se realiza el ensayo de granulometría para los rangos de tamaños de sedimentos estipulados en el proyecto, estos se indican en el cuadro 1.

Se hace el ensayo de granulometría para agregados según (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: 1998) I.N.V. E – 213 y otras referencias correspondientes:

- ASTM C-136
- AASHTO T-27
- NLT - 150
- Norma Icontec 77

Equipo

- Balanza de precisión, con sensibilidad de 0.1%
- Tamices de malla cuadrada seleccionados de acuerdo con las especificaciones del material que va a ser ensayado
- Bandejas
- Recipientes

Procedimiento

- Se seleccionó para cada material una muestra representativa para obtenerla se realizó un cuarteo de cada uno de los materiales, cada material se pone a secar al horno por 24 horas. Se deja enfriar y se pesa la cantidad requerida.
- Se selecciona un grupo de tamices de tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones de los materiales a ensayar, que varíen desde los diámetros mayores arriba hasta los diámetros inferiores abajo así (No 3/8, No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100, No. 200, pasante 200) se realiza el tamizado a mano, durante un tiempo adecuado.
- El material retenido en cada tamiz es pesado en una balanza de precisión luego se suma todos los pesos y el valor total no debe diferir de la muestra inicial en más de 0.3%

Cálculo y resultados

Cuadro 6. Análisis granulométrico de la arena tipo I

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/8	9,525	86,1	7,359	92,632
4	4,75	200,3	24,48	75,51
8	2,38	169,8	38,99	61,00
16	1,19	238	59,33	40,66
30	0,6	357	89,85	10,15
50	0,3	108,3	99,10	0,89
100	0,15	8,9	99,86	0,13
200	0,075	1	99,95	0,04
PASA 200		0,5	99,99	0,00

TOTAL PESO RETENIDO = 1169,90

PORCENTAJE DE ERROR = 0,01

Cuadro 7. Análisis granulométrico de la arena tipo II

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/8	9,525	2,8	0,238	99,617
4	4,75	106,9	9,34	90,52
8	2,38	153,6	22,42	77,44
16	1,19	233,1	42,26	57,59
30	0,6	304,6	68,19	31,66
50	0,3	218,2	86,77	13,09
100	0,15	129	97,75	2,10
200	0,075	21,9	99,62	0,24
PASA 200		2,8	99,86	0,00
TOTAL PESO RETENIDO =		1172,90		
PORCENTAJE DE ERROR =		0,14		

Cuadro 8. Análisis granulométrico de la arena tipo III

TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/8	9,525	4,8	0,487	99,472
4	4,75	97,3	10,36	89,60
8	2,38	90,4	19,54	80,42
16	1,19	111,8	30,89	69,07
30	0,6	334,8	64,87	35,09
50	0,3	258,4	91,10	8,86
100	0,15	76,4	98,85	1,11
200	0,075	9,2	99,79	0,17
PASA 200		1,7	99,96	0,00

TOTAL PESO RETENIDO = 984,80

PORCENTAJE DE ERROR = 0,04

Cuadro 9. Análisis granulométrico de arena tipo IV

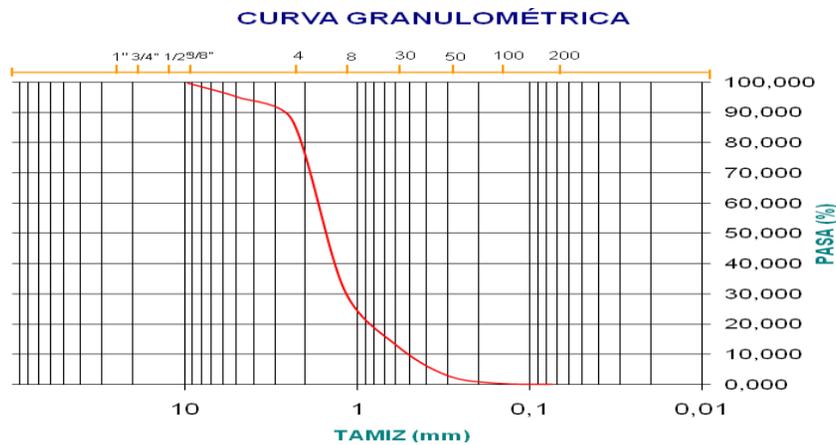
TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/8	9,525	3,4	0,194	99,775
4	4,75	85,1	5,04	94,93
8	2,38	128,3	12,34	87,63
16	1,19	987	68,52	31,44
30	0,6	319,8	86,73	13,24
50	0,3	180,5	97,00	2,97
100	0,15	45,6	99,60	0,37
200	0,075	4,8	99,87	0,10
PASA 200		1,7	99,97	0,00
TOTAL PESO RETENIDO =		1756,20		
PORCENTAJE DE ERROR =		0,03		

Cuadro 10. Análisis granulométrico de arena tipo V

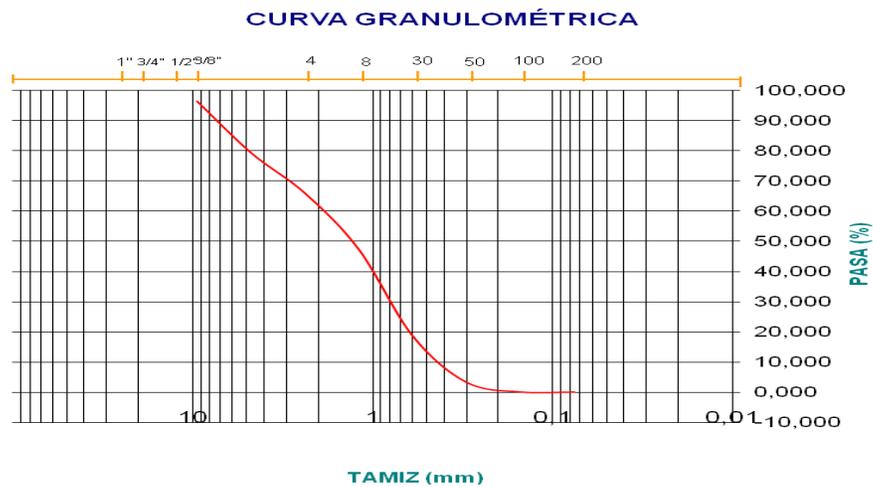
TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA
3/8	9,525	49,5	3,583	96,511
4	4,75	237,3	20,76	79,33
8	2,38	184,8	34,14	65,96
16	1,19	258,8	52,87	47,22
30	0,6	393,5	81,35	18,74
50	0,3	213,4	96,80	3,29
100	0,15	44,4	100,01	0,08
200	0,075	0,9	100,08	0,01
PASA 200		0,2	100,09	0,00
TOTAL PESO RETENIDO =		1382,80		
PORCENTAJE DE ERROR =		-0,09		

Con los datos obtenidos en los cuadros anteriores se construye la curva granulométrica (tamiz Vs % pasa)

Gráfica 5. Curva granulométrica para arena tipo 4



Gráfica 6. Curva granulométrica para arena tipo 5



A partir de la granulometría se puede cuantificar la uniformidad de los sedimentos, desviación estándar geométrica (σ_g) y el coeficiente de uniformidad C_u , los cuales se describen a continuación.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR GEOMÉTRICA DE LOS SEDIMENTOS σ_g Esta relaciona los diámetros d_{84} , d_{16} y d_{50} , como $\sigma_g = d_{84}/d_{50} \approx d_{84}/d_{16} \approx d_{50}/d_{16}$, si su valor es mayor 1.3 el sedimento es no uniforme.

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD, C_u . Su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta, los suelos con $C_u < 3$ se consideran muy uniformes; aun las arenas naturales muy uniformes rara vez tienen un $C_u > 2$. $C_u = d_{60}/d_{10}$.

En los siguientes cuadros se indica los valores para cada tipo de material.

Cuadro 11. Arena tipo

PARÁMETROS QUE SE OBTIENEN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA		
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD =	$C.U = \frac{D_{60}}{D_{10}} =$	4,23
COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN =	$C.C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} =$	0,58
DESVIACION ESTANDAR GEOMETRICA DE LOS SEDIMENTOS $\sigma_g =$	$\sigma G \cong \frac{D_{84}}{D_{50}} \approx \frac{D_{50}}{D_{16}}$	4,758 2,060
$D_{50}(m m) =$		1,41

Cuadro 12. Arena tipo 2

PARÁMETROS QUE SE OBTIENEN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA		
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD =	$C.U = \frac{D_{60}}{D_{10}} =$	5,24
COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN =	$C.C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} =$	1,03
DESVIACION ESTANDAR GEOMETRICA DE LOS SEDIMENTOS $\sigma_g =$	$\sigma G \cong \frac{D_{84}}{D_{50}} \approx \frac{D_{50}}{D_{16}}$	2,964 2,911
$D_{50}(m m) =$		0,97

Cuadro 13. Arena tipo 3

PARÁMETROS QUE SE OBTIENEN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA		
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD =	$C.U = \frac{D_{60}}{D_{10}} =$	2,98
COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN =	$C.C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} =$	0,89
DESVIACION ESTANDAR GEOMETRICA DE LOS SEDIMENTOS $\sigma_g =$	$\sigma G \cong \frac{D_{84}}{D_{50}} \approx \frac{D_{50}}{D_{16}}$	3,952 2,237
$D_{50}(m m) =$		0,81

Cuadro 14. Arena tipo 4

PARÁMETROS QUE SE OBTIENEN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA		
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD =	$C.U = \frac{D_{60}}{D_{10}} =$	3,51
COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN =	$C.C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} =$	1,67
DESVIACION ESTANDAR GEOMETRICA DE LOS SEDIMENTOS $\sigma_G =$	$\sigma_G \cong \frac{D_{84}}{D_{50}} \approx \frac{D_{50}}{D_{16}}$	1,129 2,248
$D_{50}(m m) =$	1,50	

Cuadro 15. Arena tipo 5

PARÁMETROS QUE SE OBTIENEN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA		
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD =	$C.U = \frac{D_{60}}{D_{10}} =$	4,32
COEFICIENTE DE CONTRACCIÓN =	$C.C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} =$	0,87
DESVIACION ESTANDAR GEOMETRICA DE LOS SEDIMENTOS $\sigma_G =$	$\sigma_G \cong \frac{D_{84}}{D_{50}} \approx \frac{D_{50}}{D_{16}}$	4,511 2,398
$D_{50}(m m) =$	1,27	

En las cinco clases de arena observamos que el coeficiente de uniformidad es mayor o igual a 3 esto quiere decir que las arenas son no uniformes y cumplen con los requisitos de este proyecto.

Calibración de equipos.

4.1.3 Dosificador de sólidos. Se calibra el dosificador de sólidos para cada tipo de material y con aberturas diferentes para luego sacar una regresión lineal para cada uno.

Procedimiento:

- Llenado de la tolva con material.
- Graduación de la compuerta del dosificador a una altura conocida.

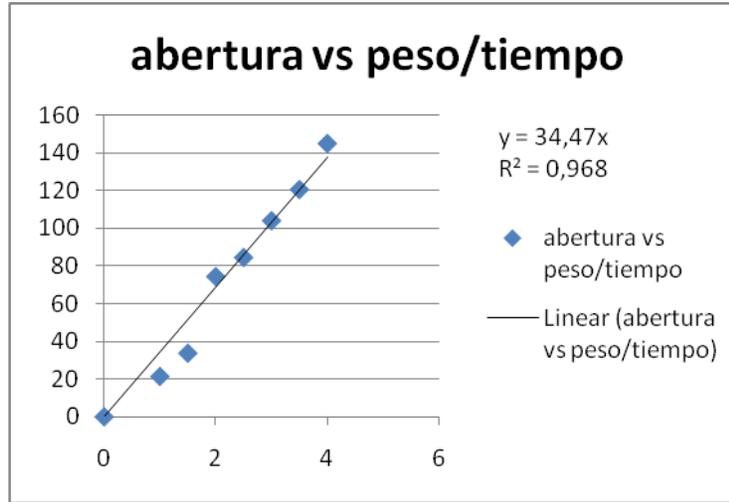
- Instalación de un recipiente a la salida del material para recolectarlo.
- Inicio del cronometro en cero.
- Encendido del dosificador de sólidos y activación del cronometro.
- Se deja pasar unos 5 a 10 segundos y se apaga el dosificador y se detiene el cronometro.
- El material recolectado en el recipiente es pesado y registrado junto con el tiempo.
- Se realiza cinco tomas de datos y de estos se escogen tres para su análisis.
- Se cambia la abertura de la compuerta del dosificador y se repite el proceso hasta conseguir los datos necesarios para realizar una línea de tendencia.

Cálculo y resultados

Cuadro 16. Calibración dosificador arena tipo 1

abertura cm	tiempo seg	peso gr	peso/tiempo gr/seg	promedio gr/seg
0	0	0	0	0
1	11,77	259	22,01	21,501979
	12,36	264,1	21,37	
	10,41	220	21,13	
1,5	11,57	384,1	33,20	33,8137572
	12,27	400,1	32,61	
	10,86	387	35,64	
2	8	612,4	76,55	74,5462391
	9,74	712,14	73,11	
	6,09	450,5	73,97	
2,5	7,52	649,4	86,36	84,6960635
	7,71	633,5	82,17	
	7,6	650,3	85,57	
3	8,03	823,4	102,54	104,229342
	7,7	849,1	110,27	
	7,19	718,1	99,87	
3,5	8,08	988,1	122,29	120,826866
	7,13	860,1	120,63	
	5,68	679,1	119,56	
4	8,28	1169,1	141,20	145,264834
	6,53	959,1	146,88	
	8,3	1226,1	147,72	

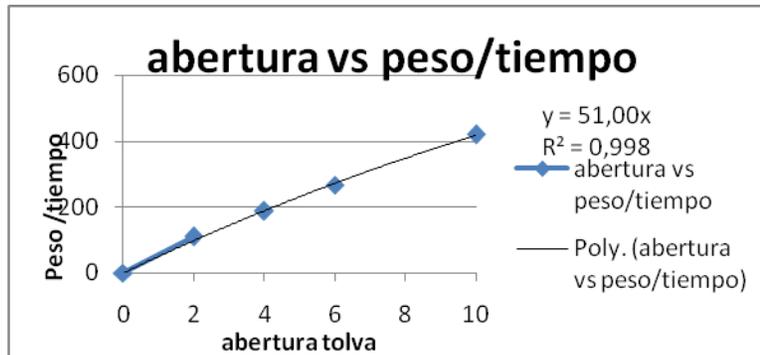
Gráfica 7. Línea de tendencia arena tipo 1



Cuadro 17. Calibración dosificador arena tipo 2

abertura cm	tiempo seg	Peso Gr	peso/tiempo gr/seg	promedio gr/seg
0	0	0	0	0
2	5,2	580	111,54	110,485073
	4,99	560	112,22	
	5,2	560	107,69	
4	4,54	770	169,60	186,738912
	5,08	970	190,94	
	4,29	860	200,47	
	4,41	820	185,94	
6	4	1050	262,50	267,143832
	3,66	1030	281,42	
	4,66	1200	257,51	
10	3,61	1610	445,98	419,547202
	3,85	1540	400,00	
	3,95	1630	412,66	

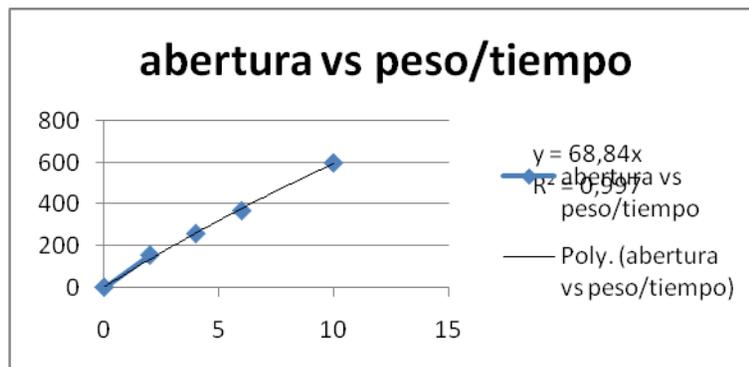
Gráfica 8. Línea de tendencia arena tipo 2



Cuadro 18. Calibración dosificador arena tipo 3

abertura cm	tiempo seg	Peso Gr	peso/tiempo gr/seg	promedio gr/seg
0	0	0	0	0
2	6,03	930	154,23	154,589007
	5,47	830	151,74	
	5,64	890	157,80	
4	5,33	1320	247,65	257,79064
	5,16	1380	267,44	
	5,67	1420	250,44	
	5,12	1360	265,63	
6	4,66	1710	366,95	367,834848
	4,16	1540	370,19	
	4,34	1590	366,36	
10	4,32	2600	601,85	597,741118
	4,58	2700	589,52	
	4,32	2600	601,85	

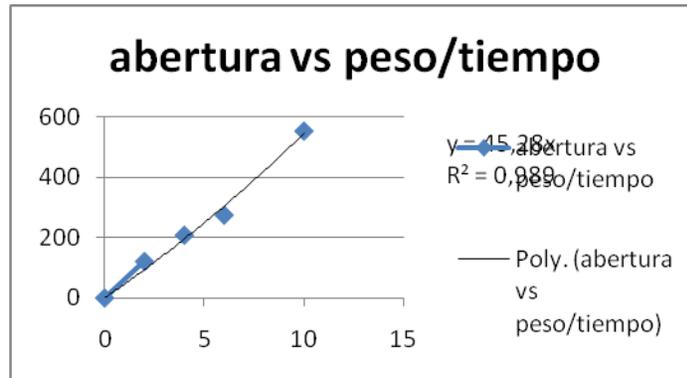
Gráfica 9. Línea de tendencia arena tipo 3



Cuadro 19. Calibración dosificador arena tipo 4

abertura cm	tiempo seg	Peso Gr	peso/tiempo gr/seg	promedio gr/seg
0	0	0	0	0
2	5,6	640	114,29	121,140337
	5,76	690	119,79	
	5,18	670	129,34	
4	5,15	1090	211,65	208,576582
	4,89	1080	220,86	
	5,25	1000	190,48	
	5,3	1120	211,32	
6	4,3	1150	267,44	275,143298
	4,65	1330	286,02	
	4,78	1300	271,97	
10	3,51	1690	481,48	554,510054
	3,4	1850	544,12	
	2,9	1850	637,93	

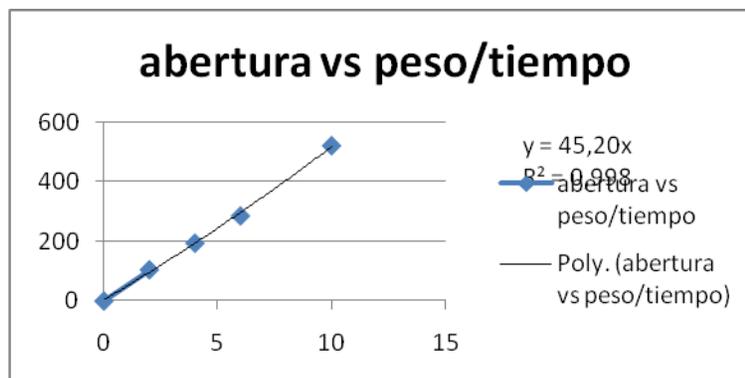
Gráfica 10. Línea de tendencia arena tipo 4



Cuadro 20. Calibración dosificador arena tipo 5

abertura cm	tiempo seg	Peso Gr	peso/tiempo gr/seg	promedio gr/seg
0	0	0	0	0
2	5,47	570	104,20	104,448306
	5,25	560	106,67	
	5,66	580	102,47	
4	4,63	800	172,79	193,519237
	4,27	840	196,72	
	6,5	1320	203,08	
	5,36	1080	201,49	
6	4,81	1370	284,82	284,672831
	5,14	1460	284,05	
	5,05	1440	285,15	
10	4,94	2600	526,32	519,771452
	4,08	2100	514,71	
	3,28	1700	518,29	

Gráfica 11. Línea de tendencia arena tipo 5



5. PROCEDIMIENTO PARA LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

5.1 TOMA DE DATOS DEL MODELO DE LABORATORIO

Se usaran 4 modelos de laboratorio circular, triangular, rectangular 10 cm, y rectangular 5 cm. Se realizaran 5 tomas de video para diferente concentracion y material es decir que por canal se haran 25 tomas de videos. para pendiente crítica.

5.1.1 Recopilación de datos. En el modelo de laboratorio se miden las variables necesarias para determinar la pendiente crítica de deposito.

Variables a recolectar

- Temperatura de la mezcla.
- Lectura manómetro diferencial. Y se calcula el caudal liquido Q_L .
- Pendiente del canal.
- Abertura dosificador. Y se calcula el caudal sólido Q_S .
- Profundidad de la lamina de la mezcla en el canal.

Procedimiento para la realización de los ensayos.

- Se llena el dosificador de sólidos con el material a analizar y se abre la compuerta completamente para así obtener una máxima concentración de sólidos.
- Instalación cámara de video.
- Abertura de la válvula de abastecimiento V2 y se cierra completamente la válvula V4 y como se trabaja con caudales muy bajos para no forzar la motobomba se decide abrir la válvula V6 y por ende se debe cerrar la válvula V5.
- Activación de la motobomba; se abre la válvula V3 en dos vueltas.
- Se purga el manómetro diferencial para eliminar el aire que pueda estar contenido en este y evitar la toma de datos erróneos.
- Puesta en marcha la cámara de video se anotan los valores de la diferencia de alturas del manómetro, tipo de material a ensayar y la temperatura de la mezcla; para no extraviar o confundir los datos estos se muestran a la cámara de video.

- Enseguida se activa el dosificador de sólidos y se verifica que todas las partículas sean transportadas en suspensión.
- Se sube el canal de ensayo mediante las poleas hasta que una de las partículas se sedimenten.
- Se apaga el dosificador de sólidos y enseguida se detiene la filmación de la cámara de video; indicando que se da inicio a otro ensayo.
- Para iniciar otro ensayo con una diferente concentración se abre nuevamente la válvula V3 y se baja el canal a su máxima pendiente.
- Se repite el proceso del (6) al (10) para la nueva concentración.
- Para un nuevo material se debe apagar todos los equipos y extraer el material del desarenador este sedimento se lleva a secar ya sea en horno o al aire libre; y el procedimiento ya sea para un nuevo canal o material se comienza del paso (1) al (11)

5.2 METODOLOGÍA DE CÁLCULO Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Los ensayos gravados en la cámara digital se digitalizan sus valores obtenidos para la pérdida de energía y se calculan los siguientes valores.

Caudal líquido (Q_L) utilizando la ecuación No 31 que se encontró en el proceso indicado en el numeral 2.7

$$[31] \quad Y = 0.7696 * X^{0.3978}$$

Y = caudal liquido ($m^3/seg.$)

X = Diferencia del nivel de mercurio en el manómetro diferencial (cm de Hg).

Caudal sólido (Q_S) se calcula como sigue.

$$[32] \quad Q_S = \frac{D_s}{\gamma_s}$$

Donde:

Q_S = Caudal sólido. (m^3/seg)

D_S = Dosificación de sólidos se establece en las gráficas (24) a la (28) (gr/seg)

γ_S = Peso específico del sólido encontrado en el numeral 5.1.1 (gr/cm^3)

Caudal de la mezcla (Q_m) se obtiene de la siguiente manera.

$$[33] \quad Q_m = Q_s + Q_L$$

Concentración de la mezcla (C) se calcula con la siguiente ecuación.

$$[34] \quad C = \frac{Q_s}{Q_m} * 100$$

Donde

C = concentración (%)

Radio hidráulico (R_H) se calcula en la ecuación (35)

$$[35] \quad R_H = \frac{A}{P_m}$$

Donde

R_H = Radio Hidráulico.

A = Área mojada de la sección.

P_m = Perímetro mojado.

Velocidad de la mezcla (V_m) está dada por la siguiente ecuación.

$$[36] \quad V_m = \frac{Q_m}{A}$$

Donde:

V_m = Velocidad de la mezcla (m/seg).

Factor de fricción de la mezcla (f_m) se calcula según la ecuación No [1].

Factor de fricción del agua calculado con la ecuación de Blasius (f_w) que se obtiene de la siguiente manera.

$$[37] \quad f_w = \frac{0,3164}{NR_m^{0,25}}$$

Donde:

f_w = Factor de fricción del agua.

NR_m = Número de Reynolds de la mezcla.

Relación del Factor de fricción adicional producido por los sólidos y el del agua o pérdida de energía; esta dado por la siguiente relación.

$$[38] \quad \frac{f_s}{f_w}$$

Donde:

f_s = Factor de fricción adicional producido por los sólidos.

5.2.1 Variables a analizar en la regresión lineal múltiple-variable. Como se menciona en el capítulo 2.7.2. “Para poder realizar esta investigación, se debe postular una relación funcional entre las variables. Tratar de explicar el comportamiento de Y con más de una variable preeditora usando una funcional lineal”. Nuestras variables predictoras o independientes a analizar serán:

- Pendiente (S)
- Concentración (C)
- Coeficiente de arrastre de partículas (C_d)
- Diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla (d^*).

La variable dependiente de este análisis será:

- Relación del Factor de fricción adicional producido por los sólidos y el del agua o pérdida de energía; se indica en la ecuación No [38]

Las ecuaciones para el análisis de la ecuación múltiple-variable quedaran como sigue:

$$[39] \quad \frac{f_s}{f_w} = \beta_0 + \beta_1 * S + \beta_2 * C$$

$$[40] \quad \frac{f_s}{f_w} = \beta_0 + \beta_1 * S + \beta_2 * C + \beta_3 * C^d$$

$$[41] \quad \frac{f_s}{f_w} = \beta_0 + \beta_1 * S + \beta_2 * C + \beta_3 * d^*$$

6. ANÁLISIS DE DATOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta parte se dedica al análisis de las funciones obtenidas a través de la regresión múltiple variable con los datos experimentales, que dará como resultado la obtención de los exponentes y constantes que darán como resultado una expresión para cada tipo de canal.

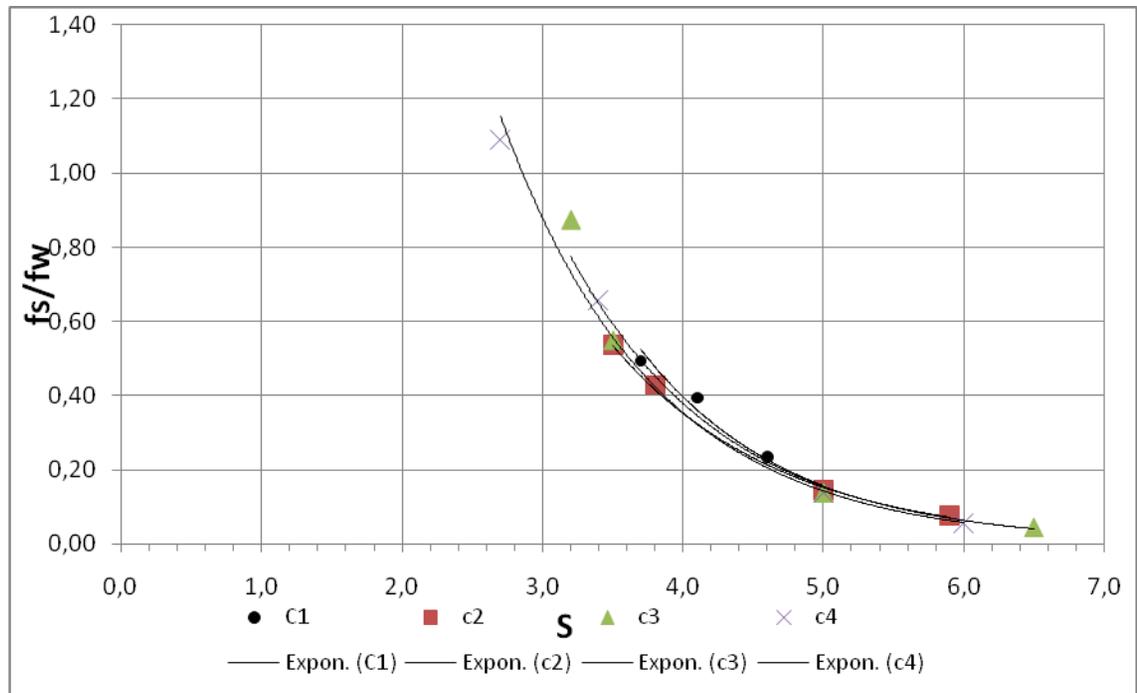
6.1.1 Descripción del proceso del análisis. Se realiza las correspondientes gráficas (S vs f_s/f_w) para cada tipo de concentración, para cada tipo de material y para cada tipo de canal.

- Se realiza un filtrado de datos.
- Con los datos ya seleccionados para proseguir a la regresión múltiple-variable se calcula el logaritmo a cada uno de ellos (f_s/f_w , S , C , $C'd$, d^{*4}).
- Se obtiene una matriz y con esto encontraremos los exponentes β_0 , β_1 , β_2 , β_3 ; respectivamente como se indica en las ecuaciones [39], [40], [41];
- Una vez obtenidas las tres ecuaciones se procede a graficar el dato experimental (f_s/f_w) vs pendiente (S) una vez más para cada tipo de material, concentración y para cada tipo de canal.
- Para el caso de los canales rectangular de 10 y 5 cm se hace necesario buscar dos ecuaciones una para altas concentraciones y otra para bajas concentraciones debido a que existe una gran diferencia entre estos dos ensayos.
- Se obtiene el error que presentan las ecuaciones dicho error puede ser analizado con f_s/f_w teórico.

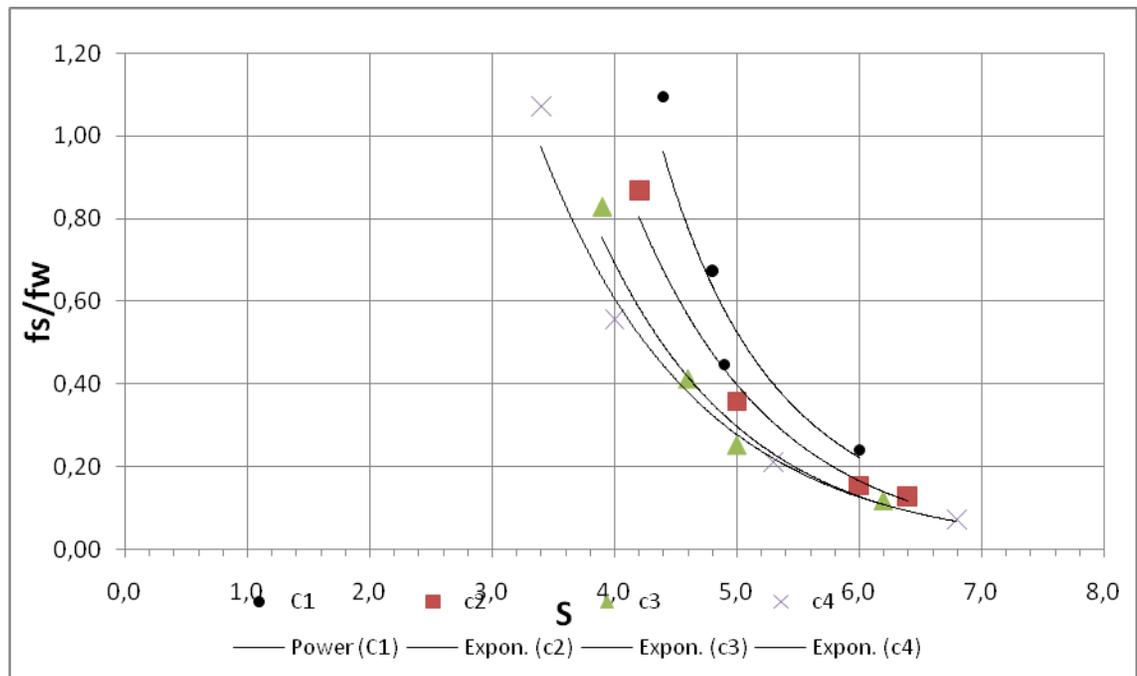
6.1.2 Resultados obtenidos para pérdida de energía en canales abiertos

- Los datos obtenidos durante los ensayos con el canal circular se relacionan como sigue a continuación en las gráficas (12-16), con estos datos y mediante el uso del método de regresión lineal que fue estudiada en el capítulo 2.7.2. Se obtuvieron tres fórmulas que explican la pérdida de energía en canales circulares.

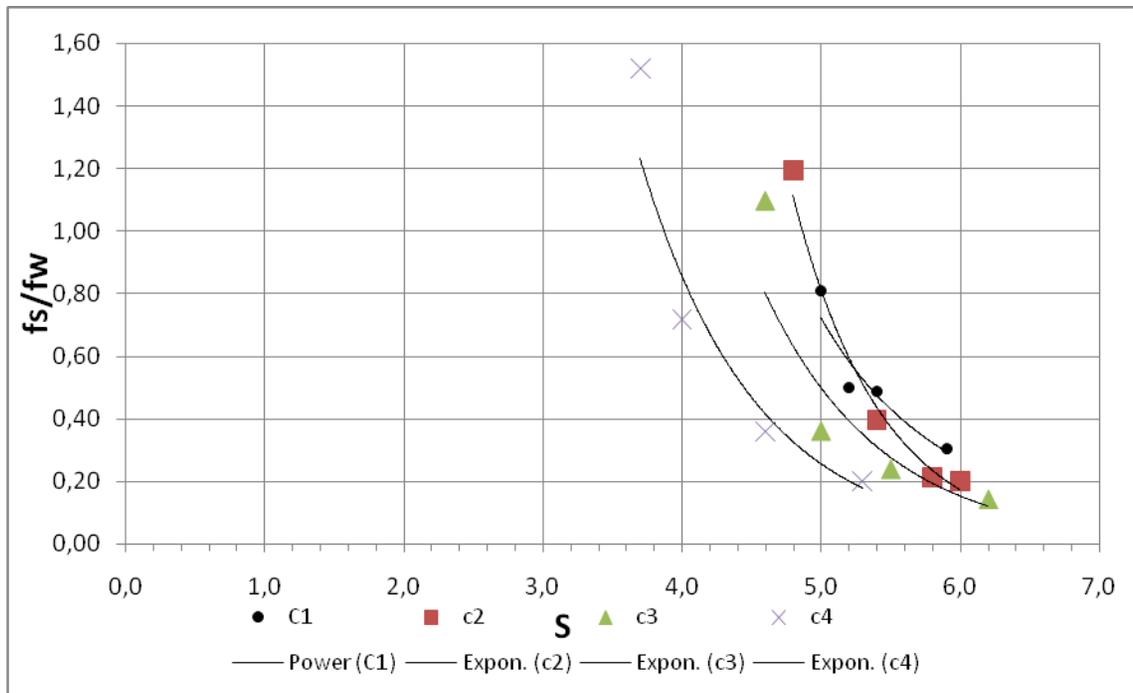
Gráfica 12. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo I canal circular



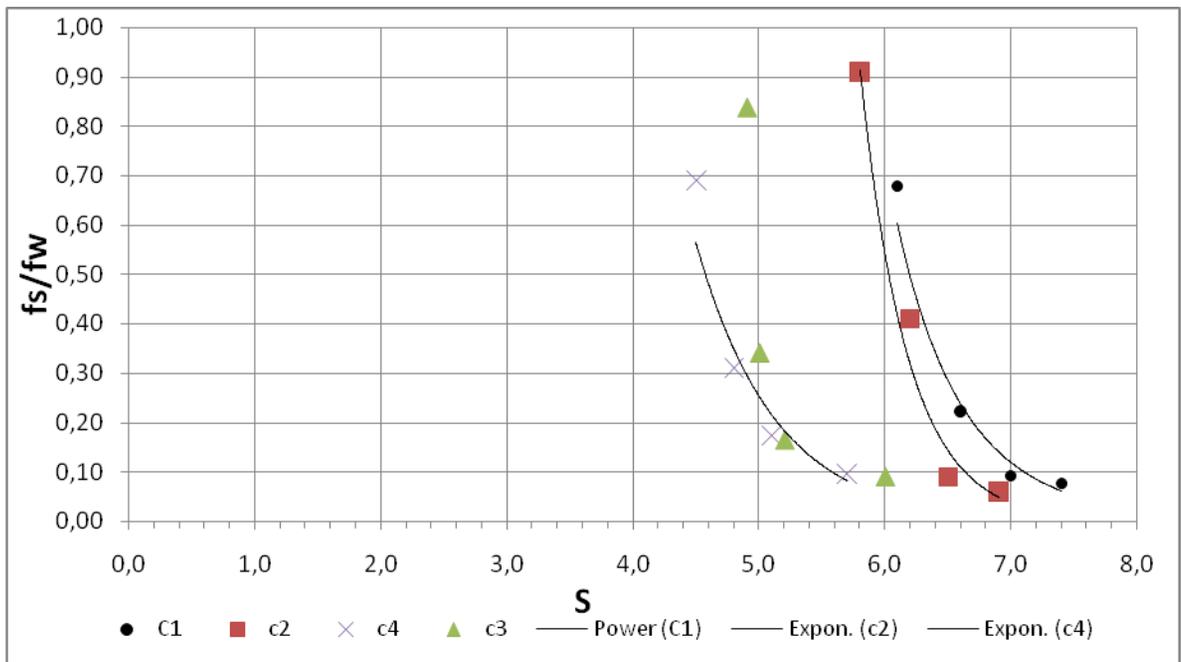
Gráfica 13. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo II canal circular



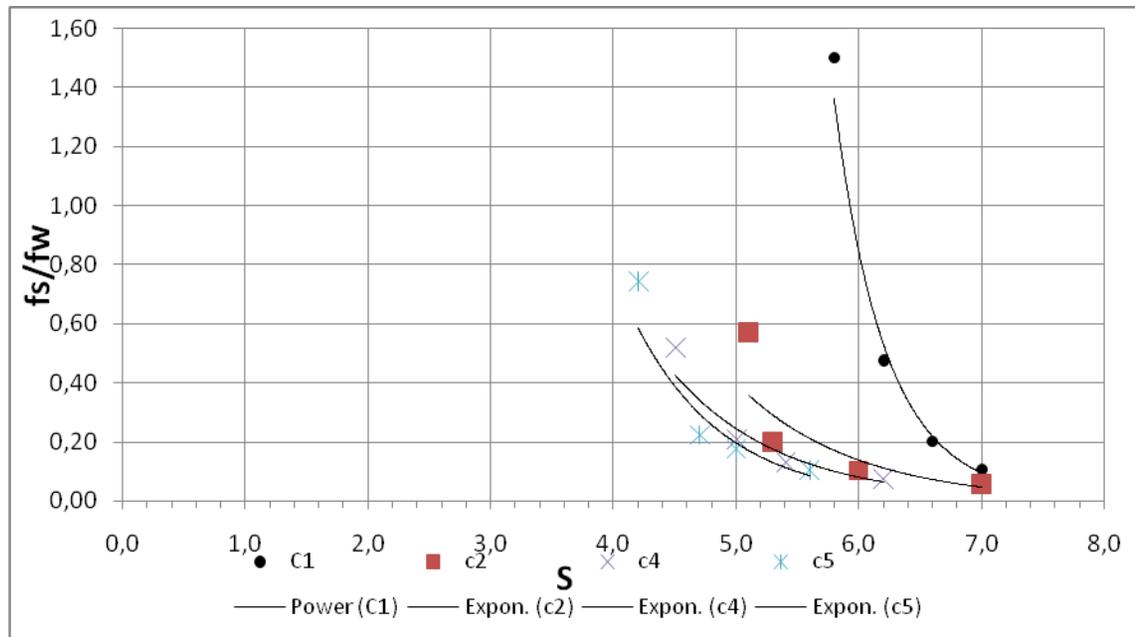
Gráfica 14. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo III canal circular



Gráfica 15. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo IV canal circular



Gráfica 16. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo v canal circular



En las anteriores gráficas (12-16) se observó el comportamiento de la mezcla de agua limpia con los diferentes tipos de sedimentos y las diferentes concentraciones utilizadas, teniendo a C1 como la mezcla con mayor concentración y C5 la mezcla con menor concentración aquí queda expuesto que la concentración y la disminución de la pendiente en el canal tienen una incidencia directa y predecible en la pérdida de energía.

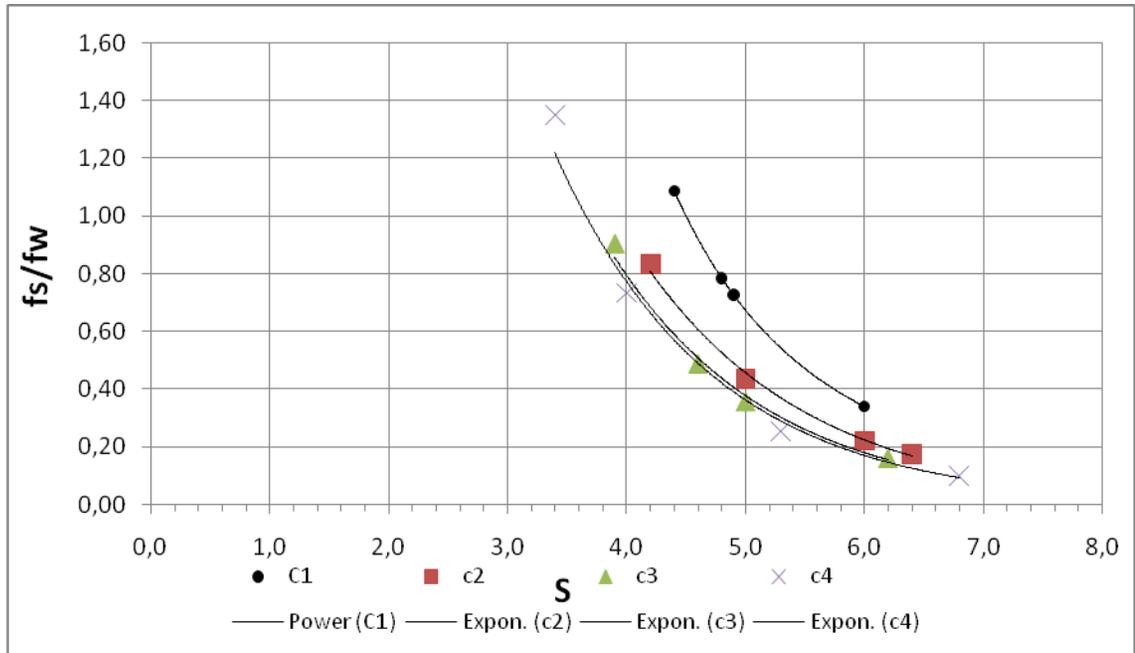
- Deducción de fórmulas para pérdida de energía en canales circulares

$$[42] \quad \frac{f_s}{f_w} = 12.425103 * S^{-3.7439} * C^{1.0821}$$

$$[43] \quad \frac{f_s}{f_w} = 0.094276 * S^{-4.3064} * C^{1.9328} * d^{*1.2919}$$

$$[44] \quad \frac{f_s}{f_w} = 17.6441 * S^{-4.287} * C^{1.9009} * C' d^{-1.8484}$$

Gráfica 17. Pérdida de energía obtenido de la ecuación no [42] vs pendiente crítica para arena tipo II canal circular



Comparando la grafica 17 con la grafica 12 se observó que usando la regresión lineal con múltiple variable, esta alinea los datos dispersos creando una curva más exacta con la misma cantidad de ensayos además no se cambia la orientación de las curvas y el error que se produce al comparar las dos gráficas es aceptable como se podrá ver a continuación en el cuadro 20 donde se indica los datos tomados correspondientes a pérdida de energía, diámetro adimensional de las partículas afectadas por la mezcla y el correspondiente porcentaje de error total que se encuentra debajo de una media de 30% que es lo aceptable para estos casos.

Cuadro 21. Pérdida de energía según la ecuación no 42, pérdida de energía experimental en canales circulares abiertos y porcentaje de error

fs/fw [-]	fs/fw experimental [°]	Error %	fs/fw [-]	fs/fw experimental [°]	Error %
0,15132	0,20931	38,31914	1,19481	0,59563	50,14851
0,23493	0,28600	21,73894	0,14258	0,18534	29,99237
0,39384	0,44001	11,72265	0,23829	0,29024	21,80188
0,49301	0,64621	31,07443	0,20033	0,29753	48,52177
0,07480	0,09731	30,08330	0,36027	0,50564	40,35016
0,14338	0,18083	26,11402	0,71843	0,85328	18,77047
0,42745	0,50523	18,19438	1,51953	1,14249	24,81247
0,53679	0,68739	28,05519	0,07703	0,10936	41,96479
0,04339	0,06203	42,96478	0,09260	0,13465	45,40133
0,13719	0,16566	20,75809	0,22226	0,16783	24,49032
0,54988	0,62974	14,52486	0,67728	0,22540	66,71926
0,87581	0,88078	0,56841	0,05923	0,07323	23,65117
0,05683	0,07859	38,29153	0,08948	0,09158	2,34646
0,13961	0,15553	11,40570	0,41073	0,10931	73,38727
0,65751	0,65901	0,22787	0,91125	0,14031	84,60272
1,09123	1,56212	43,15204	0,09074	0,10890	20,01380
0,24049	0,34076	41,69545	0,16501	0,18607	12,76545
0,44703	0,72736	62,70923	0,34158	0,21551	36,90854
0,67402	0,78573	16,57412	0,83838	0,23244	72,27543
1,09436	1,08831	0,55295	0,09553	0,12002	25,64227
0,12726	0,17273	35,72916	0,17339	0,18202	4,97801
0,15451	0,21994	42,34691	0,31084	0,22840	26,52357
0,35750	0,43525	21,74954	0,69173	0,29082	57,95779
0,87001	0,83605	3,90333	0,10540	0,14503	37,60392
0,11720	0,15980	36,34361	0,20075	0,18077	9,95252
0,25216	0,35754	41,79221	0,47487	0,22845	51,89251
0,41265	0,48854	18,39143	1,50175	0,29324	80,47319
0,82986	0,90639	9,22172	0,05751	0,08114	41,10048
0,07152	0,10073	40,84538	0,10375	0,14451	39,28961
0,21022	0,25607	21,81203	0,19960	0,22993	15,19813
0,55678	0,73439	31,89907	0,57283	0,26555	53,64270
1,07224	1,34951	25,85848	0,07299	0,09827	34,64348
0,30491	0,38661	26,79530	0,12924	0,16484	27,54586
0,48706	0,53859	10,57883	0,20665	0,21989	6,40631
0,50069	0,62033	23,89424	0,51793	0,32622	37,01449
0,80954	0,71844	11,25343	0,10238	0,13547	32,32578
0,19884	0,25832	29,91144	0,17398	0,20707	19,01965
0,21094	0,29328	39,03067	0,22169	0,26105	17,75493
0,39457	0,38324	2,87290	0,74489	0,39774	46,60387
ERROR PROMEDIO					30,5083

En el cuadro 21 se muestra la regresión lineal con las variables de pendiente y concentración cuya fórmula se indica en la ecuación 42 obteniendo un porcentaje de error promedio del 30.5%

Cuadro 22. Pérdida de energía según la ecuación [42], diámetro adimensional de partículas por ecuación [43] en canales circulares abiertos

fs/fw [-]	fs/fw con d* [-]	Error %	fs/fw [-]	fs/fw con d* [-]	Error %
0,15132	0,21546	42,38417	1,19481	0,52573	55,99890
0,23493	0,30854	31,33434	0,14258	0,12796	10,24828
0,39384	0,50643	28,58799	0,23829	0,21436	10,04087
0,49301	0,78797	59,82864	0,20033	0,21117	5,41281
0,07480	0,08322	11,24673	0,36027	0,38864	7,87482
0,14338	0,16973	18,37575	0,71843	0,70948	1,24520
0,42745	0,55338	29,46088	1,51953	0,99254	34,68081
0,53679	0,78856	46,90240	0,07703	0,16879	119,12447
0,04339	0,04746	9,37935	0,09260	0,21443	131,55482
0,13719	0,14690	7,08179	0,22226	0,27627	24,29745
0,54988	0,68249	24,11708	0,67728	0,38785	42,73385
0,87581	1,00391	14,62643	0,05923	0,08132	37,29778
0,05683	0,06011	5,77945	0,08948	0,10516	17,52410
0,13961	0,13182	5,58249	0,41073	0,12890	68,61754
0,65751	0,69383	5,52306	0,91125	0,17178	81,14903
1,09123	1,87236	71,58179	0,09074	0,12073	33,05701
0,24049	0,34340	42,79226	0,16501	0,22359	35,50048
0,44703	0,82143	83,75356	0,34158	0,26473	22,49735
0,67402	0,89771	33,18730	0,83838	0,28879	65,55341
1,09436	1,30578	19,31874	0,09553	0,12851	34,52947
0,12726	0,13849	8,82330	0,17339	0,20748	19,66065
0,15451	0,18286	18,34855	0,31084	0,26937	13,34151
0,35750	0,40096	12,15579	0,69173	0,35567	48,58205
0,87001	0,84953	2,35374	0,10540	0,18509	75,61435
0,11720	0,11725	0,04495	0,20075	0,23847	18,78865
0,25216	0,29610	17,42551	0,47487	0,31215	34,26614
0,41265	0,42402	2,75422	1,50175	0,41600	72,29872
0,82986	0,86322	4,01976	0,05751	0,07589	31,96285
0,07152	0,06563	8,22946	0,10375	0,14739	42,06905
0,21022	0,19196	8,68714	0,19960	0,25147	25,98856
0,55678	0,64493	15,83237	0,57283	0,29677	48,19153
1,07224	1,29857	21,10792	0,07299	0,08334	14,17857
0,30491	0,34656	13,66043	0,12924	0,15108	16,89999
0,48706	0,50745	4,18638	0,20665	0,21045	1,83952
0,50069	0,59701	19,23662	0,51793	0,33128	36,03710
0,80954	0,70686	12,68450	0,10238	0,11700	14,28847
0,19884	0,20111	1,13952	0,17398	0,19061	9,56246
0,21094	0,23272	10,32297	0,22169	0,24882	12,23745
0,39457	0,31658	19,76710	0,74489	0,40387	45,78172
ERROR PROMEDIO					28.5052

En el cuadro 22 se muestra la regresión lineal con las variables de pendiente, concentración y diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla como se indica en la ecuación 43 dando como resultado un error promedio del 28.5.

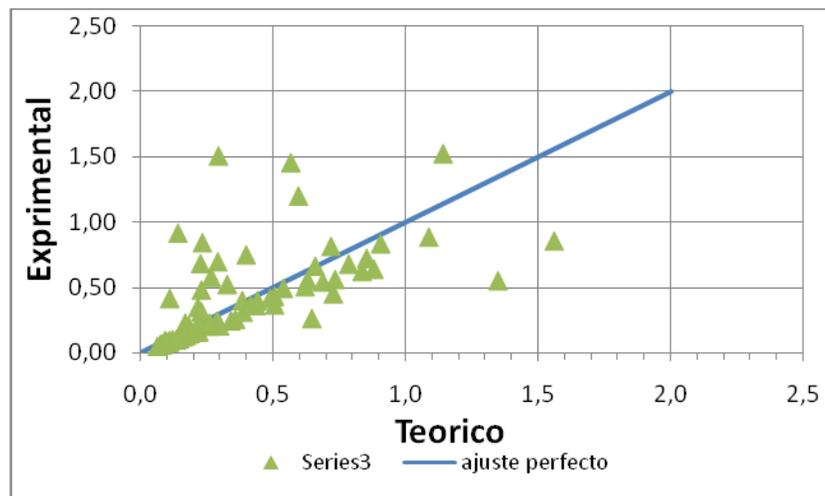
Cuadro 23. Pérdida de energía por ecuación [42] y coeficiente de arrastre de partículas por ecuación [44] en canales circulares abiertos

fs/fw [-]	fs/fw con C'd [-]	Error %	fs/fw [-]	fs/fw con C'd [-]	Error %
0,15132	0,21541	42,35305	0,14258	0,12955	9,13359
0,23493	0,30798	31,09341	0,23829	0,21652	9,13504
0,39384	0,50438	28,06588	0,36094	0,32580	9,73510
0,49301	0,78321	58,86299	1,09654	0,46579	57,52182
0,07480	0,08325	11,29382	0,20033	0,21550	7,57533
0,14338	0,16926	18,04620	0,36027	0,39553	9,78574
0,42745	0,54891	28,41496	0,71843	0,72010	0,23203
0,53679	0,78094	45,48328	1,51953	1,00587	33,80392
0,04339	0,04752	9,50472	0,07703	0,16686	116,61600
0,13719	0,14632	6,66025	0,09260	0,21174	128,65740
0,54988	0,67512	22,77598	0,22226	0,27250	22,60210
0,87581	0,99133	13,19093	0,67728	0,38198	43,60119
0,05683	0,06012	5,78761	0,05923	0,07788	31,49996
0,13961	0,13136	5,90860	0,08948	0,10061	12,43096
0,65751	0,68628	4,37475	0,41073	0,12320	70,00507
1,09123	1,84372	68,95732	0,91125	0,16397	82,00580
0,24049	0,34028	41,49484	0,09074	0,11493	26,66022
0,44703	0,81078	81,36996	0,16501	0,21225	28,62863
0,67402	0,88571	31,40706	0,34158	0,25111	26,48382
1,09436	1,28615	17,52531	0,83838	0,27383	67,33803
0,12726	0,14415	13,27743	0,09553	0,12206	27,77135
0,15451	0,19010	23,03840	0,17339	0,19663	13,40450
0,35750	0,41537	16,18855	0,31084	0,25499	17,96876
0,87001	0,87711	0,81572	0,69173	0,33626	51,38849
0,11720	0,12355	5,41820	0,10540	0,19328	83,38060
0,25216	0,31070	23,21696	0,20075	0,24873	23,90036
0,41265	0,44421	7,64781	0,47487	0,32519	31,52059
0,82986	0,90144	8,62518	1,50175	0,43282	71,17902
0,07152	0,06971	2,52369	0,05751	0,07866	36,79081
0,21022	0,20291	3,47762	0,10375	0,15233	46,82701
0,55678	0,67802	21,77412	0,19960	0,25926	29,89498
1,07224	1,36088	26,91950	0,57283	0,30575	46,62499
0,30491	0,32039	5,07757	0,07299	0,08607	17,92303
0,48706	0,46833	3,84640	0,12924	0,15562	20,41055
0,50069	0,55057	9,96293	0,20665	0,21645	4,74131
0,80954	0,65138	19,53675	0,51793	0,34003	34,34888
0,19884	0,19837	0,23909	0,10238	0,12058	17,77966
0,39457	0,31162	21,02233	0,17398	0,19601	12,66132
1,19481	0,51632	56,78615	0,22169	0,25555	15,27351
			0,74489	0,41389	44,43647
			ERROR PROMEDIO		28,6548

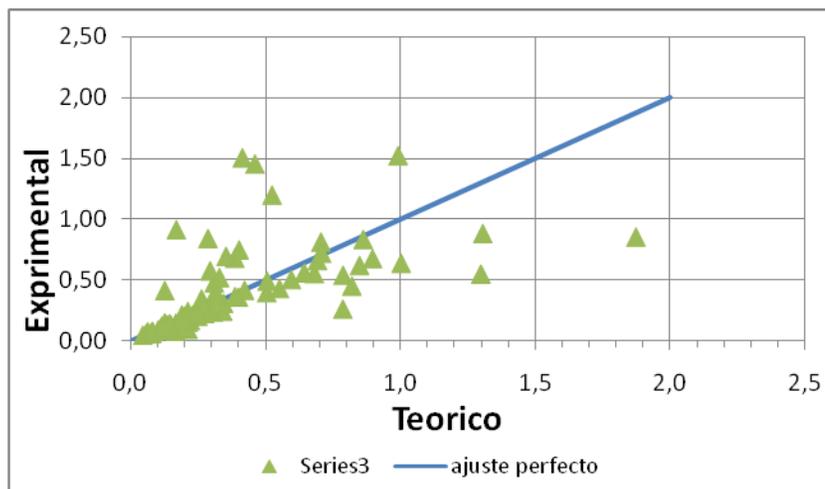
En el cuadro 23 se indica la regresión lineal con las variables de pendiente, concentración y coeficiente de arrastre de partículas como se indica en la ecuación [44] dando como resultado un error promedio del 28.65%

Como resultado de las ecuaciones obtenidas se comparó el dato experimental con el valor teórico para canales circulares abiertos.

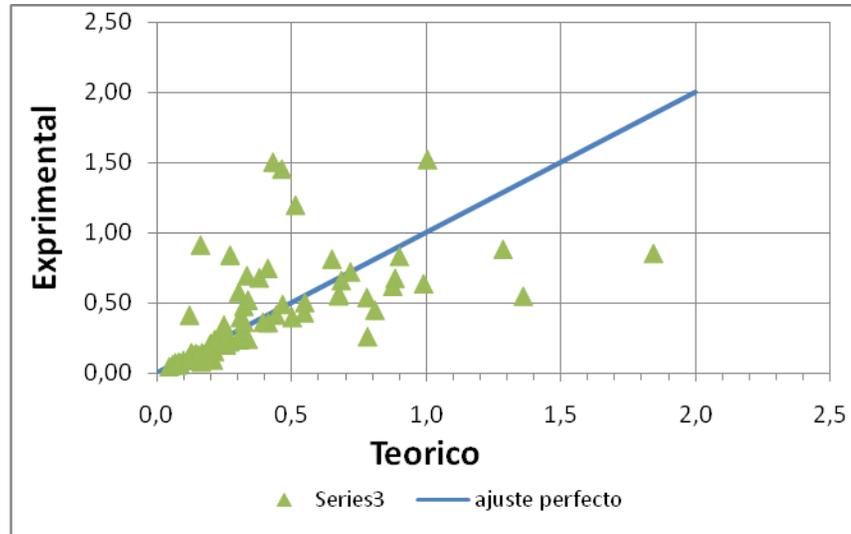
Gráfica 18. Comparación valor experimental vs valor teórico de pérdida de energía en canal circular



Gráfica 19. Valor experimental vs teórico de diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla en canal circular

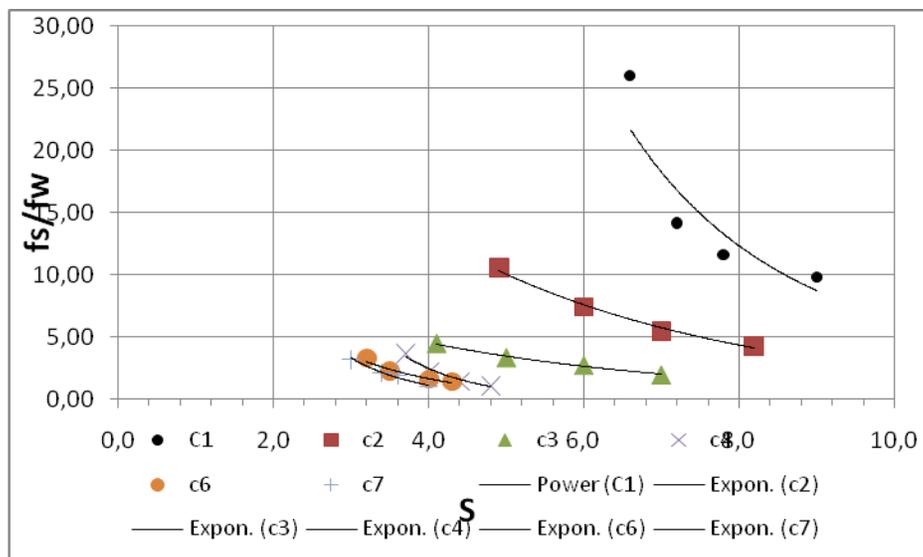


Gráfica 20. Valor experimental vs teórico del coeficiente de arrastre de partículas en canal circular

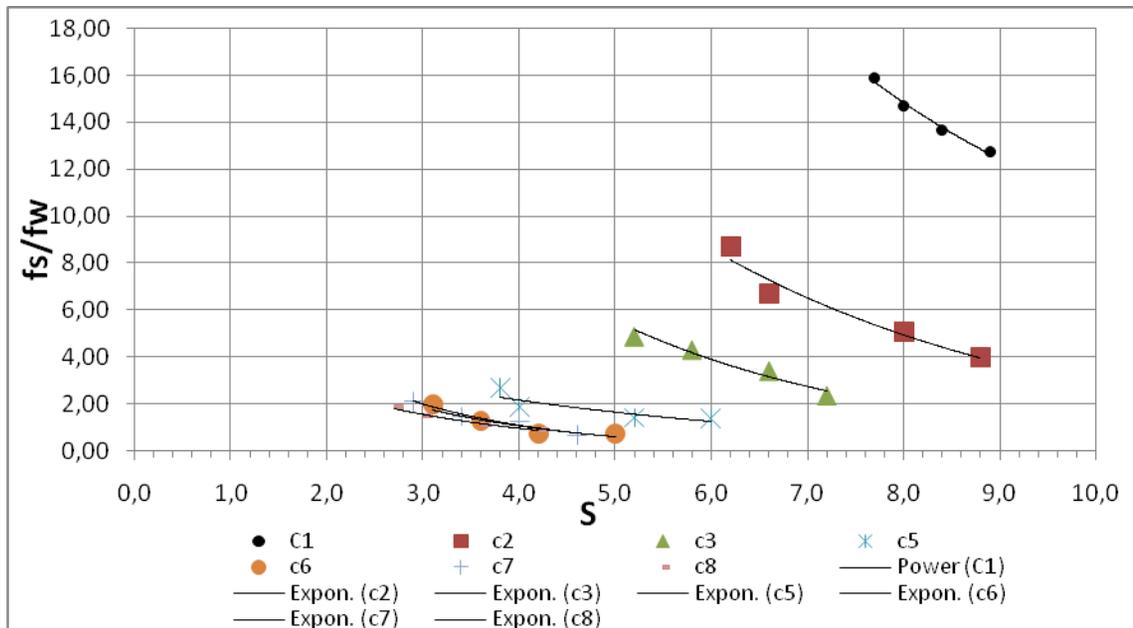


- Canal rectangular 10 cm de base. En el análisis de las gráficas de los datos obtenidos en el estudio de este canal se pudo deducir que se presentan dos tendencias una para altas concentraciones de sólido en la mezcla y otra para bajas concentraciones en esta última se produce una tendencia lineal donde no se observa una pérdida de energía considerable. Las gráficas siguientes (21-25) se deben estudiar teniendo en cuenta que C1 es la mezcla con mayor contenido de sólidos y C5 la mezcla con menor concentración.

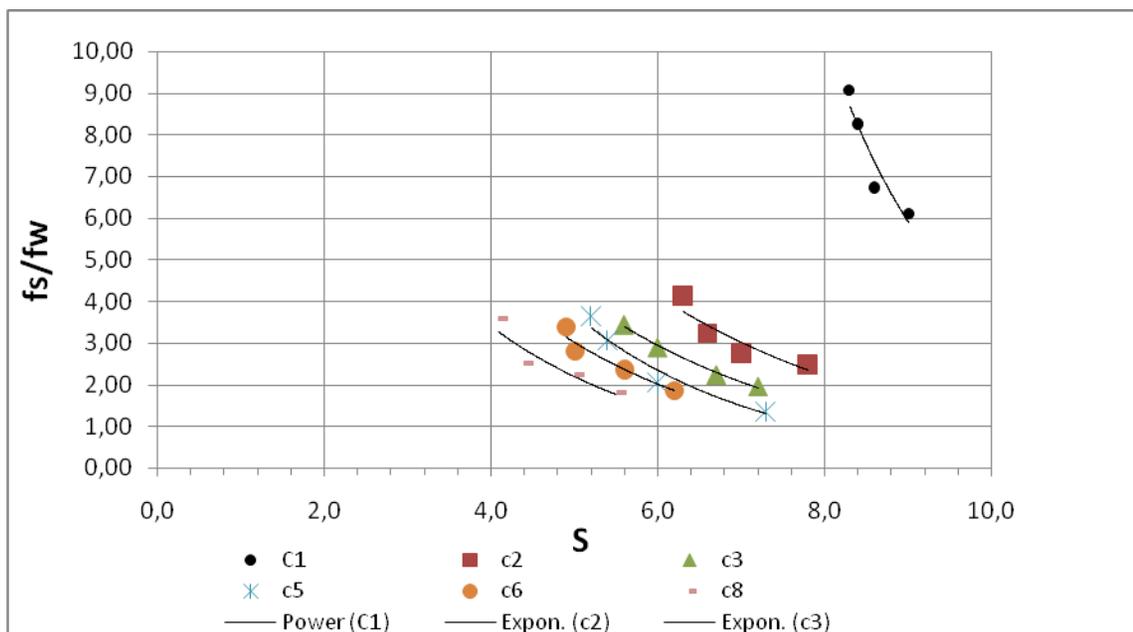
Gráfica 21. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo i canal rectangular 10 cm



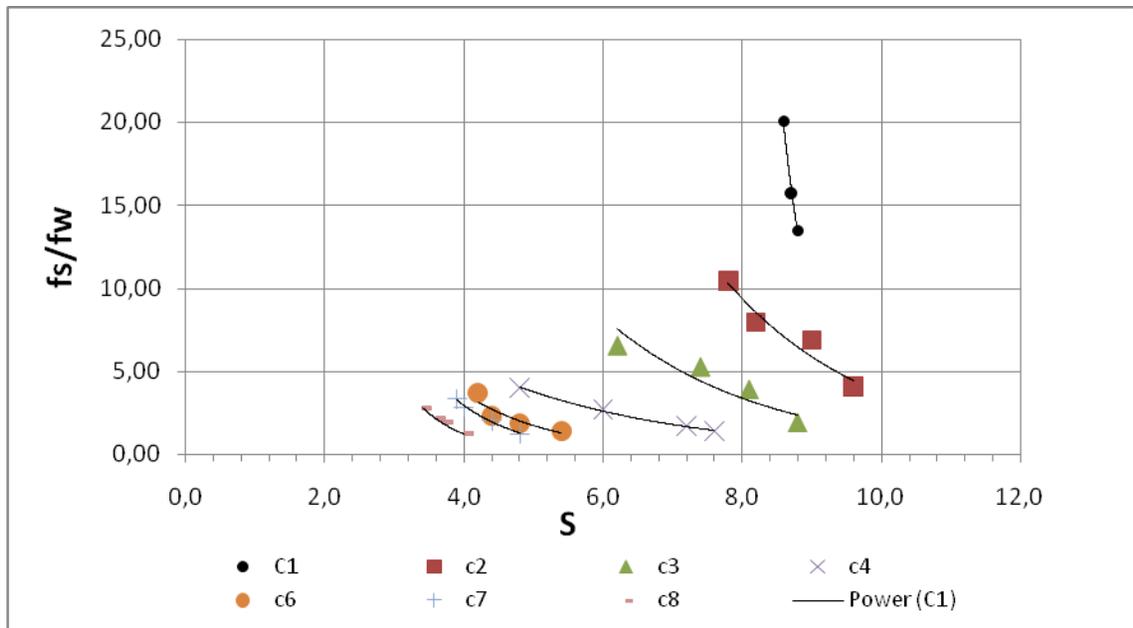
Gráfica 22. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo II canal rectangular 10 cm



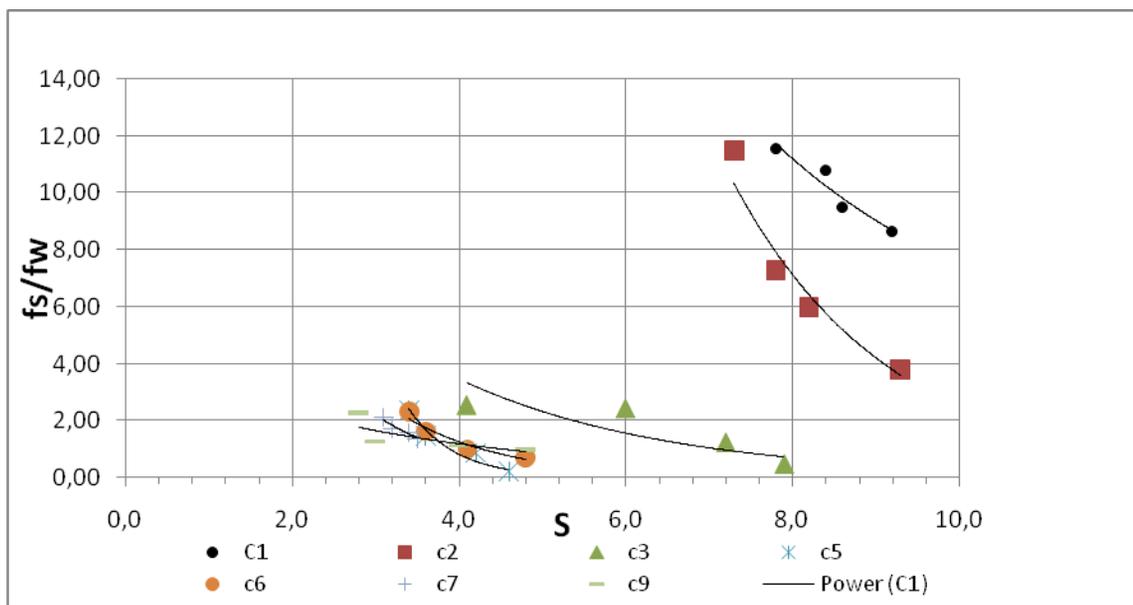
Gráfica 23. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo III canal rectangular 10 cm



Gráfica 24. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo IV canal rectangular 10 cm



Gráfica 25. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental para arena tipo v canal rectangular 10 cm



7.1.3 Deducción de fórmulas para pérdida de energía en canales rectangulares. Por medio del uso de la regresión lineal con múltiple variable es

factible deducir las siguientes ecuaciones para el estudio de la pérdida de energía en canales rectangulares.

- Alta concentración

$$[44] \quad \frac{f_s}{f_w} = 0.802047335 * S^{-1.199} * C^{1.4459}$$

$$[45] \quad \frac{f_s}{f_w} = 0.0151391 * S^{-1.5507} * C^{2.1064} * d^{*1.0316}$$

$$[46] \quad \frac{f_s}{f_w} = 0,74 * S^{-1.4582} * C^{2,0013} * C' d^{-0,9986}$$

- Baja concentración

$$[47] \quad \frac{f_s}{f_w} = 2.642376 * S^{-0.4426} * C^{0.0918}$$

$$[48] \quad \frac{f_s}{f_w} = 0.727779 * S^{-0.5223} * C^{0.3887} * d^{*0.2585}$$

$$[49] \quad \frac{f_s}{f_w} = 2,7221 * S^{-0,4375} * C^{0,0705} * C' d^{0,0294}$$

- Ecuación general para pérdida de energía en canales rectangulares

$$[50] \quad \frac{f_s}{f_w} = 0.172703047 * S^{-0.3815} * C^{1.4202}$$

Cuadro 24. Datos experimentales de pérdida de energía en canal rectangular 10 cm arena tipo I

fs/fw [-]	fs/fw experimental [°]	Error %
9,8605159	9,18067	6,894654888
11,6169074	9,69580	16,537161266
14,1703483	9,99644	29,455217653
25,9763226	10,33384	60,218231262
4,2197826	3,99433	5,342782088
5,43881594	4,24286	21,989235515
7,41177176	4,49986	39,287647814
10,6010002	4,86132	54,142840397
1,94631502	1,88163	3,323372404
2,72591846	1,99561	26,791423073
3,34696449	2,13935	36,080794725

Continuación cuadro 24

4,49037343	2,30761	48,609833156
1,07943573	1,62407	50,455355442
1,4648294	1,67888	14,612959979
2,266031	1,74105	23,167274335
3,71504194	1,79361	51,720218695
1,41273227	1,24889	11,597550837
1,57044664	1,28383	18,250838457
2,24461703	1,35092	39,815013486
3,27846017	1,39791	57,360927336
1,03741534	1,06316	2,481530248
1,95504695	1,10676	43,389426141
2,10154672	1,13116	46,174769859
3,17947085	1,18649	62,682929231
ERROR PROMEDIO		32.09

Cuadro 25. Datos experimentales de pérdida de energía en canal rectangular 10 cm arena tipo II

fs/fw [-]	fs/fw experimental [°]	Error %
12,7488125	14,66826	15,055880258
13,6640113	14,99541	9,743821747
14,6973346	15,27714	3,944958343
15,8982997	15,50153	2,495659687
3,96255387	4,47425	12,913185988
5,07035171	4,63993	8,489049871
6,67995016	4,99326	25,250077488
8,70342896	5,11379	41,244008121
2,34680339	3,51046	49,584746100
3,4029617	3,62894	6,640774581
4,30200885	3,81231	11,382950985
4,87712526	3,97449	18,507586919
1,37414183	2,46718	79,543440911
1,41983131	2,60562	83,515935659
1,86627319	2,87992	54,313777164
2,71005078	2,93683	8,367969127
0,73535087	2,38011	223,669511433
0,71460572	2,54381	255,973249605
1,26451305	2,69789	113,353974338
1,97517854	2,85627	44,608097984
0,67954443	2,24357	230,158518099
1,25024437	2,36645	89,278671030
1,4566168	2,51781	72,853410770
2,07398555	2,67533	28,994713093
0,87071602	2,14449	146,290339260
1,08804453	2,27439	109,034245218
1,46543035	2,43821	66,382090113
1,86501239	2,53821	36,096362472
Error promedio		65,98

Cuadro 26. Datos experimentales de pérdida de energía en canal rectangular 10 cm arena tipo III.

fs/fw [-]	fs/fw experimental [°]	Error %
6,1148093	8,04886	31,628954962
6,7352679	8,18968	21,593914222
8,249313	8,26352	0,172276321
9,0537741	8,30137	8,310433006
2,4891522	4,09558	64,537135127
2,7728546	4,26820	53,927945720
3,2332355	4,36509	35,006948260
4,1386824	4,44325	7,359123671
1,9524136	2,93501	50,327118667
2,2317231	3,01671	35,174156875
2,8910111	3,14642	8,834615874
3,438328	3,23034	6,049202420
1,3581783	2,40549	77,111306802
2,0648352	2,59236	25,548248639
3,0574165	2,69869	11,733087149
3,6398859	2,73782	24,782704747
1,8544666	2,35265	26,863768080
2,3565494	2,44580	3,787193979
2,8004796	2,55386	8,806356581
3,3882732	2,57362	24,043346809
1,7983987	2,15624	19,897943901
2,2264837	2,23609	0,431401278
2,5231096	2,34784	6,946487039
3,5930234	2,41195	32,871182028
ERROR PROMEDIO		21,69

Cuadro 27. Datos experimentales de pérdida de energía en canal rectangular 10 cm arena tipo IV

fs/fw [-]	fs/fw experimental [°]	Error %
13,5087214	10,86673	19,557680420
15,7609881	10,91421	30,751729421
20,073665	10,96245	45,388873387
4,07980443	4,56182	11,814644090
6,88974925	4,67553	32,137856655
7,94584866	4,84456	39,030275556
10,4582284	4,93788	52,784749958
1,89271792	2,12798	12,430017206
3,89620234	2,19635	43,628476427
5,26245546	2,27340	56,799579361
6,5517867	2,43215	62,878020186
1,36745836	1,53113	11,969127323

Continuación cuadro 27

1,7040274	1,56304	8,273701514
2,67431376	1,67563	37,343558206
3,99014722	1,82452	54,274302683
1,41284992	1,35212	4,298388572
1,83558693	1,41426	22,953127950
2,33869403	1,46200	37,486631826
3,67607659	1,48817	59,517311545
1,23601239	1,30294	5,415110077
2,01596194	1,34692	33,187196167
2,82186774	1,39680	50,500970968
3,32925071	1,41035	57,637500761
1,21847106	1,29840	6,559808323
1,90805454	1,33760	29,897291834
2,14463644	1,35165	36,975203415
2,79369595	1,38145	50,551150378
ERROR PROMEDIO		30.46

Cuadro 28. Datos experimentales de pérdida de energía en canal rectangular 10 cm arena tipo V.

fs/fw [-]	fs/fw experimental [°]	Error %
8,64091818	11,52556	33,383461397
9,47646551	11,82594	24,792759179
10,8067526	11,93258	10,417821683
11,5480388	12,27476	6,292985657
3,7843557	5,06782	33,914975884
5,98295595	5,31713	11,128695989
7,27247532	5,41955	25,478601603
11,4901363	5,55827	51,625722545
0,48331841	2,38004	392,436758858
1,23981967	2,46579	98,883002358
2,43089058	2,64341	8,742277284
2,54439731	3,05669	20,134174407
0,22045093	1,83462	732,214551306
0,88343333	1,89941	115,003722776
1,48748694	2,01447	35,427479640
2,38990773	2,05888	13,851241799
0,70945152	1,70295	140,037462341
1,00159057	1,80850	80,562690847
1,64318358	1,90049	15,659096611
2,34966491	1,94239	17,333386298
1,35892686	1,79779	32,295049474

Continuación cuadro 28

1,58888252	1,81778	14,406484681
1,7362301	1,86032	7,146906742
2,12326971	1,88299	11,316671639
0,95472712	1,31058	37,272369574
1,12069929	1,40498	25,366338614
1,25289134	1,56796	25,147090219
2,27023711	1,60977	29,092215315
ERROR PROMEDIO		64.04

Analizando los valores obtenidos en los ensayos en el canal rectangular, se dedujo que si estos son estudiados en conjunto es decir altas concentraciones y bajas concentraciones por igual se obtiene un porcentaje de error alto que influye en la deducción de fórmulas induciendo al error, por lo tanto lo más conveniente es separar el estudio en altas y bajas concentraciones por separado aquí ya se puede observar que el error del análisis se encuentra dentro del rango permitido para la presente investigación

Cuadro 29. Datos experimentales de pérdida de energía para altas concentraciones en canal rectangular 10 cm.

TIPO DE	fs/fw	fs/fw	ERROR %
ARENA TIPO 1	9,8605159	9,1828057	6,8729
ARENA TIPO 1	11,6169074	10,778905	7,2136
ARENA TIPO 1	14,1703483	11,789758	16,7997
ARENA TIPO 1	25,9763226	12,996437	49,96813
ARENA TIPO 1	4,2197826	4,212868	0,16384
ARENA TIPO 1	5,43881594	5,029591	7,52413
ARENA TIPO 1	7,41177176	5,977319	19,35370
ARENA TIPO 1	10,6010002	7,499070	29,2607
ARENA TIPO 1	1,94631502	2,197952	12,9289
ARENA TIPO 1	2,72591846	2,612113	4,17492
ARENA TIPO 1	3,34696449	3,203812	4,27706
ARENA TIPO 1	4,49037343	4,001169	10,8944
ARENA TIPO 2	12,7488125	14,918044	17,0151
ARENA TIPO 2	13,6640113	15,915980	16,4810
ARENA TIPO 2	14,6973346	16,809829	14,3733
ARENA TIPO 2	15,8982997	17,544977	10,3575
ARENA TIPO 2	3,96255387	4,490673	13,3277
ARENA TIPO 2	5,07035171	4,996514	1,4562
ARENA TIPO 2	6,67995016	6,197697	7,21939
ARENA TIPO 2	8,70342896	6,647191	23,6255

Continuación cuadro 29

ARENA TIPO 2	2,34680339	4,062554	73,11013
ARENA TIPO 2	3,4029617	4,478355	31,60171
ARENA TIPO 2	4,30200885	5,175625	20,3071
ARENA TIPO 2	4,87712526	5,848893	19,9250
ARENA TIPO 3	6,11480933	8,031589	31,3465
ARENA TIPO 3	6,73526786	8,451092	25,4752
ARENA TIPO 3	8,24931296	8,676754	5,1815
ARENA TIPO 3	9,05377414	8,793912	2,8702
ARENA TIPO 3	2,48915221	4,482639	80,0869
ARENA TIPO 3	2,77285463	5,060171	82,4895
ARENA TIPO 3	3,23323555	5,404845	67,1652
ARENA TIPO 3	4,13868239	5,693889	37,5773
ARENA TIPO 3	1,95241363	3,385612	73,4065
ARENA TIPO 3	2,23172308	3,669803	64,4381
ARENA TIPO 3	2,89101111	4,152526	43,6357
ARENA TIPO 3	3,43832803	4,486092	30,47306
ARENA TIPO 4	13,5087214	11,083178	17,9553
ARENA TIPO 4	15,7609881	11,225943	28,77385
ARENA TIPO 4	20,073665	11,372230	43,34751
ARENA TIPO 4	4,07980443	4,297737	5,341742
ARENA TIPO 4	6,88974925	4,619864	32,94582
ARENA TIPO 4	7,94584866	5,127495	35,469508
ARENA TIPO 4	10,4582284	5,422863	48,147401
ARENA TIPO 4	1,89271792	2,107265	11,335437
ARENA TIPO 4	3,89620234	2,312240	40,653982
ARENA TIPO 4	5,26245546	2,558543	51,381179
ARENA TIPO 4	6,5517867	3,119219	52,391307
ARENA TIPO 5	8,64091818	11,391169	31,828231
ARENA TIPO 5	9,47646551	12,284839	29,635248
ARENA TIPO 5	10,8067526	12,612870	16,712863
ARENA TIPO 5	11,5480388	13,704322	18,672290
ARENA TIPO 5	3,7843557	4,895935	29,373028
ARENA TIPO 5	5,98295595	5,637150	5,779851
ARENA TIPO 5	7,27247532	5,961876	18,021357
ARENA TIPO 5	11,4901363	6,421026	44,117056
ERROR PROMEDIO			27,7138484

Cuadro 30. Datos experimentales de pérdida de energía para bajas concentraciones en canal rectangular 10 cm.

TIPO DE	fs/fw	fs/fw	Error %
ARENA TIPO 1	1,079435	1,604704	32,73304
ARENA TIPO 1	1,464829	1,6677089	12,16516
ARENA TIPO 1	2,26603	1,7395650	23,23295
ARENA TIPO 1	3,715041	1,8006376	51,5311
ARENA TIPO 1	1,412732	1,6519131	14,479
ARENA TIPO 1	1,570446	1,7056447	7,9265
ARENA TIPO 1	2,244617	1,8094885	19,385
ARENA TIPO 1	3,278460	1,8826993	42,573
ARENA TIPO 1	1,037415	1,6849776	38,4315
ARENA TIPO 1	1,955046	1,7654133	9,6996
ARENA TIPO 1	2,101546	1,8106450	13,8422
ARENA TIPO 1	3,179470	1,9137800	39,80822
ARENA TIPO 2	1,37414183	1,5018640	8,5042
ARENA TIPO 2	1,419831	1,6000637	11,2640
ARENA TIPO 2	1,866273	1,7970850	3,7072
ARENA TIPO 2	2,710050	1,8383498	32,165
ARENA TIPO 2	0,735350	1,6170185	54,524
ARENA TIPO 2	0,71460572	1,7467428	59,0892
ARENA TIPO 2	1,264513	1,8700776	32,381
ARENA TIPO 2	1,975178	1,9980319	1,1437
ARENA TIPO 2	0,679544	1,6679811	59,259
ARENA TIPO 2	1,250244	1,7744183	29,54
ARENA TIPO 2	1,456616	1,9067563	23,607
ARENA TIPO 2	2,073985	2,0458340	1,376
ARENA TIPO 2	0,870716	1,7275688	49,59
ARENA TIPO 2	1,08804453	1,8495497	41,17
ARENA TIPO 2	1,465430	2,0049873	26,91
ARENA TIPO 2	1,865012	2,1006993	11,21
ARENA TIPO 3	1,358178	1,3814115	1,71
ARENA TIPO 3	2,064835	1,5066765	27,031
ARENA TIPO 3	3,057416	1,5786007	48,368
ARENA TIPO 3	3,639885	1,6051909	55,89
ARENA TIPO 3	1,854466	1,4768777	20,361
ARENA TIPO 3	2,356549	1,5449309	34,44
ARENA TIPO 3	2,800479	1,6244000	41,99
ARENA TIPO 3	3,388273	1,6389900	51,627
ARENA TIPO 3	1,798398	1,5439826	14,14
ARENA TIPO 3	2,226483	1,6105077	27,665
ARENA TIPO 3	2,523109	1,7042557	32,454

Continuación cuadro 30

ARENA TIPO 3	3,593023	1,7583640	51,061
ARENA TIPO 4	1,367458	1,3192632	3,524
ARENA TIPO 4	1,704027	1,3512142	20,704
ARENA TIPO 4	2,674313	1,4647713	45,2281
ARENA TIPO 4	3,990147	1,6168219	59,479
ARENA TIPO 4	1,412849	1,5096344	6,850
ARENA TIPO 4	1,835586	1,5904202	13,356
ARENA TIPO 4	2,338694	1,6528640	29,325
ARENA TIPO 4	3,676076	1,6872488	54,101
ARENA TIPO 4	1,236012	1,5820145	27,9934
ARENA TIPO 4	2,015961	1,6441282	18,44
ARENA TIPO 4	2,821867	1,7149683	39,225
ARENA TIPO 4	3,329250	1,7342937	47,907
ARENA TIPO 4	1,218471	1,7068897	28,614
ARENA TIPO 4	1,9080545	1,7668152	7,402
ARENA TIPO 4	2,1446364	1,7883714	16,611
ARENA TIPO 4	2,793695	1,834191	34,34
ARENA TIPO 5	0,483318	1,3356337	63,813
ARENA TIPO 5	1,239819	1,3916235	12,244
ARENA TIPO 5	2,430890	1,5085766	37,941
ARENA TIPO 5	2,544397	1,7854964	29,826
ARENA TIPO 5	0,220450	1,6464258	86,610
ARENA TIPO 5	0,883433	1,7140703	48,459
ARENA TIPO 5	1,487486	1,8350981	23,365
ARENA TIPO 5	2,389907	1,8821152	21,24
ARENA TIPO 5	0,709451	1,6096313	55,924
ARENA TIPO 5	1,001590	1,7259398	41,968
ARENA TIPO 5	1,643183	1,8282025	11,25
ARENA TIPO 5	2,349664	1,8750430	20,199
ARENA TIPO 5	1,358926	1,8432239	35,638
ARENA TIPO 5	1,588882	1,8670246	17,50
ARENA TIPO 5	1,736230	1,9177996	10,45
ARENA TIPO 5	2,1232697	1,9449387	8,398
ARENA TIPO 5	0,954727	1,5826120	39,6739
ARENA TIPO 5	1,120699	1,7156159	34,67
ARENA TIPO 5	1,252891	1,9485787	35,702
ARENA TIPO 5	2,270237	2,0089988	11,507
ERROR PROMEDIO			29,7

Cuadro 31. Datos experimentales de pérdida de energía ajustados por regresión lineal para altas concentraciones en canal rectangular 10cm.

TIPO DE	fs/fw	fs/fw con d*	Error
ARENA TIPO 1	1,079436	1,635736	34,0092
ARENA TIPO 1	1,464829	1,711789	14,4270
ARENA TIPO 1	2,266031	1,799159	20,6031
ARENA TIPO 1	3,715042	1,873932	49,5583
ARENA TIPO 1	1,412732	1,604949	11,9765
ARENA TIPO 1	1,570447	1,666733	5,7769
ARENA TIPO 1	2,244617	1,787126	20,3817
ARENA TIPO 1	3,278460	1,872760	42,8768
ARENA TIPO 1	1,037415	1,588533	34,6935
ARENA TIPO 1	1,955047	1,678400	14,1504
ARENA TIPO 1	2,101547	1,729262	17,7148
ARENA TIPO 1	3,179471	1,846085	41,9373
ARENA TIPO 2	1,374142	1,467687	6,3737
ARENA TIPO 2	1,419831	1,581588	10,2275
ARENA TIPO 2	1,866273	1,813870	2,8079
ARENA TIPO 2	2,710051	1,863121	31,2514
ARENA TIPO 2	0,735351	1,574129	53,2852
ARENA TIPO 2	0,714606	1,724206	58,5545
ARENA TIPO 2	1,264513	1,868768	32,3344
ARENA TIPO 2	1,975179	2,020571	2,2981
ARENA TIPO 2	0,679544	1,608490	57,7526
ARENA TIPO 2	1,250244	1,730298	27,7440
ARENA TIPO 2	1,456617	1,883585	22,6679
ARENA TIPO 2	2,073986	2,046757	1,3129
ARENA TIPO 2	0,870716	1,654989	47,3884
ARENA TIPO 2	1,088045	1,793748	39,3424
ARENA TIPO 2	1,465430	1,972958	25,7242
ARENA TIPO 2	1,865012	2,084572	11,7726
ARENA TIPO 3	1,358178	1,306429	3,8102
ARENA TIPO 3	2,064835	1,447341	29,9053
ARENA TIPO 3	3,057416	1,529220	49,9833
ARENA TIPO 3	3,639886	1,559663	57,1508
ARENA TIPO 3	1,854467	1,394704	24,7922
ARENA TIPO 3	2,356549	1,470854	37,5844
ARENA TIPO 3	2,800480	1,560544	44,2758
ARENA TIPO 3	3,388273	1,577098	53,4542
ARENA TIPO 3	1,798399	1,438398	20,0179
ARENA TIPO 3	2,226484	1,511814	32,0986
ARENA TIPO 3	2,523110	1,616200	35,9441

Continuación cuadro 31

ARENA TIPO 3	3,593023	1,676924	53,3283
ARENA TIPO 4	1,3674583	1,362028032	0,3971
ARENA TIPO 4	1,7040273	1,401038992	17,7807
ARENA TIPO 4	2,674313	1,541014010	42,3772
ARENA TIPO 4	3,9901472	1,731500761	56,6056
ARENA TIPO 4	1,4128499	1,528055066	7,5393
ARENA TIPO 4	1,8355869	1,625009736	11,4719
ARENA TIPO 4	2,3386940	1,700563811	27,2858
ARENA TIPO 4	3,6760765	1,742389163	52,6019
ARENA TIPO 4	1,2360123	1,591261017	22,3250
ARENA TIPO 4	2,0159619	1,665245960	17,3970
ARENA TIPO 4	2,821867	1,750240738	37,9758
ARENA TIPO 4	3,329250	1,773538732	46,7286
ARENA TIPO 4	1,218471	1,719096505	29,1214
ARENA TIPO 4	1,9080545	1,790541661	6,1588
ARENA TIPO 4	2,1446364	1,816349400	15,3074
ARENA TIPO 4	2,7936959	1,871391931	33,0138
ARENA TIPO 5	0,4833184	1,415218314	65,8485
ARENA TIPO 5	1,23996	1,485488544	19,8149
ARENA TIPO 5	2,43085	1,633900748	32,7859
ARENA TIPO 5	2,54439	1,993411968	21,6548
ARENA TIPO 5	0,220450	1,673591099	86,8277
ARENA TIPO 5	0,883433	1,755030501	49,6628
ARENA TIPO 5	1,48748	1,902177222	21,8008
ARENA TIPO 5	2,389907	1,959820674	17,9960
ARENA TIPO 5	0,709451	1,617764560	56,1462
ARENA TIPO 5	1,001590	1,756590813	42,9810
ARENA TIPO 5	1,643183	1,880056146	12,5992
ARENA TIPO 5	2,349664	1,937029242	17,5615
ARENA TIPO 5	1,358926	1,871856272	27,4022
ARENA TIPO 5	1,588882	1,900412158	16,3927
ARENA TIPO 5	1,736230	1,961550100	11,4868
ARENA TIPO 5	2,123269	1,994348385	6,0718
ARENA TIPO 5	0,954727	1,512066009	36,8594
ARENA TIPO 5	1,120699	1,663133515	32,6152
ARENA TIPO 5	1,252891	1,932780866	35,1768
ARENA TIPO 5	2,270237	2,003698666	11,7406
ERROR PROMEDIO			29.32

Cuadro 32. Datos experimentales de pérdida de energía ajustados por regresión lineal para bajas concentraciones en canal rectangular 10cm.

TIPO DE	fs/fw	fs/fw con d*'	Error %
ARENA TIPO 1	9,860516	11,457619	16,1970
ARENA TIPO 1	11,616907	14,304318	23,1336
ARENA TIPO 1	14,170348	16,194694	14,2858
ARENA TIPO 1	25,976323	18,534098	28,6500
ARENA TIPO 1	4,219783	5,045316	19,5634
ARENA TIPO 1	5,438816	6,448311	18,5609
ARENA TIPO 1	7,411772	8,189556	10,4939
ARENA TIPO 1	10,601000	11,211209	5,7561
ARENA TIPO 1	1,946315	2,230599	14,6063
ARENA TIPO 1	2,725918	2,832931	3,9257
ARENA TIPO 1	3,346964	3,758567	12,2978
ARENA TIPO 1	4,490373	5,112946	13,8646
ARENA TIPO 2	12,748812	10,567064	17,1133
ARENA TIPO 2	13,664011	11,558288	15,4107
ARENA TIPO 2	14,697335	12,466708	15,1771
ARENA TIPO 2	15,898300	13,227941	16,7965
ARENA TIPO 2	3,962554	3,435064	13,3119
ARENA TIPO 2	5,070352	3,982195	21,4612
ARENA TIPO 2	6,679950	5,366330	19,6651
ARENA TIPO 2	8,703429	5,912653	32,0653
ARENA TIPO 2	2,346803	3,146646	34,0822
ARENA TIPO 2	3,402962	3,601194	5,8253
ARENA TIPO 2	4,302009	4,400130	2,2808
ARENA TIPO 2	4,877125	5,212030	6,8669
ARENA TIPO 3	6,114809	5,764849	5,7232
ARENA TIPO 3	6,735268	6,185931	8,1561
ARENA TIPO 3	8,249313	6,415817	22,2260
ARENA TIPO 3	9,053774	6,536081	27,8082
ARENA TIPO 3	2,489152	3,142951	26,2659
ARENA TIPO 3	2,772855	3,717194	34,0566
ARENA TIPO 3	3,233236	4,072320	25,9519
ARENA TIPO 3	4,138682	4,376947	5,7570
ARENA TIPO 3	1,952414	2,241583	14,8109
ARENA TIPO 3	2,231723	2,506260	12,3016
ARENA TIPO 3	2,891011	2,974002	2,8706
ARENA TIPO 3	3,438328	3,309826	3,7373
ARENA TIPO 4	13,50872	15,04693	11,3868
ARENA TIPO 4	15,76099	15,31597	2,8235
ARENA TIPO 4	20,07367	15,59302	22,3210

Continuación cuadro 32

ARENA TIPO 4	4,07980	5,55524	36,1644
ARENA TIPO 4	6,88975	6,13998	10,8824
ARENA TIPO 4	7,94585	7,09348	10,7272
ARENA TIPO 4	10,45823	7,66549	26,7038
ARENA TIPO 4	1,89272	2,31857	22,4994
ARENA TIPO 4	3,89620	2,63658	32,3294
ARENA TIPO 4	5,26246	3,03327	42,3601
ARENA TIPO 4	6,55179	3,99087	39,0873
ARENA TIPO 5	8,640918179	12,172956676	40,8757
ARENA TIPO 5	9,476465506	13,514970804	42,6162
ARENA TIPO 5	10,80675261	14,017222636	29,7080
ARENA TIPO 5	11,54803883	15,724279680	36,1641
ARENA TIPO 5	3,784355705	5,304878211	40,1792
ARENA TIPO 5	5,982955952	6,448382420	7,7792
ARENA TIPO 5	7,272475319	6,968363957	4,1817
ARENA TIPO 5	11,4901363	7,722308849	32,7918
ERROR PROMEDIO			19.32

Cuadro 33. Datos experimentales de pérdida de energía con el coeficiente de arrastre de partículas para bajas concentraciones en canal rectangular 10 cm.

TIPO DE SEDIMENTO	fs/fw	fs/fw con C'd	Error %
ARENA TIPO 1	1,07943573	1,601631	32,6040
ARENA TIPO 1	1,4648294	1,663776	11,9575
ARENA TIPO 1	2,266031	1,734619	23,4512
ARENA TIPO 1	3,71504194	1,794805	51,6882
ARENA TIPO 1	1,41273227	1,654724	14,6243
ARENA TIPO 1	1,57044664	1,707917	8,0490
ARENA TIPO 1	2,24461703	1,810665	19,3330
ARENA TIPO 1	3,27846017	1,883063	42,5626
ARENA TIPO 1	1,03741534	1,691667	38,6750
ARENA TIPO 1	1,95504695	1,771470	9,3899
ARENA TIPO 1	2,10154672	1,816328	13,5719
ARENA TIPO 1	3,17947085	1,918561	39,6578
ARENA TIPO 2	1,374142	1,503650	8,6129
ARENA TIPO 2	1,419831	1,600797	11,3047
ARENA TIPO 2	1,866273	1,795505	3,7920
ARENA TIPO 2	2,710051	1,836253	32,2429
ARENA TIPO 2	0,735351	1,619455	54,5927
ARENA TIPO 2	0,714606	1,747820	59,1144
ARENA TIPO 2	1,264513	1,869760	32,3703

Continuación cuadro 33

ARENA TIPO 2	1,975179	1,996170	1,0516
ARENA TIPO 2	0,679544	1,671620	59,3482
ARENA TIPO 2	1,250244	1,777022	29,6439
ARENA TIPO 2	1,456617	1,907973	23,6563
ARENA TIPO 2	2,073986	2,045479	1,3745
ARENA TIPO 2	0,870716	1,732168	49,7326
ARENA TIPO 2	1,088045	1,853016	41,2825
ARENA TIPO 2	1,465430	2,006878	26,9796
ARENA TIPO 2	1,865012	2,101551	11,2554
ARENA TIPO 3	1,358178	1,387099	2,1294
ARENA TIPO 3	2,064835	1,511367	26,8045
ARENA TIPO 3	3,057416	1,582665	48,2352
ARENA TIPO 3	3,639886	1,609014	55,7949
ARENA TIPO 3	1,854467	1,483121	20,0244
ARENA TIPO 3	2,356549	1,550657	34,1980
ARENA TIPO 3	2,800480	1,629479	41,8143
ARENA TIPO 3	3,388273	1,643945	51,4813
ARENA TIPO 3	1,798399	1,551936	13,7046
ARENA TIPO 3	2,226484	1,618017	27,3286
ARENA TIPO 3	2,523110	1,711086	32,1834
ARENA TIPO 3	3,593023	1,764776	50,8833
ARENA TIPO 4	1,367458	1,315724	3,7832
ARENA TIPO 4	1,704027	1,347218	20,9392
ARENA TIPO 4	2,674314	1,459082	45,4409
ARENA TIPO 4	3,990147	1,608710	59,6829
ARENA TIPO 4	1,412850	1,508232	6,3241
ARENA TIPO 4	1,835587	1,587988	13,4888
ARENA TIPO 4	2,338694	1,649604	29,4647
ARENA TIPO 4	3,676077	1,683522	54,2033
ARENA TIPO 4	1,236012	1,581422	21,8417
ARENA TIPO 4	2,015962	1,642784	18,5112
ARENA TIPO 4	2,821868	1,712733	39,3050
ARENA TIPO 4	3,329251	1,731810	47,9820
ARENA TIPO 4	1,218471	1,706358	28,5923
ARENA TIPO 4	1,908055	1,765563	7,4679
ARENA TIPO 4	2,144636	1,786854	16,6826
ARENA TIPO 4	2,793696	1,832101	34,4202
ARENA TIPO 5	0,483318	1,328426	63,6172
ARENA TIPO 5	1,239820	1,383459	10,3826
ARENA TIPO 5	2,430891	1,498332	38,3628
ARENA TIPO 5	2,544397	1,769931	30,4381
ARENA TIPO 5	0,220451	1,643114	86,5833

Continuación cuadro 33

ARENA TIPO 5	0,883433	1,709829	48,3321
ARENA TIPO 5	1,487487	1,829119	18,6774
ARENA TIPO 5	2,389908	1,875436	21,5268
ARENA TIPO 5	0,709452	1,607716	55,8721
ARENA TIPO 5	1,001591	1,722501	41,8525
ARENA TIPO 5	1,643184	1,823350	9,8811
ARENA TIPO 5	2,349665	1,869521	20,4346
ARENA TIPO 5	1,358927	1,840005	26,1455
ARENA TIPO 5	1,588883	1,863488	14,7361
ARENA TIPO 5	1,736230	1,913575	9,2677
ARENA TIPO 5	2,123270	1,940340	8,6155
ARENA TIPO 5	0,954727	1,586545	39,8235
ARENA TIPO 5	1,120699	1,718281	34,7779
ARENA TIPO 5	1,252891	1,948745	35,7078
ARENA TIPO 5	2,270237	2,008463	11,5307
ERROR PROMEDIO			29,56

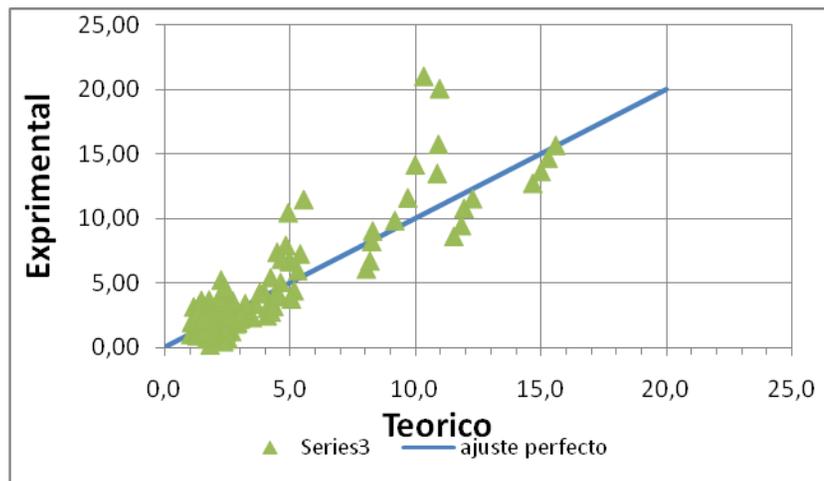
Cuadro 34. Datos experimentales de pérdida de energía con el coeficiente de arrastre de partículas para altas concentraciones en canal rectangular 10 cm.

TIPO DE SEDIMENTO	fs/fw	fs/fw con C´d	Error %
ARENA TIPO 1	9,8605159	11,644851	18,0958
ARENA TIPO 1	11,6169074	14,346898	23,5001
ARENA TIPO 1	14,1703483	16,123084	13,7804
ARENA TIPO 1	25,9763226	18,304227	29,5350
ARENA TIPO 1	4,2197826	4,872392	15,4655
ARENA TIPO 1	5,43881594	6,136824	12,8338
ARENA TIPO 1	7,41177176	7,683613	3,6677
ARENA TIPO 1	10,6010002	10,323375	2,6189
ARENA TIPO 1	1,94631502	2,108897	8,3533
ARENA TIPO 1	2,72591846	2,640445	3,1356
ARENA TIPO 1	3,34696449	3,444603	2,9172
ARENA TIPO 1	4,49037343	4,600614	2,4550
ARENA TIPO 2	12,748812	9,584684	24,8190
ARENA TIPO 2	13,664011	10,427837	23,6839
ARENA TIPO 2	14,697335	11,196762	23,8177
ARENA TIPO 2	15,898300	11,838523	25,5359
ARENA TIPO 2	3,962554	3,778294	4,6500
ARENA TIPO 2	5,070352	4,341648	14,3719
ARENA TIPO 2	6,679950	5,747532	13,9585
ARENA TIPO 2	8,703429	6,296147	27,6590
ARENA TIPO 2	2,346803	3,443053	46,7124
ARENA TIPO 2	3,402962	3,908831	14,8656
ARENA TIPO 2	4,302009	4,719274	9,6993

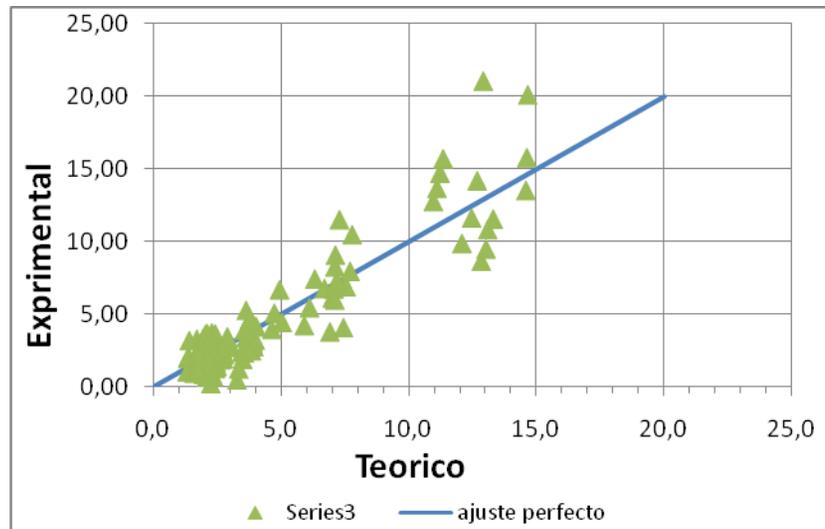
Continuación cuadro 34

ARENA TIPO 2	4,877125	5,533881	13,4660
ARENA TIPO 3	6,114809	6,020681	1,5393
ARENA TIPO 3	6,735268	6,433339	4,4828
ARENA TIPO 3	8,249313	6,657911	19,2913
ARENA TIPO 3	9,053774	6,775204	25,1671
ARENA TIPO 3	2,489152	3,473745	39,5554
ARENA TIPO 3	2,772855	4,067508	46,6903
ARENA TIPO 3	3,233236	4,431914	37,0737
ARENA TIPO 3	4,138682	4,742987	14,6014
ARENA TIPO 3	1,952414	2,510873	28,6035
ARENA TIPO 3	2,231723	2,788719	24,9581
ARENA TIPO 3	2,891011	3,275570	13,3019
ARENA TIPO 3	3,438328	3,622257	5,3494
ARENA TIPO 4	13,508721	14,144093	4,7034
ARENA TIPO 4	15,760988	14,306505	9,2284
ARENA TIPO 4	20,073665	14,472693	27,9021
ARENA TIPO 4	4,079804	6,061808	48,5809
ARENA TIPO 4	6,889749	6,465512	6,1575
ARENA TIPO 4	7,945849	7,095633	10,7001
ARENA TIPO 4	10,458228	7,459138	28,6768
ARENA TIPO 4	1,892718	2,853413	50,7574
ARENA TIPO 4	3,896202	3,099747	20,4418
ARENA TIPO 4	5,262455	3,392660	35,5309
ARENA TIPO 4	6,551787	4,048587	38,2064
ARENA TIPO 5	8,640918	12,409809	43,6168
ARENA TIPO 5	9,476466	13,274714	40,0809
ARENA TIPO 5	10,806753	13,590459	25,7590
ARENA TIPO 5	11,548039	14,634794	26,7297
ARENA TIPO 5	3,784356	6,225977	64,5188
ARENA TIPO 5	5,982956	7,060280	18,0066
ARENA TIPO 5	7,272475	7,421975	2,0557
ARENA TIPO 5	11,490136	7,929804	30,9860
ERROR PROMEDIO			21,32

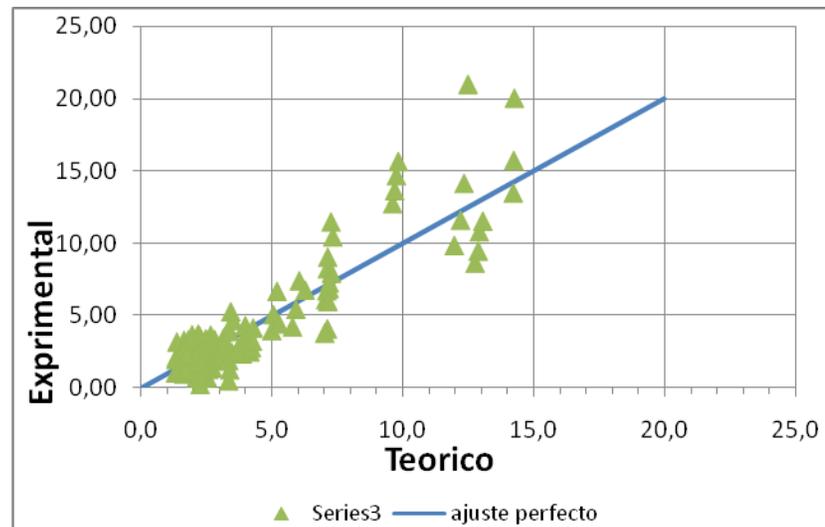
Gráfica 26. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para la totalidad de resultados en canal rectangular



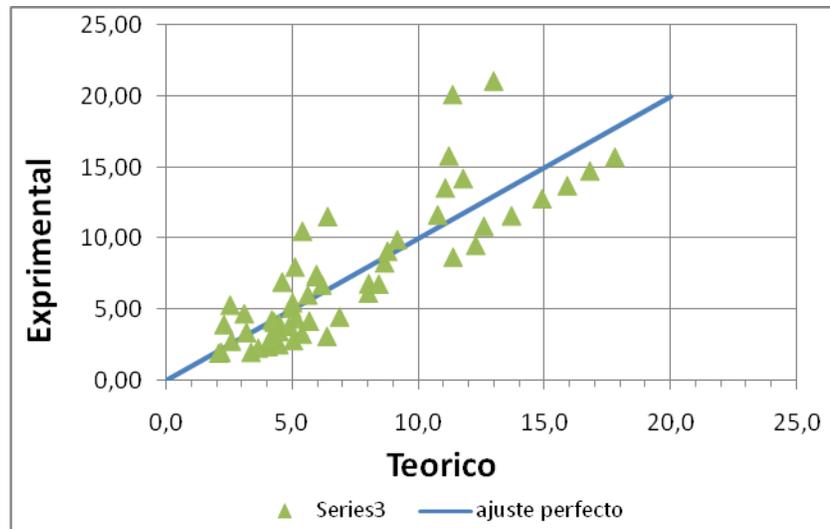
Gráfica 27. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para la totalidad de resultados



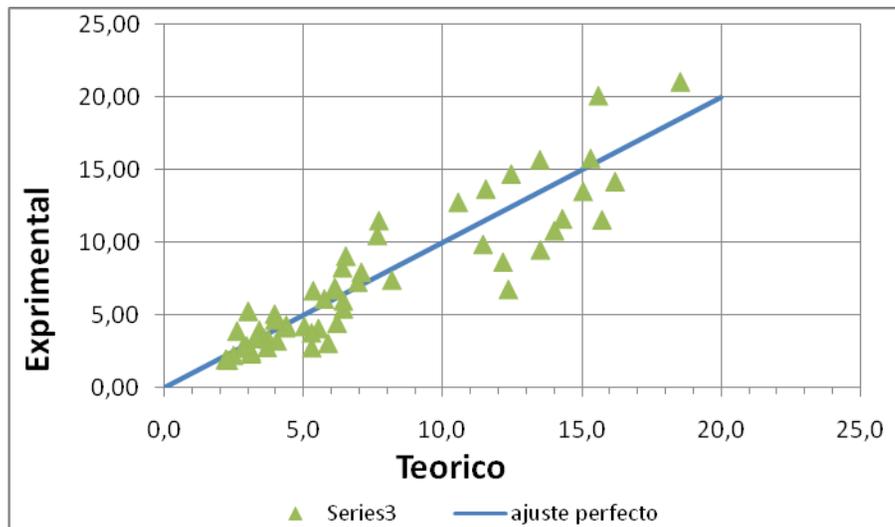
Gráfica 28. Valor experimental vs teórico del Coeficiente de arrastre de partículas para la totalidad de resultados



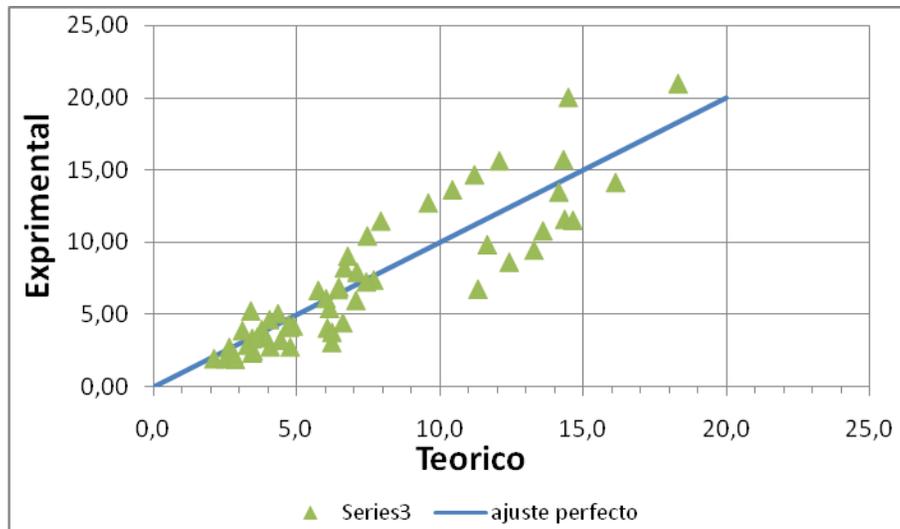
Gráfica 29. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para altas concentraciones de sólidos en canal rectangular



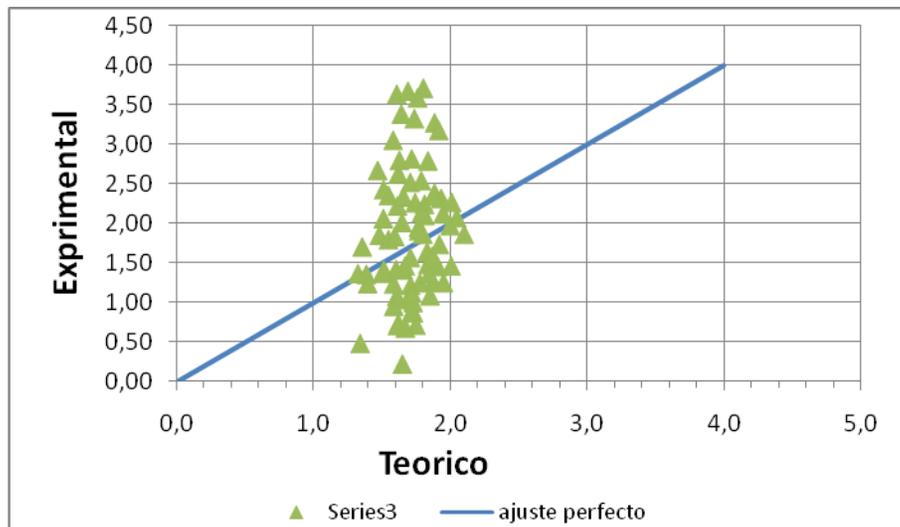
Gráfica 30. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para altas concentraciones



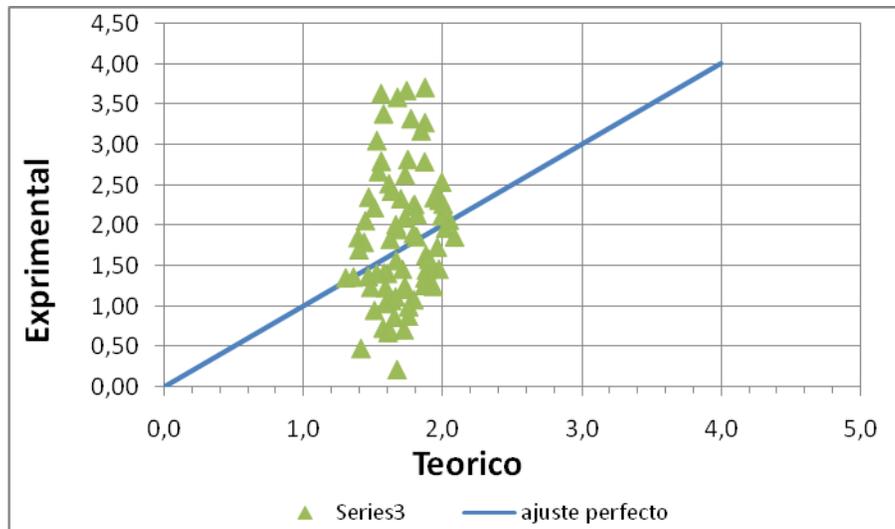
Gráfica 31. Valor experimental vs teórico del coeficiente de arrastre de partículas para altas concentraciones



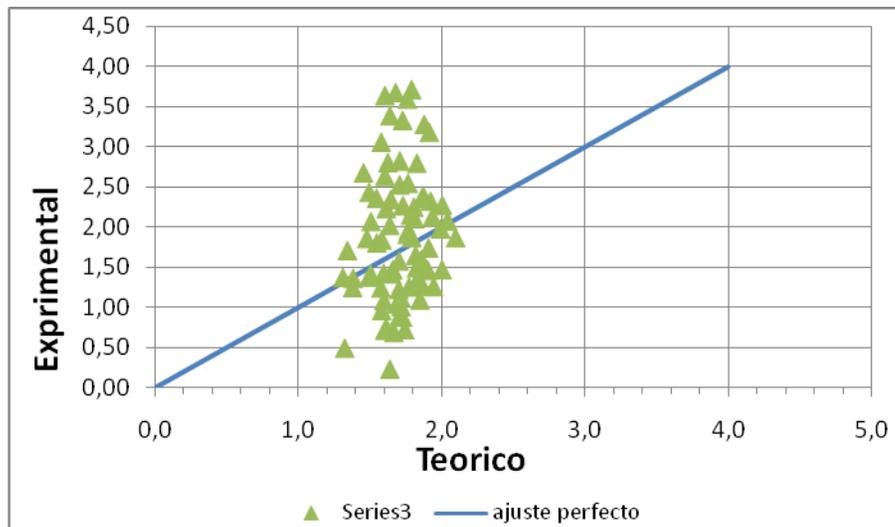
Gráfica 32. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para bajas concentraciones de sólidos en canal rectangular



Gráfica 33. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para bajas concentraciones

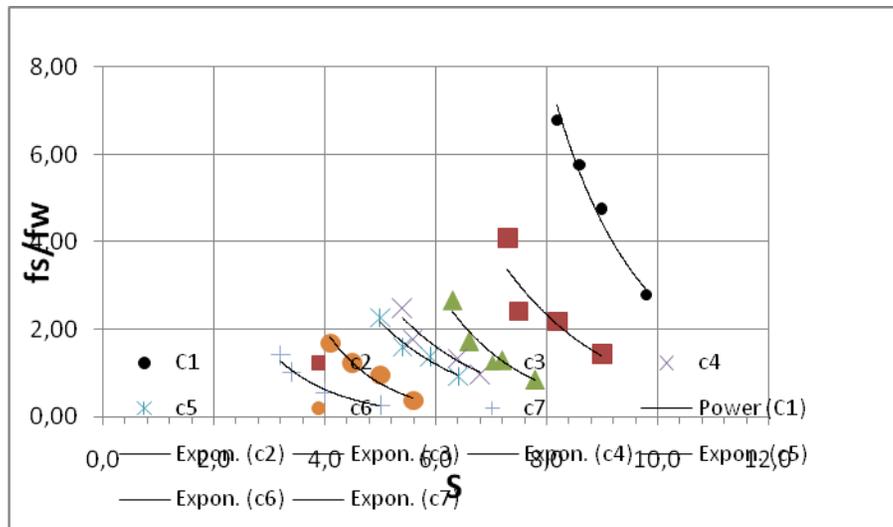


Gráfica 34. Valor experimental vs teórico del coeficiente de arrastre de partículas para bajas concentraciones

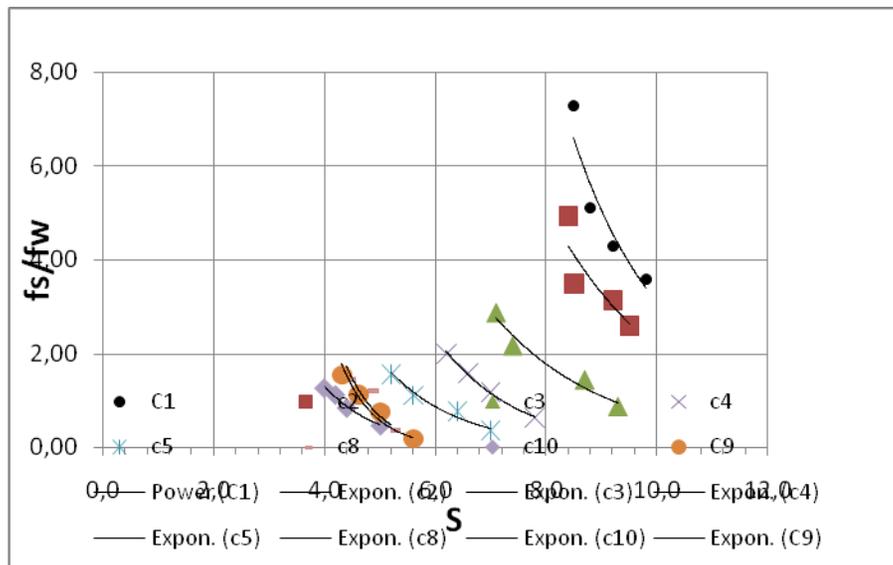


- Canal rectangular 5 cm. El estudio experimental de este canal al igual que el anterior implica que se analice por separado altas y bajas concentraciones de sólidos debido a la diferencia marcada que existe entre estas dos condiciones en el momento de hacer un análisis de resultados se puede evidenciar que las tendencias en estas situaciones

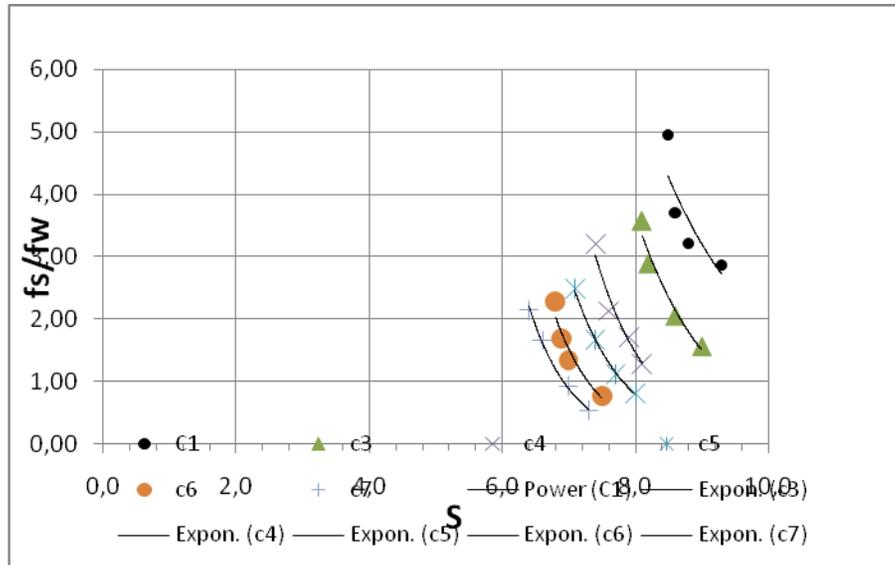
Gráfica 35. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo I canal rectangular 5 cm



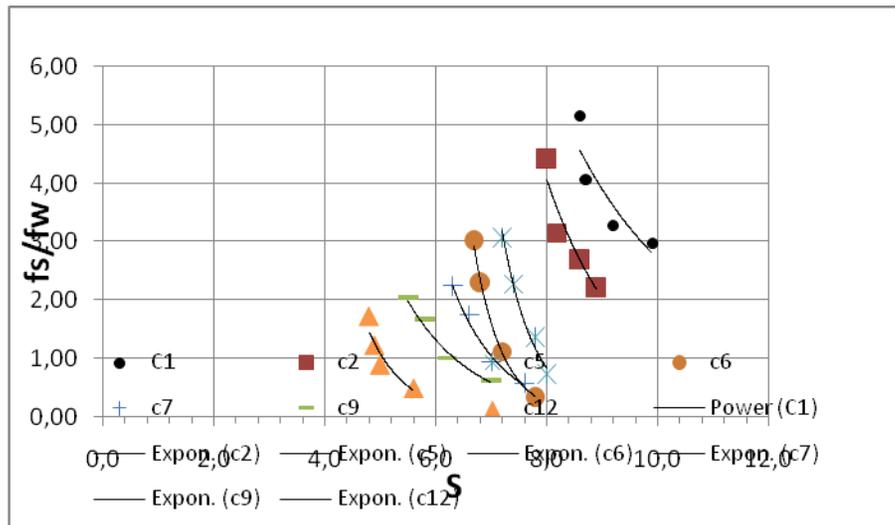
Gráfica 36. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo II canal rectangular 5 cm



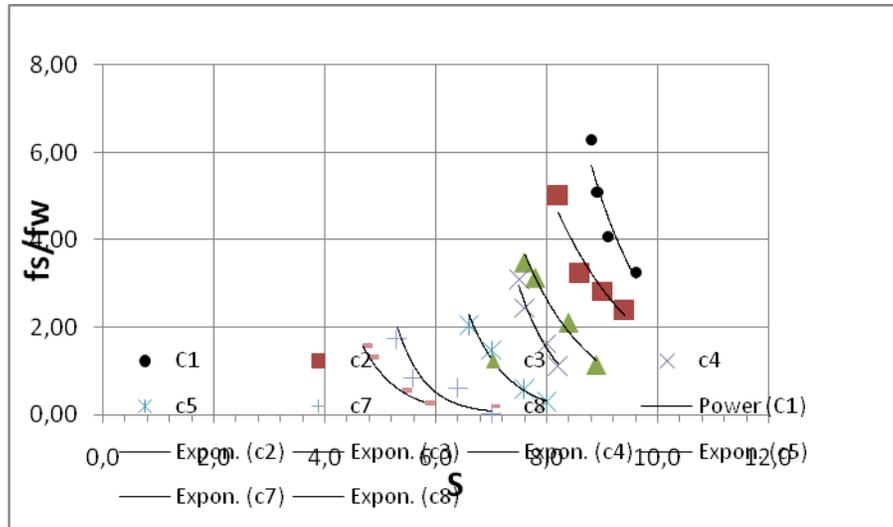
Gráfica 37. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo III canal rectangular 5 cm



Gráfica 38. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo IV canal rectangular 5 cm



Gráfica 39. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo V canal rectangular 5 cm



Del análisis por medio de regresión lineal de las anteriores gráficas se deduce las siguientes ecuaciones para el uso de altas y bajas concentraciones en canales rectangulares de espesor reducido.

- Alta concentración

$$[44] \quad \frac{f_s}{f_w} = 0.802047335 * S^{-1.199} * C^{1.4459}$$

$$[45] \quad \frac{f_s}{f_w} = 1,92353 * S^{-2,5568} * C^{2,5716} * d^{*0,3755}$$

$$[46] \quad \frac{f_s}{f_w} = 0,74 * S^{-1.4582} * C^{2,0013} * C'd^{-0,9986}$$

- Baja concentración

$$[47] \quad \frac{f_s}{f_w} = 2.642376 * S^{-0.4426} * C^{0.0918}$$

$$[48] \quad \frac{f_s}{f_w} = 0,00195 * S^{-1,533} * C^{2,114} * d^{*1,3835}$$

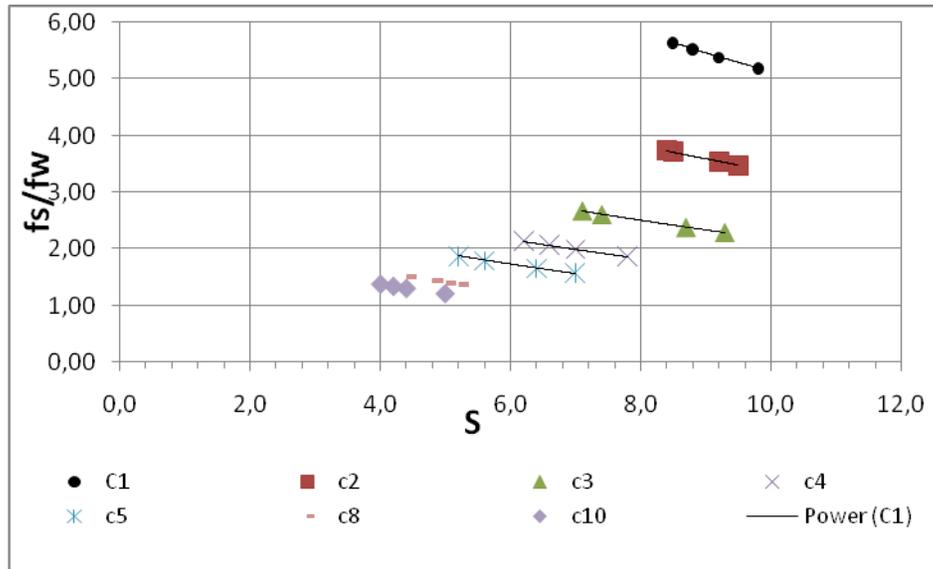
$$[49] \quad \frac{f_s}{f_w} = 2,7221 * S^{-04375} * C^{0,0705} * C'd^{0,0294}$$

- Ecuación general para pérdida de energía en canales rectangulares

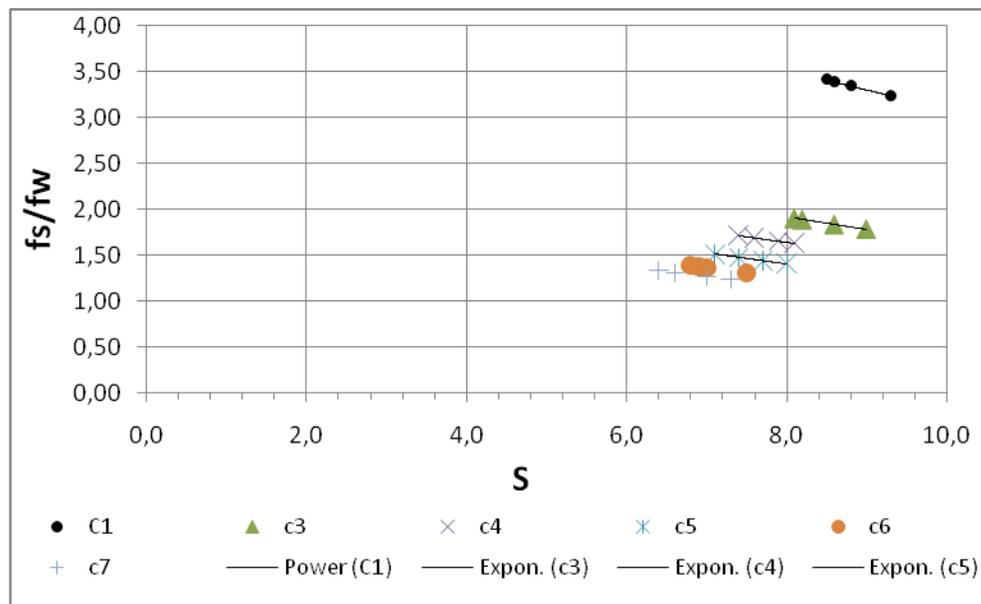
[50]

$$\frac{f_s}{f_w} = 0.172703047 * S^{-0.3815} * C^{1.4202}$$

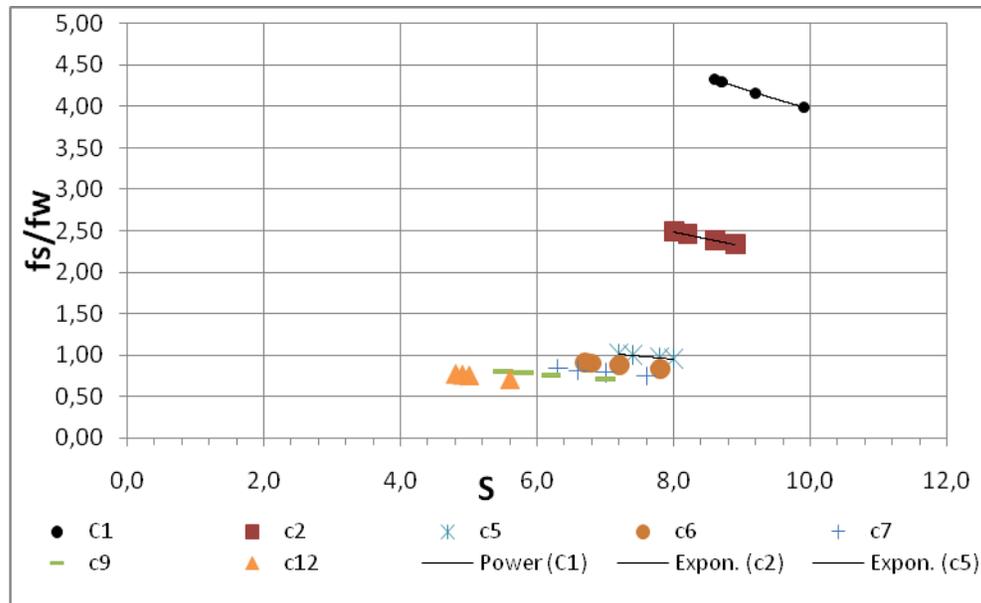
Gráfica 40. Pérdida de energía ecuación [50] vs pendiente crítica ajustada por regresión lineal arena tipo I canal rectangular 5 cm



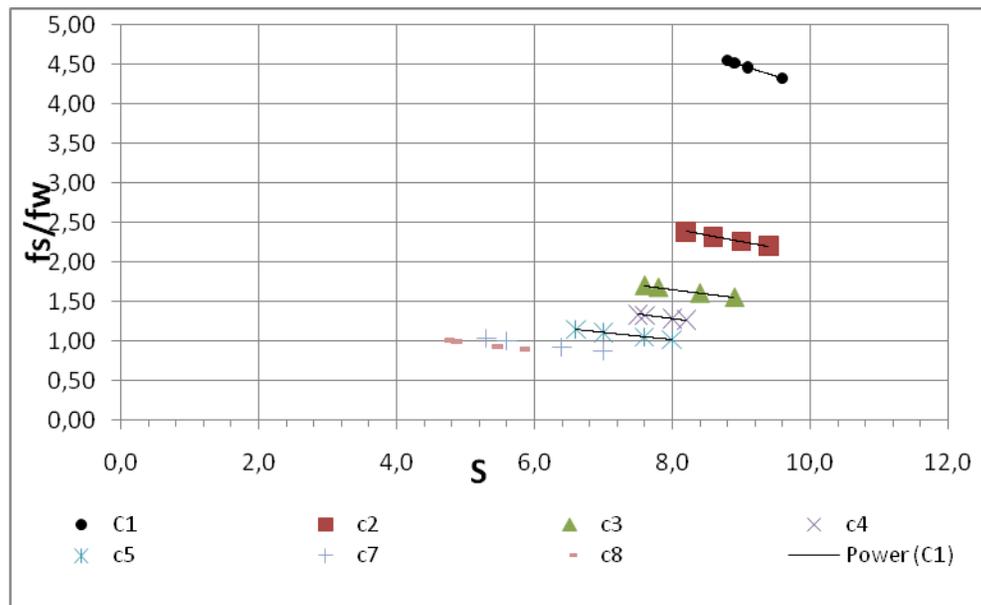
Gráfica 41. Pérdida de energía ecuación [50] vs pendiente crítica ajustada por regresión lineal arena tipo II canal rectangular 5 cm



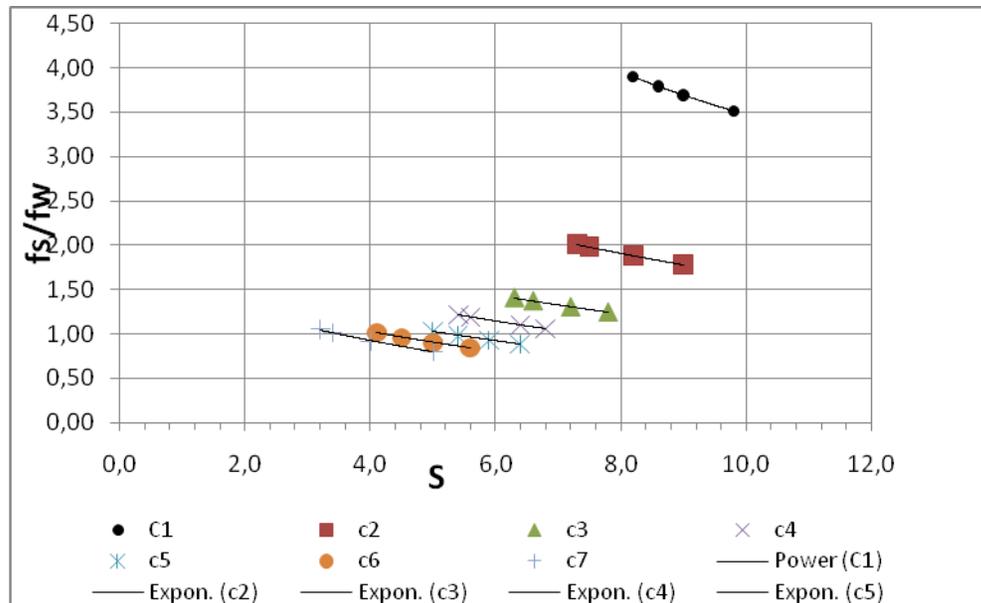
Gráfica 42. Pérdida de energía ecuación [50] vs pendiente crítica ajustada por regresión lineal arena tipo III canal rectangular 5 cm



Gráfica 43. Pérdida de energía ecuación [50] vs pendiente crítica ajustada por regresión lineal arena tipo IV canal rectangular 5 cm



Gráfica 44. Pérdida de energía ecuación [50] vs pendiente crítica ajustada por regresión lineal arena tipo V canal rectangular 5 cm



Cuadro 35. Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo I en canal rectangular 5 cm.

fs/fw	fs/fw experimental	Error	fs/fw con $d^{*'}_c$	Error	fs/fw con $C'd$	Error
2,7889	3,5080	20,497	3,68465	24,31	4,422	36,93
4,7515	3,6877	22,389	4,19859	11,64	4,777	0,54
5,7535	3,7873	34,174	4,50170	21,76	4,978	13,48
6,7804	3,8946	42,560	4,84276	28,58	5,198	23,34
1,4278	1,7784	19,711	1,77810	19,70	2,105	32,17
2,1826	1,8782	16,206	2,05090	6,03	2,290	4,71
2,4215	1,9791	18,269	2,35161	2,89	2,483	2,49
4,1040	2,0108	51,005	2,45111	40,28	2,545	37,99
0,8617	1,2430	30,671	1,16295	25,90	1,362	36,71
1,3033	1,3027	0,048	1,31481	0,87	1,464	10,97
1,7340	1,3709	26,481	1,50246	13,35	1,584	8,64
2,6600	1,4089	47,035	1,61355	39,34	1,652	37,88
0,9770	1,0584	7,690	0,98641	0,95	1,121	12,84
1,3443	1,0967	22,576	1,08250	19,48	1,184	11,90
1,7833	1,1861	33,490	1,32845	25,51	1,337	25,04
2,5050	1,2117	51,631	1,40464	43,93	1,381	44,85

Continuación cuadro 35

0,9249	0,8913	3,777	0,77884	15,79	0,898	2,93
1,3749	0,9348	47,072	0,88230	35,83	0,967	29,70
1,5858	0,9847	37,909	1,01062	36,27	1,047	33,96
2,2619	1,0301	54,457	1,13719	49,72	1,123	50,35
0,3774	0,8412	55,138	0,76554	50,70	0,843	55,24
0,9591	0,8991	6,679	0,91082	5,03	0,934	2,65
1,2326	0,9564	28,882	1,07052	13,15	1,028	16,60
1,6847	1,0101	66,792	1,23476	26,71	1,119	33,61
0,2774	0,8058	65,579	0,76195	63,60	0,806	65,58
0,5661	0,9185	38,371	1,07281	47,24	0,987	42,62
1,0201	1,0104	0,960	1,37639	25,89	1,143	10,76
1,4086	1,0470	25,676	1,51047	7,23	1,208	14,27

Cuadro 36. Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo II en canal rectangular 5cm.

fs/fw	fs/fw experimental	Error	fs/fw con d^{*r}	Error	fs/fw con C'd	Error
3,5859	5,1824	30,807	2,55981	28,61	3,421	4,59
4,2879	5,3781	20,271	2,82019	34,23	3,623	15,50
5,1110	5,5202	7,413	3,01911	40,93	3,772	26,20
7,2726	5,6337	22,536	3,18403	56,22	3,893	46,48
2,5822	3,4753	25,698	2,09158	19,00	3,038	15,00
3,1316	3,5414	11,572	2,19707	29,84	3,128	0,12
3,4861	3,7096	6,024	2,48051	28,85	3,360	3,61
4,9465	3,7355	24,482	2,52593	48,93	3,397	31,33
0,8579	2,2822	62,408	1,33085	35,54	2,063	58,41
1,4345	2,3733	39,556	1,47414	2,69	2,191	34,53
2,1678	2,6096	16,932	1,88935	12,84	2,537	14,57
2,8802	2,6738	7,721	2,01312	30,11	2,634	8,54
0,6302	1,8717	66,328	1,16262	45,79	1,719	63,33
1,1828	1,9943	40,692	1,37246	13,82	1,896	37,61
1,5929	2,0644	22,837	1,50204	5,71	2,000	20,34
2,0002	2,1415	6,596	1,65315	17,35	2,116	5,49
0,3631	1,5761	76,961	0,97654	62,81	1,426	74,53
0,7802	1,6612	53,035	1,12038	30,36	1,546	49,55
1,1135	1,7965	38,019	1,37494	19,01	1,745	36,20
1,5624	1,8764	16,731	1,54040	1,41	1,867	16,30
0,3607	1,3711	73,693	0,96015	62,43	1,260	71,37
0,8285	1,4030	40,949	1,01966	18,75	1,305	36,53

Continuación cuadro 36

1,1858	1,4370	17,476	1,08553	8,46	1,355	12,45
1,4415	1,5122	4,677	1,24046	13,95	1,466	1,65
0,1917	1,2143	84,213	0,75866	74,73	1,065	82,01
0,7596	1,2978	41,471	0,90263	15,85	1,181	35,66
1,1365	1,3628	16,612	1,02574	10,79	1,273	10,75
1,5482	1,4178	8,422	1,13748	26,53	1,354	12,57
0,4756	1,2121	60,761	0,81039	41,31	1,081	55,98
0,8485	1,3065	35,057	0,98587	13,94	1,213	30,07
1,1242	1,3426	16,270	1,05876	5,82	1,265	11,17
1,2688	1,3816	8,892	1,14101	10,07	1,323	4,08

Cuadro 37. Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo III en canal rectangular 5cm.

fs/fw	fs/fw experimental	Error	fs/fw con d^*	Error	fs/fw con C'd	Error
2,8791	3,2387	11,105	1,70149	40,90	2,564	10,93
3,2269	3,3454	3,544	1,85194	42,61	2,696	16,45
3,7189	3,3909	8,821	1,91839	48,42	2,753	25,98
4,9560	3,4142	31,109	1,95310	60,59	2,782	43,86
1,5668	1,7873	12,337	0,84888	45,82	1,439	8,19
2,0532	1,8356	10,598	0,91016	55,67	1,499	26,99
2,8958	1,8876	34,816	0,97912	66,19	1,565	45,95
3,5800	1,9013	46,893	0,99772	72,13	1,583	55,79
1,2880	1,6277	20,868	0,80187	37,74	1,321	2,50
1,7223	1,6518	4,097	0,83321	51,62	1,351	21,54
2,1398	1,6897	21,033	0,88417	58,68	1,400	34,59
3,2164	1,7163	46,638	0,92107	71,36	1,434	55,42
0,8124	1,4107	42,413	0,65646	19,19	1,115	27,15
1,1277	1,4427	21,831	0,69608	38,28	1,154	2,31
1,6698	1,4767	11,563	0,73981	55,69	1,197	28,33
2,4897	1,5130	39,229	0,78828	68,34	1,243	50,09
0,7742	1,3181	41,262	0,61884	25,11	1,038	25,42
1,3460	1,3725	1,975	0,68789	48,89	1,105	17,89
1,6987	1,3842	18,516	0,70324	58,60	1,120	34,09
2,2868	1,3961	38,951	0,71916	68,55	1,135	50,39
0,5392	1,2383	56,456	0,57282	5,87	0,965	44,13
0,9271	1,2692	36,899	0,61089	51,76	1,002	7,52
1,6561	1,3138	20,669	0,66857	147,7	1,057	36,15
2,1387	1,3377	37,452	0,70087	67,23	1,087	49,16

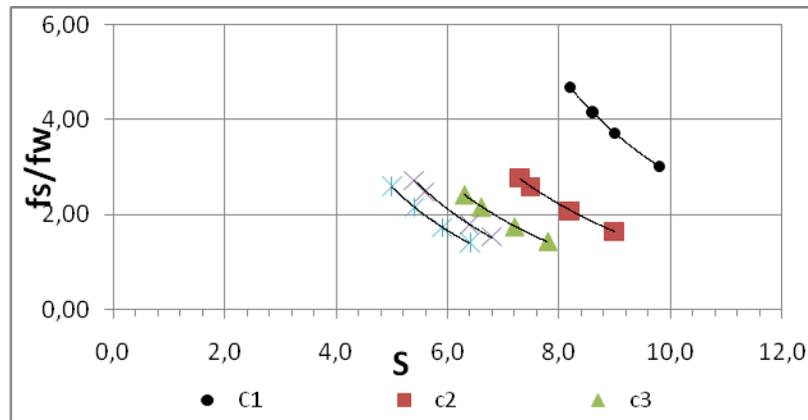
Cuadro 38. Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo IV en canal rectangular 5cm.

fs/fw	fs/fw experimental	Error	fs/fw con d^*	Error	fs/fw con $C'd$	Error
2,9794	3,9892	25,313	4,61628	35,46	5,296	43,74
3,2788	4,1645	21,267	5,16563	36,53	5,660	42,07
4,0717	4,3033	5,688	5,62775	27,65	5,954	31,62
5,1640	4,3326	16,100	5,72839	9,85	6,017	14,17
2,2186	2,3387	5,138	2,97225	25,36	3,119	28,86
2,7041	2,3862	11,754	3,13270	13,68	3,217	15,95
3,1532	2,4538	22,178	3,37003	6,44	3,359	6,53
4,4339	2,4896	43,850	3,50007	21,06	3,435	22,53
0,7261	0,9542	23,909	0,88552	18,01	1,007	27,88
1,3604	0,9685	28,807	0,92057	32,33	1,030	24,28
2,2757	0,9989	56,107	0,99796	56,15	1,080	52,52
3,0747	1,0150	66,987	1,04078	66,15	1,108	63,98
0,3429	0,8305	142,17	0,72242	52,53	0,839	59,11
1,1204	0,8704	22,314	0,81675	27,10	0,902	19,52
2,3121	0,9001	61,069	0,89156	61,44	0,950	58,93
3,0330	0,9080	70,064	0,91205	69,93	0,962	68,27
0,5659	0,7567	33,716	0,63233	10,50	0,742	23,75
0,9297	0,7941	14,582	0,71730	22,85	0,800	13,99
1,7422	0,8220	52,815	0,78503	54,94	0,843	51,59
2,2340	0,8448	62,185	0,84307	62,26	0,880	60,62
0,6144	0,7035	12,665	0,58830	4,43	0,678	9,42
0,9965	0,7554	24,202	0,70862	28,89	0,757	24,02
1,6589	0,7855	52,651	0,78492	52,69	0,804	51,52
2,0350	0,8104	60,178	0,85151	58,16	0,844	58,53
0,4858	0,7027	30,857	0,66937	27,42	0,695	30,06
0,8883	0,7510	15,464	0,79641	11,54	0,770	13,35
1,2280	0,7599	38,119	0,82146	33,11	0,784	36,16
1,7284	0,7692	55,498	0,84785	50,94	0,799	53,78

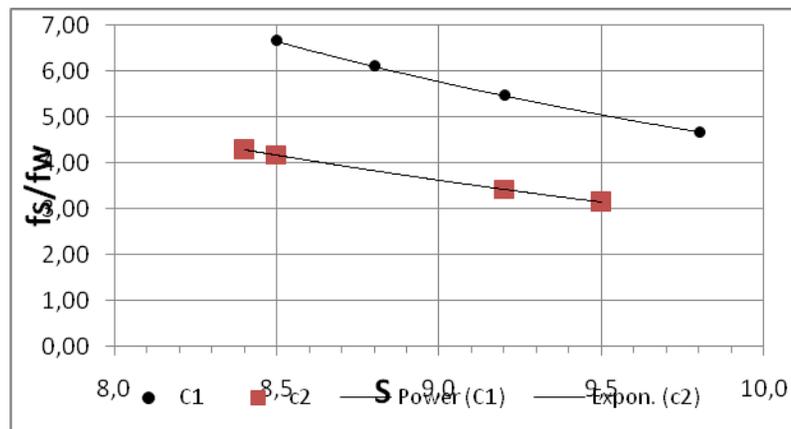
Cuadro 39. Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo II en canal rectangular 5cm.

fs/fw	fs/fw experimental	Error	fs/fw con d^{*r}	Error	fs/fw con C'd	Error
3,2681	4,3231	24,405	3,87944	15,76	4,877	32,98
4,0708	4,4609	8,745	4,21102	3,33	5,119	20,47
5,0964	4,5195	12,766	4,35698	16,97	5,223	2,42
6,2869	4,5495	27,635	4,43313	29,49	5,277	16,07
2,3872	2,2010	8,457	2,01311	18,58	2,557	6,63
2,8133	2,2579	19,743	2,15191	30,74	2,659	5,47
3,2379	2,3189	28,382	2,30727	28,74	2,771	14,41
5,0319	2,3846	52,610	2,48207	50,67	2,894	42,50
1,1512	1,5500	25,730	1,30181	11,57	1,687	31,77
2,1099	1,6035	24,002	1,42249	32,58	1,778	15,74
3,1241	1,6747	46,394	1,59367	96,03	1,901	39,14
3,4710	1,7004	51,009	1,65842	52,22	1,947	43,91
1,1022	1,2660	12,941	1,02136	7,33	1,320	16,52
1,6186	1,2845	26,010	1,06078	52,59	1,350	16,58
2,4292	1,3237	83,512	1,14757	52,76	1,414	41,77
3,0921	1,3341	56,855	1,17112	62,12	1,431	53,70
0,2799	1,0198	72,550	0,74676	62,51	1,000	72,01
0,5748	1,0510	45,306	0,80786	28,85	1,048	45,13
1,4812	1,1029	34,298	0,91643	61,62	1,129	23,79
2,0541	1,1416	44,422	1,00296	51,17	1,191	42,04
0,0364	0,8775	95,851	0,63900	94,30	0,834	95,63
0,6210	0,9248	32,850	0,73312	15,29	0,904	31,32
0,8509	1,0002	14,921	0,89969	5,42	1,021	16,62
1,7421	1,0330	40,702	0,97894	43,81	1,073	38,42
0,2827	0,8937	68,371	0,73558	61,57	0,874	67,67
0,5592	0,9319	39,996	0,82076	31,87	0,933	40,05
1,3166	0,9986	31,853	0,98322	33,91	1,038	21,18
1,5720	1,0110	35,689	1,01547	35,40	1,058	32,71
ERROR PROMEDIO		33,154		35,29		30,57

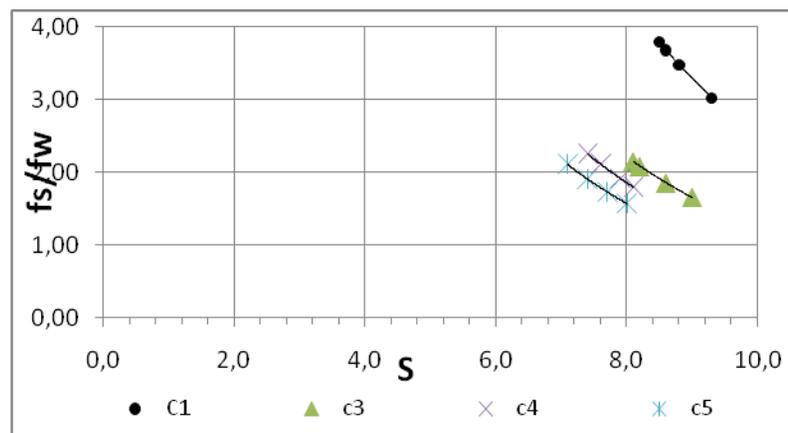
Gráfica 45. Pérdida de energía [44] vs pendiente crítica para altas concentraciones de sólidos arena I canal rectangular 5 cm



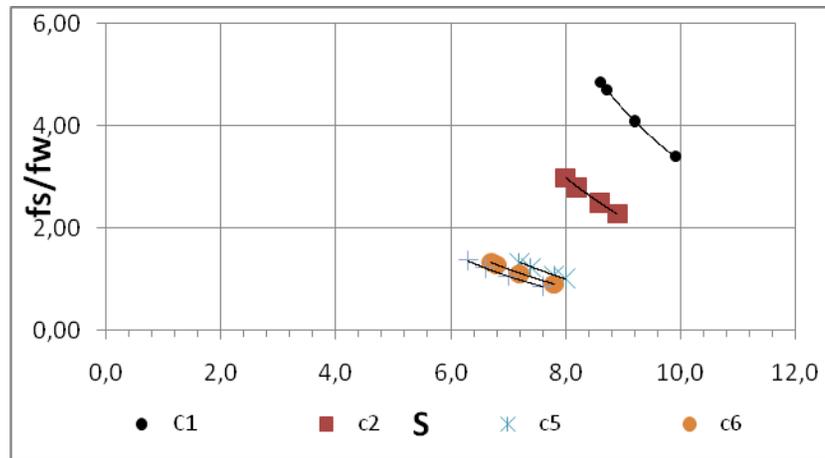
Gráfica 46. Pérdida de energía [44] vs pendiente crítica para altas concentraciones de sólidos arena II canal rectangular 5cm



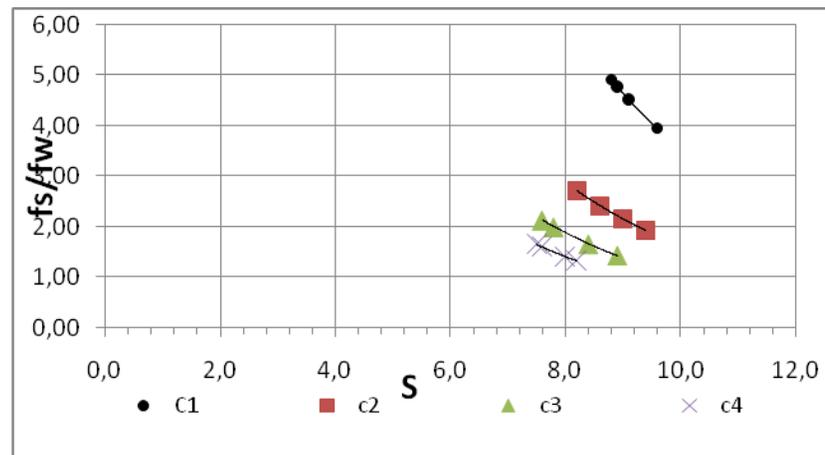
Gráfica 47. Pérdida de energía vs pendiente crítica para alta concentración de sólidos arena III canal rectangular 5cm



Gráfica 48. Pérdida de energía [44] vs pendiente crítica para alta concentración de sólidos arena IV canal rectangular 5cm



Gráfica 49. Pérdida de energía [44] vs pendiente crítica para alta concentración de sólidos arena v canal rectangular 5cm



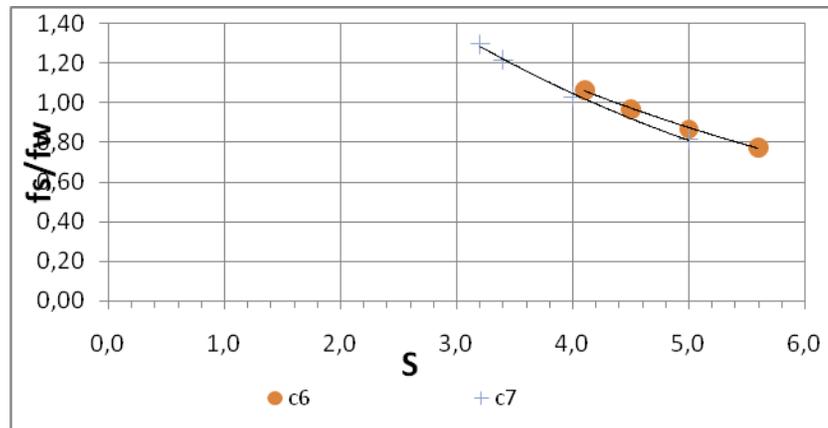
Cuadro 40. Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo II con alta concentraciones en canal rectangular 5cm.

TIPO DE	fs/fw	fs/fw S	ERROR	fs/fw con	ERROR	fs/fw con	ERROR
ARENA TIPO 1	2,7889	3,011	7,39	3,307	15,67	3,328	16,19
ARENA TIPO 1	4,7515	3,724	21,62	4,112	15,56	4,151	12,64
ARENA TIPO 1	5,7535	4,171	27,50	4,618	24,58	4,670	18,83
ARENA TIPO 1	6,7804	4,698	30,72	5,216	29,98	5,285	22,06
ARENA TIPO 1	1,4278	1,641	13,00	1,770	19,33	1,754	18,60
ARENA TIPO 1	2,1826	2,070	5,14	2,246	2,80	2,233	2,27
ARENA TIPO 1	2,4215	2,586	6,38	2,821	14,16	2,815	13,98
ARENA TIPO 1	4,1040	2,767	32,58	3,023	35,77	3,020	26,42
ARENA TIPO 1	0,8617	1,427	39,62	1,481	41,79	1,464	41,12
ARENA TIPO 1	1,3033	1,743	25,20	1,817	28,26	1,801	27,65
ARENA TIPO 1	1,7340	2,165	19,91	2,269	23,59	2,258	23,20
ARENA TIPO 1	2,6600	2,431	8,60	2,556	4,07	2,547	4,23
ARENA TIPO 1	0,9770	1,533	36,25	1,552	37,06	1,539	36,51
ARENA TIPO 1	1,3443	1,783	24,59	1,813	25,83	1,801	25,36
ARENA TIPO 1	1,7833	2,487	39,48	2,550	30,07	2,547	29,98
ARENA TIPO 1	2,5050	2,724	8,02	2,799	10,49	2,799	10,50
ARENA TIPO 1	0,9249	1,412	34,50	1,394	33,64	1,383	33,12
ARENA TIPO 1	1,3749	1,730	20,52	1,716	19,88	1,708	19,50
ARENA TIPO 1	1,5858	2,157	26,49	2,152	26,31	2,149	26,21
ARENA TIPO 1	2,2619	2,614	13,47	2,620	13,67	2,624	13,80
ARENA TIPO 2	3,5859	4,669	23,19	4,151	13,62	3,890	7,82
ARENA TIPO 2	4,2879	5,465	21,54	4,879	12,12	4,583	6,44
ARENA TIPO 2	5,1110	6,106	16,30	5,466	6,50	5,143	0,63
ARENA TIPO 2	7,2726	6,658	8,45	5,973	21,75	5,628	22,62
ARENA TIPO 2	2,5822	3,155	18,15	2,962	12,82	2,965	12,92
ARENA TIPO 2	3,1316	3,418	8,38	3,215	2,60	3,223	2,83
ARENA TIPO 2	3,4861	4,164	16,27	3,936	11,44	3,958	11,91
ARENA TIPO 2	4,9465	4,288	13,30	4,057	21,92	4,081	17,50
ARENA TIPO 3	2,8791	3,031	5,01	2,735	5,28	2,725	5,37
ARENA TIPO 3	3,2269	3,479	7,24	3,150	2,45	3,145	2,55
ARENA TIPO 3	3,7189	3,684	0,94	3,340	11,33	3,338	10,25
ARENA TIPO 3	4,9560	3,793	23,46	3,442	43,99	3,441	30,57
ARENA TIPO 3	1,5668	1,651	5,07	1,454	7,75	1,489	4,94
ARENA TIPO 3	2,0532	1,849	9,96	1,633	25,70	1,676	18,37
ARENA TIPO 3	2,8958	2,082	28,10	1,845	36,29	1,896	34,51
ARENA TIPO 3	3,5800	2,147	40,04	1,904	46,82	1,958	45,31
ARENA TIPO 3	1,2880	1,803	28,56	1,576	18,25	1,625	20,75
ARENA TIPO 3	1,7223	1,919	10,25	1,680	2,54	1,734	0,68
ARENA TIPO 3	2,1398	2,113	1,23	1,854	15,39	1,917	10,39

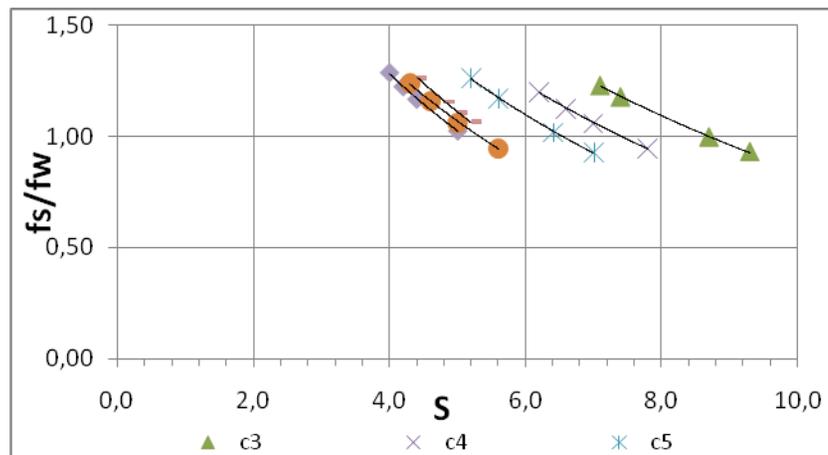
Continuación cuadro 40

ARENA TIPO 3	3,2164	2,259	29,77	1,985	38,28	2,055	36,12
ARENA TIPO 3	0,8124	1,571	48,27	1,352	39,89	1,398	41,89
ARENA TIPO 3	1,1277	1,728	34,73	1,490	24,33	1,544	26,95
ARENA TIPO 3	1,6698	1,908	12,47	1,650	1,22	1,712	2,44
ARENA TIPO 3	2,4897	2,115	15,04	1,834	26,35	1,906	23,46
ARENA TIPO 4	2,9794	3,415	12,76	3,850	22,60	3,864	22,89
ARENA TIPO 4	3,2788	4,101	20,04	4,643	29,39	4,674	29,84
ARENA TIPO 4	4,0717	4,714	13,62	5,357	23,99	5,403	24,64
ARENA TIPO 4	9,4506	4,852	48,66	5,517	71,29	5,567	69,75
ARENA TIPO 4	2,2186	2,279	2,65	2,606	14,86	2,567	13,58
ARENA TIPO 4	2,7041	2,482	8,20	2,845	4,94	2,806	3,64
ARENA TIPO 4	3,1532	2,796	11,34	3,213	1,87	3,175	0,70
ARENA TIPO 4	4,4339	2,973	32,94	3,422	29,55	3,385	23,65
ARENA TIPO 4	0,7261	1,012	28,27	1,057	31,32	1,021	28,91
ARENA TIPO 4	1,3604	1,078	20,74	1,128	20,61	1,091	19,82
ARENA TIPO 4	2,2757	1,230	45,97	1,290	43,30	1,250	45,05
ARENA TIPO 4	3,0747	1,317	57,18	1,384	54,99	1,342	56,34
ARENA TIPO 4	0,3429	0,907	62,20	0,929	63,07	0,897	61,75
ARENA TIPO 4	1,1204	1,108	1,13	1,140	1,69	1,104	1,51
ARENA TIPO 4	2,3121	1,277	44,75	1,319	42,95	1,280	44,64
ARENA TIPO 4	3,0330	1,326	56,29	1,370	54,83	1,330	56,14
ARENA TIPO 4	0,5659	0,857	33,97	0,865	34,58	0,835	32,24
ARENA TIPO 4	0,9297	1,052	11,65	1,067	12,91	1,034	10,07
ARENA TIPO 4	1,7422	1,219	30,05	1,241	40,41	1,204	30,87
ARENA TIPO 4	2,2340	1,369	38,74	1,398	37,44	1,359	39,17
ARENA TIPO 5	3,2681	3,955	17,37	4,132	20,91	4,162	21,48
ARENA TIPO 5	4,0708	4,520	9,93	4,737	14,07	4,782	14,87
ARENA TIPO 5	5,0964	4,777	6,26	5,014	1,63	5,066	0,60
ARENA TIPO 5	6,2869	4,914	21,84	5,161	21,80	5,216	17,03
ARENA TIPO 5	2,3872	1,926	19,34	2,036	17,23	2,046	14,29
ARENA TIPO 5	2,8133	2,146	23,71	2,276	23,62	2,290	18,58
ARENA TIPO 5	3,2379	2,404	25,76	2,556	26,67	2,577	20,40
ARENA TIPO 5	5,0319	2,707	46,20	2,887	74,28	2,916	42,04
ARENA TIPO 5	1,1512	1,436	24,70	1,477	22,04	1,477	22,08
ARENA TIPO 5	2,1099	1,658	21,40	1,712	23,24	1,717	18,64
ARENA TIPO 5	3,1241	1,995	36,14	2,069	50,98	2,081	33,40
ARENA TIPO 5	3,4710	2,129	38,67	2,211	56,97	2,226	35,88
ARENA TIPO 5	1,1022	1,329	20,59	1,336	17,53	1,337	17,56
ARENA TIPO 5	1,6186	1,414	12,66	1,424	13,71	1,425	11,93
ARENA TIPO 5	2,4292	1,607	33,87	1,623	49,67	1,628	32,97
ARENA TIPO 5	3,0921	1,661	46,30	1,679	45,70	1,685	45,50
ERROR PROMEDIO			22,63		22,11		21,74

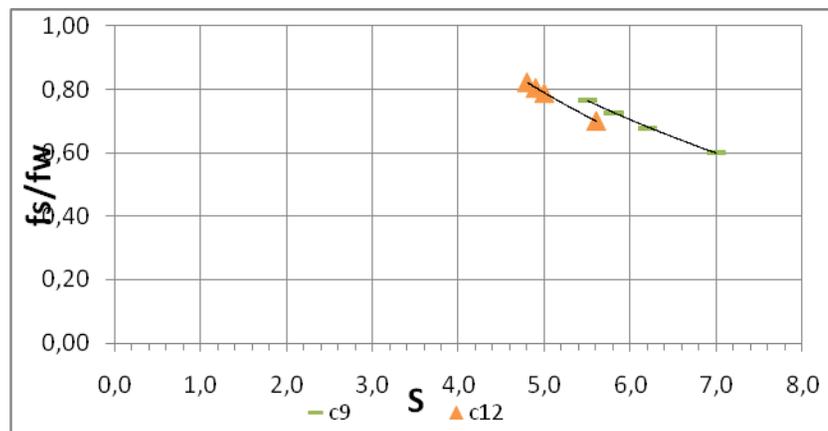
Gráfica 50. Pérdida de energía [47] vs pendiente crítica para baja concentración de sólidos arena tipo I canal rectangular 5cm



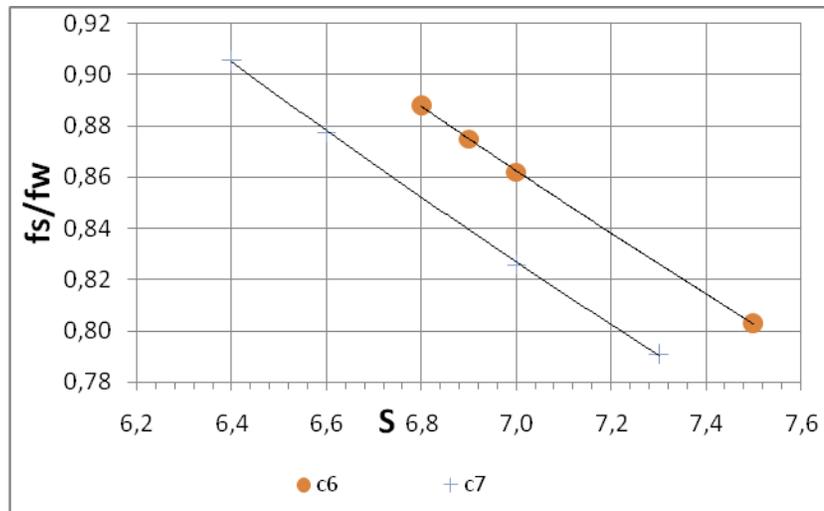
Gráfica 51. Pérdida de energía [47] vs pendiente crítica para baja concentración de sólidos arena tipo II canal rectangular 5cm



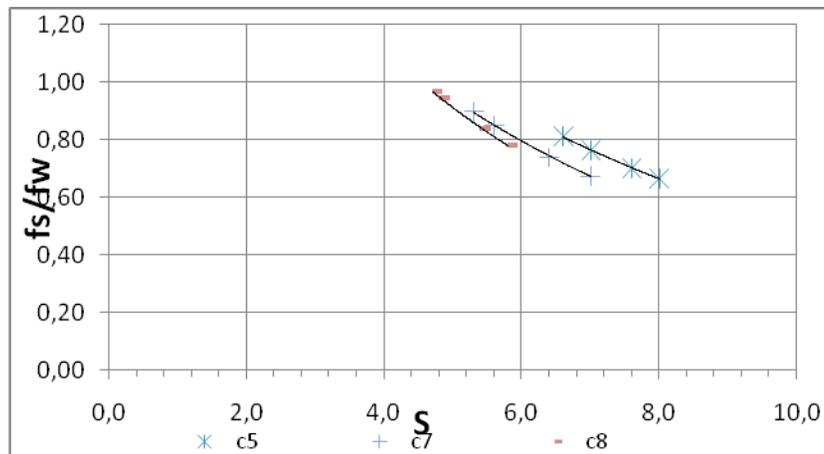
Gráfica 52. Pérdida de energía [47] vs pendiente crítica para baja concentración de sólidos arena tipo III canal rectangular 5cm



Gráfica 53. Pérdida de energía [47] vs pendiente crítica para baja concentración de sólidos arena tipo IV canal rectangular 5cm



Gráfica 54. Pérdida de energía [47] vs pendiente crítica para baja concentración de sólidos arena tipo V canal rectangular 5cm



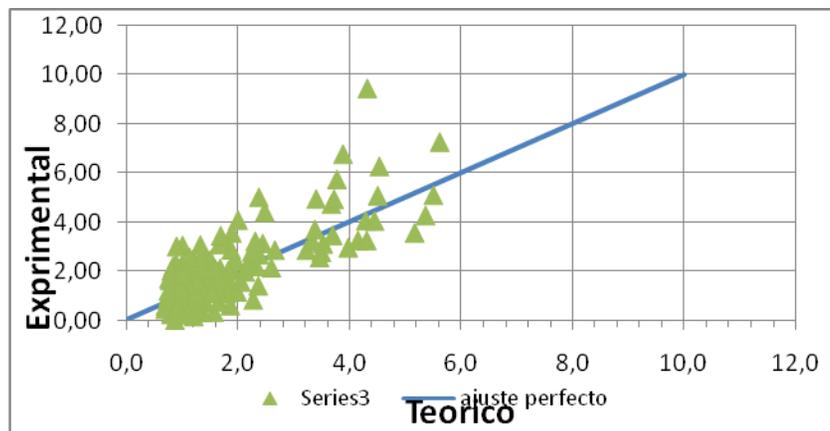
Cuadro 41. Datos experimentales de pérdida de energía, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas para arena tipo II con baja concentraciones en canal rectangular 5cm.

TIPO DE	fs/fw	fs/fw S	ERRO	fs/fw con	ERRO	fs/fw con	ERRO
ARENA TIPO 1	0,3774	0,773	51,16	0,766	50,70	0,774	51,25
ARENA TIPO 1	0,9591	0,868	9,45	0,911	5,30	0,898	6,81
ARENA TIPO 1	1,2326	0,968	21,45	1,071	15,14	1,031	16,37
ARENA TIPO 1	1,6847	1,066	36,74	1,235	36,44	1,164	30,88
ARENA TIPO 1	0,2774	0,818	66,09	0,762	63,60	0,785	64,66
ARENA TIPO 1	0,5661	1,030	45,02	1,073	47,24	1,051	46,15
ARENA TIPO 1	1,0201	1,218	16,22	1,376	25,89	1,300	21,55
ARENA TIPO 1	1,4086	1,296	7,99	1,510	6,74	1,408	0,06
ARENA TIPO 2	0,8579	0,930	7,78	1,331	35,54	1,115	23,03
ARENA TIPO 2	1,4345	0,997	30,53	1,474	2,69	1,216	15,21
ARENA TIPO 2	2,1678	1,178	45,68	1,889	12,84	1,503	30,65
ARENA TIPO 2	2,8802	1,229	57,33	2,013	30,11	1,587	44,89
ARENA TIPO 2	0,6302	0,946	33,36	1,163	45,79	1,063	40,73
ARENA TIPO 2	1,1828	1,057	10,60	1,372	13,82	1,225	3,46
ARENA TIPO 2	1,5929	1,124	29,47	1,502	5,71	1,323	16,92
ARENA TIPO 2	2,0002	1,198	40,09	1,653	17,35	1,436	28,20
ARENA TIPO 2	0,3631	0,930	60,94	0,977	62,81	0,961	62,23
ARENA TIPO 2	0,7802	1,020	23,49	1,120	30,36	1,081	27,84
ARENA TIPO 2	1,1135	1,170	4,84	1,375	19,01	1,288	13,53
ARENA TIPO 2	1,5624	1,263	19,16	1,540	1,43	1,419	9,18
ARENA TIPO 2	0,3607	1,064	66,10	0,960	62,43	1,008	64,21
ARENA TIPO 2	0,8285	1,108	25,22	1,020	18,75	1,061	21,90
ARENA TIPO 2	1,1858	1,155	2,56	1,086	9,24	1,119	5,64
ARENA TIPO 2	1,4415	1,264	12,32	1,240	16,21	1,254	13,01
ARENA TIPO 2	0,1917	0,945	79,70	0,759	74,73	0,837	77,09
ARENA TIPO 2	0,7596	1,062	28,45	0,903	15,85	0,970	21,73
ARENA TIPO 2	1,1365	1,157	1,77	1,026	10,79	1,082	4,99
ARENA TIPO 2	1,5482	1,240	19,89	1,137	36,11	1,182	23,63
ARENA TIPO 2	0,4756	1,023	53,49	0,810	41,31	0,897	46,98
ARENA TIPO 2	0,8485	1,167	27,28	0,986	13,94	1,060	19,99
ARENA TIPO 2	1,1242	1,224	8,16	1,059	6,18	1,127	0,25
ARENA TIPO 2	2,7054	1,287	110,17	1,141	137,11	1,201	55,60
ARENA TIPO 3	0,7742	0,803	3,55	0,619	25,11	0,673	13,13
ARENA TIPO 3	1,3460	0,862	35,96	0,688	95,66	0,736	45,31
ARENA TIPO 3	1,6987	0,875	48,50	0,703	58,60	0,750	55,84
ARENA TIPO 3	2,2868	0,888	61,17	0,719	68,55	0,765	66,56
ARENA TIPO 3	0,5392	0,791	31,82	0,573	5,87	0,640	15,79
ARENA TIPO 3	0,9271	0,826	10,93	0,611	51,76	0,676	27,04

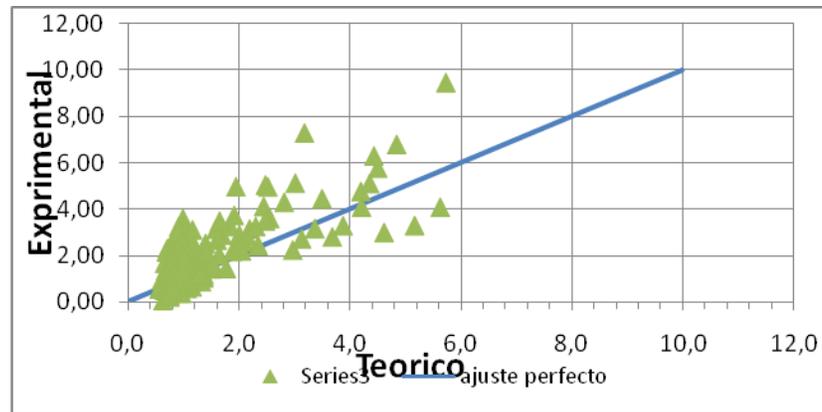
Continuación cuadro 41

ARENA TIPO 3	1,6561	0,877	47,01	0,669	59,63	0,731	55,88
ARENA TIPO 3	2,1387	0,906	57,65	0,701	67,23	0,761	64,43
ARENA TIPO 4	0,6144	0,598	2,67	0,588	4,43	0,585	4,82
ARENA TIPO 4	0,9965	0,678	32,00	0,709	40,63	0,685	31,22
ARENA TIPO 4	1,6589	0,726	56,24	0,785	52,69	0,748	54,91
ARENA TIPO 4	2,0350	0,767	62,32	0,852	138,98	0,802	60,60
ARENA TIPO 4	0,4858	0,700	30,62	0,669	27,42	0,666	27,02
ARENA TIPO 4	0,8883	0,787	11,40	0,796	11,54	0,772	13,08
ARENA TIPO 4	1,2280	0,804	52,81	0,821	49,49	0,793	35,44
ARENA TIPO 4	1,7284	0,821	52,50	0,848	50,94	0,815	52,87
ARENA TIPO 5	0,2799	0,666	57,99	0,747	62,51	0,742	62,27
ARENA TIPO 5	0,5748	0,703	18,18	0,808	28,85	0,794	27,56
ARENA TIPO 5	1,4812	0,765	48,37	0,916	61,62	0,884	40,33
ARENA TIPO 5	2,5864	0,813	68,58	1,003	61,22	0,955	63,09
ARENA TIPO 5	0,0364	0,675	94,60	0,639	94,30	0,673	94,59
ARENA TIPO 5	0,6210	0,740	16,10	0,733	15,29	0,756	17,90
ARENA TIPO 5	0,8509	0,849	0,18	0,900	5,42	0,901	5,55
ARENA TIPO 5	2,1221	0,899	57,63	0,979	53,87	0,968	54,37
ARENA TIPO 5	0,2827	0,779	63,72	0,736	61,57	0,770	63,29
ARENA TIPO 5	0,5592	0,839	33,32	0,821	31,87	0,845	33,85
ARENA TIPO 5	1,3166	0,947	28,08	0,983	33,91	0,986	25,09
ARENA TIPO 5	1,8949	0,968	48,93	1,015	86,60	1,014	46,49
ERROR PROMEDIO			34,15		32,61		33,10

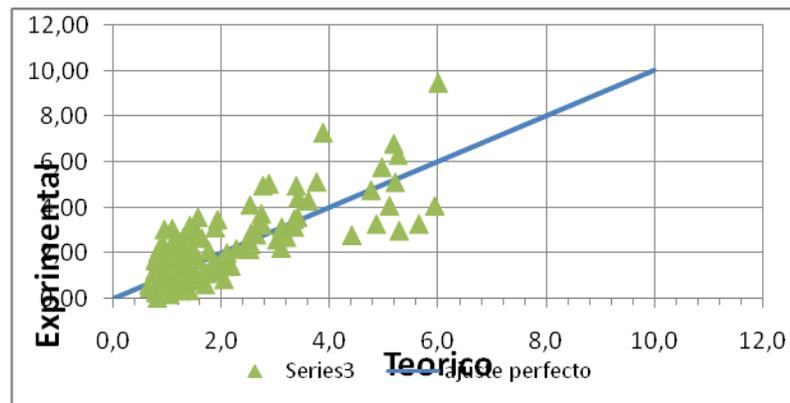
Gráfica 55. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para la totalidad de resultados



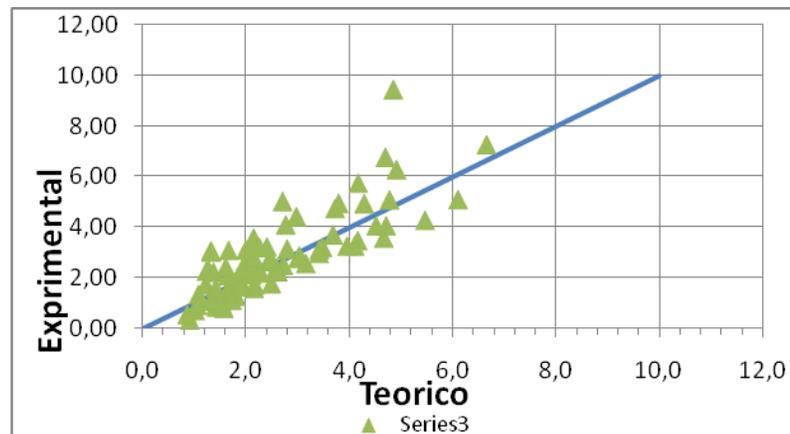
Gráfica 56. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para la totalidad de resultados



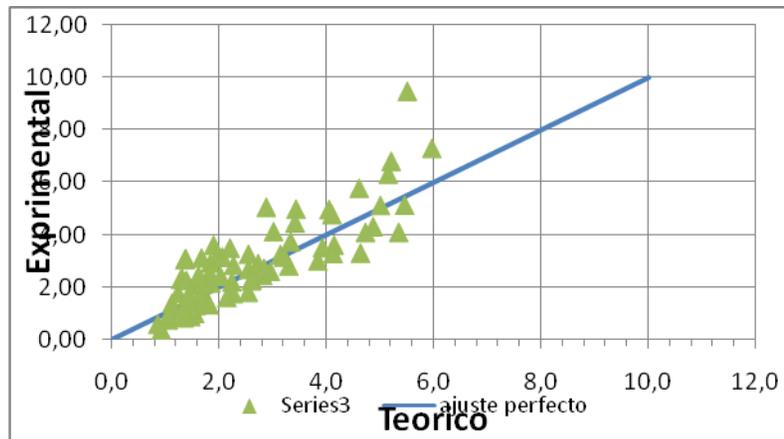
Gráfica 57. Valor experimental vs teórico del Coeficiente de arrastre de partículas para la totalidad de resultados



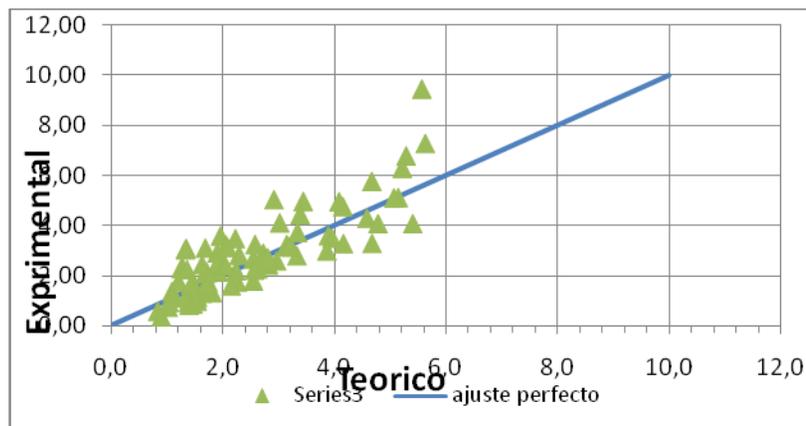
Gráfica 58. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para altas concentraciones de sólidos en canal rectangular



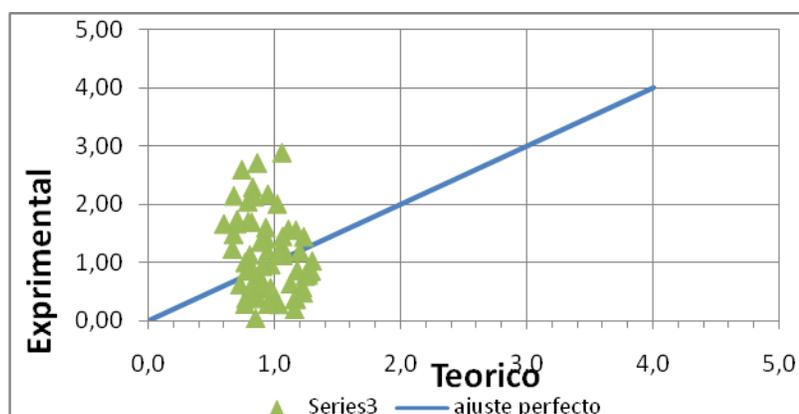
Gráfica 59. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para altas concentraciones



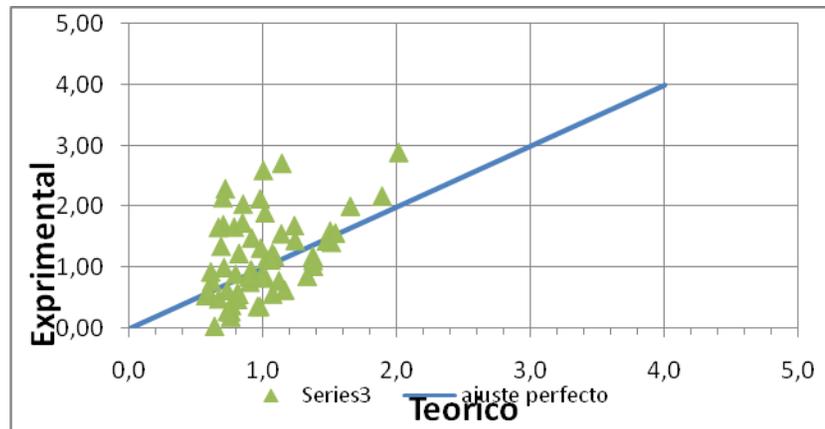
Gráfica 60. Valor experimental vs teórico del Coeficiente de arrastre de partículas para altas concentraciones



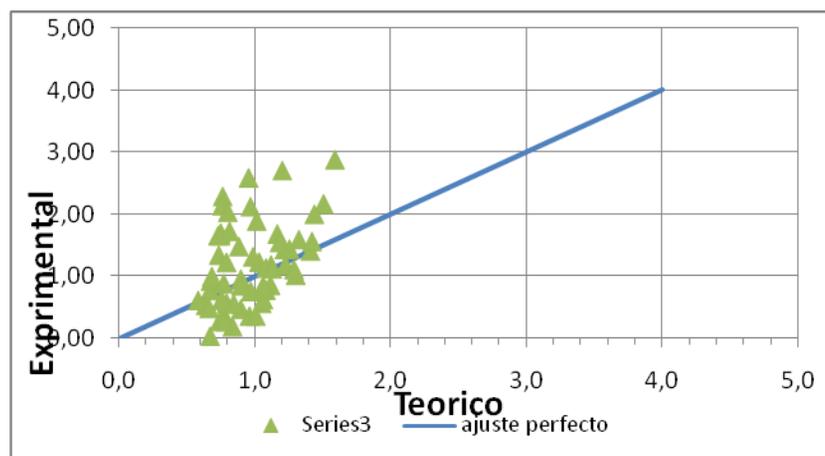
Gráfica 61. Valor experimental vs teórico de pérdida de energía para bajas concentraciones de sólidos en canal rectangular



Gráfica 62. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla para bajas concentraciones

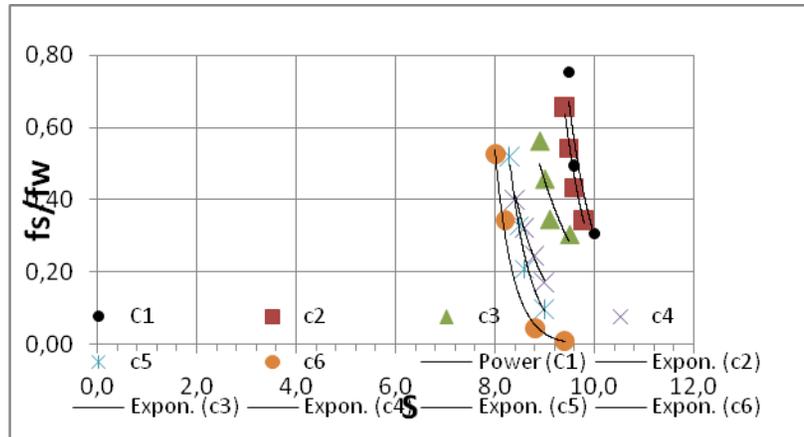


Gráfica 63. Valor experimental vs teórico del Coeficiente de arrastre de partículas para bajas concentraciones

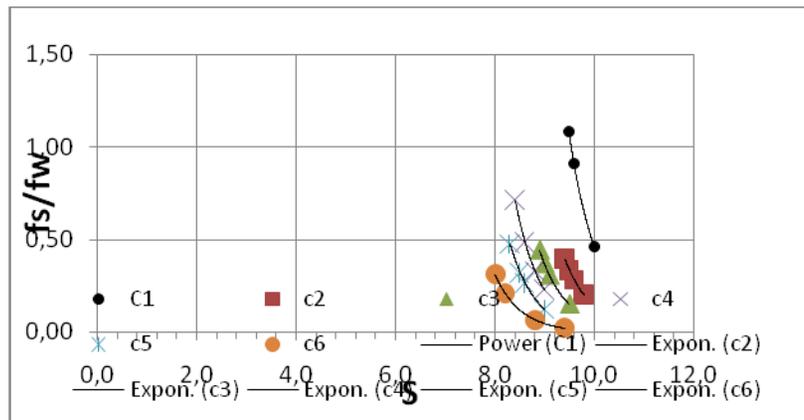


- Canal triangular. Durante el desarrollo de los ensayos en el canal triangular se encontró que en las condiciones recreadas en laboratorio para este, solo fue posible trabajar con el tipo de arena II ya que los demás sedimentos no se transportaban por dicho canal en las condiciones más favorables es decir con máxima pendiente y máximo caudal por lo tanto los datos recolectados se limitan al tipo de arena II antes mencionado.

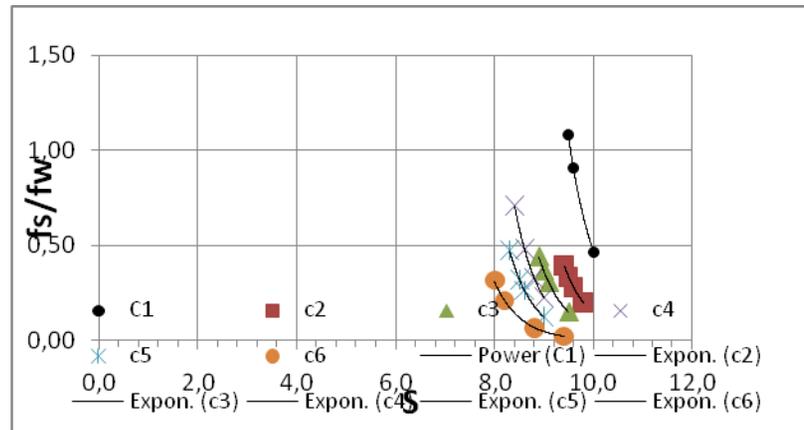
Gráfica 64. Pérdida de energía experimental vs pendiente crítica experimental arena tipo II canal triangular



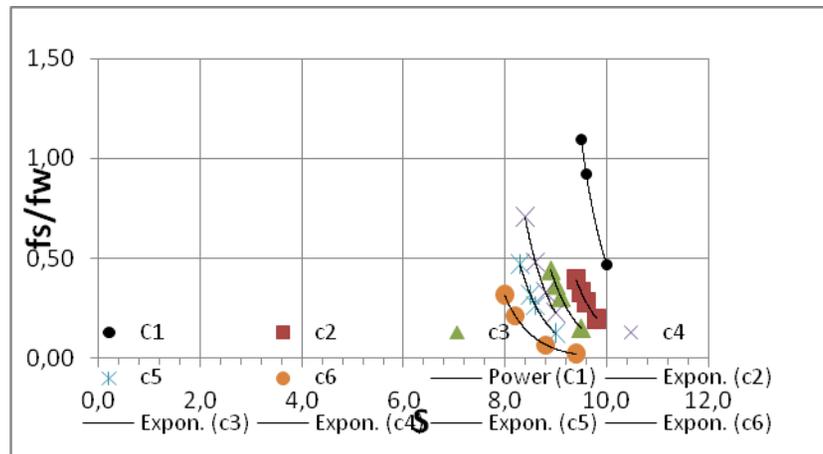
Gráfica 65. Pérdida de energía vs pendiente crítica ajustados por regresión lineal con ecuación no. [51] arena tipo II canal triangular



Gráfica 66. Pérdida de energía con diámetro adimensional de partículas calculado con ecuación no. [52] en canales triangulares abiertos



Gráfica 67. Pérdida de energía con el coeficiente de arrastre de partículas calculado con ecuación no. [53] en canales triangulares abiertos



Analizando las gráficas realizadas a partir de los datos recolectados en el ensayo con arena tipo II, la cual tiene el menor peso específico de las cinco clases de sedimento utilizadas para la presente investigación y analizando estos resultados por medio de la regresión lineal múltiple variable se dedujo las siguientes ecuaciones para encontrar la pérdida de energía en canales triangulares

$$[51] \quad \frac{f_s}{f_w} = 10^{17,4255} * S^{-16,5461} * C^{16,2618}$$

$$[52] \quad \frac{f_s}{f_w} = 10^{49,9102} * S^{-16,564} * C^{15,9537} * d^{*-25,1323}$$

$$[53] \quad \frac{f_s}{f_w} = 10^{-53,6722} * S^{-16,524} * C^{14,2199} * C'd^{234,6169}$$

Cuadro 42. Datos experimentales de pérdida de energía en canal triangular

Tipo Sedimento	fs/fw	fs/fw	Error %
ARENA TIPO 2	0,31	0,46	33,51
ARENA TIPO 2	0,50	0,91	45,4879
ARENA TIPO 2	0,75	1,08	30,3212
ARENA TIPO 2	0,34	0,20	42,63995
ARENA TIPO 2	0,43	0,28	35,98219
ARENA TIPO 2	0,54	0,33	39,1747
ARENA TIPO 2	0,66	0,39	40,18750
ARENA TIPO 2	0,30	0,15	50,41635
ARENA TIPO 2	0,35	0,31	11,3189
ARENA TIPO 2	0,46	0,37	19,4971

Continuación cuadro 42

ARENA TIPO 2	0,56	0,44	21,2770
ARENA TIPO 2	0,17	0,23	24,528
ARENA TIPO 2	0,25	0,33	25,533
ARENA TIPO 2	0,32	0,48	33,33
ARENA TIPO 2	0,40	0,71	43,884
ARENA TIPO 2	0,10	0,12	21,2091
ARENA TIPO 2	0,21	0,26	21,0669
ARENA TIPO 2	0,33	0,32	2,11796
ARENA TIPO 2	0,52	0,48	8,2419
ARENA TIPO 2	0,01	0,02	48,061
ARENA TIPO 2	0,05	0,07	28,999
ARENA TIPO 2	0,34	0,21	38,986
ARENA TIPO 2	0,53	0,32	40,1623
ERROR PROMEDIO			30,6931

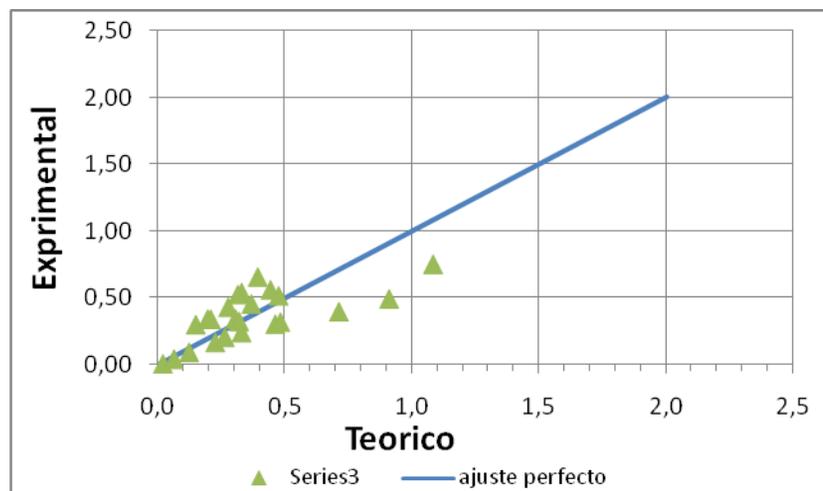
Cuadro 43. Datos experimentales de pérdida de energía con diámetro adimensional de partículas en canales triangulares abiertos

Tipo Sedimento	fs/fw	fs/fw con d*'	Error %
ARENA TIPO 2	0,30764	0,463188	33,58
ARENA TIPO 2	0,49562	0,910787	45,58
ARENA TIPO 2	0,75336	1,083287	30,46
ARENA TIPO 2	0,34451	0,197295	42,73
ARENA TIPO 2	0,43419	0,277615	36,06
ARENA TIPO 2	0,54342	0,330195	39,24
ARENA TIPO 2	0,65837	0,393454	40,24
ARENA TIPO 2	0,30399	0,150424	50,52
ARENA TIPO 2	0,34632	0,306740	11,43
ARENA TIPO 2	0,45804	0,368348	19,58
ARENA TIPO 2	0,56351	0,443237	21,34
ARENA TIPO 2	0,17163	0,227119	24,43
ARENA TIPO 2	0,24561	0,329546	25,47
ARENA TIPO 2	0,32167	0,482275	33,30
ARENA TIPO 2	0,39964	0,712139	43,88
ARENA TIPO 2	0,09816	0,124444	21,12
ARENA TIPO 2	0,20865	0,264250	21,04
ARENA TIPO 2	0,32772	0,320739	2,13
ARENA TIPO 2	0,51840	0,475814	8,22
ARENA TIPO 2	0,01138	0,021901	48,02
ARENA TIPO 2	0,04635	0,065305	29,03
ARENA TIPO 2	0,34420	0,210352	38,89
ARENA TIPO 2	0,52809	0,316648	40,04
ERROR PROMEDIO			30,7095

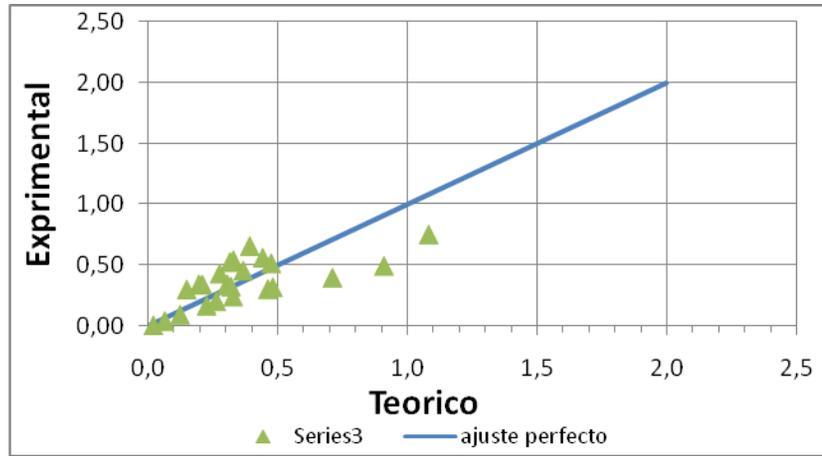
Cuadro 44. Datos experimentales de pérdida de energía con coeficiente de arrastre de partículas en canales triangulares abiertos

Tipo Sedimento	fs/fw	fs/fw con C´d	Error
ARENA TIPO 2	0,30764	0,468018718	34,2670
ARENA TIPO 2	0,49562	0,918783882	46,0566
ARENA TIPO 2	0,75336	1,092341337	31,0322
ARENA TIPO 2	0,34451	0,197152746	42,7727
ARENA TIPO 2	0,43419	0,277186868	36,1595
ARENA TIPO 2	0,54342	0,329547220	64,9000
ARENA TIPO 2	0,65837	0,392516441	40,3809
ARENA TIPO 2	0,30399	0,149923891	50,6806
ARENA TIPO 2	0,34632	0,305193817	13,4758
ARENA TIPO 2	0,45804	0,366329988	20,0218
ARENA TIPO 2	0,56351	0,440610892	21,8095
ARENA TIPO 2	0,17163	0,226147151	24,1078
ARENA TIPO 2	0,24561	0,327840553	25,0812
ARENA TIPO 2	0,32167	0,479338088	32,8938
ARENA TIPO 2	0,39964	0,707136777	43,4854
ARENA TIPO 2	0,09816	0,124357629	21,0632
ARENA TIPO 2	0,20865	0,263586553	20,8413
ARENA TIPO 2	0,32772	0,319784442	2,4223
ARENA TIPO 2	0,51840	0,473946435	8,5754
ARENA TIPO 2	0,01138	0,022169902	48,6486
ARENA TIPO 2	0,04635	0,065932076	29,7004
ARENA TIPO 2	0,34420	0,211771898	38,4747
ARENA TIPO 2	0,52809	0,318470699	39,6933
ERROR PROMEDIO			32,0236

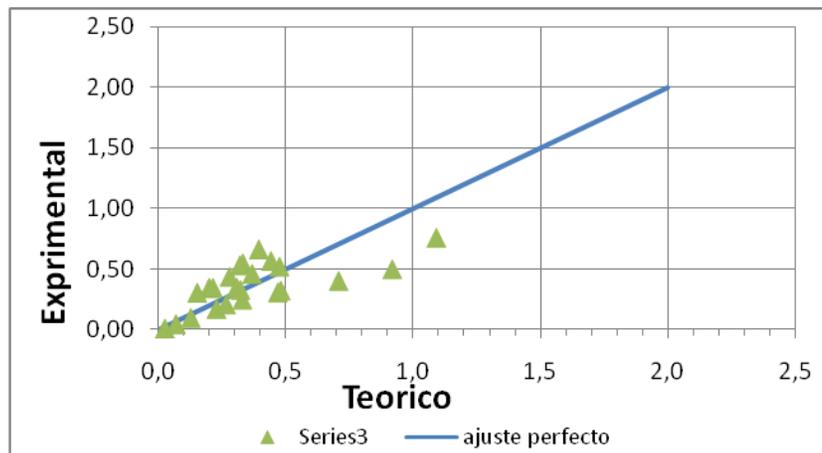
Gráfica 68. Comparación valor experimental vs valor teórico de pérdida de energía en canal triangular



Gráfica 69. Valor experimental vs teórico del diámetro adimensional de partículas afectadas por la mezcla en canal triangular



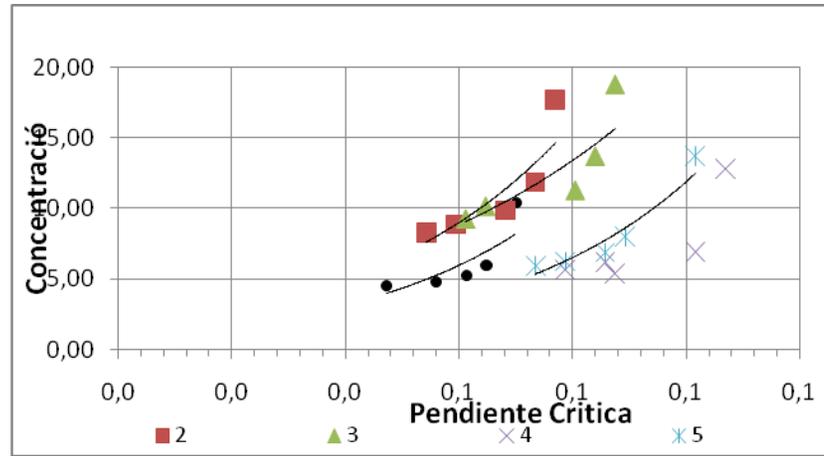
Gráfica 70. Valor experimental vs teórico del Coeficiente de arrastre de partículas en canal triangular



6.1.4 Resultados obtenidos para pendiente crítica en canales abiertos

- Pendiente crítica en canales circulares abiertos. Los datos obtenidos durante los ensayos con el canal circular se procesan y grafican para entender cómo se afecta la pendiente crítica con la variación de la concentración de sólidos en una mezcla sedimentable como sigue a continuación en las gráficas, con estos datos y mediante el uso del método de regresión lineal que fue estudiada en el capítulo 2.7.2. Se obtienen tres fórmulas con las cuales se deduce la pendiente crítica de un canal circular abierto.

Gráfica 71. Pendiente crítica experimental vs concentración de mezcla para canal circular



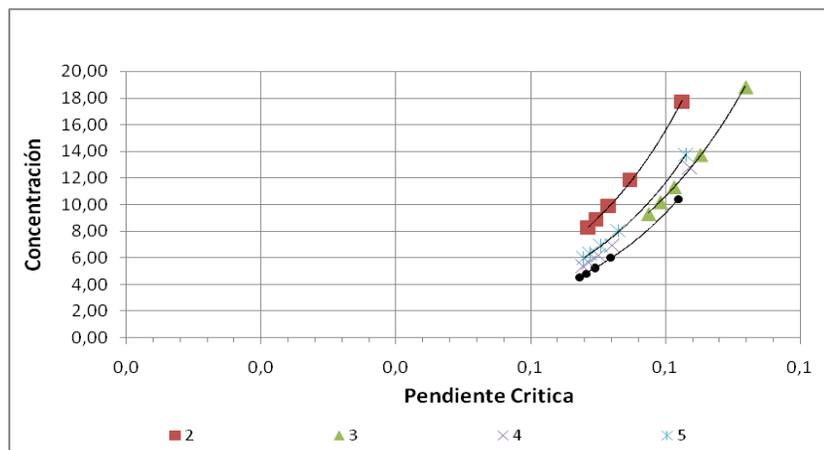
[54] $S_{CD} = 0,06033 * \sigma^{-0,3574} * C^{0,2414}$

[55] $S_{CD} = 0,04210 * \sigma^{0,0767} * C^{0,6061} * C'd^{-0,9997}$

[56] $S_{CD} = 0,02114 * \sigma^{0,0297} * C^{0,6213} * d^{*0,7128}$

[57] $S_{CD} = 0,02114 * \sigma^{0,2337} * C^{0,6045} * Cd^{2,4307} * D^{*2,3456}$

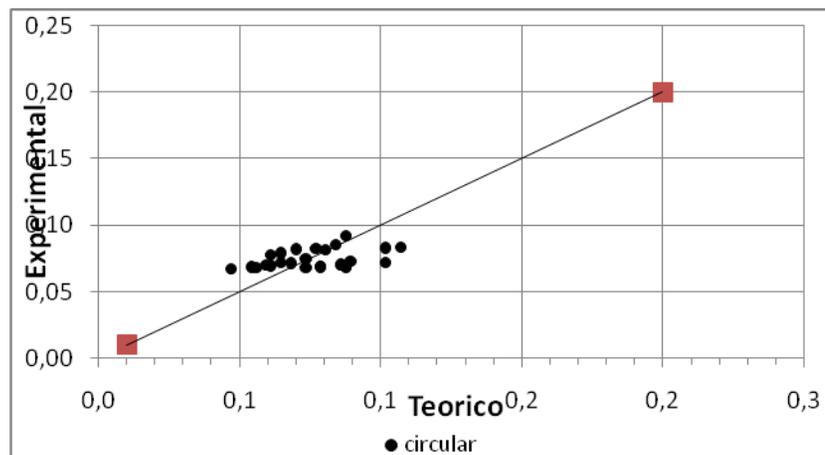
Gráfica 72. Pendiente crítica vs concentración de mezcla, ajustado por regresión lineal con ecuación No. [54] en canal circular



Cuadro 45. Datos experimentales para pendiente crítica, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas en canales circulares

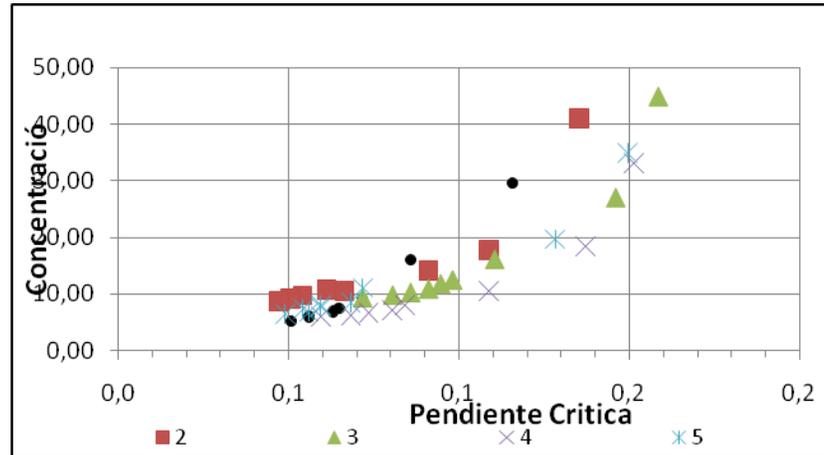
ARENA TIPO	S_{CD}	S_{CD} exp.	Error	S_{CD} exp. CD	Error	S_{CD} exp. D^{**}	Error	S_{CD} exp. g cd, D^{**}	Error
1	0,0699	0,0820	17,22	0,0960	37,35	0,09443	35,04	0,0889	27,07
1	0,0646	0,0719	11,14	0,0720	11,29	0,07134	10,32	0,0699	8,14
1	0,0611	0,0696	13,74	0,0669	9,35	0,06642	8,60	0,0658	7,54
1	0,0559	0,0682	22,02	0,0640	14,40	0,06358	13,73	0,0633	13,26
1	0,0471	0,0673	42,63	0,0618	31,13	0,06147	30,34	0,0614	30,14
2	0,0769	0,0825	7,16	0,0868	12,79	0,08884	15,46	0,0931	20,94
2	0,0734	0,0748	1,83	0,0749	2,00	0,07493	2,03	0,0750	2,09
2	0,0681	0,0716	4,99	0,0691	1,40	0,06873	0,81	0,0682	0,02
2	0,0594	0,0697	17,40	0,0657	10,66	0,06517	9,70	0,0644	8,44
2	0,0541	0,0685	26,53	0,0634	17,15	0,06278	15,92	0,0620	14,41
3	0,0874	0,0919	5,03	0,0804	8,06	0,08294	5,20	0,0907	3,62
3	0,0839	0,0852	1,43	0,0737	12,25	0,07354	12,43	0,0747	11,04
3	0,0804	0,0813	1,04	0,0685	14,84	0,06751	16,09	0,0669	16,89
3	0,0646	0,0793	22,55	0,0656	1,39	0,06426	0,63	0,0630	2,54
3	0,0611	0,0775	26,73	0,0630	2,93	0,06145	0,46	0,0599	2,14
4	0,1068	0,0836	21,75	0,1123	5,09	0,11332	6,03	0,1110	3,85
4	0,1015	0,0721	28,99	0,0819	19,38	0,08424	17,07	0,0883	13,06
4	0,0857	0,0701	18,21	0,0768	10,42	0,07918	7,64	0,0839	2,17
4	0,0787	0,0687	12,76	0,0731	7,13	0,07543	4,15	0,0804	2,16
4	0,0874	0,0678	22,51	0,0710	18,81	0,07340	16,10	0,0786	10,12
5	0,1015	0,0831	18,21	0,1033	1,73	0,10153	0,04	0,0946	6,88
5	0,0892	0,0730	18,22	0,0797	10,70	0,07883	11,67	0,0760	14,89
5	0,0857	0,0704	17,87	0,0736	14,16	0,07287	15,00	0,0708	17,40
5	0,0787	0,0688	12,54	0,0700	11,10	0,06932	11,92	0,0677	13,94
5	0,0734	0,0679	7,52	0,0679	7,56	0,06728	8,39	0,0659	10,21
Error Promedio			16,00		11,72		10,99		10,81

Gráfica 73. Valor Teórico vs valor experimental con desviación estándar y concentración de la mezcla en canales circulares



- Pendiente crítica en canal rectangular abierto base 10 cm. El procedimiento para el análisis de los datos experimentales que se hacen para este canal son

Gráfica 74. Pendiente crítica experimental vs concentración de mezcla para canal rectangular base 10cm.



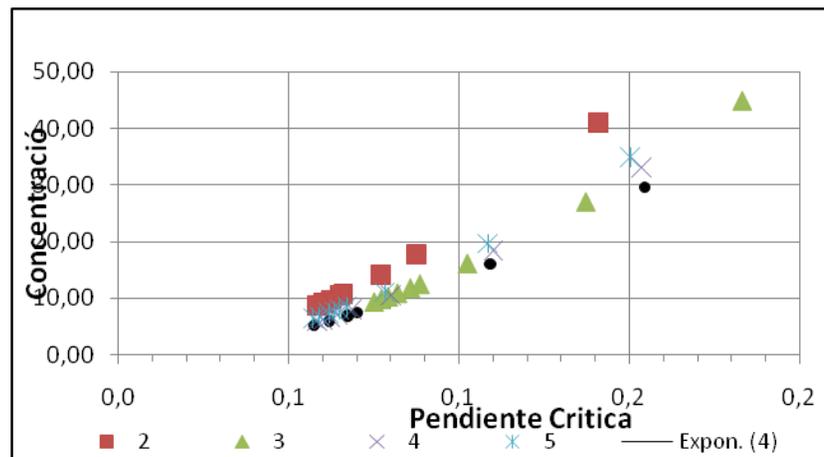
[58] $S_{CD} = 0,0401 * \sigma^{0,8007} * C^{0,5687}$

[59] $S_{CD} = 0,03682 * \sigma^{-0,7426} * C^{0,6193} * C'd^{-0,114}$

[60] $S_{CD} = 0,0228 * \sigma^{-0,7052} * C^{0,6269} * d^{*0,1157}$

[61] $S_{CD} = 0,0234 * \sigma^{-0,7077} * C^{0,6269} * Cd^{-0,0007} * D^{*0,1096}$

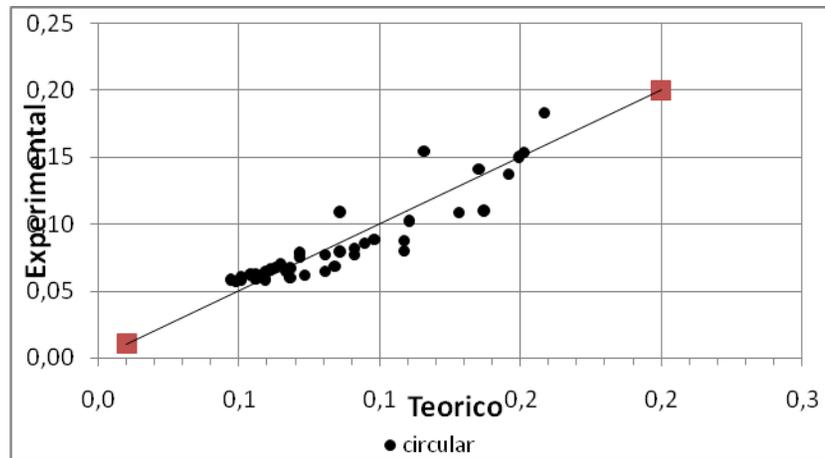
Gráfica 75. Pendiente crítica vs concentración de mezcla ajustado por regresión lineal con ecuación No. [58], canal rectangular 10 cm.



Cuadro 46. Datos experimentales para pendiente crítica, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas en canal rectangular de base 10 cm.

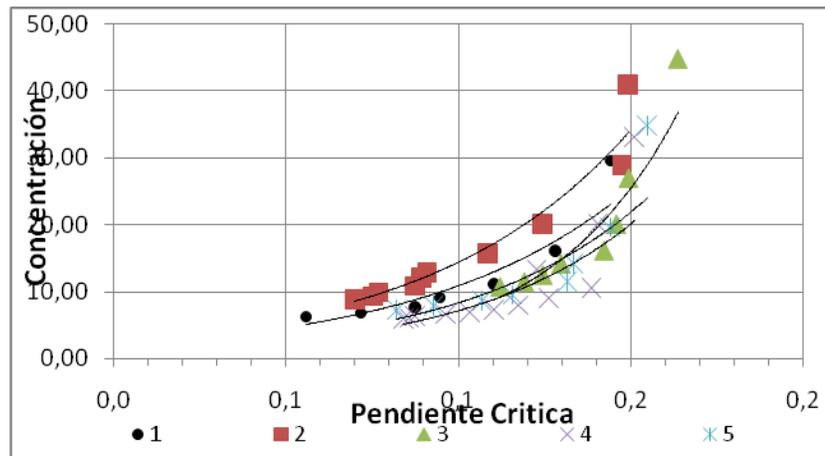
ARENA TIPO	SCD	SCD exp.	Error	SCD exp. CD	Error	SCD exp. D**	Error	SCD exp. □g cd, D**	Error
1	0,11570	0,1545	33,53	0,1599	38,18	0,1586	37,10	0,1586	37,07
1	0,08573	0,1091	27,32	0,1122	30,93	0,1121	30,80	0,1121	30,72
1	0,07168	0,0788	9,96	0,0794	10,82	0,0796	11,05	0,0795	10,94
1	0,06466	0,0701	8,47	0,0701	8,40	0,0702	8,65	0,0702	8,53
1	0,06291	0,0674	7,14	0,0672	6,75	0,0673	7,00	0,0672	6,88
1	0,05590	0,0621	11,05	0,0615	9,95	0,0616	10,20	0,0615	10,07
1	0,05065	0,0576	13,65	0,0567	11,85	0,0567	12,08	0,0567	11,95
2	0,13520	0,1411	4,33	0,1372	1,46	0,1396	3,31	0,1393	3,05
2	0,10863	0,0875	19,43	0,0887	18,36	0,0885	18,49	0,0885	18,58
2	0,09100	0,0770	15,36	0,0777	14,58	0,0775	14,77	0,0775	14,87
2	0,06116	0,0659	7,79	0,0660	7,96	0,0658	7,63	0,0658	7,51
2	0,06641	0,0650	2,07	0,0651	2,02	0,0648	2,33	0,0648	2,44
2	0,05415	0,0624	15,14	0,0622	14,91	0,0620	14,52	0,0620	14,39
2	0,05065	0,0601	18,70	0,0599	18,20	0,0596	17,77	0,0596	17,64
2	0,04715	0,0582	23,49	0,0579	22,74	0,0576	22,29	0,0576	22,14
3	0,15838	0,1831	15,61	0,1676	5,81	0,1724	8,87	0,1719	8,51
3	0,14588	0,1372	5,93	0,1345	7,77	0,1336	8,37	0,1336	8,45
3	0,11040	0,1024	7,21	0,1009	8,59	0,0996	9,74	0,0996	9,79
3	0,09805	0,0886	9,68	0,0868	11,45	0,0856	12,69	0,0856	12,73
3	0,09452	0,0857	9,32	0,0839	11,23	0,0827	12,50	0,0827	12,54
3	0,09100	0,0819	9,95	0,0801	12,04	0,0788	13,33	0,0788	13,37
3	0,08573	0,0792	7,59	0,0773	9,89	0,0761	11,23	0,0761	11,27
3	0,08045	0,0772	4,06	0,0752	6,57	0,0740	7,98	0,0740	8,02
3	0,07168	0,0751	4,79	0,0730	1,89	0,0719	0,33	0,0719	0,28
4	0,15123	0,1536	1,58	0,1607	6,26	0,1601	5,86	0,1600	5,81
4	0,13698	0,1100	19,72	0,1148	16,16	0,1155	15,66	0,1154	15,74
4	0,10863	0,0800	26,39	0,0820	24,53	0,0828	23,70	0,0828	23,80
4	0,08397	0,0685	18,38	0,0695	17,24	0,0703	16,23	0,0702	16,36
4	0,08045	0,0643	20,14	0,0648	19,43	0,0656	18,44	0,0655	18,57
4	0,07343	0,0619	15,72	0,0623	15,21	0,0630	14,16	0,0629	14,30
4	0,06817	0,0599	12,15	0,0601	11,85	0,0608	10,76	0,0607	10,91
4	0,05941	0,0582	2,10	0,0582	1,98	0,0589	0,76	0,0589	0,93
5	0,14945	0,1503	0,55	0,1543	3,23	0,1536	2,79	0,1535	2,72
5	0,12810	0,1083	15,45	0,1121	12,51	0,1119	12,60	0,1119	12,67
5	0,07168	0,0780	8,88	0,0795	10,93	0,0797	11,20	0,0796	11,08
5	0,06817	0,0669	1,91	0,0674	1,10	0,0676	0,80	0,0675	0,92
5	0,05941	0,0647	8,98	0,0651	9,55	0,0652	9,83	0,0652	9,70
5	0,05941	0,0633	6,46	0,0635	6,91	0,0637	7,24	0,0636	7,11
65	0,05415	0,0616	13,73	0,0617	13,91	0,0618	14,20	0,0618	14,06
5	0,05590	0,0588	5,18	0,0587	5,00	0,0588	5,27	0,0588	5,14
5	0,04890	0,0570	16,45	0,0567	15,97	0,0568	16,26	0,0568	16,11
Error Promedio			11,83		11,81		11,92		11,89

Gráfica 76. Comparación Datos Teórico vs Datos experimentales con desviación estándar y concentración en canal rectangular 10 cm.



- Pendiente crítica en canal rectangular abierto 5 cm de base.

Gráfica 77. Pendiente crítica experimental vs concentración de mezcla para canal rectangular base 5cm



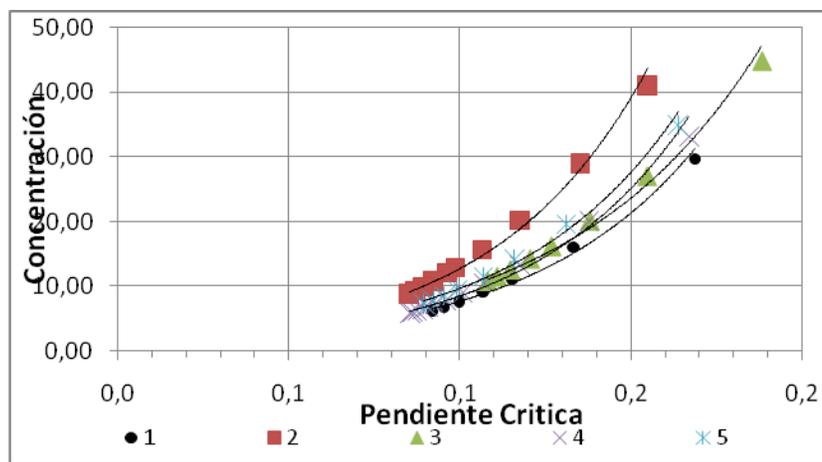
[62] $S_{CD} = 0,07089 * \sigma^{-0,6131} * C^{0,3866}$

[63] $S_{CD} = 0,06116 * \sigma^{-0,5202} * C^{0,4633} * C'd^{-0,1638}$

[64] $S_{CD} = 0,02834 * \sigma^{-0,4503} * C^{0,4842} * d^{*0,1796}$

[65] $S_{CD} = 0,02409 * \sigma^{0,4394} * C^{0,4851} * Cd^{0,0442} * D^{*0,2193}$

Gráfica 78. Pendiente crítica vs concentración de mezcla ajustada por regresión lineal con ecuación No. [42] en canal rectangular 5 cm.



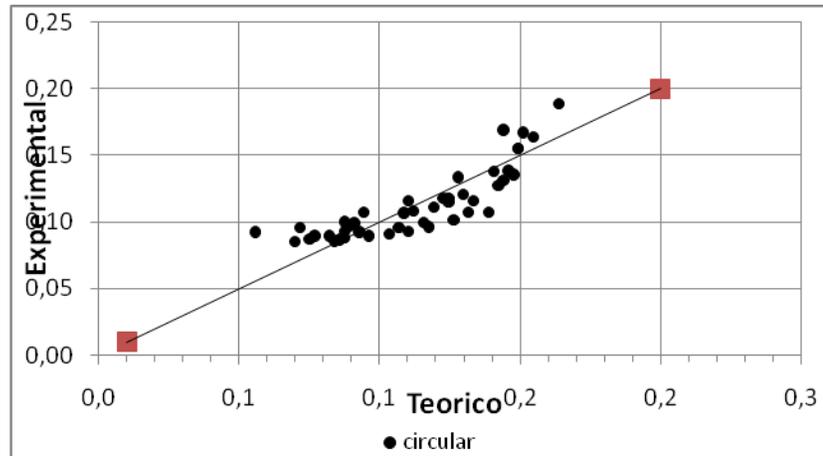
Cuadro 47. Datos experimentales para pendiente crítica, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas en canal rectangular de base 5 cm.

ARENA TIPO	SCD	SCD exp.	Error	SCD exp. C'd	Error	SCD exp. D* ¹	Error	SCD exp. sg Cd D* ¹	Error
1	0,14410208	0,1686	17,03	0,2474	71,69	0,17471	21,24	0,1740	20,77
1	0,12810285	0,1332	3,95	0,1817	41,86	0,13747	7,32	0,1372	7,14
1	0,11040093	0,1154	4,53	0,1489	34,86	0,11699	5,97	0,1169	5,92
1	0,09452775	0,1067	12,90	0,1333	41,03	0,10681	12,99	0,1068	12,98
1	0,08748859	0,0998	14,06	0,1212	38,49	0,09868	12,79	0,0987	12,81
1	0,07168083	0,0955	33,21	0,1138	58,69	0,09361	30,59	0,0936	30,64
1	0,05590863	0,0922	64,84	0,1081	93,39	0,08972	60,48	0,0898	60,56
2	0,14945087	0,1548	3,58	0,2154	44,13	0,15273	2,20	0,1540	3,06
2	0,14766703	0,1352	8,44	0,1912	29,46	0,13739	6,96	0,1376	6,85
2	0,12455648	0,1175	5,65	0,1614	29,62	0,11956	4,01	0,1195	4,07
2	0,10863467	0,1066	1,89	0,1420	30,75	0,10758	0,97	0,1075	1,06
2	0,09100705	0,0988	8,52	0,1281	40,77	0,09876	8,52	0,0987	8,41
2	0,08924755	0,0963	7,87	0,1237	38,64	0,09596	7,52	0,0959	7,41
2	0,08748859	0,0923	5,50	0,1168	33,47	0,09145	4,53	0,0913	4,41
2	0,07694574	0,0892	15,95	0,1114	44,74	0,08790	14,24	0,0878	14,12
2	0,07519031	0,0870	15,70	0,1075	42,99	0,08535	13,51	0,0853	13,38
2	0,06992675	0,0851	21,68	0,1042	49,06	0,08316	18,92	0,0831	18,79
3	0,16375614	0,1882	14,94	0,2417	47,59	0,17128	4,59	0,1738	6,13
3	0,14945087	0,1547	3,52	0,2081	39,27	0,14782	1,09	0,1477	1,18

Continuación cuadro 47

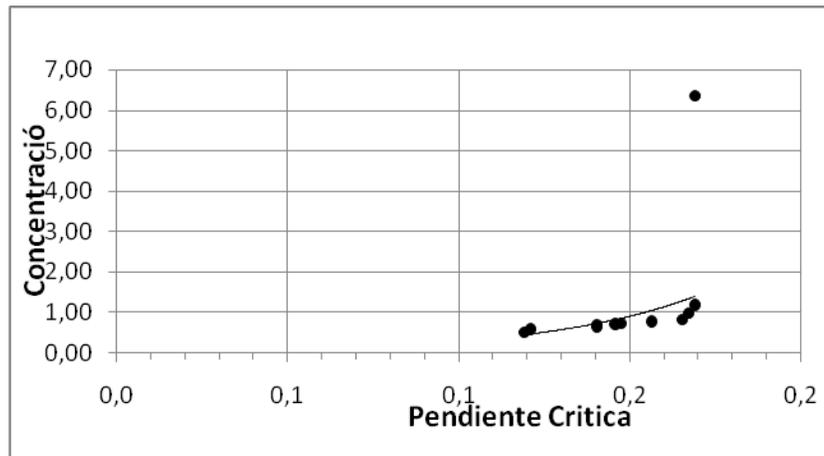
3	0,1458841	0,1380	5,38	0,1817	24,52	0,13190	9,59	0,1315	9,85
3	0,14232095	0,1268	10,89	0,1629	14,46	0,12046	15,36	0,1200	15,66
3	0,12987721	0,1206	7,14	0,1524	17,32	0,11394	12,27	0,1135	12,61
3	0,12455648	0,1149	7,78	0,1427	14,55	0,10785	13,41	0,1074	13,76
3	0,11924268	0,1110	6,91	0,1362	14,19	0,10372	13,02	0,1033	13,37
3	0,11216788	0,1082	3,52	0,1315	17,24	0,10074	10,19	0,1003	10,56
4	0,15123565	0,1670	10,42	0,2520	66,63	0,17747	17,35	0,1770	17,02
4	0,14054071	0,1377	2,05	0,1973	40,42	0,14777	5,14	0,1477	5,12
4	0,12278446	0,1173	4,43	0,1585	29,07	0,12423	1,18	0,1244	1,34
4	0,13876135	0,1071	22,79	0,1394	0,48	0,11198	19,30	0,1123	19,10
4	0,12632927	0,1009	20,13	0,1281	1,38	0,10445	17,32	0,1047	17,08
4	0,1174729	0,0960	18,28	0,1193	1,56	0,09852	16,14	0,0988	15,87
4	0,11040093	0,0927	16,04	0,1135	2,79	0,09451	14,39	0,0948	14,10
4	0,10333986	0,0906	12,29	0,1099	6,34	0,09202	10,95	0,0923	10,64
4	0,09628897	0,0891	7,44	0,1073	11,39	0,09017	6,36	0,0905	6,03
4	0,08748859	0,0875	0,02	0,1045	19,42	0,08822	0,83	0,0885	1,19
4	0,08573017	0,0863	0,65	0,1024	19,45	0,08675	1,19	0,0871	1,56
4	0,08397227	0,0854	1,69	0,1009	20,15	0,08570	2,05	0,0860	2,43
5	0,15480805	0,1638	5,80	0,2423	56,51	0,16935	9,40	0,1690	9,17
5	0,14410208	0,1311	9,03	0,1846	28,13	0,13725	4,75	0,1370	4,91
5	0,13342837	0,1158	13,21	0,1561	16,96	0,11995	10,10	0,1199	10,17
5	0,13165239	0,1068	18,89	0,1394	5,90	0,10943	16,88	0,1094	16,90
5	0,11570385	0,0991	14,35	0,1255	8,50	0,10040	13,23	0,1004	13,21
5	0,10686908	0,0954	10,76	0,1189	11,27	0,09599	10,18	0,0960	10,15
5	0,09276712	0,0920	0,80	0,1130	21,85	0,09204	0,79	0,0921	0,75
5	0,0822149	0,0893	8,64	0,1083	31,78	0,08884	8,06	0,0889	8,12
Error Promedio			11,18		10,89		11,06		11,12

Gráfica 79. Comparación Datos Teórico vs Datos experimentales con desviación estándar y concentración en canal rectangular 5 cm.



- Pendiente crítica en canales triangulares abiertos.

Gráfica 80. Pendiente crítica experimental vs concentración de mezcla para canal triangular



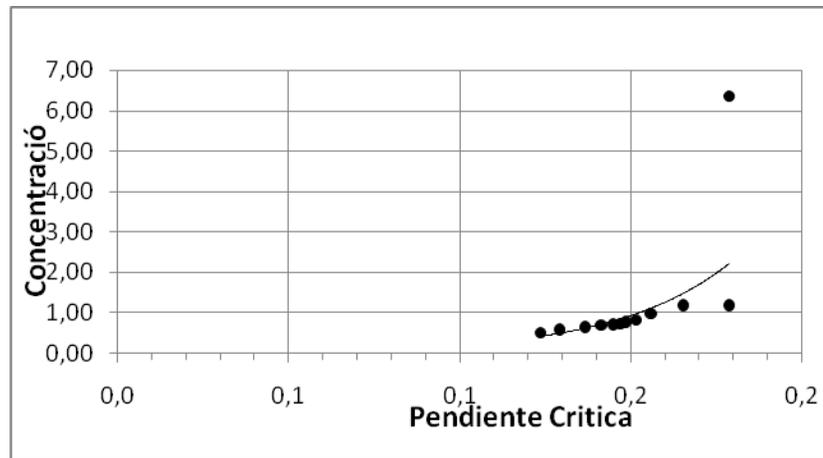
[66] $S_{CD} = 10^{35,2581} * \sigma^{-63,9843} * C^{0,2994} * d^{*1-9,0824}$

[67] $S_{CD} = 10^{35,6424} * \sigma^{-47,2748} * C^{0,8252} * Cd^{*1-60,9581}$

[68] $S_{CD} = 10^{35,2581} * \sigma^{-63,9843} * C^{0,2994} * d^{*1-9,0824}$

[69] $S_{CD} = 0,0097 * \sigma^{15,8013} * C^{0,7727} * Cd^{-43,874} * D^{*16,5985}$

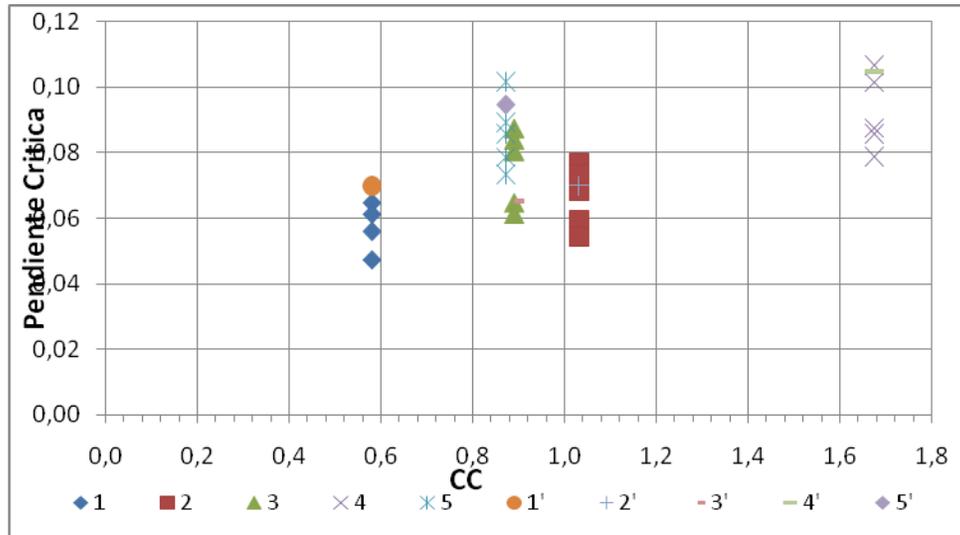
Gráfica 81. Pendiente crítica vs concentración de mezcla ajustada por regresión lineal con la ecuación No. [66] en canal triangular



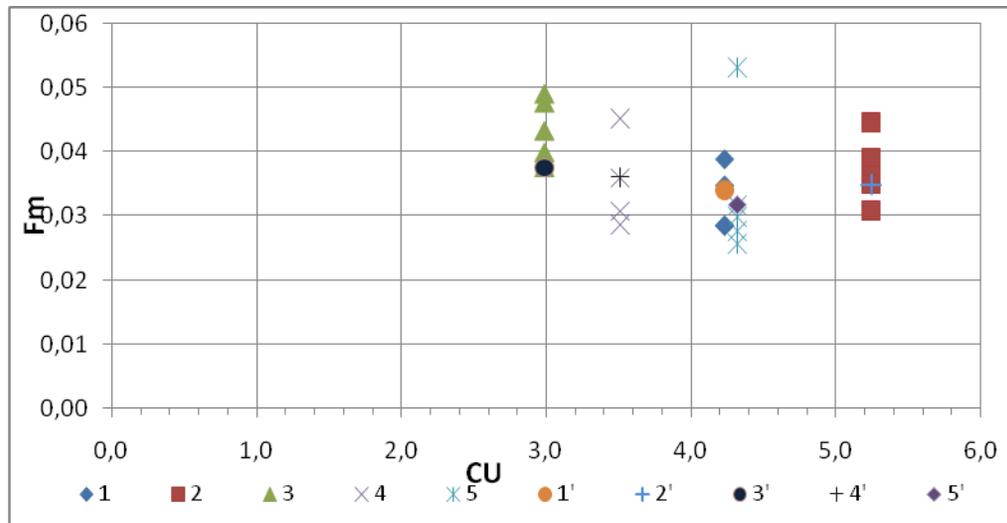
Cuadro 48. Datos experimentales para pendiente crítica, coeficiente de arrastre de partículas y diámetro adimensional de partículas en canal triangular

ARENA TIPO	SCD	SCD exp.	Error	SCD exp. C'd	error	SCD exp. D*'	Error	SCD exp. Sg cd	Error
2	0,1691	0,1789	5,76	0,1757	3,91	0,180	6,75	0,1762	4,17
2	0,1691	0,1789	5,76	0,1757	3,76	0,180	6,75	0,1762	4,17
2	0,1691	0,1656	2,10	0,1620	4,37	0,167	1,09	0,1625	3,91
2	0,1673	0,1559	6,81	0,1577	6,08	0,156	6,53	0,1576	5,84
2	0,1655	0,1515	8,47	0,1549	6,86	0,151	8,40	0,1546	6,64
2	0,1565	0,1487	5,06	0,1528	2,46	0,148	5,10	0,1524	2,70
2	0,1476	0,1470	0,49	0,1515	2,50	0,146	0,59	0,1509	2,22
2	0,1458	0,1448	0,72	0,1497	2,53	0,144	0,89	0,1491	2,22
2	0,1405	0,1413	0,54	0,1465	4,05	0,140	0,30	0,1459	3,80
2	0,1405	0,1366	2,80	0,1418	0,86	0,136	3,06	0,1412	0,45
2	0,1210	0,1293	6,87	0,1244	2,73	0,131	8,37	0,1250	3,33
2	0,1192	0,1237	3,70	0,1178	1,17	0,125	5,36	0,1186	0,56
Error Promedio			4,09		3,75		4,43		3,33

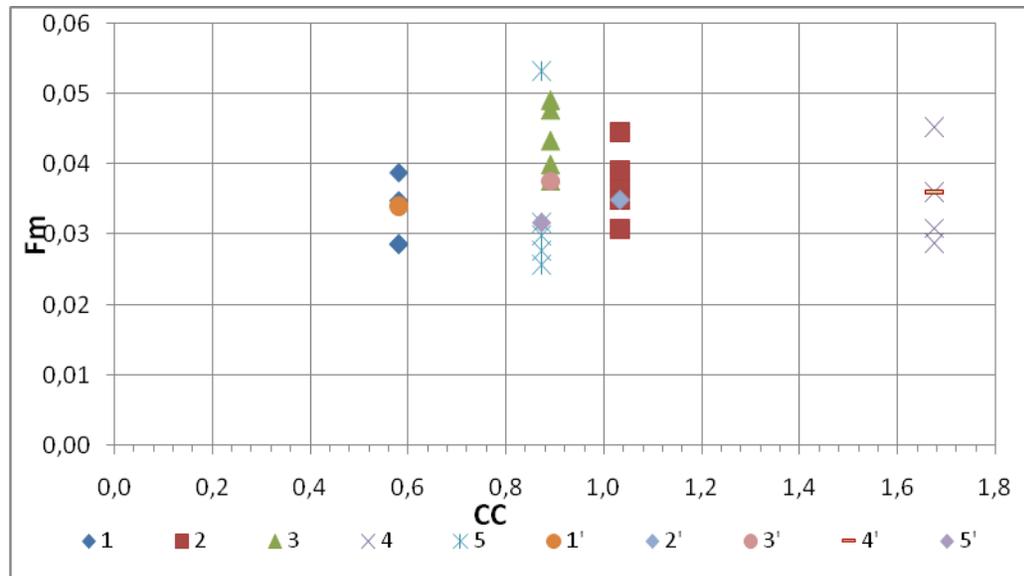
Gráfica 84. Pendiente crítica vs coeficiente de curvatura en canales cículares



Gráfica 85. Coeficiente de uniformidad vs factor de fricción de la mezcla en canales cículares

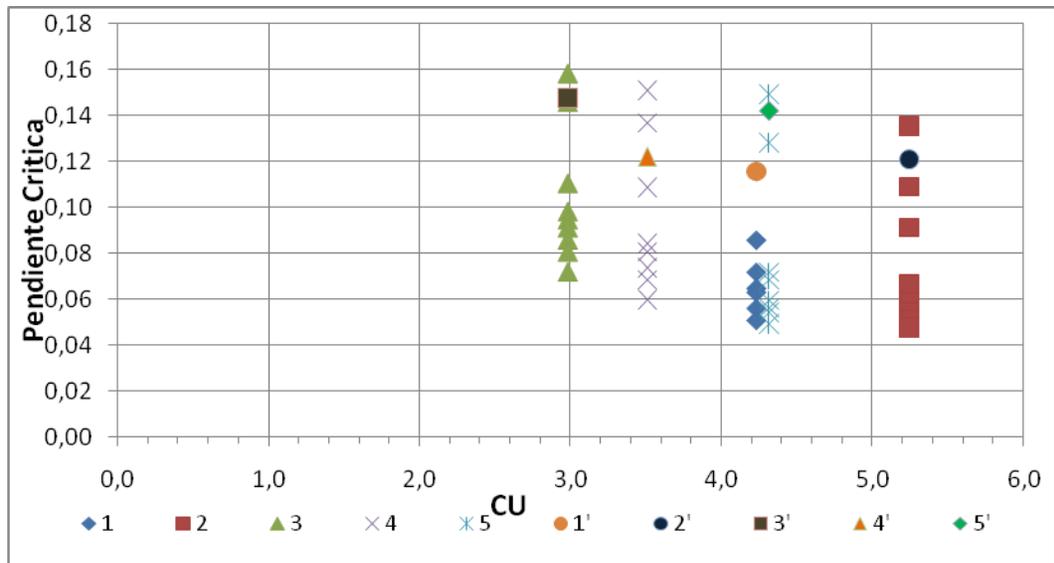


Gráfica 86. Coeficiente de curvatura del sedimento vs factor de fricción de la mezcla en canales circulares

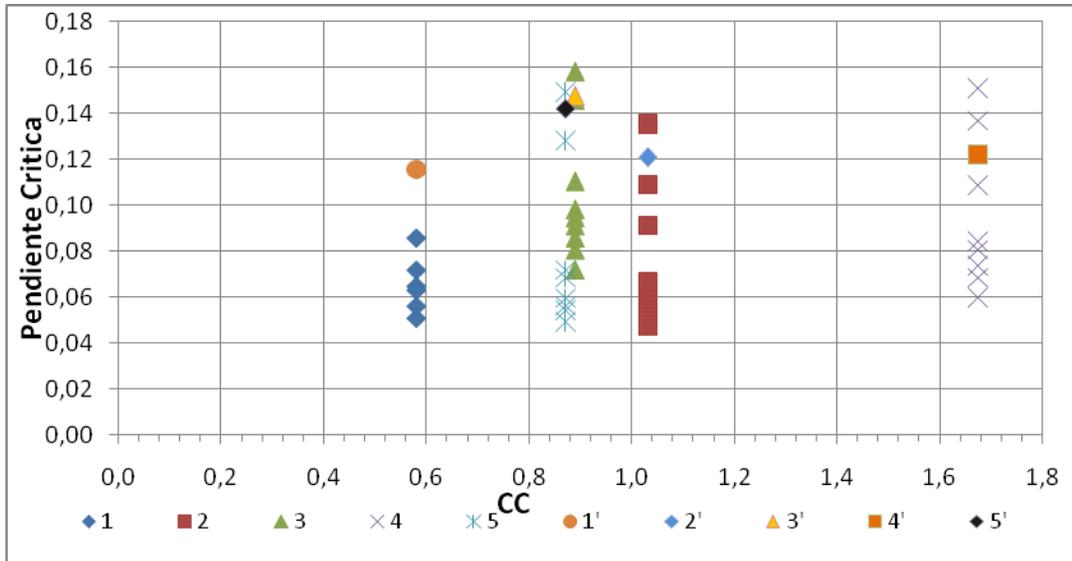


- Canal rectangular 10 cm de espesor.

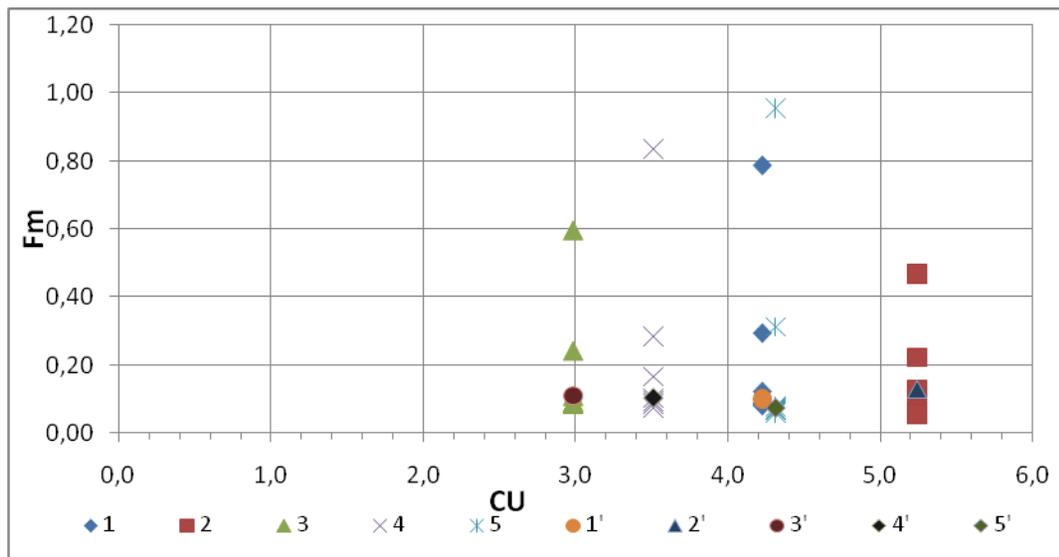
Gráfica 87. Pendiente crítica vs coeficiente de uniformidad en canales rectangulares 10 cm de espesor



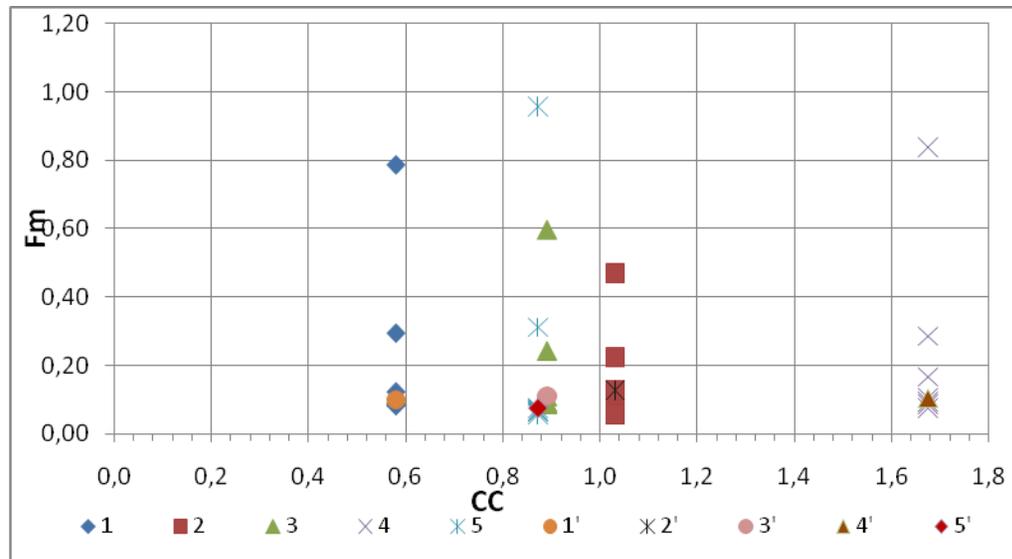
Gráfica 88. Pendiente crítica vs coeficiente de curvatura en canales rectangulares 10 cm de espesor



Gráfica 89. Coeficiente de uniformidad vs factor de fricción de la mezcla en canales rectangulares 10 cm de espesor

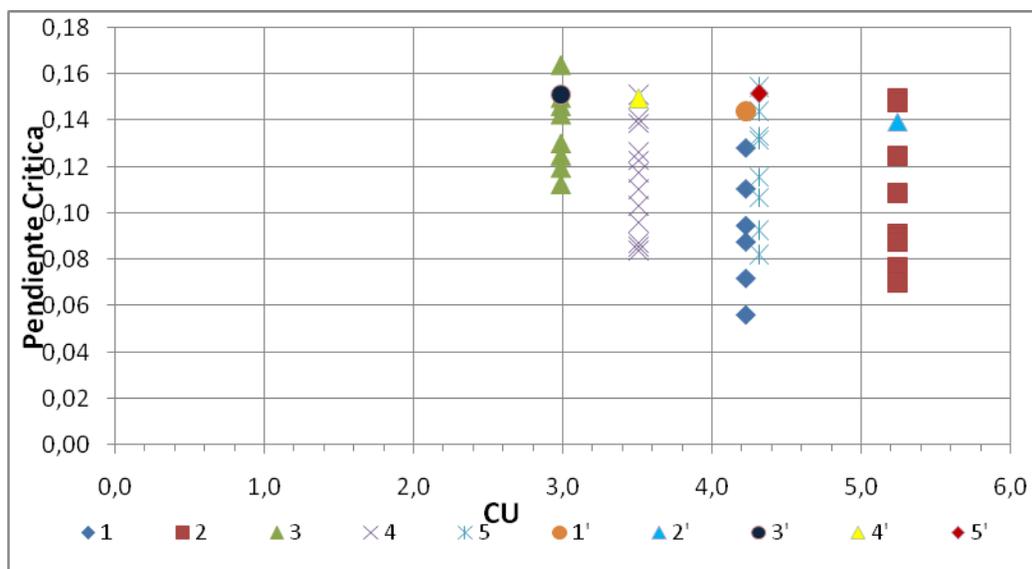


Gráfica 90. Coeficiente de curvatura del sedimento vs factor de fricción de la mezcla en canales rectangulares 10 cm de espesor

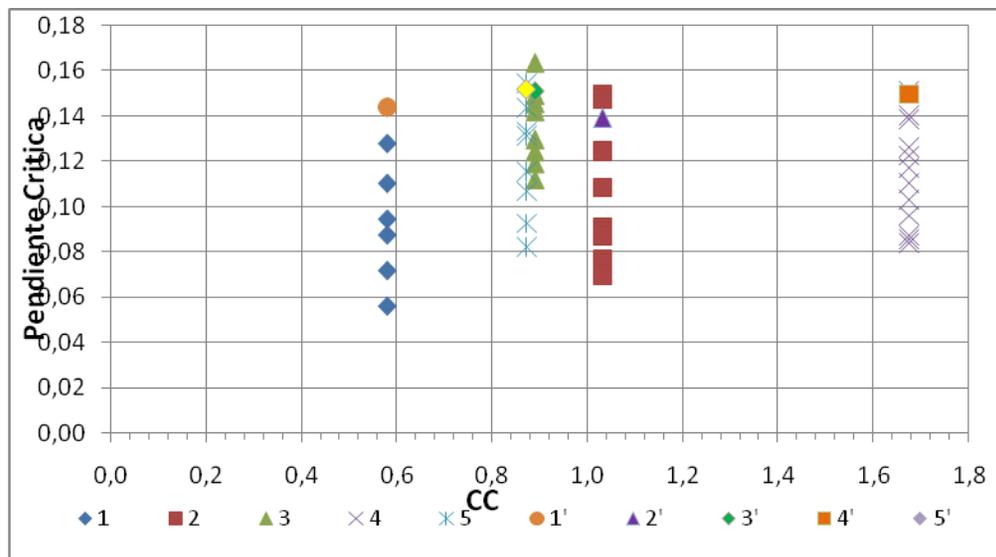


- Canal rectangular 5 cm de espesor.

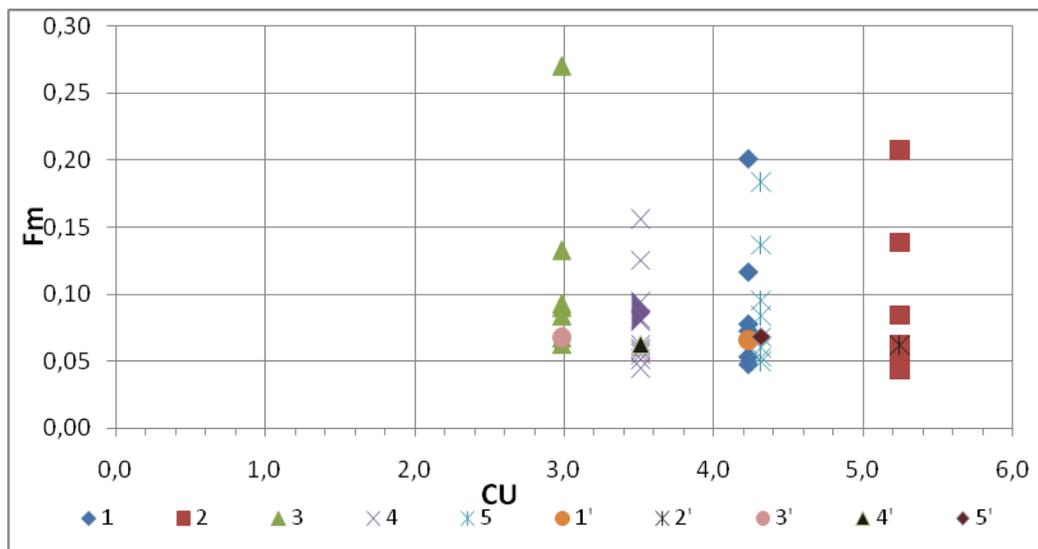
Gráfica 91. Pendiente crítica vs coeficiente de uniformidad en canales rectangulares 5 de espesor



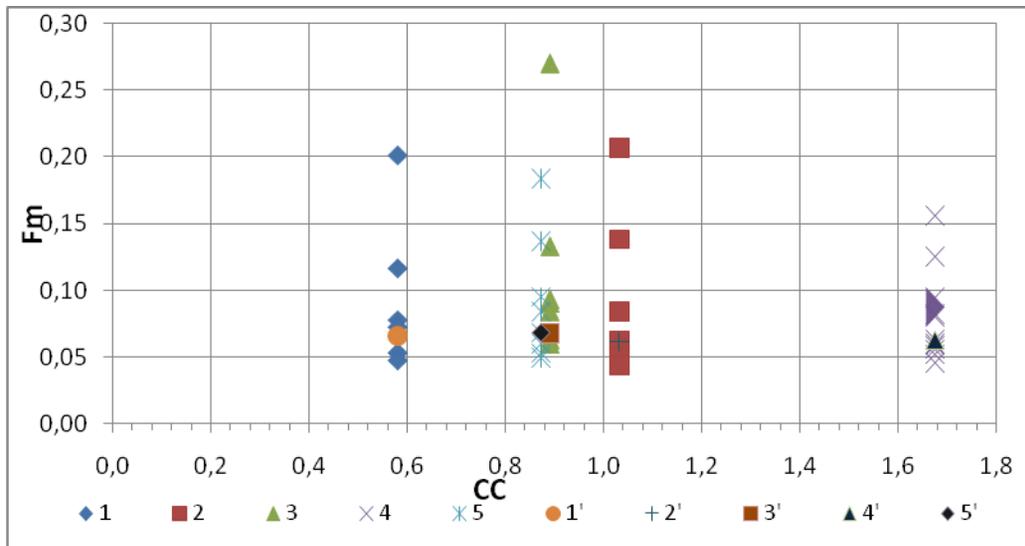
Gráfica 92. Pendiente crítica vs coeficiente de curvatura en canales rectangulares 5 de espesor



Gráfica 93. Coeficiente de uniformidad vs factor de fricción de la mezcla en canales rectangulares 5 cm de espesor



Gráfica 94. Coeficiente de curvatura del sedimento vs factor de fricción de la mezcla en canales rectangulares 5 cm de espesor.



7. CONCLUSIONES

Para resolver el problema de pérdida de energía en mezclas sedimentables en canales abiertos se plantearon relaciones funcionales adimensionales entre las variables que intervienen en el problema, para encontrar estas relaciones se utilizó la regresión lineal múltiple variable este método nos permite analizar varias variables para incluirlas en una misma ecuación.

Con los resultados obtenidos de los diferentes ensayos se determinó la pérdida de energía experimental ya que con estos se simula los fenómenos de forma adecuada. Esto debido a que se incluyeron variables muy importantes como son: la velocidad de la mezcla, la rugosidad de la mezcla y conducto, el factor de fricción, el tipo de sección del canal, la viscosidad cinemática de la mezcla y la pendiente.

Una parte importante que hay que tener en cuenta es la rugosidad del canal y en especial los cambios de rugosidad o cambios de material a la hora de realizar los ensayos ya que esto genera un error muy grande en la toma de mediciones en especial en la pendiente.

El cambio de materiales en la construcción de los canales produce cambios de rugosidad en la superficie por la cual se producen resultados y lecturas erradas de la prueba ejecutada.

Comparando el valor de la pendiente crítica de depósito experimental con la pendiente teórica obtenida partiendo de la hipótesis de que la ecuación de Manning puede ser adaptada al flujo de una mezcla Sc_D . Se obtiene un error del 1% lo cual indica que estos dos valores se los puede considerar como que la ecuación propuesta en el desarrollo de esta investigación es correcta y muy precisa.

Se afirmó que uno de los factores de mayor relevancia en esta investigación es la forma transversal del canal ya que la experiencia arroja que el canal circular es el que tiene un mejor desempeño frente a los otros canales involucrados en este estudio, adicionalmente asegurar que la sección triangular no es recomendable en el transporte de sólidos debido a la poca capacidad de esta sección en el movimiento de partículas suspendidas en una mezcla heterogénea debido principalmente a su forma.

Al analizar las gráficas de efecto de la granulometría sobre la pendiente crítica de depósito y el factor de fricción de la mezcla se concluyó que las condiciones granulométricas de los materiales no tienen mucha incidencia en la velocidad de depósito y la pérdida de carga en el transporte de mezclas heterogéneas en canales abiertos por el contrario se afirma que la variación en la pendiente de depósito está directamente relacionada con la concentración y la gravedad

especifica de los sólidos dentro de las mezcla transportadas dichos fenómenos estudiados en el transcurso de esta investigación.

8. RECOMENDACIONES

Construir canales y elementos que se puedan adicionar al equipo de laboratorio para el transporte de mezclas se deben usar materiales de excelente calidad en lo posible certificados.

Ampliar el conocimiento sobre el tema se recomienda investigar sobre las consecuencias de la gravedad específica de los materiales sobre los fenómenos de los cuales trata esta investigación.

Se recomienda utilizar equipos de protección personal como casco, gafas protectoras, tapones auditivos, delantal y en lo posible usar calzado dieléctrico durante el manejo del equipo de laboratorio para el transporte de mezclas; además Se debe usar las herramientas adecuadas para la manipulación del equipo debido a que los materiales de los cuales están hechos los canales son delicados.

9. BIBLIOGRAFÍA

ABULNAGA, Baha E., P.E. "Slurry Systems Handbook". McGraw Hill. 2002.

CHENG. N. S. "Simplified Settling Velocity Formula For Sediment Particle". Journal of Hydraulic Engineering. Vol 123. No 2. 1997a.

----- . "Effect of Concentration on Settling Velocity of Sediment Particles". Journal of Hydraulic Engineering. Vol 123. No 8. 1997b.

DOMÍNGUEZ, B., R. Souyris, and A. Nazer. (1996). Deposit velocity of slurry flow in open channels. Paper read at the symposium, Slurry Handling and Pipeline Transport. Thirteenth annual International Conference of the British Hydromechanic Research Association, Johannesburg, South Africa.

GÓMEZ, Z. Hernán. J. "Hidrotransporte de sedimentos en tubos horizontales a presión: Estudio de la velocidad crítica de depositación". Trabajo de investigación para optar el título de Magíster en Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Oct 2002.

----- . "Velocidad Crítica de Depositación en el Transporte de Sedimentos en Tubos Horizontales a Presión", XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana: Octubre de 2002.

----- . "Velocidad Crítica de Depositación en el Transporte de Sedimentos en Canales Abiertos", XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana: Octubre de 2002.

----- . "Efecto de la Concentración de Partículas de Sedimentos Naturales en la Velocidad Mínima de Transporte en Canales Abiertos". XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica". São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil, octubre 18 al 22 de 2004.

GRAF, H. W. "Hydraulics of Sediment Transport". McGraw.Hill. New York. 1971. [ISBN 07-023900-2], 1972. 513 p.

YANG, Chih Ted. "Sediment Transport: Theory and Practice". McGraw.Hill. Series in Water Resources and Environmental Engineering. New York. 1996.