

**EFFECTO DE LA CURVATURA DE UN CANAL ABIERTO SOBRE LA
VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

**DIEGO FERNANDO AGUIRRE ORTIZ
MARCELO MARTÍNEZ MEDINA**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2008**

**EFFECTO DE LA CURVATURA DE UN CANAL ABIERTO SOBRE LA
VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS**

**DIEGO FERNANDO AGUIRRE ORTIZ
MARCELO MARTÍNEZ MEDINA**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

Director

ING. HERNAN JAVIER GOMEZ ZAMBRANO. M.Sc.

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2008**

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en el presente trabajo son responsabilidad exclusiva de sus autores.

Artículo 1° del acuerdo N° 324 de octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, Agosto de 2008

DEDICATORIA

Al evocar todos estos años que han transcurrido a lo largo de esta interminable carrera de ingeniería, solo me queda agradecer a todos los que han confiado en mí y han puesto su granito de arena para llevar a cabo y culminar satisfactoriamente este gran proyecto.

A mi familia, a mi novia y a mis amigos, mil gracias por acompañarme a lo largo de todos estos años de arduo trabajo y sacrificio.

Diego Fernando Aguirre Ortiz

DEDICATORIA

A mis padres, a mis hermanos y a mi novia Korin; por su apoyo, sus consejos y su interminable amor; sin ustedes este logro no sería tan valioso como lo es hoy.

Gracias por estar conmigo en todo momento.

Marcelo Martínez Medina

AGRADECIMIENTOS

A: Roberto García, Gustavo Ponce y a nuestro director; Ing. Hernán Javier Gómez, nuestro agradecimiento profundo por su asesoría y colaboración a lo largo de este proyecto de investigación, con lo que se ha alcanzado los objetivos propuestos.

Diego Fernando Aguirre Ortiz

Marcelo Martínez Medina

CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| GLOSARIO..... | 17 |
| RESUMEN | 18 |
| ABSTRACT | 18 |
| INTRODUCCION..... | 19 |
| 1. REVISION Y ANALISIS DEL ESTADO DEL ARTE..... | 21 |
| 1.1. ANALISIS DE LA INFORMACION RECOLECTADA..... | 21 |
| 1.1.1. <i>Transporte de sedimentos por corrientes y tipos de lecho.....</i> | <i>25</i> |
| 1.1.2. <i>Flujo secundario.....</i> | <i>26</i> |
| 1.1.3. <i>Sobre elevación.....</i> | <i>28</i> |
| 1.1.4. <i>Flujo subcrítico alrededor de la curvatura de un canal.....</i> | <i>30</i> |
| 1.1.5. <i>Flujo supercrítico alrededor de la curvatura de un canal.....</i> | <i>32</i> |
| 1.1.6. <i>Pérdida de energía.....</i> | <i>33</i> |
| 1.1.7. <i>La ecuación de Manning.....</i> | <i>34</i> |
| 1.1.8. <i>El Número de Dean.....</i> | <i>35</i> |
| 1.1.9. <i>Numero de Froude.....</i> | <i>36</i> |
| 1.1.10. <i>Numero de Reynolds.....</i> | <i>36</i> |
| 2. DISEÑO DEL MODELO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO..... | 38 |
| 2.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO..... | 39 |
| 2.2. DISEÑO DEL MODELO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO..... | 41 |
| 2.2.1. <i>Diseño del dosificador de sedimentos.....</i> | <i>42</i> |
| 3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO | 44 |
| 3.1. MATERIALES, HERRAMIENTA Y EQUIPO UTILIZADO..... | 47 |
| 3.1.1. <i>Materiales utilizados.....</i> | <i>47</i> |
| 3.1.2. <i>Herramienta utilizada.....</i> | <i>47</i> |
| 3.1.3. <i>Equipo utilizado.....</i> | <i>48</i> |
| 4. CALIBRACION DE EQUIPOS Y ENSAYOS DE SUELOS | 49 |
| 4.1. CALIBRACION DEL ORIFICIO..... | 49 |
| 4.2. ENSAYOS DE SUELOS..... | 52 |
| 4.2.1. <i>Ensayos de gravedad específica.....</i> | <i>52</i> |
| 4.2.2. <i>Ensayos de granulometría.....</i> | <i>54</i> |
| 4.3. CALIBRACION DEL DOSIFICADOR DE SEDIMENTOS..... | 61 |
| 4.4. ESTIMACION DEL NÚMERO DE MANNING “N” PARA FLUJO DE AGUA..... | 65 |
| 5. TOMA DE MEDICIONES..... | 68 |

| | |
|---|------------|
| 5.1. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO | 68 |
| 5.2. DESCRIPCIÓN DE LA TOMA DE MEDICIONES | 69 |
| 6. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS..... | 84 |
| 6.1. PARÁMETROS ADIMENSIONALES A CALCULAR Y ECUACIONES UTILIZADAS .. | 84 |
| 6.1.1. Número de Froude Densimétrico (F_L) | 85 |
| 6.1.2. Número de Dean, (De) | 85 |
| 6.1.3. Coeficiente de Arrastre Afectado por la Concentración de Partículas ($C'd$) | 86 |
| 6.1.4. Número de Reynolds de las partículas afectadas por la mezcla (R_m) | 86 |
| 6.1.5. Parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla (d^*) | 86 |
| 6.1.6. Coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla (Δ') | 87 |
| 6.1.7. Concentración de la mezcla (C) | 87 |
| 6.2. PARÁMETROS DIMENSIONALES A CALCULAR Y ECUACIONES UTILIZADAS | 89 |
| 6.2.1. Densidad del agua (ρ_w) | 89 |
| 6.2.2. Viscosidad cinemática del agua (ν_w) | 89 |
| 6.2.3. Viscosidad dinámica del agua (μ_w) | 89 |
| 6.2.4. Densidad de la mezcla fluido-sólido (ρ_m) | 90 |
| 6.2.5. Viscosidad cinemática de la mezcla (ν_m) | 90 |
| 6.2.6. Viscosidad dinámica de la mezcla (μ_m) | 90 |
| 6.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL FLUJO | 91 |
| 6.3.1. Caudal líquido (Q_l) | 92 |
| 6.3.2. Caudal de la mezcla (Q_m) | 92 |
| 6.3.3. Área del ensayo (A_e) | 92 |
| 6.3.4. Velocidad de depósito (V_d) | 92 |
| 6.3.5. Perímetro Mojado (P_M) | 93 |
| 6.3.6. Radio Hidráulico (R_H) | 93 |
| 6.3.7. Diámetro Equivalente (D_{eq}) | 93 |
| 6.4. PROCESAMIENTO DE DATOS | 94 |
| 6.4.1. Velocidad crítica de depósito | 95 |
| 6.4.2. Comparación entre canales rectos con sección rectangular y canales curvos con sección rectangular | 101 |
| 6.4.3. Cálculo de la pérdida de energía de mezclas sedimentables en canales curvos .. | 104 |
| 6.4.4. Cálculo de la pérdida de energía de mezclas sedimentables en canales curvos para condiciones de depósito | 110 |
| 6.4.5. Cálculo de la sobre elevación de la lámina del flujo en canales curvos | 114 |
| 6.5. METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA CANALES CURVOS CON SECCIÓN RECTANGULAR | 123 |
| 7. CONCLUSIONES | 131 |
| 8. RECOMENDACIONES | 132 |
| 9. BIBLIOGRAFÍA | 133 |
| ANEXOS | 134 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabla 2-1. Diseño del Canal Curvo</i> | <i>42</i> |
| <i>Tabla 4-1. Resultados de la Calibración del Orificio</i> | <i>50</i> |
| <i>Tabla 4-2. Resultados Gravedad específica</i> | <i>54</i> |
| <i>Tabla 4-3. Análisis granulométrico para Sedimento 1</i> | <i>55</i> |
| <i>Tabla 4-4. Análisis granulométrico para Sedimento 2</i> | <i>56</i> |
| <i>Tabla 4-5. Análisis granulométrico para Sedimento 3</i> | <i>56</i> |
| <i>Tabla 4-6. Análisis granulométrico para Sedimento 4</i> | <i>57</i> |
| <i>Tabla 4-7. Análisis granulométrico para Sedimento 5</i> | <i>57</i> |
| <i>Tabla 4-8. Cálculo del d50</i> | <i>61</i> |
| <i>Tabla 4-9. Sedimento 1</i> | <i>63</i> |
| <i>Tabla 4-10. Sedimento 2</i> | <i>63</i> |
| <i>Tabla 4-11. Sedimento 3</i> | <i>63</i> |
| <i>Tabla 4-12. Sedimento 4</i> | <i>64</i> |
| <i>Tabla 4-13. Sedimento 5</i> | <i>64</i> |
| <i>Tabla 4-14. Estimación de número n de Manning.</i> | <i>66</i> |
| <i>Tabla 5-1. Sedimento 1, Apertura 1</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla 5-2. Sedimento 1, Apertura 4</i> | <i>71</i> |
| <i>Tabla 5-3. Sedimento 1, Apertura 6</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla 5-4. Sedimento 1, Apertura 8</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla 5-5. Sedimento 1, Apertura 11</i> | <i>72</i> |
| <i>Tabla 5-6. Sedimento 2, Apertura 1</i> | <i>73</i> |
| <i>Tabla 5-7. Sedimento 2, Apertura 4</i> | <i>73</i> |
| <i>Tabla 5-8. Sedimento 2, Apertura 8</i> | <i>73</i> |
| <i>Tabla 5-9. Sedimento 2, Apertura 11</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabla 5-10. Sedimento 2, Apertura 13</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabla 5-11. Sedimento 3, Apertura 12</i> | <i>74</i> |
| <i>Tabla 5-12. Sedimento 3, Apertura 13</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla 5-13. Sedimento 3, Apertura 14</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla 5-14. Sedimento 3, Apertura 15</i> | <i>75</i> |
| <i>Tabla 5-15. Sedimento 3, Apertura 17</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla 5-16. Sedimento 4, Apertura 4</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla 5-17. Sedimento 4, Apertura 6</i> | <i>76</i> |
| <i>Tabla 5-18. Sedimento 4, Apertura 8</i> | <i>77</i> |
| <i>Tabla 5-19. Sedimento 4, Apertura 11</i> | <i>77</i> |
| <i>Tabla 5-20. Sedimento 4, Apertura 12</i> | <i>77</i> |
| <i>Tabla 5-21. Sedimento 5, Apertura 6</i> | <i>78</i> |
| <i>Tabla 5-22. Sedimento 5, Apertura 8</i> | <i>78</i> |
| <i>Tabla 5-23. Sedimento 5, Apertura 10</i> | <i>78</i> |
| <i>Tabla 5-24. Sedimento 5, Apertura 11</i> | <i>79</i> |
| <i>Tabla 5-25. Sedimento 5, Apertura 13</i> | <i>79</i> |
| <i>Tabla 5-26. Promedios de datos obtenidos experimentalmente</i> | <i>80</i> |

| | |
|--|-----|
| <i>Tabla 5-27. Datos Experimentales para Pérdida de Energía</i> | 82 |
| <i>Tabla 6-1. Parámetros adimensionales</i> | 88 |
| <i>Tabla 6-2. Parámetros dimensionales</i> | 91 |
| <i>Tabla 6-3. Parámetros generales del flujo</i> | 94 |
| <i>Tabla 6-4. Parámetros para el cálculo de velocidad crítica</i> | 96 |
| <i>Tabla 6-5. Mínimo Error 1</i> | 98 |
| <i>Tabla 6-6. Mínimo Error 2</i> | 98 |
| <i>Tabla 6-7. Mínimo Error 3</i> | 99 |
| <i>Tabla 6-8. Mínimo Error 4</i> | 99 |
| <i>Tabla 6-9. Resumen del proceso de mínimo error para F_L</i> | 100 |
| <i>Tabla 6-10. Relación V_{dc}/V_{dr} y Dean</i> | 102 |
| <i>Tabla 6-11. Parámetros para el cálculo de pérdida de energía</i> | 106 |
| <i>Tabla 6-12. Parámetros para el cálculo de pérdida de energía para condiciones de depósito</i> | 110 |
| <i>Tabla 6-13. Tratamiento de sobre elevación, Segunda ley de Newton</i> | 115 |
| <i>Tabla 6-14. Tratamiento de sobre elevación, Grashof</i> | 115 |
| <i>Tabla 6-15. Tratamiento de sobre elevación, Woodward</i> | 116 |
| <i>Tabla 6-16. Resumen de las tres metodologías para tratamiento de sobre elevación de la lámina de agua</i> | 116 |
| <i>Tabla 6-17. Parámetros para el cálculo de la sobre elevación</i> | 121 |
| <i>Tabla 9-1. Elementos Geométricos de la Sección del Canal</i> | 138 |
| <i>Tabla 9-2 Variación de y en función de S</i> | 139 |
| <i>Tabla 9-3 Variación de y en función de S</i> | 140 |
| <i>Tabla 9-4 Variación de y en función de S</i> | 141 |
| <i>Tabla 9-5 Variación de y en función de S</i> | 142 |
| <i>Tabla 9-6 Variación de y en función de S</i> | 143 |
| <i>Tabla 9-7 Variación de y en función de S</i> | 143 |

LISTA DE ECUACIONES

| | |
|---|-----------|
| <i>Ecuación 1-1. Numero de Reynolds.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Ecuación 1-2. Velocidad promedio.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Ecuación 1-3. Número de Dean.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Ecuación 1-4. Reynolds aproximado.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Ecuación 1-5. Relación entre radios de curvatura.....</i> | <i>22</i> |
| <i>Ecuación 1-6. Número de Dean Crítico.....</i> | <i>23</i> |
| <i>Ecuación 1-7. Descarga de sedimento en el fondo.....</i> | <i>24</i> |
| <i>Ecuación 1-8. Sobre elevación según leyes de Newton.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Ecuación 1-9. Sobre elevación según Grashof.....</i> | <i>29</i> |
| <i>Ecuación 1-10. Sobre elevación según Woodward.....</i> | <i>30</i> |
| <i>Ecuación 1-11. Inclinación de la lámina de agua.....</i> | <i>31</i> |
| <i>Ecuación 1-12. Angulo de olas en la entrada de curva.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Ecuación 1-13. Angulo central.....</i> | <i>32</i> |
| <i>Ecuación 1-14. Pérdida de energía según Manning.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Ecuación 1-15. Coeficiente de rugosidad n de Manning.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Ecuación 1-16. Ecuación de Manning.....</i> | <i>34</i> |
| <i>Ecuación 1-17. Numero de Dean.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Ecuación 1-18. Numero de Froude.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Ecuación 1-19. Numero de Reynolds.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Ecuación 1-20. Número de Reynolds.....</i> | <i>37</i> |
| <i>Ecuación 4-1. Caudal líquido en función de la altura de mercurio.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Ecuación 4-2. Diferencial de alturas en el manómetro de mercurio.....</i> | <i>51</i> |
| <i>Ecuación 4-3. Gravedad específica de los sedimentos.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Ecuación 4-4. Coeficiente de Uniformidad.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Ecuación 4-5. Tendencia para n_w vs y/R_H.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Ecuación 4-6. Ecuación para determinar n de Manning para flujo de agua.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Ecuación 6-1. Número de Froude Densimétrico.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Ecuación 6-2. Parámetro de Relación de Densidad de Sólidos y Densidad del Fluido.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Ecuación 6-3. Número de Dean.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Ecuación 6-4. Coeficiente de arrastre afectado por la concentración de partículas.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Ecuación 6-5. Número de Reynolds de las partículas afectadas por la mezcla.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Ecuación 6-6. Parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Ecuación 6-7. Coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Ecuación 6-8. Concentración de la mezcla.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Ecuación 6-9. Densidad del agua.....</i> | <i>89</i> |
| <i>Ecuación 6-10. Viscosidad cinemática del Agua.....</i> | <i>89</i> |
| <i>Ecuación 6-11. Viscosidad dinámica del agua.....</i> | <i>89</i> |
| <i>Ecuación 6-12. Densidad de la mezcla fluido-sólido.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Ecuación 6-13. Viscosidad cinemática de la mezcla.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Ecuación 6-14. Viscosidad dinámica de la mezcla.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Ecuación 6-15. Caudal de la mezcla.....</i> | <i>92</i> |

| | |
|--|------------|
| <i>Ecuación 6-16. Área del ensayo.....</i> | <i>92</i> |
| <i>Ecuación 6-17. Velocidad de depósito</i> | <i>92</i> |
| <i>Ecuación 6-18. Perímetro mojado</i> | <i>93</i> |
| <i>Ecuación 6-19. Radio Hidráulico</i> | <i>93</i> |
| <i>Ecuación 6-20. Diámetro equivalente.....</i> | <i>93</i> |
| <i>Ecuación 6-21. Parámetro Π_1 para determinación de velocidad crítica</i> | <i>95</i> |
| <i>Ecuación 6-22. Tendencia para F_L vs Π_1</i> | <i>97</i> |
| <i>Ecuación 6-23. Error promedio para el cálculo de F_L</i> | <i>98</i> |
| <i>Ecuación 6-24. Ecuación Empírica para F_L.....</i> | <i>101</i> |
| <i>Ecuación 6-25. Velocidad de depósito experimental para canales curvos con sección rectangular</i> | <i>101</i> |
| <i>Ecuación 6-26. Velocidad de depósito para canales rectos con sección rectangular</i> | <i>101</i> |
| <i>Ecuación 6-27. Tendencia para V_{dc}/V_{dr} vs De.....</i> | <i>103</i> |
| <i>Ecuación 6-28. Velocidad crítica de depósito en un canal curvo a partir de un canal recto</i> | <i>104</i> |
| <i>Ecuación 6-29. Pérdida de energía de la mezcla</i> | <i>104</i> |
| <i>Ecuación 6-30. Factor de fricción de la mezcla.....</i> | <i>104</i> |
| <i>Ecuación 6-31. Coeficiente n para los sedimentos</i> | <i>105</i> |
| <i>Ecuación 6-32. Factor de fricción de los sedimentos f_s.....</i> | <i>105</i> |
| <i>Ecuación 6-33. Parámetro Π_2 para determinación de pérdida de energía.....</i> | <i>105</i> |
| <i>Ecuación 6-34. Tendencia para f_s/f_w vs Π_2.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Ecuación 6-35. Ecuación empírica para la relación f_s/f_w.....</i> | <i>108</i> |
| <i>Ecuación 6-36. Factor de fricción de la Mezcla.....</i> | <i>108</i> |
| <i>Ecuación 6-37. Tendencia para n_s/n_w vs Π_2.....</i> | <i>109</i> |
| <i>Ecuación 6-38. Ecuación empírica para la relación n_s/n_w.....</i> | <i>109</i> |
| <i>Ecuación 6-39. Coeficiente n de la Mezcla</i> | <i>110</i> |
| <i>Ecuación 6-40 Tendencia para f_s/f_w vs Π_2 para condiciones de depósito</i> | <i>111</i> |
| <i>Ecuación 6-41. Ecuación empírica para la relación f_s/f_w para condiciones de depósito ..</i> | <i>112</i> |
| <i>Ecuación 6-42. Factor de fricción de la Mezcla para condiciones de depósito.....</i> | <i>112</i> |
| <i>Ecuación 6-43. Tendencia para n_s/n_w vs Π_2 para condiciones de depósito</i> | <i>113</i> |
| <i>Ecuación 6-44. Ecuación empírica para la relación n_s/n_w para condiciones de depósito</i> | <i>113</i> |
| <i>Ecuación 6-45. Coeficiente n de la Mezcla para condiciones de depósito.....</i> | <i>114</i> |
| <i>Ecuación 6-46. Ecuación de Sobre elevación para agua limpia.....</i> | <i>119</i> |
| <i>Ecuación 6-47. Sobre elevación en los sedimentos Δh_s.....</i> | <i>119</i> |
| <i>Ecuación 6-48. Sobre elevación de la lámina de agua-sedimento.....</i> | <i>120</i> |
| <i>Ecuación 6-49. Parámetro Π_3 para determinación de Sobre elevación de la lamina de flujo</i> | <i>121</i> |
| <i>Ecuación 6-50. Tendencia para $\Delta h_s/\Delta h_w$ vs Π_3</i> | <i>122</i> |
| <i>Ecuación 6-51. Ecuación empírica para la relación $\Delta h_s/\Delta h_w$.....</i> | <i>122</i> |
| <i>Ecuación 6-52. Sobre elevación de la lámina del flujo en canales curvos.....</i> | <i>123</i> |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|------------|
| <i>Figura 1-1. Montaje experimental elaborado por G. Gautier (2001).....</i> | <i>23</i> |
| <i>Figura 1-2. configuración del flujo planteada por W Rodi (2000)</i> | <i>25</i> |
| <i>Figura 1-3. Esquema del flujo secundario.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Figura 1-4. Esquema de la sobre elevación según leyes de Newton.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figura 1-5. Esquema de la sobre elevación según Grashof.....</i> | <i>28</i> |
| <i>Figura 1-6. Esquema de la sobre elevación según Woodward.</i> | <i>29</i> |
| <i>Figura 1-7. Perfil de la superficie del agua en la curvatura de un canal con flujo subcrítico.</i> | <i>31</i> |
| <i>Figura 1-8. Vista en planta del flujo supercrítico en la curvatura de un canal.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figura 1-9. Parámetros geométricos para el cálculo de del Número de Dean.</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 2-1. Diseño preliminar del modelo en 3D.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 2-2. Esquema general del modelo experimental</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 2-3. Dosificador de Sedimentos</i> | <i>43</i> |
| <i>Figura 4-1. Esquema de medición del caudal por placa perforada</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 9-1. Esquema Ilustrativo de la Sobre elevación</i> | <i>1</i> |
| <i>Gráfico 4-1. Curva de Calibración del Orificio</i> | <i>51</i> |
| <i>Gráfico 4-2. Curva granulométrica para Sedimento 1.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Gráfico 4-3. Curva granulométrica para Sedimento 2.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Gráfico 4-4. Curva granulométrica para Sedimento 3.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Gráfico 4-5. Curva granulométrica para Sedimento 4.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Gráfico 4-6. Curva granulométrica para Sedimento 5.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Gráfico 4-7. Curvas de Calibración del Dosificador de Sedimentos.....</i> | <i>64</i> |
| <i>Gráfico 4-8. Relación del numero de Manning n_w vs y/RH</i> | <i>66</i> |
| <i>Gráfico 6-1. Relación entre el número de Froude Densimétrico y el parámetro adimensional Π_1</i> | <i>97</i> |
| <i>Gráfico 6-2. Mínimo error para FL.....</i> | <i>100</i> |
| <i>Gráfico 6-3. Relación propuesta de las velocidades de depósito para los tramos curvo y recto V_{dc}/V_{dr} frente al Parámetro adimensional De.....</i> | <i>103</i> |
| <i>Gráfico 6-4. Relación entre f_s/f_w y el parámetro adimensional Π_2.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Gráfico 6-5. Relación entre n_s/n_w y el parámetro adimensional Π_2.....</i> | <i>109</i> |
| <i>Gráfico 6-6. Relación entre f_s/f_w y el parámetro adimensional Π_2 para condiciones de depósito.....</i> | <i>111</i> |
| <i>Gráfico 6-7. Relación entre n_s/n_w y el parámetro adimensional Π_2 para condiciones de depósito.....</i> | <i>113</i> |
| <i>Gráfico 6-8. Sobre elevación observada y calculada por la segunda ley de Newton vs caudal líquido</i> | <i>117</i> |
| <i>Gráfico 6-9. Sobre elevación observada y calculada por la ecuación de Grashof vs caudal líquido</i> | <i>118</i> |
| <i>Gráfico 6-10. Sobre elevación observada y calculada por la ecuación de Woodward vs caudal líquido</i> | <i>118</i> |
| <i>Gráfico 6-11. Sobre elevación para agua limpia según Woodward vs y/RH.....</i> | <i>119</i> |

| | |
|--|------------|
| <i>Gráfico 6-12. Relación entre $\Delta h_s/\Delta h_w$ y el parámetro adimensional Π_3.....</i> | <i>122</i> |
| <i>Fotografía 3-1 Construcción del modelo experimental en lámina.</i> | <i>44</i> |
| <i>Fotografía 3-2. Etapa de masillado y pulido del modelo experimental en lámina.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Fotografía 3-3. Etapa de masillado y pulido para modelo experimental en madera.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Fotografía 3-4. Modelo experimental.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Fotografía 4-1. Válvula de cierre del dosificador de sedimentos.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Fotografía 4-2. Muestra del sedimento tipo 1.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Fotografía 4-3. Balanza de precisión.....</i> | <i>62</i> |
| <i>Fotografía 5-1. Elementos de Toma de Datos</i> | <i>1</i> |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|--|------------|
| <i>ANEXO A CLASIFICACION DE SEDIMENTOS UTILIZADOS SISTEMA USCS</i> | <i>135</i> |
| <i>ANEXO B DISEÑOS TENTATIVOS DEL CANAL</i> | <i>138</i> |
| <i>ANEXO C CALIBRACION DEL ORIFICIO</i> | <i>145</i> |
| <i>ANEXO D REGISTRO DE PLANOS</i> | <i>147</i> |

GLOSARIO

ADIMENSIONAL: Se refiere a algo que no tiene dimensiones, como por ejemplo el número π .

CALIBRACION: Proceso en el cual se ajusta, con la mayor exactitud posible, las indicaciones de un instrumento de medida con los valores de la magnitud que ha de medir.

COEFICIENTE: Expresión numérica de una propiedad o característica de un cuerpo, que generalmente se presenta como una relación entre dos magnitudes.

DENSIDAD: Magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de un cuerpo.

DEPOSITACION: Acción por la cual algunas partículas de sedimento se quedan en estado de reposo en el fondo del canal.

FRICCION: se conoce como el rozamiento de dos cuerpos en contacto, en el caso de este estudio se trata de la base y paredes del canal y el flujo que circula sobre las mismas

ITERACION: Proceso por el cual se encuentra un mayor grado de exactitud en algún cálculo, repitiendo el mismo, variando algún coeficiente, hasta conseguir el mínimo grado de error posible.

MEZCLA: Se trata de la unión, enlace o agrupación de cosas heterogéneas.

PARÁMETRO: Se puede denominar como una variable que, incluida en una ecuación, modifica el resultado de esta, también se trata de un valor numérico o dato fijo que se considera en el estudio o análisis, pueden ser dimensionales o adimensionales.

VISCOSIDAD: Físicamente hablando, se trata de la propiedad de los fluidos que se gradúa por la velocidad de salida de aquellos a través de tubos capilares.

RESUMEN

Se realizó un estudio experimental sobre el efecto de la curvatura de un canal abierto sobre la velocidad crítica de depósito en el transporte de mezclas de agua y sedimentos naturales. El análisis teórico del fenómeno se hace con base al análisis adimensional; logrando establecer junto con los datos experimentales ecuaciones empíricas, que predicen satisfactoriamente las velocidades de depósito, pérdidas de energía y la sobre elevación en el flujo de mezclas en el canal. El estudio experimental se hace en un montaje de laboratorio diseñado para simular las características del flujo a través de una sección rectangular curvada longitudinalmente, el cual permite estudiar el comportamiento de dicho flujo. Para las mezclas se usó agua y sedimentos entre arena y grava fina de origen natural. Al final se establece una metodología de diseño, con seguridad aceptable en proyectos prácticos de ingeniería, de canales curvados abiertos que sirvan como medio de transporte de material aluvial producto de la actividad minera de mezclas sedimentables.

ABSTRACT

An experimental study was made on the effect of the curvature of an open channel on the critical speed of deposit in the transport of mixtures of water and natural sediment. The theoretical analysis of the phenomenon was done based on the adimensional analysis; obtaining, together with the experimental information, empirical equations, which predict satisfactorily the speeds of deposit, loss of energy and the increase in the flow of mixtures in the channel. The experimental study is done in an assembly laboratory designed to simulate the characteristics of the flow through a rectangular section curved lengthwise, which allows studying the behavior of that flow. For mixtures used water and sediment between sand and fine gravel of natural origin. After establishing a design methodology, with acceptable safety in practical engineering projects, curved open channels that serve as a means of transporting material product of alluvial mining mixing sediments.

PALABRAS CLAVES: mezclas, transporte hidráulico, canales curvos abiertos.

INTRODUCCION

En el presente trabajo se exponen los resultados de la investigación experimental, realizada para determinar la velocidad crítica de depósito, las pérdidas de energía y la sobre-elevación de la lámina del flujo, durante el transporte de sedimentos sólidos a través de canales curvos abiertos. El objetivo es estudiar el efecto que tiene la curvatura de un canal en cuanto a la pérdida de energía, sobre-elevación y velocidad crítica de depósito en el flujo de mezclas sedimentables, compuestas por agua y sedimentos naturales a diferentes velocidades del mismo.

La importancia del presente estudio radica en que existe poca investigación respecto al transporte de sólidos sedimentables en canales curvos abiertos los cuales conociendo su comportamiento pueden ayudar a resolver problemas de medio ambiente, ingeniería de ríos, aplicaciones específicas en la industria de la minería y otras actividades donde es necesario un control adecuado de los sedimentos.

Entre los autores que han estudiado el tema se encuentran O. K. Karlykhanov y O. B. Shevchenko (1991), quienes realizan un estudio acerca del transporte de sedimentos en un canal curvo, obteniendo ecuaciones aplicables a lechos móviles; Gómez (2004), quien presenta un estudio del efecto que tiene la concentración de partículas y la pendiente del canal en la velocidad de depósito en canales abiertos. La mayoría de estudios incluyendo la teoría clásica del transporte de sedimentos no es aplicable a este tipo de canales curvos con lechos fijos, siendo necesario realizar algunas modificaciones para su aplicación.

Por medio de experimentos en el laboratorio se obtuvieron un grupo de ecuaciones, que predicen de forma aproximada el comportamiento del flujo de mezclas sedimentables a través de canales curvos abiertos de sección rectangular. Se encuentran ecuaciones para el Número de Froude F_L , para la sobre elevación Δh y para el factor de fricción de la ecuación de Darcy-Weisbach f , en función del Número de Dean De , la concentración C , el diámetro adimensional de la partícula afectado por la concentración d^* , la pendiente del canal S y el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de partículas $C'd$.

Con las ecuaciones establecidas en esta investigación se busca obtener una metodología de cálculo paso a paso, para determinar la velocidad crítica de depósito en el transporte de mezclas de material aluvial, producto de diversas

actividades, sin que se produzca depositación de los sólidos transportados en el fondo de las posibles curvas de un canal.

CAPITULO 1

REVISION Y ANALISIS DEL ESTADO DEL ARTE

Durante esta etapa se consulta y asimila el estado del arte de los temas tratados y demás bibliografía que se considera necesaria durante la ejecución de la presente investigación. La cual radica en clarificar los temas de flujo secundario para agua limpia, velocidad crítica de depósito, sobre elevación de la lámina del flujo, transporte de sedimentos en canales curvos y pérdida de energía en la curvatura de un canal y su posible aplicación al flujo de una mezcla agua sólido.

Debido a que la mayoría de la información sobre el tema investigado es publicada en Journals y conferencias internacionales, su disponibilidad es escasa, además son pocos los artículos publicados en nuestro idioma, por lo cual se debe realizar una traducción al español y realizar una interpretación de cada caso con el fin de verificar su aplicabilidad al presente trabajo de investigación

1.1. ANALISIS DE LA INFORMACION RECOLECTADA

Al recolectar y analizar la información se encuentra que G. Gauthier, P. Gondret, H. Thome, y M. Rabaud (2001), realizaron un estudio titulado “Inestabilidades centrifugas en un conducto relativamente pequeño”, en el cual los autores citados realizaron un modelo similar al utilizado en el presente estudio, pero sin pendiente y de dimensiones milimétricas, con el fin de explicar cómo las fuerzas centrifugas son un mecanismo de gran eficiencia para la desestabilización de fluidos, los autores utilizan parámetros y variables en su experimento como son:

Caudal **Q**

Viscosidad cinemática **ν**

Altura del canal **h**

Radios de curvaturas **$R1$ y $R2$**

Para su investigación adoptan ecuaciones como son:

$$R_e = \bar{U}h/\nu$$

Ecuación 1-1. Numero de Reynolds

$$\bar{U} = Q/h (R_2 - R_1)$$

Ecuación 1-2. Velocidad promedio

$$D_e = R_e \sqrt{C}$$

Ecuación 1-3. Número de Dean

En la literatura consultada, se trabaja con dos radios de curvatura **R1** y **R2**, los investigan por separado y esto lo comparan con el número de Reynolds, con lo que concluyen que el número de Reynolds se incrementa o decrece con **R1** y **R2**, entonces los autores plantean una buena aproximación para el Número de Reynolds, la cual está dada por la ecuación:

$$R_{ec} = 100C^{-1/2}$$

Ecuación 1-4. Reynolds aproximado

Donde

$$C = \frac{(R_2 - R_1)}{(R_2 + R_1)}$$

Ecuación 1-5. Relación entre radios de curvatura.

Esta ley obedece a un Número de Dean crítico:

$$De_c = \left(\frac{U_c h}{\nu} \right) \left[\frac{(R_2 + R_1)}{(R_2 - R_1)} \right]^{1/2} \approx 100$$

Ecuación 1-6. Número de Dean Crítico

Donde los parámetros de la ecuación son:

U_c = Velocidad crítica

h = alto del canal

ν = Viscosidad cinemática

Ahora incluimos un esquema de las relaciones R_2 y R_1

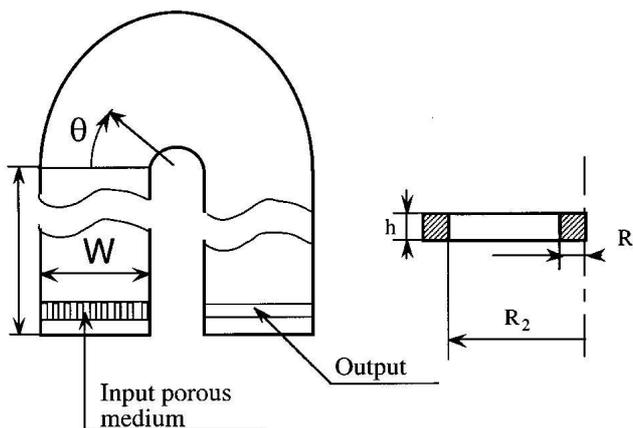


Figura 1-1. Montaje experimental elaborado por G. Gautier (2001)

Donde W estará definido por:

$W = R_2 - R_1$ donde R_2 y R_1 son radio interno y externo, respectivamente.

h es la altura del canal.¹

Lo importante de este texto, no radica en las ecuaciones que ellos plantean, sino en la forma como ellos abordan la investigación, se encontró que establecen y siguen un camino que se puede considerar como un flujograma, y como resultado de su investigación plantean ecuaciones basándose en resultados estadísticos

¹ Cfr. G. GAUTHIER, P. GONDRET, H. THOME, Y M. RABAU, Inestabilidades centrífugas en un conducto relativamente pequeño, (2001).

obtenidos en su investigación, lo cual vislumbra la forma de realizar un trabajo de investigación con objetivos algo similares como el presente.

Por otra parte, en un estudio realizado por O. K. Karlykhanov y O. B. Shevchenko, (1991), titulado "Transporte de sedimento en un canal curvo", se plantea que existe una necesidad de aumentar la capacidad de transporte de la corriente de agua para compensar el transporte de sedimentos en el canal.

Entonces se plantea que existen varias metodologías para determinar la capacidad de transporte, llegando a la conclusión de la relación entre la velocidad media de la corriente y la potencia debe superar la relación 1.5 : 4, es decir, por cada 1.5 veces la corriente, son 4 veces la potencia.

Para la investigación realizada por los autores, se plantea una ecuación para calcular la descarga del sedimento en el fondo, la cual se enumera como la ecuación 1-7:

$$q_f = \alpha \gamma C_r h_r$$

Ecuación 1-7. Descarga de sedimento en el fondo

Cuyas variables son:

α =factor de la forma del sedimento

γ =peso unitario del sedimento

C_r =tasa de propagación en el lecho

h_r =altura de la lámina del sedimento

Los resultados obtenidos por O. K. Karlykhanov y O. B. Shevchenko, (1991), permitieron deducir que las propiedades de un canal curvo brindan buenos resultados para el transporte de sedimentos, por lo que lo recomiendan para tomas de agua de ríos con alto contenido de sedimentos.

El texto de Karlykhanov (1991), aborda el tema de la sedimentación en canales de una forma más amplia puesto que su investigación va enfocada hacia canales de gran tamaño y sus conclusiones hablan de buenos resultados, se entiende que abordar temas complejos como la velocidad crítica de depositación en canales, si tiene aplicabilidades reales.²

² Cfr. O. K. KARLYKHANOV Y O. B. SHEVCHENKO, Transporte de sedimento en un canal curvo, (1991).

Se encontró además un estudio realizado por W. Rodi (2000), titulado “Cálculo numérico de flujo y de transporte de sedimentos en ríos” en el cual se utilizan modelos hidrodinámicos que ayudan a predecir el comportamiento del transporte de sedimentos en los ríos, los cuales pueden ser en 1D, 2D o en 3D.

Los modelos en 3D son los mejores, porque no tienen que asumir la presión hidrostática y calculan el comportamiento del flujo secundario que se presenta, pero también son las más costosos y son hasta ahora sólo utilizada para el cálculo de los fenómenos más locales.

Acerca de los modelos hidrodinámicos, se plantea que si la concentración de sedimentos en suspensión es pequeña y la carga de fondo es delgada, se pueden resolver ecuaciones sin tener en cuenta el sedimento, sino simplemente como si se tratara de agua limpia, pero la verdad es que se pueden generar efectos indirectos por causa de estos sedimentos como deformar el lecho de fondo así como su rugosidad y geometría, como efectivamente sucede en casos reales.

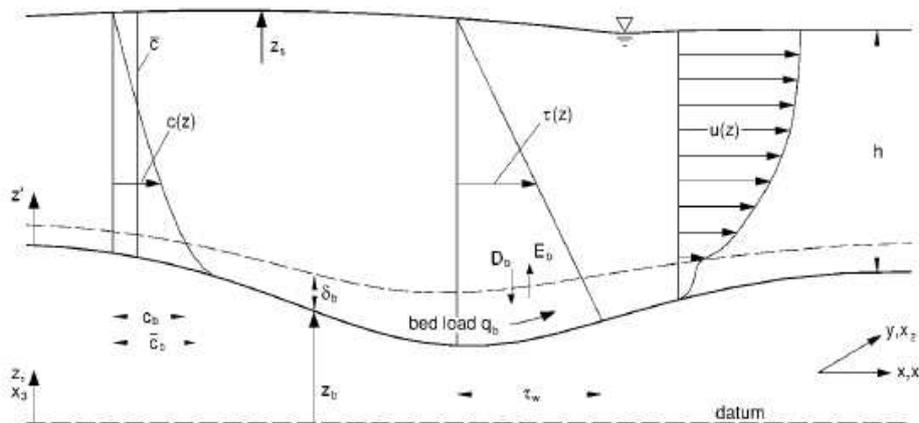


Figura 1-2. configuración del flujo planteada por W Rodi (2000)

El esquema de configuración del flujo planteado por Rodi (2000), ilustra el comportamiento del flujo que se podría presentar en el modelo de investigación, lo cual brinda una idea aproximada de lo que va a suceder con la mezcla de sólido y líquido que recorrerá el modelo de investigación cuando se llegue a la toma de datos.³

1.1.1. Transporte de sedimentos por corrientes y tipos de lecho. La consideración del flujo de sedimento bajo una corriente de agua, requiere un parámetro de importancia el cual es el poder de la corriente. Dicho parámetro se refiere a la

³ Cfr. W. RODI. Calculo numérico de flujo y de transporte de sedimentos en ríos, (2000)

medición del trabajo realizado por el fluido sobre el lecho, puede ser visto además como la tasa de conversión de energía potencial del flujo a energía cinética turbulenta, que resulta en el movimiento del sedimento del lecho. Conforme el fluido comienza su movimiento, el poder de la corriente aumenta desde cero, al principio no hay transporte de sedimento. Una vez que alcanzado el umbral del sedimento, este se transporta corriente abajo por el fluido. Fenómeno que se denomina *umbral de movimiento de sedimento*.

La forma en la cual las partículas son transportadas o arrastradas por una corriente, una vez alcanzado el umbral de movimiento por arriba de su velocidad crítica, depende de la energía que posee el flujo y del tamaño de las partículas.

Los modos de transporte son:

Carga de lecho: el sedimento se mueve muy cerca del lecho, mayormente en contacto con él. Las partículas de sedimento ruedan por el substrato, lo que se conoce como rolo, o las partículas saltan sobre la superficie en trayectorias aproximadamente elípticas, lo que se conoce como saltación. Esto ocurre generalmente para las gravas y las arenas.

Carga en suspensión: las partículas del sedimento están suspendidas en el fluido moviéndose por encima del lecho en la dirección de la corriente. Generalmente ocurre para las partículas de limo y arcilla.

La forma de transporte de una partícula de sedimento depende de su tamaño y densidad, y de las propiedades hidráulicas del flujo.

1.1.2. Flujo secundario. Se refiere a las componentes transversales de la velocidad de un flujo que se mueve en forma helicoidal a lo largo de la dirección general de un flujo, según lo citado por Chow (2004), *“se cree que este fenómeno se debe principalmente a: 1) Fricción en las paredes del canal, la cual causa velocidades mayores de los filamentos cerca del centro del canal que cerca de las paredes; 2) la fuerza centrífuga, la cual refleja las partículas de agua desde un movimiento en línea recta; y 3) una distribución vertical de velocidades, que existe en el canal de aproximación y por consiguiente inicia un movimiento en espiral en el flujo”*.

“Las corrientes secundarias son una característica del flujo en curvas de canales abiertos. Además del movimiento helicoidal clásico (con eje en la región central), un eje más débil y más pequeño de circulación se observa a menudo cerca de la curva externa, que se cree desempeña un papel importante en procesos de la erosión del banco localizado en esta curva. Los mecanismos subyacentes a los ejes de la circulación, especialmente el eje del banco externo, siguen siendo mal

entendidos, y su simulación numérica todavía plantea problemas, debido a la carencia de datos experimentales detallados. La turbulencia desempeña un papel de menor importancia en la generación de la circulación de la región central, que es principalmente debido a la fuerza centrífuga. Para las curvaturas fuertes, sin embargo, se requiere una descripción completamente tridimensional del flujo. Debido a los perfiles no-monotónicos de la velocidad, la fuerza centrífuga favorece la circulación del flujo del banco externo. Por otra parte, los términos se relacionaron con la anisotropía de la turbulencia de la corriente cruzada, inducido por proximidad del contorno del canal, están en el mismo orden de la magnitud y se incrementa la recirculación transversal del flujo del banco externo". Blanckaert k (2007).

En conclusión, el flujo secundario es un flujo que se mueve en espiral a medida que avanza a lo largo de la dirección general de un flujo a través de una curva, produciendo erosión al margen externo de la curva y un depósito de partículas en el margen interno de la misma; se puede observar en la figura 1-3 dicho fenómeno de manera más clara.

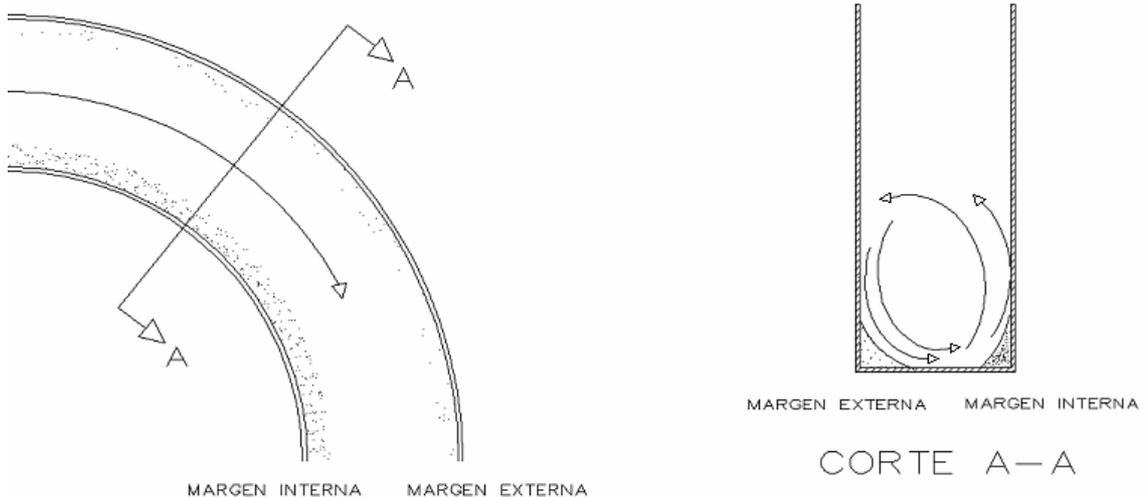


Figura 1-3. Esquema del flujo secundario

1.1.3. Sobre elevación. El flujo en canales curvos difiere de aquel en canales rectos a causa de la aceleración centrípeta. Como consecuencia, se produce una sobre elevación de la superficie del agua la cual conduce, bajo ciertas condiciones, a un movimiento helicoidal en respuesta a un flujo secundario que produce un depósito de partículas en el margen interno de la curvatura y un fenómeno de erosión al margen externo de la misma; ambos casos observados en el desarrollo de la investigación. La figura 1-4 a 1-6, muestran un esquema ilustrativo del fenómeno de la sobre elevación, para cada ecuación consultada.

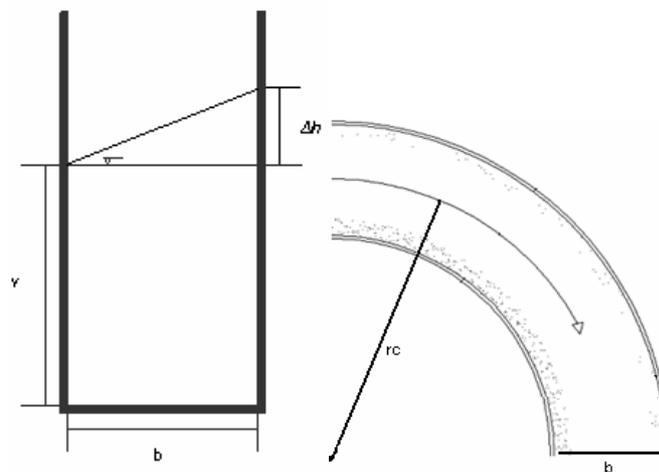


Figura 1-4. Esquema de la sobre elevación según leyes de Newton.

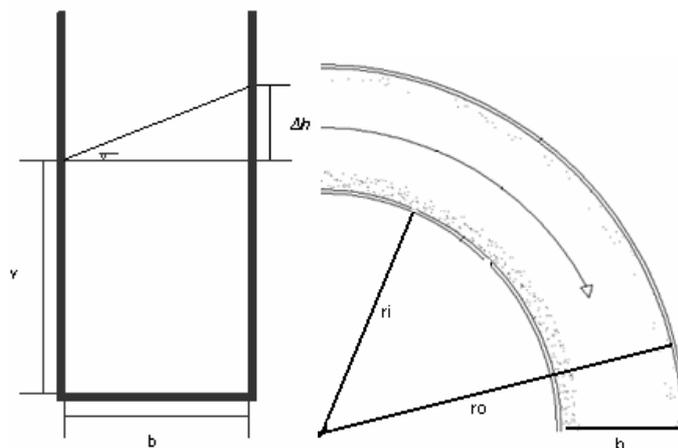


Figura 1-5. Esquema de la sobre elevación según Grashof.

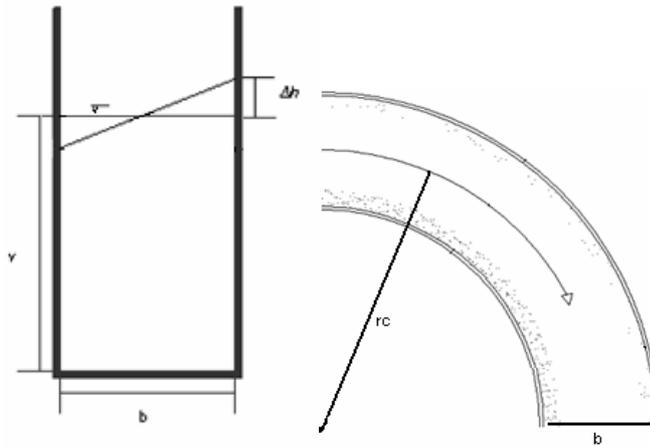


Figura 1-6. Esquema de la sobre elevación según Woodward.

“La sobre elevación en canales curvos puede determinarse mediante ecuaciones basadas en la aplicación de la segunda ley del movimiento, de Newton, a la acción centrífuga en la curva. Al suponer que todas las velocidades de los filamentos en la curva son iguales a la velocidad media V_z y que todas las líneas de corriente tienen un radio de curvatura r_c , puede demostrarse que la superficie transversal del agua debe ser una línea recta, y que puede obtenerse una ecuación simple para la sobre elevación:

$$\Delta h = \frac{V_z^2 b}{gr_c}$$

Ecuación 1-8. Sobre elevación según leyes de Newton

Donde b es el ancho del canal.

Al aplicar la segunda ley de Newton a cada línea de corriente y luego integrar a través de toda la sección del canal, Grashof pudo demostrar que el perfil de la superficie transversal es una curva logarítmica y que la sobre elevación es

$$\Delta h = 2.30 \frac{V_z^2}{g} \log \frac{r_0}{r_i}$$

Ecuación 1-9. Sobre elevación según Grashof

Woodward supuso que la velocidad es cero en las bancas y tiene un valor máximo V_{max} en el centro, que varía entre dichos valores de acuerdo con una curva parabólica. Mediante la segunda ley de Newton obtuvo la siguiente ecuación para la sobre elevación:

$$\Delta h = \frac{V_{max}^2}{g} \left[\frac{20 r_c}{3 b} - 16 \frac{r_c^3}{b^3} + \left(\frac{4 r_c^2}{b^2} - 1 \right)^2 \ln \frac{2 r_c + b}{2 r_c - b} \right]$$

Ecuación 1-10. Sobre elevación según Woodward

A partir de las tres ecuaciones anteriores para la sobre elevación, la ecuación 1-10 brinda los mejores resultados⁴.

1.1.4. Flujo subcrítico alrededor de la curvatura de un canal. Debido a la incapacidad del agua a resistir los esfuerzos cortantes, se presenta, dentro de un flujo uniforme estable, una superficie libre en un plano normal a la resultante de las fuerzas que actúen sobre ella. Fenómeno que se evidencia en los depósitos de agua, donde la superficie libre de esta se encuentra en un plano horizontal ya que la única fuerza actuante sobre ella en este caso es la gravedad.

“El agua reacciona de acuerdo con la primera ley de movimiento de Newton: fluye en línea recta, salvo que la desvíe una fuerza externa de su trayectoria. Cuando se obliga al agua a circular en una trayectoria curva, su superficie adopta una posición normal a la resultante de las fuerzas de gravedad y de aceleración radial.”⁵

En este orden de ideas, las fuerzas actuantes sobre el flujo de agua en la curvatura de un canal serían la gravedad y la aceleración radial; la figura 1-7, "Perfil de la superficie del agua en la curvatura de un canal con flujo subcrítico" muestra dichas fuerzas y como la superficie del agua se encuentra en un plano normal a la resultante de las mismas.

⁴ CHOW, Ven Te, Hidráulica de canales abiertos, Mc Graw Hill, marzo de 2004. Pág. 438

⁵ S. MERRIT, Frederick, Manual del Ingeniero Civil Vol III, Mc Graw Hill, pag 21-66

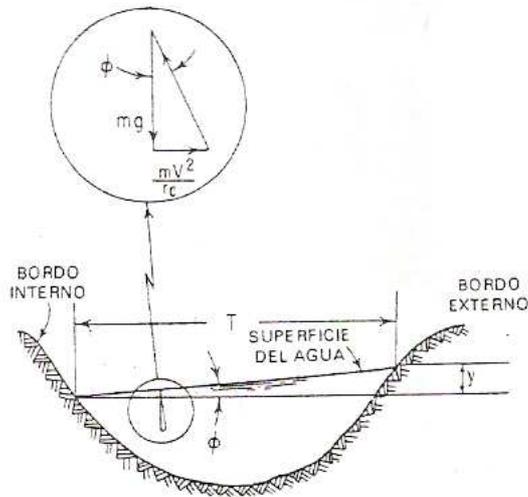


Figura 1-7. Perfil de la superficie del agua en la curvatura de un canal con flujo subcrítico.

Ahora, la superficie del agua tiene una inclinación con ángulo ϕ respecto a la horizontal, por lo tanto:

$$\tan \phi = \frac{V^2}{r_c g}$$

Ecuación 1-11. Inclinación de la lámina de agua

Donde V es la velocidad promedio, y es la sobre elevación que se plantea según las leyes de Newton y, por último, r_c el radio de curvatura del eje central del canal.

Puesto que en la curvatura de un canal con flujo subcrítico la superficie libre del agua tiene una inclinación respecto a la horizontal, se presenta una diferencia de altura y en los extremos externo e interno del canal, esta sobre elevación se puede encontrar al multiplicar el ancho del canal por $\tan \phi$, obteniendo así una expresión para la sobre elevación de la lamina de agua en base a la segunda ley de movimiento de Newton que ya ha sido citada anteriormente (ecuación 1-8)

Ya que en el flujo de un canal la capa superior del mismo tiene mayor velocidad que el flujo del fondo, se necesita más fuerza para desviar el flujo de la capa superior que al flujo del fondo, por lo tanto al entrar este flujo a una curvatura del canal la capa superior se moverá hacia la parte exterior de la curva; toda esta agua con gran velocidad puede ocasionar un fenómeno de erosión en el borde externo del canal, además debido a la compresión del flujo contra el borde del canal se evidencian pérdidas por fricción.

En conclusión, el flujo subcrítico en la curvatura del canal se puede caracterizar por la sobre elevación generada, los fenómenos de erosión generados y las pérdidas por fricción.

1.1.5. Flujo supercrítico alrededor de la curvatura de un canal. Cuando un flujo de tipo supercrítico circula en la curvatura de un canal se evidencia un fenómeno de olas estacionarias, una positiva y una negativa al empezar la curva y que se irán entrecruzando conforme el flujo avanza por la curva.

La ola positiva, tiene una elevación de superficie mayor que la altura promedio, mientras que la ola negativa presenta una elevación de superficie menor que la altura promedio; estas dos olas a su entrada en la curva forman un ángulo con el canal de entrada, este ángulo se conoce como β_o que se puede observar en la figura 1-8, "Vista en planta del flujo supercrítico en la curvatura de un canal", y se puede determinar mediante la ecuación:

$$\text{sen}\beta_o = \frac{1}{F_1}$$

Ecuación 1-12. Ángulo de olas en la entrada de curva

Donde F_1 es el número de Froude del flujo del canal de entrada.

Se puede también determinar la distancia existente entre el comienzo de la curva y la primera cresta de la ola en el extremo exterior del canal, esto mediante el ángulo central θ_o , determinado por la ecuación:

$$\tan\theta_o = \frac{T}{(r_c + T/2)\tan\beta_o}^6$$

Ecuación 1-13. Ángulo central

Donde T es el ancho del canal y r_c es el radio de la curvatura del canal a su eje central.

⁶ S. MERRIT, Frederick, Ibid, pág. 21-67

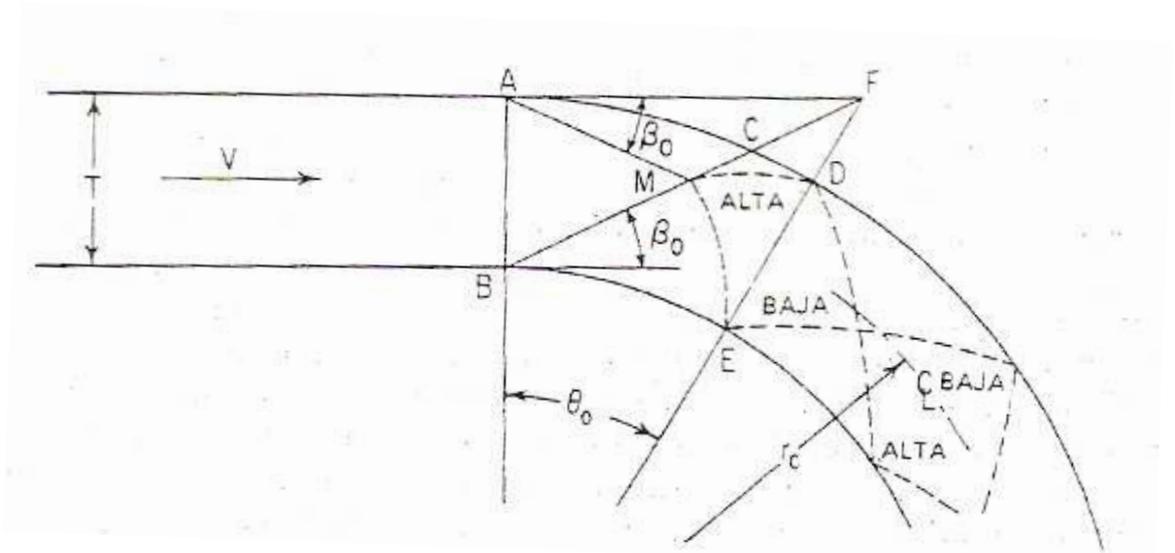


Figura 1-8. Vista en planta del flujo supercrítico en la curvatura de un canal

En conclusión, el flujo supercrítico a través de la curvatura de un canal se caracteriza por la formación de olas estacionarias entrecruzadas a lo largo de la curva, fenómeno previsible actualmente mediante la utilización de curvas circulares de transición que evitan contradisturbios en el flujo o un peraltado en el fondo del canal con un ángulo de inclinación igual al descrito en la ecuación 1-13.

1.1.6. Pérdida de energía. La pérdida de carga que se presenta en un canal curvo abierto con sección rectangular, representa la pérdida de energía de un flujo hidráulico a lo largo del mismo por efecto del rozamiento, tanto en el piso como en las paredes del canal.

Las ecuaciones de Manning se suelen utilizar en canales. La fórmula tiene en cuenta un coeficiente de rugosidad (n) obtenido empíricamente, y no las variaciones de viscosidad con la temperatura. La expresión es la siguiente:

$$\frac{h}{L} = 10.3n^2 \left[\frac{Q^2}{D_{eq}^{5.33}} \right]$$

Ecuación 1-14. Pérdida de energía según Manning

En donde h es la pérdida de carga o de energía (m), n es el coeficiente de rugosidad (adimensional), D_{eq} es el diámetro equivalente (m), Q es el caudal

(m³/s) y **L** es la longitud de la tubería (m). Es conocido también, que la relación **h/L**, equivale a la pendiente del canal **S**.

Por otra parte, se puede determinar el factor de fricción **f** de la ecuación de Darcy Weisbach a partir, del valor del coeficiente de rugosidad de Manning, despejando la ecuación que se muestra a continuación.

$$n = \frac{R_H^{1/6}}{\sqrt{\frac{8g}{f}}}$$

Ecuación 1-15. Coeficiente de rugosidad n de Manning

Conociendo valores experimentales para **n** se puede determinar el valor de **f** y mediante estos realizar un análisis del fenómeno de pérdida de energía, para agua limpia y flujo de mezclas.

1.1.7. La ecuación de Manning. La ecuación de Manning fue desarrollada a partir de siete ecuaciones diferentes y además fue verificada mediante 170 observaciones. Debido a su simplicidad y los resultados satisfactorios en aplicaciones prácticas, la ecuación de Manning se ha convertido en la más utilizada de todas las ecuaciones de flujo uniforme para cálculos en canales abiertos.

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} S^{1/2}$$

Ecuación 1-16. Ecuación de Manning

En donde **A** es el área transversal del flujo (m²), **Q** es el flujo de diseño de un canal, (m³/s), **R** es el radio hidráulico, que equivale el área del flujo dividido entre el perímetro mojado (m), **S** es la pendiente (m/m) y **n** es el coeficiente Manning de rugosidad.

Es de anotar además que la ecuación 1-16 está diseñada para el sistema métrico, en caso de trabajar para el sistema inglés existe otra que contiene el valor del ajuste por unidades

1.1.8. El Número de Dean. El Número de Dean (**De**) es un parámetro adimensional usado en mecánica de fluidos para estudiar los flujos a través de tuberías y canales curvados.

El número está definido por la ecuación 1-17, aunque para el presente estudio se utilizará una ecuación ajustada para canales abiertos, la cual se mencionará más adelante.

$$D_e = \frac{\rho * u * a}{\mu} \left(\frac{a}{R} \right)^{1/2}$$

Ecuación 1-17. Numero de Dean

Donde ρ es la densidad del fluido, μ es la viscosidad del fluido, u es la velocidad axial del flujo, a es la longitud característica asociada con la sección transversal del canal o tubería (por ejemplo el radio en el caso de una tubería circular), R es el radio de curvatura del canal o tubería.

La figura 1-9 ilustra los parámetros a y R , para el cálculo del Número de Dean.

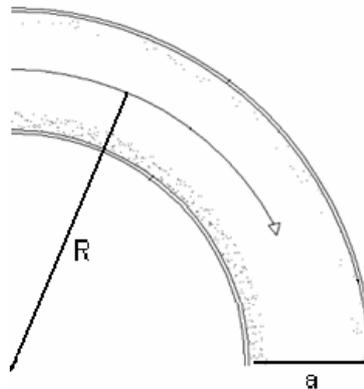


Figura 1-9. Parámetros geométricos para el cálculo de del Número de Dean.

*“El número de Dean es por lo tanto el producto del Número de Reynolds de un flujo axial de velocidad “u” a través de una tubería de radio “a” y de la raíz cuadrada del cociente de longitudes características “a/R”. Algunos autores incluyen un factor adicional de 2 en la definición o llaman D2 al número de Dean”.*⁷

⁷ Anónimo, Disponible en “http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Dean”, última actualización, 19 jul 2008

1.1.9. Numero de Froude. El número de Froude (Fr) es un parámetro adimensional que relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y la fuerza de gravedad actuantes en un fluido, es decir, las fuerzas de inercia, en base al segundo principio de la dinámica, se definen como el producto entre la masa y la aceleración, pero como se refiere a un fluido se describe la masa como densidad por volumen.

Entonces se define el número de Froude:

$$Fr^2 = \frac{v^2}{g * l}$$

Ecuación 1-18. Numero de Froude

Donde las variables son:

- l - parámetro de longitud [m]
- v - parámetro de velocidad [m/s]
- g - aceleración de la gravedad [m/s²]

La clasificación del numero de Froude se puede expresar de la siguiente manera:

| | |
|----------|-------------------------------|
| $Fr < 1$ | flujo subcríticos o tranquilo |
| $Fr = 1$ | flujo critico |
| $Fr > 1$ | flujo supercrítico |

La velocidad de flujo lenta ($Fr < 1$) se da cuando hay una pequeña alteración que se desplaza corriente arriba afectando así las condiciones corriente arriba a este se le llama flujo subcrítico o tranquilo.

Para las velocidades de flujo altas ($Fr > 1$) se da lo contrario que en el flujo lento, la alteración no puede viajar corriente arriba, entonces las corrientes arriba no pueden ser las mismas corrientes abajo, a este se le llama flujo supercrítico o rápido. Entonces para concluir, se dice que ($Fr < 1$) es una onda superficial que viaja corriente arriba y ($Fr > 1$) es arrastrada corriente abajo y parece congelada, y en el caso intermedio el flujo es crítico ($Fr = 1$). Por otro lado la velocidad de una onda se propaga y altera en canales más profundos que en los menos profundos.⁸

1.1.10. Numero de Reynolds. Este número recibe su nombre en honor a Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo describió en 1883. Es un número adimensional

⁸ **MOOT**, Robert L. Mecánica de Fluidos. Sexta Edición. Editorial Pearson. México, 2006

utilizado en mecánica de fluidos para caracterizar el movimiento de un fluido. Viene dado por la ecuación 1-19.

$$R_e = \frac{\rho * v_s * D}{\mu}$$

Ecuación 1-19 . Numero de Reynolds

O también por la ecuación 1-20

$$R_e = \frac{v_s * D}{\nu}$$

Ecuación 1-20. Número de Reynolds

Donde, ρ es la densidad del fluido v_s es la velocidad característica del fluido, D es el diámetro de la sección a través de la cual circula el fluido, μ es la viscosidad dinámica del fluido, ν es la viscosidad cinemática del fluido

La viscosidad cinemática viene dada por la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido.⁹

⁹ **ROCHA**, Arturo. Hidráulica de tuberías y canales. Sexta Edición. Editorial Mc Graw Hill. Colombia, 1994.

CAPITULO 2

DISEÑO DEL MODELO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO

Esta es una de las etapas más importantes de la investigación, puesto que es aquí en donde se definen las características del eje central del proyecto, el modelo experimental, en torno al cual gira la totalidad del trabajo de investigación; es aquí en donde se definen la geometría del modelo, su modo de funcionamiento, los materiales necesarios, las partes que lo constituyen y si es necesario elementos adicionales para mejorar su funcionamiento.

Se pretende construir un modelo que simule condiciones reales, con el fin de extraer datos experimentales y proceder a la obtención de resultados y conclusiones acordes a dichos datos. Se busca obtener un diseño que combine funcionalidad, para una adecuada simulación de las condiciones reales, y facilidad de operación, para realizar una toma de datos precisa y sin complicaciones.

Además, se contempla la necesidad de ciertos elementos anexos, que sin ser indispensables, son de gran utilidad dentro del desarrollo de los ensayos que se realicen en el modelo experimental; dichos elementos tienen la función de facilitar ciertos procedimientos y evitar la realización de actividades adicionales a los ensayos de laboratorio.

Un diseño preliminar de lo que se desea para el modelo experimental se muestra en la figura 2-1, "Diseño preliminar del modelo en 3D" las cuales recrean las condiciones que el modelo pretende simular de la realidad en un canal curvo con sección rectangular.

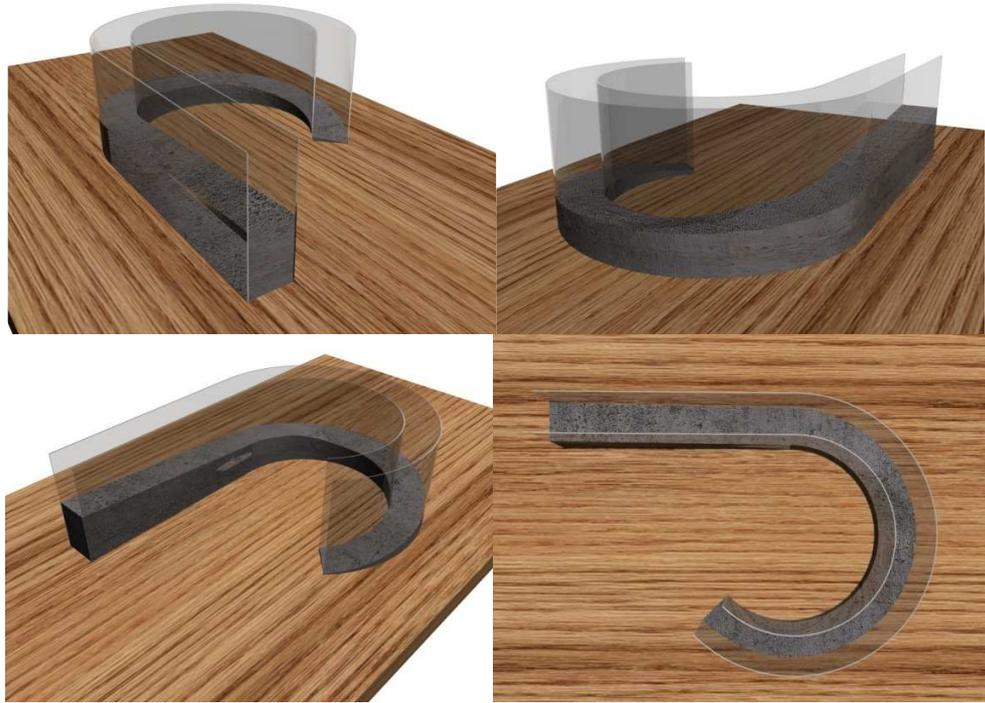


Figura 2-1. Diseño preliminar del modelo en 3D

Según lo planteado anteriormente se procede a realizar una descripción de los elementos necesarios para conformar el modelo experimental, incluyendo en esta parte todo elemento que se considere de utilidad para los ensayos a realizar en el proyecto. Una vez definido lo anterior se realiza el diseño del modelo experimental, dentro del cual se obtienen todas las características geométricas del mismo y la forma en que este se comportará.

2.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO

El modelo consiste en un canal curvo abierto de sección rectangular, de dimensiones constantes a lo largo del mismo; tales como: su pendiente, el ancho de su base, la altura de sus paredes y el radio de curvatura.

Teniendo en cuenta que el modelo trabaja usando el montaje para transporte de mezclas, instalado en el laboratorio de hidráulica, es necesaria la utilización de un tanque que reciba el flujo de agua, proveniente del montaje para transporte de mezclas y lo encamine hacia el canal curvo; se conoce de antemano que el agua caerá con cierta turbulencia dentro del tanque mencionado, por lo cual se hace

necesario reducir esta turbulencia con la utilización de un mecanismo disipador de energía, seguido de un sector recto del canal para estabilizar aun más el flujo.

Obviamente se debe observar el comportamiento del flujo dentro del canal, por lo cual las paredes del mismo deben ser transparentes en su totalidad, y debido a la carga que estas paredes deben soportar deben ser rígidas y resistentes; a su vez es necesario eliminar al máximo el coeficiente de fricción del canal, sobre todo en la base del mismo, para que este factor no influya bruscamente en el comportamiento del flujo.

Otro punto a considerar es la dosificación de sedimentos para la realización de los ensayos, ésta debe ser regulable en su caudal, para lograr diferentes concentraciones, y constante durante todo el ensayo para garantizar un flujo de mezcla homogéneo. Este sedimento agregado debe ser a su vez recuperado para efectuar posteriores ensayos.

Además, se considera la utilización de un mecanismo de soporte y anclaje que permita ubicar el canal sobre el sedimentador que hace parte del montaje para transporte de mezclas, este sedimentador recolectará el flujo proveniente del canal haciendo posible una recirculación del flujo de agua. Por último, es fundamental el uso de elementos de precisión en la medición y colocados de manera que registren el comportamiento del flujo de mezcla de la mejor forma posible. La figura 2-2, muestra un esquema general del modelo.

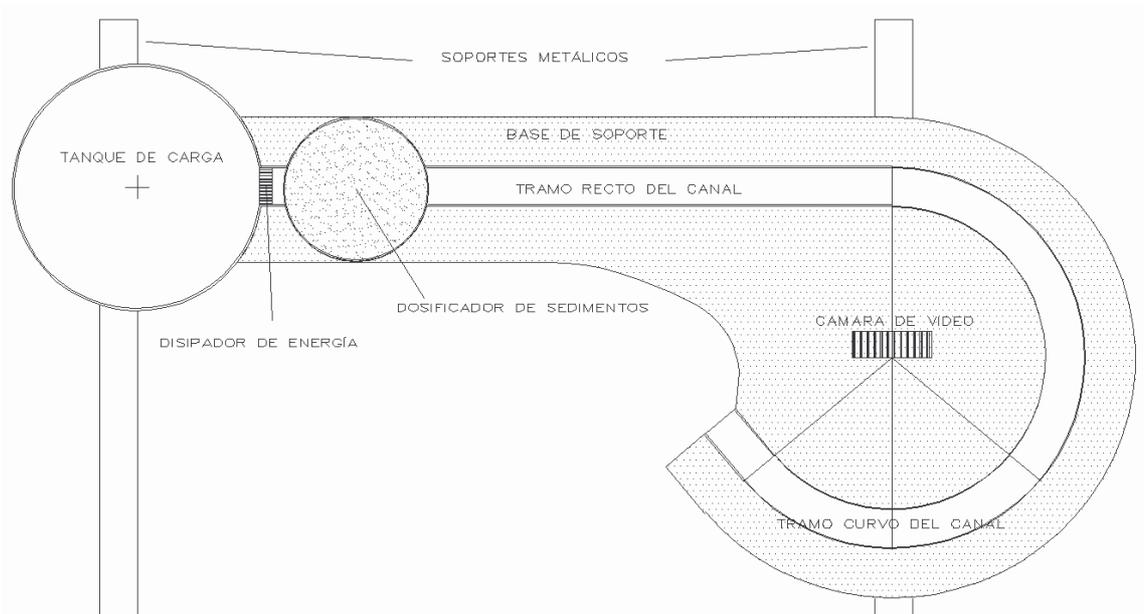


Figura 2-2. Esquema general del modelo experimental

En resumen, este modelo consta de:

- Paredes en acrílico transparente
- Soportes para paredes
- Base del canal en madera
- Fondo del canal en masilla esmaltada para eliminar al máximo el coeficiente de fricción y brindar un acabado impermeable
- Tanque de carga
- Disipador de energía en la entrada del canal
- Mecanismos de soporte y anclaje
- Elementos de medición
- Soporte de elementos de medición
- Dosificador de sedimentos
- Soporte de dosificador
- Malla recuperadora de sedimentos

Conocidas las partes fundamentales del modelo se procede a determinar las dimensiones y ubicación de cada una de ellas.

2.2. DISEÑO DEL MODELO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO

Dado que el trabajo de investigación se basa en un modelo experimental, es necesario realizar una serie de prediseños del mismo, para obtener así un modelo que pueda brindar una óptima simulación de las condiciones reales y se preste a una adecuada toma de datos para la presente investigación.

En este orden de ideas, se realiza una suposición de geometrías y dimensiones del canal, para caudales de $0.006 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.013 \text{ m}^3/\text{s}$ ya que es el intervalo manejado en laboratorio; con el fin de obtener para cada suposición el valor de y (altura de la lamina de agua) y el valor de Δh (sobre elevación del nivel de agua en la curva); se utiliza la ecuación de Manning, para determinar el valor de y ; y el valor de Δh está determinado por las ecuaciones para el cálculo de sobre elevación mencionadas en el Capítulo 1.

En cuanto a las dimensiones generales del canal como su ancho total y longitud, se definen en base a los limitantes de espacio en el laboratorio y correcciones al prediseño presentado en el anteproyecto; ejemplo de esto es la variación realizada en los radios de curvatura, longitud de la sección recta del canal y sección recta de salida del flujo en el canal.

Dado que no se conoce de antemano el comportamiento definitivo del modelo, una vez se calcula estos valores del diseño se procede a escoger el aparentemente más adecuado para efectos de observación. Los resultados de estos diseños están consignados en el ANEXO B, "DISEÑOS TENTATIVOS DEL CANAL"; y sus respectivos planos están consignados en el ANEXO C, "REGISTRO DE PLANOS"; a continuación la Tabla 2-1. "Diseño del Canal Curvo" contiene los resultados de la opción seleccionada.

Tabla 2-1. Diseño del Canal Curvo

| Diseño del Canal Curvo | | | | | | | | |
|------------------------|---------------|--------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------|---------------------------------|----------------------|
| Base del canal (b) | Pendiente (s) | Longitud (L) | Radio Interno (r _i) | Radio Externo (r _e) | Caudal (Q) | | Caudal (Q) | |
| | | | | | 0,013 m ³ /s | | 0,006 m ³ /s | |
| 0,06 m | 5 % | 2,20 m | 0.24 m | 0.30 m | Altura de la Lamina de Agua (y) | Sobre elevación (Δh) | Altura de la Lamina de Agua (y) | Sobre elevación (Δh) |
| | | | | | 0,10 m | 0,09 m | 0,055 m | 0,073 m |

Es muy probable que el comportamiento esperado varíe en diferentes aspectos, por lo tanto el procedimiento constructivo que se adopte para el mismo debe garantizar en un gran porcentaje el menor error físico del canal y por ende minimizar el error experimental.

2.2.1. Diseño del dosificador de sedimentos. Ante la necesidad de un suministro constante del sedimento y de un caudal regulable del mismo para cada uno de los diferentes ensayos, se hace necesario idear un mecanismo dosificador de sedimentos que cumpla con estos dos requerimientos. Conocidas con anterioridad las granulometrías de los sedimentos a usar, es posible realizar esta dosificación mediante un sistema de embudo con boquilla de diámetro regulable.

La duración promedio de los ensayos es de aproximadamente 4 minutos, por lo tanto es necesario que la cantidad de sedimento que provee el dosificador sea suficiente durante este tiempo. Es por esto que el sistema de embudo con boquilla debe también estar dotado de un tanque de almacenamiento de sedimento, que garantice la cantidad suficiente del mismo para cada ensayo y de la misma forma permita adicionar más sedimento en caso de que el ensayo lo solicite.

La determinación de las dimensiones y componentes del dosificador están en su mayoría determinados por el sedimento y las características del mismo. Se utiliza entonces tres componentes para conformar el mecanismo dosificador; en primer

lugar un tanque cilíndrico para el almacenamiento del sedimento, un embudo para encaminar el sedimento dentro del modelo experimental, y por ultimo una válvula de compuerta de diámetro 1", al final del embudo, la cual hace posible regular el caudal de sólidos variando la apertura de la misma. La figura 2-3. "Dosificador de Sedimentos", ilustra el sistema de suministro de sedimentos.

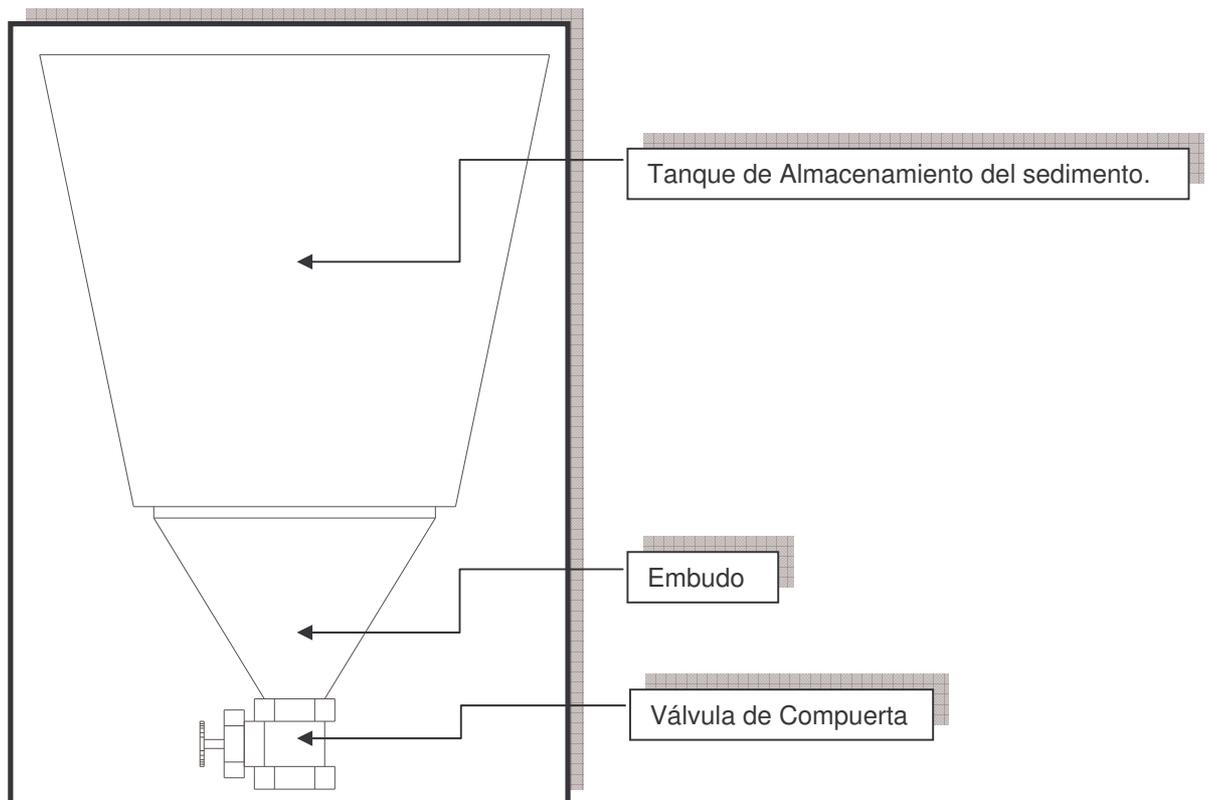


Figura 2-3. Dosificador de Sedimentos

Además de estos elementos el sistema de suministro de sedimentos cuenta con un soporte para hacer posible su ubicación al inicio de la sección recta del modelo experimental, sitio escogido para realizar la dosificación puesto que la inclusión de los sedimentos en este sitio del modelo garantiza una homogenización de la mezcla en su recorrido por el canal.

CAPITULO 3

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL DE LABORATORIO

Puesto que no se tiene mucho conocimiento acerca de las técnicas constructivas apropiadas para la elaboración de modelos experimentales en lo que al presente trabajo de investigación se refiere, se decide realizar 2 modelos en diferentes materiales, uno en madera y otro en lámina, esto con el fin de observar cual de los dos brinda la mayor exactitud en sus propiedades geométricas, para que al realizar los ensayos y toma de datos, estos sean al máximo confiables.

Se requiere una adecuada selección de materiales para la realización del modelo, por lo tanto se contempla la utilización de diversos elementos con el fin de obtener mayor precisión.

Luego de haberse obtenido las características principales del canal, se procede a plasmarlo en un plano graficado en AutoCad, para así conseguir las piezas necesarias para su elaboración, tanto en lámina como en madera.

Ahora bien, al desarrollar el canal en lámina, como se observa en la fotografía 3-1 “Construcción del modelo experimental en lámina”, la pieza es soldada, de acuerdo a las especificaciones del diseño, luego por efecto de la soldadura, se encuentra que la lámina se deformó en múltiples partes, por lo cual se recurre a la utilización de un esmeril para darle un acabado aceptable y a la aplicación de masilla, tal como lo podemos apreciar en la foto 3-2 “Etapa de masillado y pulido del modelo experimental en lámina”.



Fotografía 3-1 Construcción del modelo experimental en lámina.



Fotografía 3-2. Etapa de masillado y pulido del modelo experimental en lámina

Al mismo tiempo en que se trabaja el canal de lámina, se procede a trabajar el canal de madera, como se observa en la fotografía 3-3 “Etapa de masillado y pulido para modelo experimental en madera”, modelo que al realizar comparaciones brinda una mayor precisión para la posterior toma de datos en laboratorio.



Fotografía 3-3. Etapa de masillado y pulido para modelo experimental en madera

Como aprecia en la fotografía 3-4, “modelo experimental en madera”, el modelo ya está listo para proceder a la toma de datos experimentales.



Fotografía 3-4. Modelo experimental

Es de anotar que el montaje cuenta con:

- Canal curvo con sección rectangular de base 6 cms y pendiente 5%, el que servirá para observar cómo se comporta el flujo con sedimentos.
- Tanque externo de carga: Conduce el agua hacia canal de estabilización para el canal curvo.
- Canal de estabilización de flujo: Su función radica en garantizar que la lámina de agua antes de entrar al canal curvo sea estabilizada.
- Disipador de energía a la entrada del canal recto: Estabiliza el flujo evitando turbulencia
- Base para soporte del canal: Será la responsable de sostener el canal en la pendiente indicada.
- Dosificador de sedimentos: Será el responsable de adicionar sedimentos al flujo de agua.

El dosificador de sedimentos que se menciona anteriormente se hace de una manera práctica y funcional, consta de una base cónica y encaja perfectamente debajo del canal que suministra agua al modelo experimental.

Además de lo anterior se hizo necesario implementar en el tanque sedimentador del montaje para transporte de mezclas, una malla recuperadora de sedimento para evitar que el material llegue al tanque principal de almacenamiento y a su vez que pueda ser secado y reutilizado para pruebas posteriores.

3.1. MATERIALES, HERRAMIENTA Y EQUIPO UTILIZADO

Para elaborar el modelo experimental de una manera adecuada se cuenta con elementos propios y otros que se facilitan por medio del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Nariño, y se detallan a continuación.

3.1.1. Materiales utilizados.

- Espátula.
- Tornillos de diferente diámetro y longitud.
- Lija No. 100 y No. 120, además de lija tipo esmeril
- Masilla catalizada.
- Soldadura para lámina
- Acrílico calibre 2mm.
- Pegante para acrílico.
- Laminas de acero calibre 20.
- Thiner.
- Hojas de segueta tipo Nicholson.
- Esmalte color blanco.
- Silicona SIKA blanca y transparente
- Madera de diferentes tipos
- Tanques plásticos
- Embudos plásticos
- Llave de paso de 1"
- Malla de cerramiento plástica
- Manguera plástica de 1/4"
- Niple galvanizado con codos de 90°
- Cinta teflón
- Cloruro de metileno

3.1.2. Herramienta utilizada.

- Destornilladores.
- Lamina de madera.
- Limas.
- Hombre solo.
- Alicate.
- Mazeta.
- Segueta.
- Prensa.
- Alicate.
- Llave de tubos

- Tijera para cortar lamina.
- Guantes y gafas de protección.
- Llaves y brocas de distintos tamaños.
- Nivel
- Escuadra

3.1.3. Equipo utilizado.

- Cizalla.
- Soldador.
- Dobladora de lámina.
- Taladro.
- Esmeril.
- Caladora.

CAPITULO 4

CALIBRACION DE EQUIPOS Y ENSAYOS DE SUELOS

4.1. CALIBRACION DEL ORIFICIO

La calibración del orificio se hace con el fin de calibrar el piezómetro en función dos presiones, una antes y otra después de una lámina con una perforación que se encuentra en la tubería que sube de la motobomba hacia la salida en la parte alta del sistema de abastecimiento de agua al modelo experimental, este diferencial de presiones se ve reflejado en la diferencia de niveles de mercurio que se observa en el piezómetro; se utiliza entonces una placa de acrílico con un orificio de 3 cm de diámetro, ubicada en la tubería de PVC mencionada anteriormente cuyo diámetro es de 2 1/2" con diámetro interno de 5.46mm.

Para captar la presión diferencial que origina la placa de orificio, es necesario conectar dos tomas, una en la parte anterior y otra en la parte posterior de la placa. La disposición de las tomas, según se muestra en la figura 4-1, puede ser: en las bridas, en la vena contraída, y en la tubería.

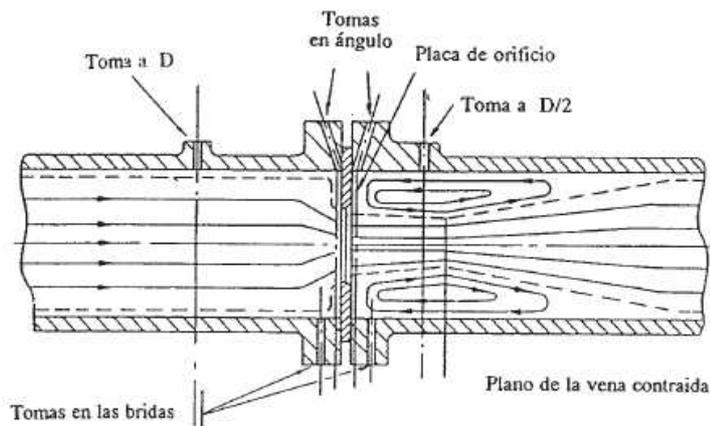


Figura 4-1. Esquema de medición del caudal por placa perforada

Para su calibración se hace necesario contar con un cronómetro y un tanque aforador, entonces la calibración se hace cada vuelta de cierre de la válvula de paso de agua entre la motobomba y la parte alta, y se toman tres tiempos para cada situación.

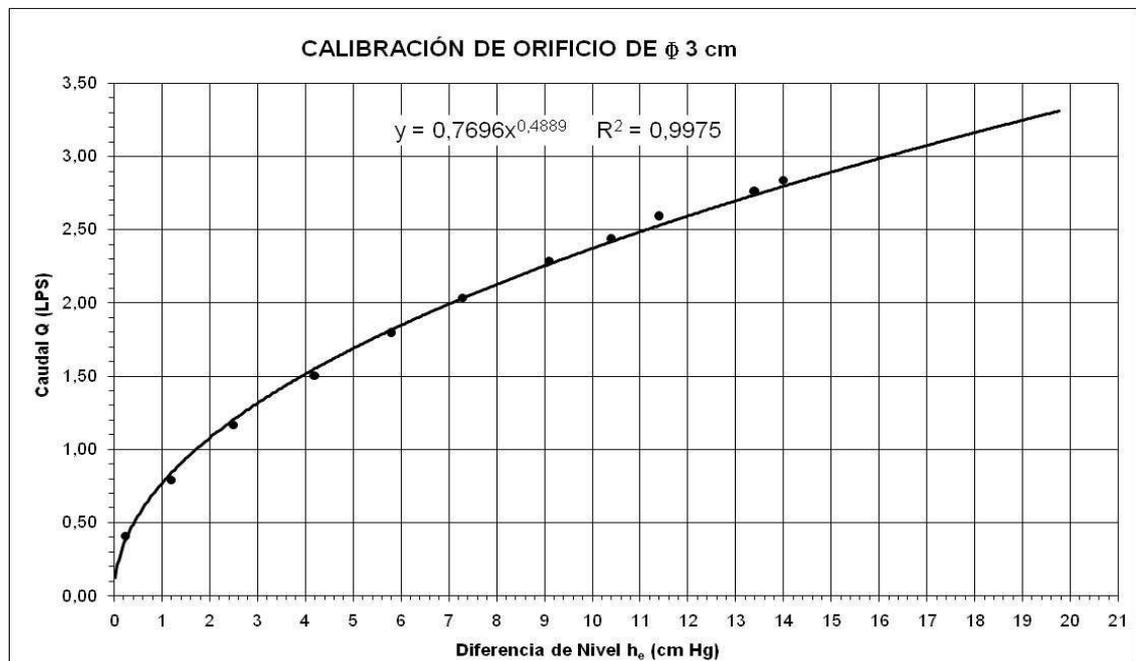
La tabla 4-1 muestra los resultados de dicho aforo.

Tabla 4-1. Resultados de la Calibración del Orificio

| DIFERENCIA DE NIVEL h_e (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 |

Con lo anterior se logra la curva de calibración mostrada a continuación, a partir de la cual se obtiene la ecuación 4-1.

Gráfico 4-1. Curva de Calibración del Orificio



$$Q_l = \frac{(0.7696 * h_e^{0.489})}{1000}$$

Ecuación 4-1. Caudal líquido en función de la altura de mercurio

Donde Q_l es el caudal en m^3/s y h_e es la lectura del diferencial de alturas de los meniscos de mercurio en el manómetro.

El valor de h_e puede ser determinado mediante la lectura del menisco en el manómetro de mercurio y usando este valor en la siguiente ecuación

$$h_e = 2(h_{menisco} - 41.4)$$

Ecuación 4-2. Diferencial de alturas en el manómetro de mercurio

Donde $h_{menisco}$ es el valor leído del menisco de mercurio más alto.

4.2. ENSAYOS DE SUELOS

Los materiales que se utilizan en la presente investigación para que sirvan como material sedimentable se denominarán sedimento 1 al 5, se denominan también según el diámetro del tamiz comercial correspondiente al diámetro máximo de la muestra d_{max} y al diámetro mínimo de la muestra d_{min} ; los cuales difieren en su tamaño, granulometría, gravedad específica y todos a excepción del quinto sedimento son de un color amarillo claro, el cual es de color café oscuro. Una clasificación de los sedimentos mediante el sistema USCS se presenta en el Anexo A.

Los primeros tres sedimentos son material ya utilizado, arena tipo cuarzo, para el trabajo de investigación denominado “TRANSPORTE HIDRÁULICO DE MEZCLAS EN CANALES ABIERTOS”, el cual gentilmente fue cedido para la investigación; el cuarto sedimento es arena blanca de construcción y el quinto sedimento es sedimento natural que se obtuvo del río San Miguel en el Departamento del Putumayo Colombia

A continuación se presentan los ensayos realizados para determinar las características de los sedimentos utilizados para la presente investigación.

4.2.1. Ensayos de gravedad específica. Se realiza el ensayo de peso específico o gravedad específica para los sedimentos mencionados anteriormente.

Se hace el ensayo de peso específico de agregados finos según (INSTITUTO NACIONAL DE VIAS: 2006) I.N.V. E – 222 y otras referencias correspondientes:

- ASTM C 128
- AASHTO T 84
- NLT 154

Equipo utilizado

- Probetas volumétricas de 500 ml
- Molde de cono (tronco de cono recto)
- Varilla metálica para apisonar
- Balanza de precisión de 0.1 gr
- Termómetro
- Pipeta
- Horno
- Bandejas
- Recipientes de secado

Procedimiento del ensayo

- 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 SSS¹⁰, 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 probetas volumétricas vacías y se marcan para su posterior identificación.
- Se pesan dos muestras de 250 gr de material y son adicionadas a las probetas volumétricas respectivamente.
- Se adiciona agua desairada hasta la marca de 500 ml indicada en las probetas.
- Las probetas volumétricas se ponen en baño maría aproximadamente 7 horas dependiendo del tipo de material para facilitar la salida de vacíos.
- Después de este proceso se completa con agua desairada hasta llegar a las marcas de las probetas volumétricas las cuales indican 500 ml.
- Se registra el peso de las probetas volumétricas con la muestra de suelo y agua, también se lee la temperatura.
- Se retira el contenido de las probetas volumétricas 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 las probetas volumétricas llenas con agua desairada hasta la marca de 500 ml. El agua debe estar a 20° centígrados.

Cálculos y Resultados

La gravedad específica G_s se calcula por la ecuación 4-3.

$$G_s = \frac{W_{sol}}{W_w} = \frac{W_{sol}}{W_{fw} + W_{sol} - W_{fws}}$$

Ecuación 4-3. Gravedad específica de los sedimentos

Donde (W_{fw}) es el peso de la probeta volumétrica con agua destilada hasta la marca, (W_{fws}) es el peso de la probeta volumétrica llena con agua y sólido y (W_{sol}) es el peso del sólido seco.

¹⁰ SSS = Saturado con superficie seca

La gravedad específica obtenida para los materiales que se utilizan para efectuar los ensayos de laboratorio se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4-2. Resultados Gravedad específica

| DENOMINACION | Sedimento 1 | | Sedimento 2 | | Sedimento 3 | | Sedimento 4 | | Sedimento 5 | |
|--------------------------------------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|--------|-------------|--------|
| | 5 – 7 | | 5 – 10 | | 18 – 35 | | 5 – 35 | | 5 – 35 | |
| Ensayo No. | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Probeta No. | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Temperatura [Tx] (°C) | 24 | 22 | 18 | 19 | 18 | 20 | 19 | 21 | 19 | 20 |
| W_{fw} (gr) | 339,7 | 336,5 | 332 | 321,7 | 331,9 | 338 | 847,40 | 966,2 | 847,50 | 950,2 |
| W_{fws} (gr) | 400,1 | 398,3 | 393,2 | 382,5 | 394,6 | 401,2 | 962,00 | 1080,1 | 998,00 | 1100,7 |
| W_{sol} (gr) | 98,5 | 99,8 | 98,1 | 98,5 | 98,8 | 100 | 214,10 | 216,4 | 247,70 | 246,90 |
| G_s [20°C] | 2,581 | 2,625 | 2,66 | 2,613 | 2,738 | 2,717 | 2,152 | 2,11 | 2,548 | 2,561 |
| G_s promedio (gr/cm ³) | 2,6 | | 2,63 | | 2,72 | | 2,1311 | | 2,555 | |

W_{fw} : peso del frasco volumétrico lleno con agua

W_{fws} : peso del frasco volumétrico lleno con agua + sólido

W_{sol} : peso del sólido seco

G_s : gravedad específica del sólido

Los resultados de los sedimentos 1 al 3 fueron tomados directamente del trabajo de Morillo, Romero (2008), puesto que como se mencionó anteriormente estos sedimentos fueron cedidos para la presente investigación.

4.2.2. Ensayos de granulometría. Se realiza el ensayo de granulometría para los rangos de tamaños de sedimentos estipulados en el proyecto.

Se hace el ensayo de granulometría para agregados según (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: 2006) I.N.V. E – 213 y otras referencias correspondientes:

- ASTM C-136
- AASHTO T-27
- NLT - 150
- NTC 77

Equipo utilizado

- Balanza, con sensibilidad de por lo menos 0.1%

- Tamices seleccionados de acuerdo con las especificaciones del material que va a ser ensayado
- Tamizador mecánico
- Bandejas
- Recipientes

Procedimiento

Se selecciona un grupo de tamices de tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones de los materiales a ensayar. Colocamos los tamices en orden decreciente, por tamaño de abertura (No. 4, No. 8, No. 10, No. 16, No. 20, No. 30 No. 40, No. 50, No. 100, No. 200) se realiza el tamizado a mano o por medio de un tamizador mecánico, durante un tiempo adecuado.

Se determina el peso del material retenido en cada tamiz en la balanza teniendo cuidado de no disipar el material al llevarlo del tamiz al recipiente. El peso total del material después del tamizado, debe ser comparado con el peso original de la muestra que se ensayó. Si la cantidad difiere en más del 0.3% basado en el peso de la muestra original seca, el resultado no debe ser aceptado.

Cálculos y Resultados

Tabla 4-3. Análisis granulométrico para Sedimento 1

| Sedimento 1 | | | | | |
|--------------|------------|--------------------|------------|----------------------|---------|
| Tamiz (pulg) | Tamiz (mm) | Peso retenido (gr) | % Retenido | % Retenido acumulado | % Pasa |
| No. 4 | 4,76 | 0 | 0,000 | 0,000 | 100,000 |
| No. 8 | 2,38 | 615,4 | 61,632 | 61,632 | 38,368 |
| No. 10 | 2,00 | 316 | 31,647 | 93,280 | 6,720 |
| No. 16 | 1,19 | 57,1 | 5,719 | 98,998 | 1,002 |
| No. 20 | 0,84 | 3,9 | 0,391 | 99,389 | 0,611 |
| No. 40 | 0,35 | 0,9 | 0,090 | 99,479 | 0,521 |
| Fondo | | 5,2 | 0,521 | 100,000 | 0,000 |
| Total | | 998,5 | 100,000 | | |

Tabla 4-4. Análisis granulométrico para Sedimento 2

| Sedimento 2 | | | | | |
|--------------|------------|--------------------|------------|----------------------|---------|
| Tamiz (pulg) | Tamiz (mm) | Peso retenido (gr) | % Retenido | % Retenido acumulado | % Pasa |
| No. 4 | 4,76 | 0,0 | 0,000 | 0,000 | 100,000 |
| No. 8 | 2,38 | 7,5 | 0,752 | 0,752 | 99,248 |
| No. 10 | 2,00 | 304,9 | 30,569 | 31,321 | 68,679 |
| No. 16 | 1,19 | 676,9 | 67,866 | 99,188 | 0,812 |
| No. 20 | 0,84 | 5,5 | 0,551 | 99,739 | 0,261 |
| No. 40 | 0,35 | 0,7 | 0,070 | 99,810 | 0,190 |
| Fondo | | 1,9 | 0,190 | 100,000 | 0,000 |
| Total | | 997,4 | 100,000 | | |

Tabla 4-5. Análisis granulométrico para Sedimento 3

| Sedimento 3 | | | | | |
|--------------|------------|--------------------|------------|----------------------|---------|
| Tamiz (pulg) | Tamiz (mm) | Peso retenido (gr) | % Retenido | % Retenido acumulado | % Pasa |
| No. 10 | 2 | 0 | 0.000 | 0.000 | 100.000 |
| No. 16 | 1.19 | 10.7 | 1.073 | 1.073 | 98.927 |
| No. 20 | 0.84 | 4.1 | 0.411 | 1.484 | 98.516 |
| No. 30 | 0.59 | 454.7 | 45.602 | 47.087 | 52.913 |
| No. 40 | 0.42 | 40.5 | 4.062 | 51.148 | 48.852 |
| No. 50 | 0.297 | 450.2 | 45.151 | 96.299 | 3.701 |
| Fondo | | 36.9 | 3.701 | 100.000 | 0.000 |
| Total | | 997,4 | 100,000 | | |

Tabla 4-6. Análisis granulométrico para Sedimento 4

| Sedimento 4 | | | | | |
|--------------|------------|--------------------|------------|----------------------|---------|
| Tamiz (pulg) | Tamiz (mm) | Peso retenido (gr) | % Retenido | % Retenido acumulado | % Pasa |
| No. 4 | 4.76 | 0 | 0.000 | 0.000 | 100.000 |
| No. 8 | 2.38 | 51.4 | 5.152 | 5.152 | 94.848 |
| No. 16 | 1.19 | 141.9 | 14.223 | 19.375 | 80.625 |
| No. 30 | 0.59 | 360.9 | 36.173 | 55.548 | 44.452 |
| No. 50 | 0.297 | 329.9 | 33.066 | 88.614 | 11.386 |
| No. 100 | 0.149 | 99.7 | 9.993 | 98.607 | 1.393 |
| No. 200 | 0.074 | 9.3 | 0.932 | 99.539 | 0.461 |
| Fondo | | 4.6 | 0.461 | 100.000 | 0.000 |
| Total | | 997.7 | 100.000 | | |

Tabla 4-7. Análisis granulométrico para Sedimento 5

| Sedimento 5 | | | | | |
|--------------|------------|--------------------|------------|----------------------|---------|
| Tamiz (pulg) | Tamiz (mm) | Peso retenido (gr) | % Retenido | % Retenido acumulado | % Pasa |
| No. 4 | 4.76 | 0 | 0.000 | 0.000 | 100.000 |
| No. 8 | 2.38 | 112.9 | 11.316 | 11.316 | 88.684 |
| No. 16 | 1.19 | 139.8 | 14.012 | 25.328 | 74.672 |
| No. 30 | 0.59 | 415.9 | 41.686 | 67.014 | 32.986 |
| No. 50 | 0.297 | 253.7 | 25.428 | 92.443 | 7.557 |
| No. 100 | 0.149 | 69.8 | 6.996 | 99.439 | 0.561 |
| No. 200 | 0.074 | 5.1 | 0.511 | 99.950 | 0.050 |
| Fondo | | 0.5 | 0.050 | 100.000 | 0.000 |
| Total | | 997.7 | 100.000 | | |

La granulometría obtenida para los materiales que se utilizan para efectuar los ensayos de laboratorio se muestran en las siguientes gráficas:

Gráfico 4-2. Curva granulométrica para Sedimento 1

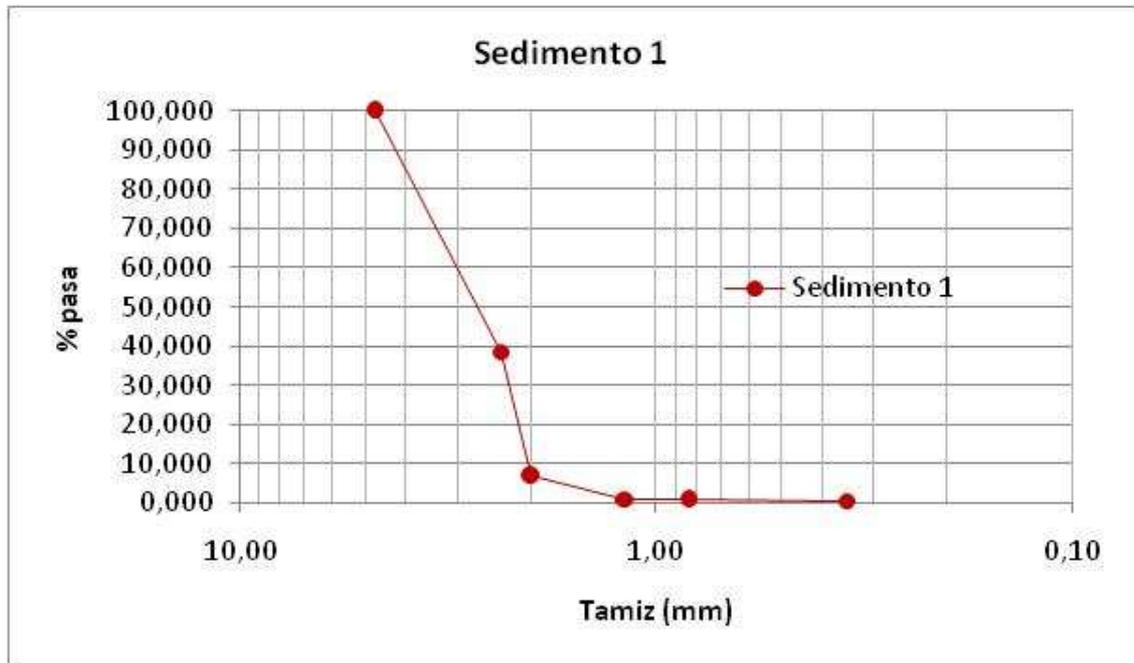


Gráfico 4-3. Curva granulométrica para Sedimento 2

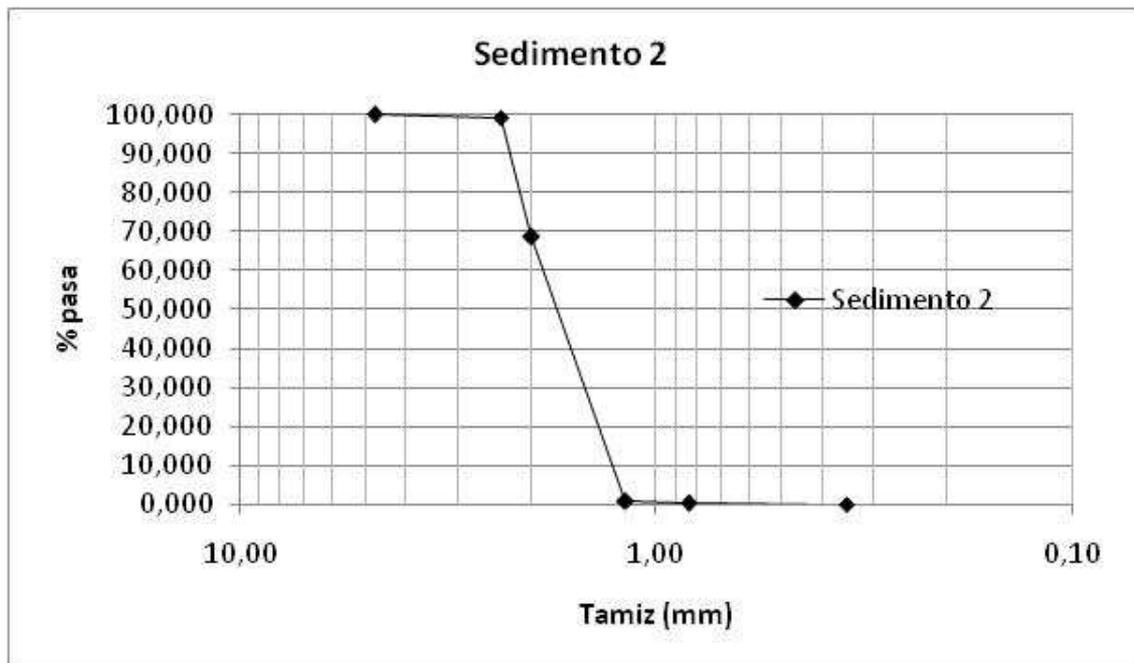


Gráfico 4-4. Curva granulométrica para Sedimento 3

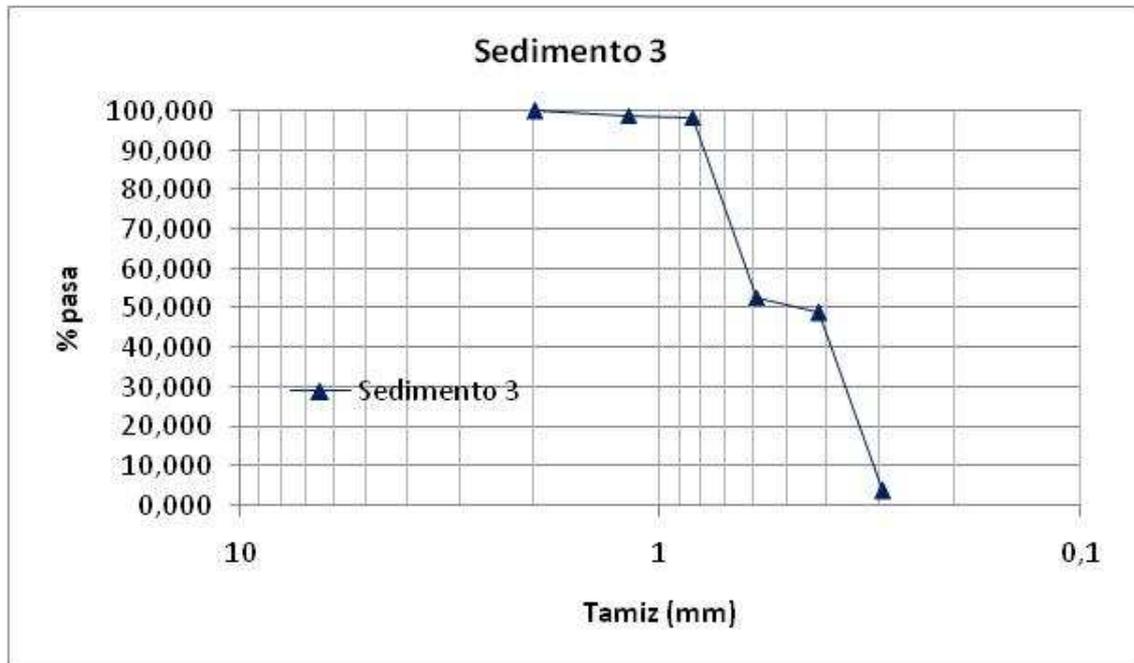


Gráfico 4-5. Curva granulométrica para Sedimento 4

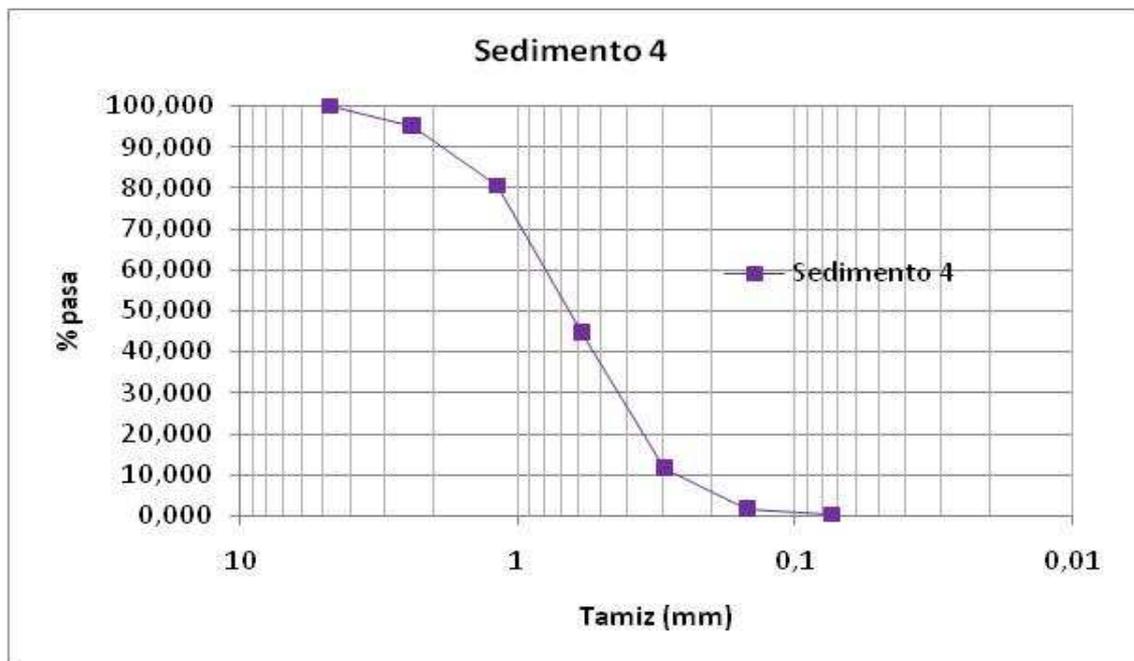
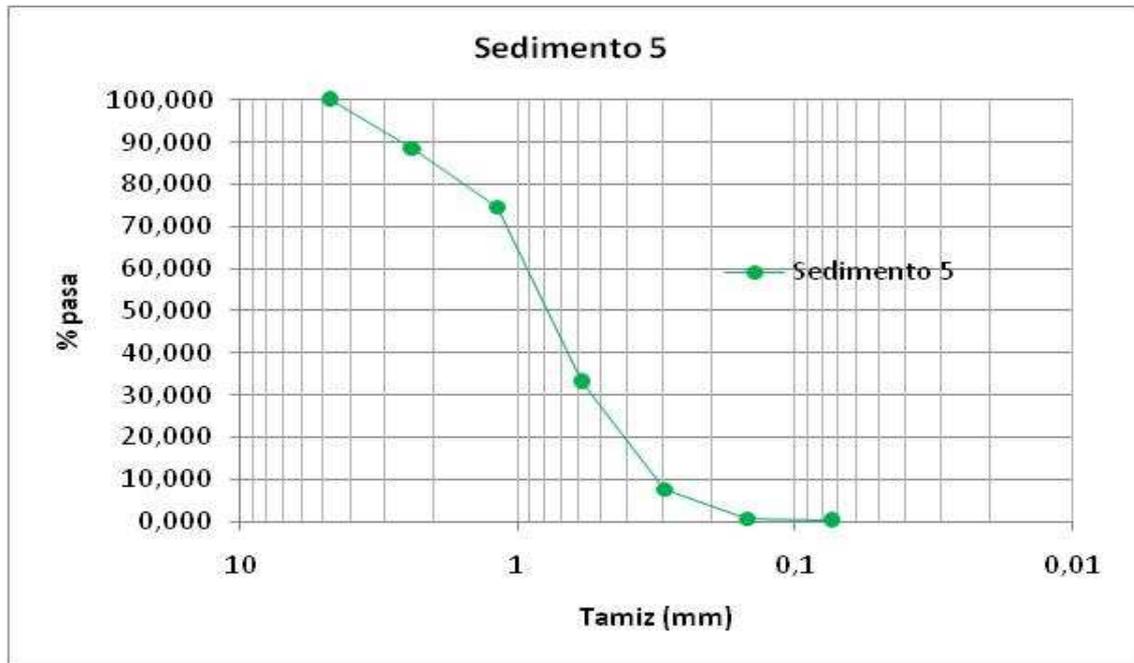


Gráfico 4-6. Curva granulométrica para Sedimento 5



A partir de la granulometría podemos obtener el coeficiente de uniformidad y el d_{50} .

El coeficiente de uniformidad de un sedimento es una medida de la distribución de los materiales en él. El coeficiente de uniformidad, CU, es la razón entre el tamaño de material que es más fino que el 60% del material de la muestra, d_{60} , sobre el tamaño de sedimento que es más fino que el 10% de la muestra, d_{10} .

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

Ecuación 4-4. Coeficiente de Uniformidad

El d_{50} es la abertura del tamiz o tamaño de la partícula en mm, que corresponde al 50% del pasante.

Tabla 4-8. Cálculo del d50

| Sedimento | d ₈₄ | d ₁₆ | d ₆₀ | d ₁₀ | C _U | Desviación estándar | d ₅₀ |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 4,142 | 2,111 | 3,215 | 2,039 | 1,5768 | 1,962 | 2,829 |
| 2 | 2,183 | 1,371 | 1,896 | 1,300 | 1,4585 | 1,592 | 1,768 |
| 3 | 0,760 | 0,331 | 0,887 | 0,314 | 2,8248 | 2,296 | 0,574 |
| 4 | 1,472 | 0,338 | 0,848 | 0,277 | 3,0665 | 4,358 | 0,682 |
| 5 | 1,982 | 0,394 | 0,979 | 0,325 | 3,0108 | 5,027 | 0,835 |

Una muestra con un valor de CU menor que 2 se considera uniforme o con poca variedad de tamaños, mientras que si el valor de CU es mayor que 4 la muestra es una grava bien gradada, que tiene una mayor dispersión de tamaños de granos. Por lo tanto se puede concluir que las muestras usadas en los ensayos están entre los dos casos mencionados.

4.3. CALIBRACION DEL DOSIFICADOR DE SEDIMENTOS

Una vez que el dosificador se ha elaborado de una manera satisfactoria y que se ha comprobado que es practico en su función de agregar sedimentos, se hace imperativo conseguir una calibración del mismo.

La calibración se hace de acuerdo al tamaño de sedimento y vueltas de cierre de la válvula de cierre del mismo, como se observa en la Fotografía 4-1.



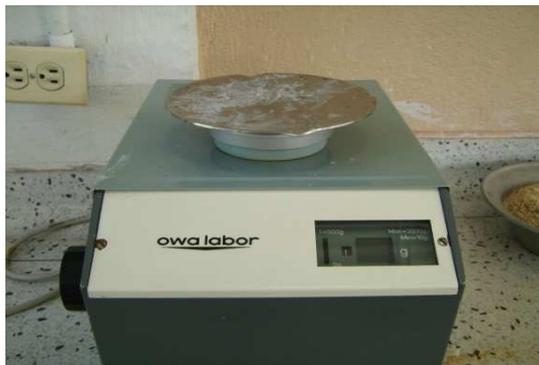
Fotografía 4-1. Válvula de cierre del dosificador de sedimentos

Se hizo entonces para sedimento desde el tipo 1 hasta el tipo 5, se procede a tomar lecturas del tiempo que demora en descargar una cierta cantidad de material en un determinado cierre de válvula, esa cantidad se pesa en una balanza de precisión con error de un gramo.

La Fotografía 4-2 ilustra el material y la Fotografía 4-3 la balanza de precisión usada para la calibración.



Fotografía 4-2. Muestra del sedimento tipo 1



Fotografía 4-3. Balanza de precisión

Los datos obtenidos en el proceso de calibración se tabulan y grafican, con lo que obtenemos las curvas de calibración, las tablas 4-9, 4-10, 4-11, 4-12 y 4-13 muestran los resultados obtenidos y el gráfico 3-1 muestra las curvas de calibración respectivas.

Tabla 4-9. Sedimento 1

| APERTURA | CAUDAL promedio(m3/seg) | # VUELTAS DE CIERRE |
|----------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 3,42E-05 | 0 |
| 2 | 3,24E-05 | 1 ½ |
| 3 | 3,12E-05 | 1 ¾ |
| 4 | 2,90E-05 | 2 |
| 5 | 2,73E-05 | 2 ¼ |
| 6 | 2,58E-05 | 2 ½ |
| 7 | 2,53E-05 | 2 ¾ |
| 8 | 2,51E-05 | 3 |
| 9 | 2,48E-05 | 3 ¼ |
| 10 | 2,42E-05 | 3 ½ |
| 11 | 2,11E-05 | 4 |
| 13 | 1,29E-05 | 5 |

Tabla 4-10. Sedimento 2

| APERTURA | CAUDAL promedio(m3/seg) | # VUELTAS DE CIERRE |
|----------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 4,20E-05 | 0 |
| 2 | 4,00E-05 | 1 ½ |
| 4 | 3,88E-05 | 2 |
| 6 | 3,44E-05 | 2 ½ |
| 8 | 3,18E-05 | 3 |
| 10 | 2,61E-05 | 3 ½ |
| 11 | 2,57E-05 | 4 |
| 12 | 2,23E-05 | 4 ½ |
| 13 | 1,76E-05 | 5 |
| 14 | 1,25E-05 | 5 ½ |
| 15 | 9,79E-06 | 6 |

Tabla 4-11. Sedimento 3

| APERTURA | CAUDAL promedio(m3/seg) | # VUELTAS DE CIERRE |
|----------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 6,01E-05 | 0 |
| 4 | 5,39E-05 | 2 |
| 6 | 4,89E-05 | 2 ½ |
| 8 | 4,23E-05 | 3 |
| 10 | 3,75E-05 | 3 ½ |
| 11 | 3,05E-05 | 4 |
| 12 | 2,56E-05 | 4 ½ |
| 13 | 2,05E-05 | 5 |
| 14 | 1,62E-05 | 5 ½ |
| 15 | 1,08E-05 | 6 |
| 16 | 7,61E-06 | 6 ½ |
| 17 | 7,34E-06 | 7 |

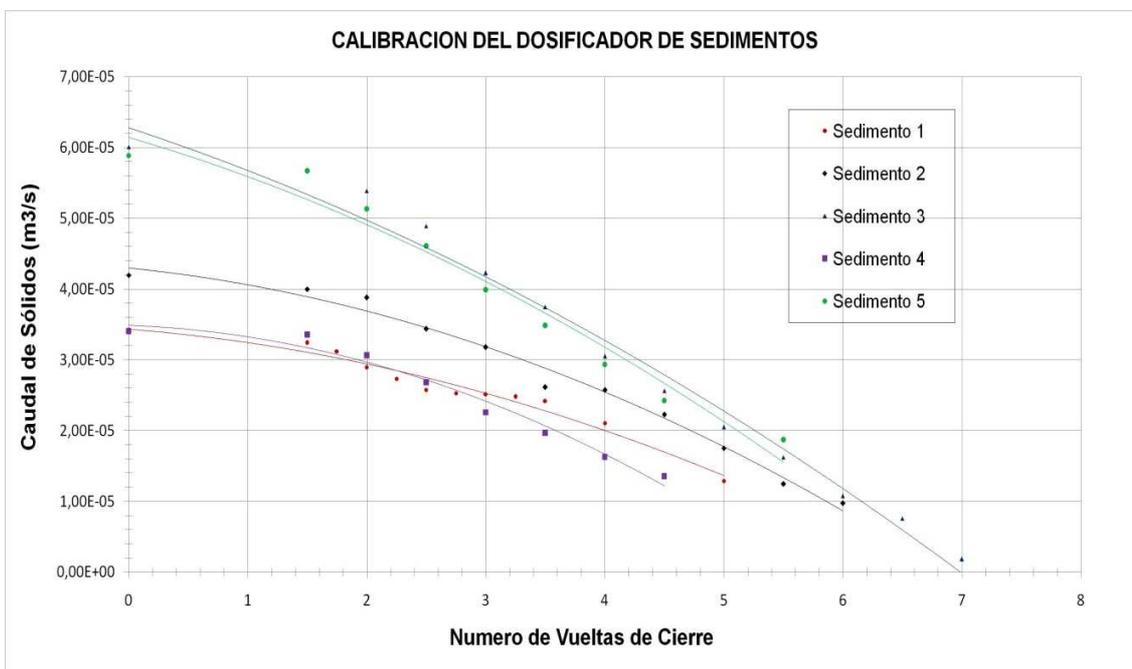
Tabla 4-12. Sedimento 4

| APERTURA | CAUDAL promedio(m3/seg) | # VUELTAS DE CIERRE |
|----------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 3.41E-05 | 0 |
| 2 | 3.36E-05 | 1 ½ |
| 4 | 3.06E-05 | 2 |
| 6 | 2.68E-05 | 2 ½ |
| 8 | 2.26E-05 | 3 |
| 10 | 1.97E-05 | 3 ½ |
| 11 | 1.63E-05 | 4 |
| 12 | 1.36E-05 | 4 ½ |

Tabla 4-13. Sedimento 5

| APERTURA | CAUDAL promedio(m3/seg) | # VUELTAS DE CIERRE |
|----------|-------------------------|---------------------|
| 1 | 5.87E-05 | 0 |
| 2 | 5.67E-05 | 1 ½ |
| 4 | 5.14E-05 | 2 |
| 6 | 4.61E-05 | 2 ½ |
| 8 | 3.99E-05 | 3 |
| 10 | 3.49E-05 | 3 ½ |
| 11 | 2.94E-05 | 4 |
| 12 | 2.42E-05 | 4 ½ |
| 13 | 1.88E-05 | 5 ½ |

Gráfico 4-7. Curvas de Calibración del Dosificador de Sedimentos



4.4. ESTIMACION DEL NÚMERO DE MANNING “*n*” PARA FLUJO DE AGUA

Puesto que para la investigación se intenta recrear condiciones muy similares a la realidad, se hace imperativo conocer el Número de Manning, el cual es fundamental para el procesamiento de los datos, en donde este parámetro intervendrá de una manera activa para lograr los objetivos propuestos en la investigación.

Como se ha hablado anteriormente, en la revisión y estado del arte, el número de Manning, forma parte de la ecuación 1-14, por lo tanto al conocer los demás parámetros involucrados en esta ecuación se puede determinar el valor del coeficiente para flujo de agua sin sedimentos.

Hay que conocer ciertos parámetros que permitirán encontrar el “*n*” de Manning, como son la pendiente del canal ***S***, el caudal líquido ***Ql*** y el diámetro equivalente ***D_{eq}***.

A continuación se describe la forma de cálculo del “*n*” de Manning, llevado a cabo mediante el uso de hojas de cálculo; columna por columna de la hoja de cálculo, se explica la metodología usada. Las hojas de cálculo para la determinación del “*n*” de Manning se presentan más adelante.

Metodología de Cálculo

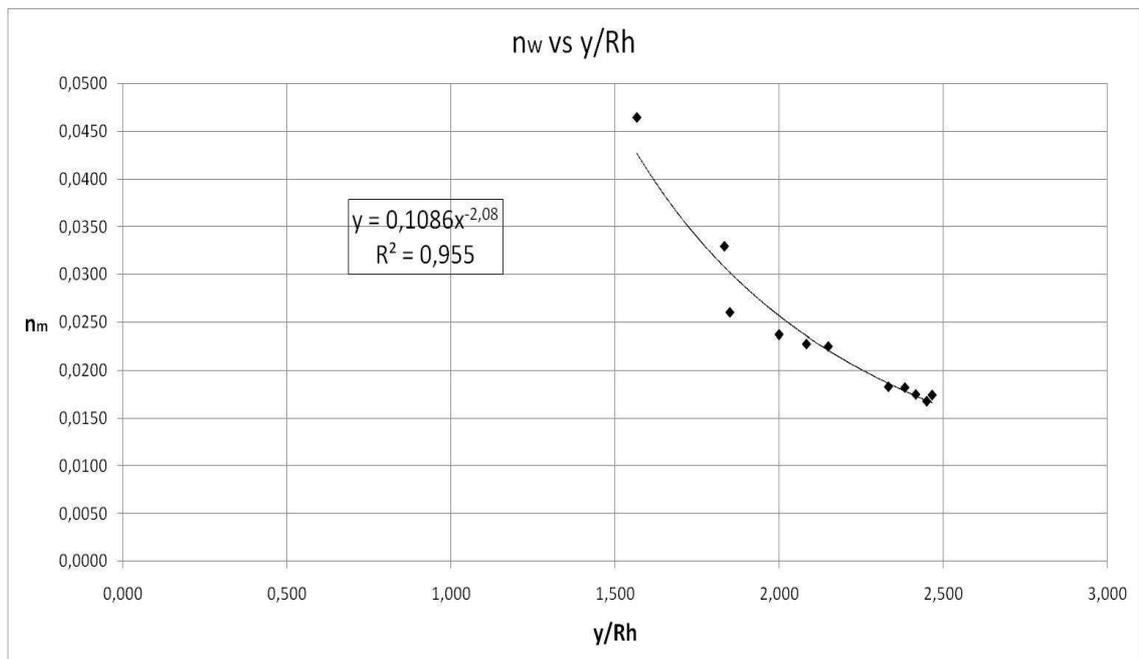
- Columna 1. Ensayo N^o, describe el número del ensayo realizado.
- Columna 2. H Menisco (cm), describe la altura del menisco leído en el manómetro.
- Columna 3. H mercurio (cm), promedio de las diferencias de altura leídas en el manómetro de mercurio, para cada ensayo. Calculado mediante la ecuación 4-2.
- Columna 4. *Ql* (m³/s), caudal líquido promedio para cada ensayo. Calculado por la ecuación 4-1.
- Columna 5. *H_{int}* (m), valor leído de la altura interna de la lámina de agua en el momento del ensayo.
- Columna 6. *H_{ext}* (m), valor leído de la altura externa de la lámina de agua en el momento del ensayo.
- Columna 7. *y_{prom}* (m), promedio de la altura de la lámina de agua en metros.
- Columna 8. *R_H*, es el radio hidráulico, dado por la ecuación 6-19
- Columna 9. *D_{eq}*, es el diámetro equivalente dado por la ecuación 6-20
- Columna 10. *y/R_H*, relación entre la altura promedio y el radio hidráulico.
- Columna 11. *n_w*, es el número *n* de Manning para flujo de agua, el cual se encuentra despejando el *n* de la ecuación 1-14.

Tabla 4-14. Estimación de número n de Manning.

| Ensayo N ^o | H Menisco (cm) | H mercurio (cm) | Ql(m3/s) | Hint(m) | Hext(m) | y prom (m) | R _H (m) | D _{eq} (m) | y/R _H | n _w |
|-----------------------|----------------|-----------------|------------|---------|---------|------------|--------------------|---------------------|------------------|----------------|
| 1 | 53,1 | 23,40 | 0,00359480 | 0,020 | 0,067 | 0,044 | 0,0177 | 0,0658 | 2,450 | 0,01684 |
| 2 | 52,5 | 22,20 | 0,00350346 | 0,021 | 0,067 | 0,044 | 0,0178 | 0,0654 | 2,467 | 0,01749 |
| 3 | 51,6 | 20,40 | 0,00336158 | 0,020 | 0,065 | 0,043 | 0,0175 | 0,0650 | 2,417 | 0,01755 |
| 4 | 50,3 | 17,80 | 0,00314482 | 0,020 | 0,063 | 0,042 | 0,0174 | 0,0646 | 2,383 | 0,01828 |
| 5 | 49,5 | 16,20 | 0,00300329 | 0,019 | 0,061 | 0,040 | 0,0171 | 0,0641 | 2,333 | 0,01836 |
| 6 | 45,1 | 7,40 | 0,00204754 | 0,016 | 0,053 | 0,035 | 0,0160 | 0,0637 | 2,150 | 0,02258 |
| 7 | 44,5 | 6,20 | 0,00187787 | 0,016 | 0,049 | 0,033 | 0,0156 | 0,0614 | 2,083 | 0,02283 |
| 8 | 43,7 | 4,60 | 0,00162288 | 0,015 | 0,045 | 0,030 | 0,0150 | 0,0604 | 2,000 | 0,02380 |
| 9 | 42,6 | 2,40 | 0,00118073 | 0,012 | 0,039 | 0,026 | 0,0137 | 0,0568 | 1,850 | 0,02611 |
| 10 | 42,1 | 1,40 | 0,00090721 | 0,012 | 0,038 | 0,025 | 0,0136 | 0,0551 | 1,833 | 0,03302 |
| 11 | 41,5 | 0,20 | 0,00035038 | 0,005 | 0,045 | 0,017 | 0,0108 | 0,0545 | 1,567 | 0,04651 |

Al graficar el parámetro n_w vs y/R_H , se obtiene la siguiente relación:

Gráfico 4-8. Relación del numero de Manning n_w vs y/R_H



La ecuación de la línea de tendencia potencial que se obtiene es de la siguiente forma:

$$n_w = 0.1086 \left[\frac{y}{R_H} \right]^{-2.08}$$

Ecuación 4-5. Tendencia para n_w vs y/R_H

Al efectuar la corrección por mínimo error de esta tendencia potencial, se obtiene el valor α corregido. Se sustituye el valor α por el corregido, en la ecuación 4-5, obteniendo así la siguiente ecuación.

$$n_w = 0.108 \left[\frac{y}{R_H} \right]^{-2.08}$$

Ecuación 4-6. Ecuación para determinar n de Manning para flujo de agua

CAPITULO 5

TOMA DE MEDICIONES

La toma de mediciones, es el procedimiento por el cual se convierte una prueba o ensayo de laboratorio en una serie de valores que describen el comportamiento del fenómeno en estudio. Es fundamental, dentro de este procedimiento, obtener la mayor aproximación entre las condiciones reales y los valores que las describen; para conseguir esto, se debe contar con elementos de medición adecuados para el caso de estudio, dichos elementos a su vez deben estar calibrados entre los mínimos rangos de error. De esta manera se puede garantizar que los valores obtenidos son una fiel representación del ensayo o prueba realizada.

Es necesario en un principio describir las características y procedimientos de los ensayos realizados para la presente investigación, esto incluye todos los pasos requeridos para recrear el fenómeno en estudio dentro del modelo experimental construido para este fin. Posteriormente a la descripción de los ensayos se mencionará los mecanismos y procedimientos para la obtención de los datos representativos de los mismos, y de la misma forma se presentan los valores obtenidos.

5.1. DESCRIPCION DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

El objetivo de la investigación llevada a cabo radica en estudiar el efecto que tiene la curvatura de un canal en la pérdida de energía, sobre elevación y velocidad crítica de depósito, en el flujo de mezclas sedimentables compuestas por agua y sedimentos naturales a diferentes velocidades del mismo; para la consecución de este objetivo es necesario llevar a cabo una serie de ensayos en el modelo experimental descrito con anterioridad. Dichos ensayos buscan obtener todos los datos requeridos para representar el fenómeno estudiado y así poder realizar un análisis del mismo que concluya en el cumplimiento del objetivo de la investigación.

A continuación se mencionan los pasos más relevantes a seguir para la realización del ensayo característico de esta investigación:

- Ubicar el modelo experimental sobre el sedimentador que se encuentra bajo el montaje para transporte de mezclas y nivelarlo.
- Regular la apertura de la válvula del dosificador de sedimentos según el caudal sólido requerido por el ensayo y colocar el tapón de la válvula.
- Colocar al inicio del canal, (después del tanque de carga) el mecanismo dosificador del sedimento.
- Llenar el tanque de almacenamiento de sedimento con la cantidad requerida para el ensayo. Si durante el ensayo se aprecia que la cantidad de sedimento inicial no es suficiente, se debe agregar más sedimento al tanque hasta satisfacer los requerimientos del ensayo.
- Encender el mecanismo de suministro de agua del montaje para transporte de mezclas, con el fin de suministrar el caudal líquido al modelo experimental.
- Retirar el tapón del mecanismo dosificador del sedimento, con el fin de suministrar el caudal sólido al modelo experimental.
- Disminuir gradualmente el caudal líquido mediante la válvula correspondiente en el montaje para transporte de mezclas, hasta que las partículas del sedimento se depositen en el fondo del canal.

Estos pasos se realizan para cada uno de los cinco sedimentos utilizados, variando en cada caso el caudal sólido en cinco diferentes aperturas de la válvula del dosificador y realizando para cada apertura un promedio de 11 ensayos, con el fin de disminuir la probabilidad de ensayos errados o poder descartarlos en caso de que así sean, sin afectar la adecuada correlación matemática buscada para los datos experimentales.

5.2. DESCRIPCION DE LA TOMA DE MEDICIONES

La toma de datos, del ensayo descrito anteriormente, debe registrar todos los valores necesarios para efectuar los posteriores cálculos sin omitir ningún parámetro que resulte indispensable. Dado que lo que se busca es identificar el instante en el cual las partículas se depositan, es necesario disminuir los errores de medición subjetivos, por lo cual los valores son tomados por medio de una cámara digital que graba el transcurso del ensayo enfocando la zona de estudio y los instrumentos de medición.

Los valores a obtener de cada ensayo son:

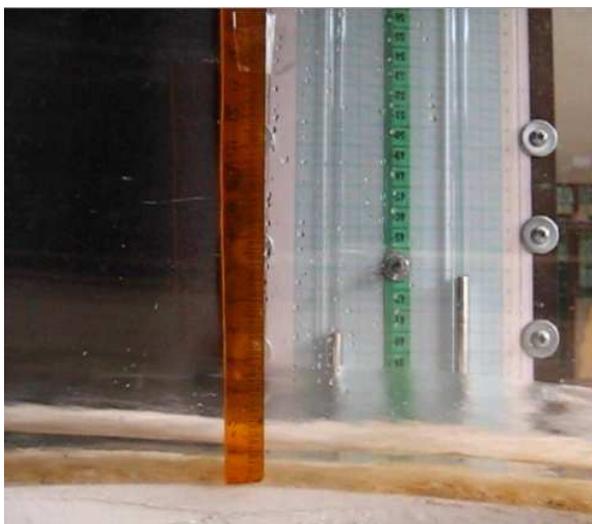
- Caudal líquido.
- Caudal sólido.

- Altura interna de la lámina de agua.
- Altura externa de la lámina de agua.
- Temperatura de la mezcla.

Las características del sedimento utilizado y del canal curvo son conocidas con anterioridad y se toman como constates durante todo el ensayo, pues han sido obtenidas mediante ensayos de suelos y calibraciones descritas en el Capítulo 4; igualmente el caudal de sólidos es constante ya que la válvula del dosificador esta a una apertura constante durante todo el ensayo, y su valor se conoce dado que ya ha sido calibrado en función del sedimento y apertura.

Para la obtención de los valores necesarios para los posteriores cálculos se ha dispuesto un grupo de elementos de medición adecuados al caso, estos elementos son: un medidor de caudal de placa perforada, el cual registra el valor del caudal líquido mediante la lectura de la diferencia de alturas en el mercurio de su respectivo manómetro, una regla encargada de medir las alturas de la lámina de agua, un termómetro encargado de registrar la temperatura del flujo durante el ensayo y por último una cámara digital, encargada de grabar el comportamiento del flujo de mezcla y los elementos de medición ya descritos. La fotografía 5-1. “Elementos de Toma de Datos”, ilustra lo anterior.

Fotografía 5-1. Elementos de Toma de Datos



El resultado del proceso de toma de datos es un video que permite apreciar el instante en el cual las partículas del sedimento se depositan en el fondo del canal; en ese instante se toma lectura de la altura del menisco del mercurio, las alturas de la lámina de agua y la temperatura que marca el termómetro, el cual no se encuentra dentro de la grabación pues por su tamaño interfiere con los demás elementos de medición, pero el valor se registra en el formato de toma de datos.

Cada uno de estos videos se renombra de tal manera que el nombre del archivo muestre el flujo estudiado, el numero de sedimento usado, la apertura de la válvula del dosificador, la temperatura del ensayo y el número del ensayo; por ejemplo, para la fotografía 5-1. “Elementos de Toma de Datos” el nombre del archivo es: “Mezcla- 1- apertura_8- T_16.9- 2”.

Los valores obtenidos de los ensayos realizados se muestran a continuación desde el sedimento 1 y la mayor apertura de la válvula dosificadora, hasta el sedimento 5 y la menor apertura de la válvula dosificadora.

Tabla 5-1. Sedimento 1, Apertura 1

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 47,70 | 17,10 | 0,022 | 0,057 |
| 2 | 47,80 | 17,10 | 0,021 | 0,058 |
| 3 | 47,70 | 17,10 | 0,022 | 0,058 |
| 4 | 47,70 | 17,10 | 0,022 | 0,057 |
| 5 | 47,80 | 17,00 | 0,022 | 0,058 |
| 6 | 47,80 | 17,00 | 0,021 | 0,058 |
| 7 | 47,70 | 17,10 | 0,021 | 0,058 |
| 8 | 47,80 | 17,10 | 0,021 | 0,057 |
| 9 | 47,80 | 17,00 | 0,022 | 0,058 |
| 10 | 47,80 | 17,10 | 0,021 | 0,058 |
| 11 | 47,80 | 17,10 | 0,021 | 0,058 |

Tabla 5-2. Sedimento 1, Apertura 4

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 45,9 | 17,00 | 0,021 | 0,050 |
| 2 | 45,9 | 17,10 | 0,020 | 0,050 |
| 3 | 45,9 | 17,00 | 0,021 | 0,050 |
| 4 | 45,9 | 17,00 | 0,020 | 0,050 |
| 5 | 46,0 | 17,00 | 0,021 | 0,051 |
| 6 | 46,0 | 17,00 | 0,020 | 0,050 |
| 7 | 46,0 | 17,00 | 0,020 | 0,052 |
| 8 | 45,9 | 17,10 | 0,021 | 0,051 |
| 9 | 45,9 | 17,00 | 0,020 | 0,051 |
| 10 | 46,0 | 17,10 | 0,020 | 0,051 |
| 11 | 45,9 | 17,10 | 0,020 | 0,051 |

Tabla 5-3. Sedimento 1, Apertura 6

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 44,5 | 16,90 | 0,019 | 0,048 |
| 2 | 44,6 | 16,90 | 0,020 | 0,047 |
| 3 | 44,6 | 17,00 | 0,020 | 0,048 |
| 4 | 44,6 | 16,90 | 0,020 | 0,047 |
| 5 | 44,5 | 16,90 | 0,019 | 0,048 |
| 6 | 44,5 | 16,90 | 0,019 | 0,047 |
| 7 | 44,5 | 17,00 | 0,019 | 0,048 |
| 8 | 44,5 | 16,90 | 0,019 | 0,047 |
| 9 | 44,6 | 16,90 | 0,020 | 0,048 |
| 10 | 44,6 | 16,90 | 0,020 | 0,048 |
| 11 | 44,6 | 16,90 | 0,019 | 0,047 |

Tabla 5-4. Sedimento 1, Apertura 8

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 43,0 | 17,00 | 0,018 | 0,046 |
| 2 | 42,9 | 16,90 | 0,019 | 0,047 |
| 3 | 42,9 | 17,00 | 0,019 | 0,047 |
| 4 | 43,0 | 17,00 | 0,018 | 0,045 |
| 5 | 43,0 | 16,90 | 0,018 | 0,046 |
| 6 | 42,9 | 17,00 | 0,018 | 0,046 |
| 7 | 42,9 | 17,00 | 0,018 | 0,046 |
| 8 | 43,0 | 17,00 | 0,019 | 0,046 |
| 9 | 43,0 | 17,00 | 0,019 | 0,047 |
| 10 | 42,9 | 16,90 | 0,019 | 0,047 |
| 11 | 43,0 | 17,00 | 0,018 | 0,046 |

Tabla 5-5. Sedimento 1, Apertura 11

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 41,7 | 16,60 | 0,014 | 0,041 |
| 2 | 41,8 | 16,70 | 0,013 | 0,041 |
| 3 | 41,7 | 16,60 | 0,014 | 0,040 |
| 4 | 41,8 | 16,70 | 0,014 | 0,040 |
| 5 | 41,7 | 16,70 | 0,013 | 0,041 |
| 6 | 41,7 | 16,60 | 0,014 | 0,040 |
| 7 | 41,8 | 16,60 | 0,013 | 0,041 |
| 8 | 41,8 | 16,60 | 0,014 | 0,041 |
| 9 | 41,8 | 16,60 | 0,014 | 0,041 |
| 10 | 41,8 | 16,70 | 0,014 | 0,040 |
| 11 | 41,7 | 16,70 | 0,013 | 0,041 |

Tabla 5-6. Sedimento 2, Apertura 1

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 49,40 | 16,80 | 0,028 | 0,058 |
| 2 | 49,50 | 16,80 | 0,029 | 0,057 |
| 3 | 49,50 | 17,00 | 0,028 | 0,057 |
| 4 | 49,40 | 17,10 | 0,028 | 0,057 |
| 5 | 49,50 | 17,00 | 0,029 | 0,058 |
| 6 | 49,50 | 17,00 | 0,029 | 0,057 |
| 7 | 49,40 | 17,10 | 0,029 | 0,058 |
| 8 | 49,50 | 17,10 | 0,029 | 0,058 |
| 9 | 49,30 | 17,10 | 0,029 | 0,057 |
| 10 | 49,50 | 17,10 | 0,028 | 0,058 |
| 11 | 49,50 | 17,00 | 0,029 | 0,058 |

Tabla 5-7. Sedimento 2, Apertura 4

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 48,3 | 17,00 | 0,026 | 0,054 |
| 2 | 48,3 | 17,00 | 0,027 | 0,054 |
| 3 | 48,2 | 17,00 | 0,027 | 0,055 |
| 4 | 48,1 | 17,00 | 0,027 | 0,055 |
| 5 | 48,3 | 17,10 | 0,026 | 0,054 |
| 6 | 48,2 | 16,90 | 0,026 | 0,054 |
| 7 | 48,2 | 16,90 | 0,027 | 0,054 |
| 8 | 48,1 | 16,90 | 0,027 | 0,055 |
| 9 | 48,3 | 16,90 | 0,027 | 0,054 |
| 10 | 48,1 | 16,90 | 0,026 | 0,055 |
| 11 | 48,3 | 17,00 | 0,026 | 0,054 |

Tabla 5-8. Sedimento 2, Apertura 8

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 46,0 | 16,80 | 0,023 | 0,049 |
| 2 | 45,9 | 16,80 | 0,023 | 0,048 |
| 3 | 45,9 | 16,80 | 0,022 | 0,048 |
| 4 | 46,1 | 16,80 | 0,022 | 0,048 |
| 5 | 46,1 | 16,80 | 0,023 | 0,049 |
| 6 | 45,9 | 16,80 | 0,023 | 0,049 |
| 7 | 46,0 | 16,00 | 0,022 | 0,049 |
| 8 | 46,0 | 16,80 | 0,023 | 0,049 |
| 9 | 45,9 | 16,80 | 0,022 | 0,049 |
| 10 | 45,9 | 16,80 | 0,023 | 0,048 |
| 11 | 46,0 | 16,80 | 0,022 | 0,049 |

Tabla 5-9. Sedimento 2, Apertura 11

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 42,8 | 16,70 | 0,020 | 0,045 |
| 2 | 42,8 | 16,70 | 0,020 | 0,046 |
| 3 | 42,9 | 16,70 | 0,019 | 0,046 |
| 4 | 42,9 | 16,70 | 0,021 | 0,045 |
| 5 | 42,8 | 16,70 | 0,020 | 0,046 |
| 6 | 42,8 | 16,60 | 0,020 | 0,046 |
| 7 | 42,8 | 16,60 | 0,021 | 0,045 |
| 8 | 42,9 | 16,60 | 0,020 | 0,046 |
| 9 | 42,9 | 16,70 | 0,019 | 0,045 |
| 10 | 42,9 | 16,70 | 0,021 | 0,045 |
| 11 | 42,8 | 16,70 | 0,020 | 0,046 |

Tabla 5-10. Sedimento 2, Apertura 13

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 41,6 | 16,80 | 0,011 | 0,035 |
| 2 | 41,5 | 16,80 | 0,011 | 0,034 |
| 3 | 41,6 | 16,80 | 0,012 | 0,035 |
| 4 | 41,6 | 16,80 | 0,011 | 0,035 |
| 5 | 41,5 | 16,80 | 0,011 | 0,034 |
| 6 | 41,5 | 16,80 | 0,012 | 0,035 |
| 7 | 41,6 | 16,80 | 0,011 | 0,034 |
| 8 | 41,6 | 16,80 | 0,012 | 0,035 |
| 9 | 41,5 | 16,80 | 0,011 | 0,035 |
| 10 | 41,5 | 16,80 | 0,011 | 0,035 |
| 11 | 41,7 | 16,80 | 0,012 | 0,035 |

Tabla 5-11. Sedimento 3, Apertura 12

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 53,10 | 16,40 | 0,029 | 0,061 |
| 2 | 53,00 | 16,40 | 0,028 | 0,060 |
| 3 | 53,10 | 16,40 | 0,030 | 0,061 |
| 4 | 53,10 | 16,40 | 0,029 | 0,060 |
| 5 | 53,10 | 16,40 | 0,029 | 0,060 |
| 6 | 53,00 | 16,40 | 0,029 | 0,061 |
| 7 | 53,00 | 16,40 | 0,028 | 0,061 |
| 8 | 52,90 | 16,40 | 0,028 | 0,062 |
| 9 | 52,90 | 16,40 | 0,030 | 0,062 |
| 10 | 52,90 | 16,40 | 0,029 | 0,062 |
| 11 | 53,00 | 16,40 | 0,029 | 0,059 |

Tabla 5-12. Sedimento 3, Apertura 13

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 45,0 | 16,40 | 0,021 | 0,049 |
| 2 | 44,9 | 16,40 | 0,020 | 0,048 |
| 3 | 44,9 | 16,40 | 0,020 | 0,049 |
| 4 | 44,9 | 16,40 | 0,020 | 0,049 |
| 5 | 45,0 | 16,40 | 0,020 | 0,048 |
| 6 | 45,0 | 16,40 | 0,021 | 0,048 |
| 7 | 45,1 | 16,40 | 0,021 | 0,048 |
| 8 | 45,1 | 16,50 | 0,021 | 0,048 |
| 9 | 45,1 | 16,50 | 0,021 | 0,049 |
| 10 | 45,0 | 16,50 | 0,020 | 0,048 |
| 11 | 45,0 | 16,50 | 0,021 | 0,049 |

Tabla 5-13. Sedimento 3, Apertura 14

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 43,0 | 16,00 | 0,019 | 0,045 |
| 2 | 43,0 | 16,00 | 0,018 | 0,045 |
| 3 | 43,0 | 16,00 | 0,019 | 0,044 |
| 4 | 42,9 | 16,10 | 0,019 | 0,044 |
| 5 | 43,0 | 16,10 | 0,018 | 0,044 |
| 6 | 43,0 | 16,10 | 0,018 | 0,045 |
| 7 | 42,9 | 16,10 | 0,019 | 0,045 |
| 8 | 42,9 | 16,10 | 0,018 | 0,045 |
| 9 | 43,0 | 16,10 | 0,018 | 0,044 |
| 10 | 43,0 | 16,10 | 0,018 | 0,044 |
| 11 | 42,9 | 16,10 | 0,018 | 0,045 |

Tabla 5-14. Sedimento 3, Apertura 15

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 42,5 | 16,20 | 0,016 | 0,041 |
| 2 | 42,4 | 16,20 | 0,016 | 0,041 |
| 3 | 42,3 | 16,20 | 0,016 | 0,042 |
| 4 | 42,5 | 16,20 | 0,015 | 0,042 |
| 5 | 42,5 | 16,10 | 0,015 | 0,042 |
| 6 | 42,3 | 16,00 | 0,015 | 0,042 |
| 7 | 42,5 | 16,00 | 0,016 | 0,041 |
| 8 | 42,5 | 16,10 | 0,016 | 0,041 |
| 9 | 42,0 | 16,10 | 0,016 | 0,042 |
| 10 | 42,4 | 16,00 | 0,016 | 0,041 |
| 11 | 42,4 | 16,00 | 0,016 | 0,041 |

Tabla 5-15. Sedimento 3, Apertura 17

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 41,5 | 15,80 | 0,008 | 0,028 |
| 2 | 41,6 | 15,90 | 0,007 | 0,029 |
| 3 | 41,5 | 15,90 | 0,008 | 0,030 |
| 4 | 41,5 | 15,90 | 0,008 | 0,028 |
| 5 | 41,5 | 15,90 | 0,008 | 0,028 |
| 6 | 41,6 | 15,90 | 0,007 | 0,029 |
| 7 | 41,5 | 15,90 | 0,007 | 0,030 |
| 8 | 41,5 | 15,90 | 0,008 | 0,028 |
| 9 | 41,6 | 15,90 | 0,007 | 0,029 |
| 10 | 41,5 | 16,00 | 0,008 | 0,028 |
| 11 | 41,5 | 16,00 | 0,007 | 0,028 |

Tabla 5-16. Sedimento 4, Apertura 4

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 45,60 | 16,30 | 0,020 | 0,051 |
| 2 | 45,60 | 16,30 | 0,020 | 0,05 |
| 3 | 45,60 | 16,30 | 0,019 | 0,05 |
| 4 | 45,60 | 16,30 | 0,020 | 0,051 |
| 5 | 45,60 | 16,30 | 0,020 | 0,049 |
| 6 | 45,60 | 16,30 | 0,019 | 0,05 |
| 7 | 45,60 | 16,30 | 0,020 | 0,05 |
| 8 | 45,60 | 16,40 | 0,020 | 0,049 |
| 9 | 45,60 | 16,40 | 0,019 | 0,051 |
| 10 | 45,60 | 16,40 | 0,020 | 0,049 |
| 11 | 45,60 | 16,50 | 0,019 | 0,05 |

Tabla 5-17. Sedimento 4, Apertura 6

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 44,5 | 16,10 | 0,019 | 0,048 |
| 2 | 44,6 | 16,10 | 0,020 | 0,047 |
| 3 | 44,6 | 16,10 | 0,020 | 0,048 |
| 4 | 44,6 | 16,10 | 0,020 | 0,047 |
| 5 | 44,5 | 16,10 | 0,019 | 0,048 |
| 6 | 44,5 | 16,10 | 0,019 | 0,048 |
| 7 | 44,5 | 16,10 | 0,019 | 0,048 |
| 8 | 44,4 | 16,10 | 0,019 | 0,047 |
| 9 | 44,4 | 16,20 | 0,018 | 0,047 |
| 10 | 44,5 | 16,20 | 0,018 | 0,047 |
| 11 | 44,5 | 16,20 | 0,019 | 0,047 |

Tabla 5-18. Sedimento 4, Apertura 8

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 43,6 | 16,90 | 0,016 | 0,045 |
| 2 | 43,5 | 16,90 | 0,016 | 0,045 |
| 3 | 43,5 | 17,00 | 0,017 | 0,044 |
| 4 | 43,5 | 16,90 | 0,017 | 0,045 |
| 5 | 43,6 | 16,90 | 0,016 | 0,045 |
| 6 | 43,6 | 16,90 | 0,016 | 0,045 |
| 7 | 43,6 | 17,00 | 0,017 | 0,044 |
| 8 | 43,8 | 16,90 | 0,016 | 0,045 |
| 9 | 43,5 | 16,90 | 0,016 | 0,044 |
| 10 | 43,6 | 16,90 | 0,017 | 0,045 |
| 11 | 43,5 | 16,90 | 0,017 | 0,045 |

Tabla 5-19. Sedimento 4, Apertura 11

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 42,5 | 16,00 | 0,015 | 0,042 |
| 2 | 42,5 | 16,10 | 0,014 | 0,041 |
| 3 | 42,4 | 16,10 | 0,015 | 0,042 |
| 4 | 42,5 | 16,10 | 0,015 | 0,042 |
| 5 | 42,5 | 16,10 | 0,014 | 0,041 |
| 6 | 42,4 | 16,10 | 0,015 | 0,041 |
| 7 | 42,4 | 16,10 | 0,014 | 0,042 |
| 8 | 42,5 | 16,20 | 0,014 | 0,042 |
| 9 | 42,4 | 16,20 | 0,015 | 0,041 |
| 10 | 42,5 | 16,20 | 0,014 | 0,041 |
| 11 | 42,5 | 16,20 | 0,014 | 0,041 |

Tabla 5-20. Sedimento 4, Apertura 12

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 42,0 | 16,00 | 0,013 | 0,035 |
| 2 | 42,1 | 16,00 | 0,013 | 0,035 |
| 3 | 42,1 | 16,00 | 0,013 | 0,036 |
| 4 | 42,0 | 16,00 | 0,012 | 0,035 |
| 5 | 42,0 | 16,00 | 0,012 | 0,036 |
| 6 | 42,0 | 16,00 | 0,013 | 0,036 |
| 7 | 42,1 | 16,10 | 0,014 | 0,036 |
| 8 | 42,1 | 16,10 | 0,012 | 0,035 |
| 9 | 42,0 | 16,10 | 0,012 | 0,035 |
| 10 | 42,1 | 16,10 | 0,012 | 0,036 |
| 11 | 42,0 | 16,10 | 0,013 | 0,036 |

Tabla 5-21. Sedimento 5, Apertura 6

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 51,00 | 16,00 | 0,027 | 0,059 |
| 2 | 51,10 | 16,00 | 0,028 | 0,059 |
| 3 | 51,20 | 16,00 | 0,028 | 0,059 |
| 4 | 51,10 | 16,00 | 0,027 | 0,059 |
| 5 | 51,20 | 16,00 | 0,027 | 0,059 |
| 6 | 51,00 | 16,00 | 0,027 | 0,060 |
| 7 | 51,00 | 16,00 | 0,028 | 0,059 |
| 8 | 51,10 | 16,10 | 0,028 | 0,060 |
| 9 | 51,10 | 16,10 | 0,028 | 0,060 |
| 10 | 51,20 | 16,10 | 0,027 | 0,060 |
| 11 | 51,00 | 16,10 | 0,028 | 0,059 |

Tabla 5-22. Sedimento 5, Apertura 8

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 48,5 | 16,30 | 0,025 | 0,056 |
| 2 | 48,6 | 16,30 | 0,025 | 0,057 |
| 3 | 48,5 | 16,30 | 0,025 | 0,056 |
| 4 | 48,4 | 16,30 | 0,024 | 0,056 |
| 5 | 48,4 | 16,30 | 0,025 | 0,057 |
| 6 | 48,5 | 16,40 | 0,025 | 0,056 |
| 7 | 48,5 | 16,40 | 0,025 | 0,057 |
| 8 | 48,6 | 16,40 | 0,024 | 0,056 |
| 9 | 48,6 | 16,40 | 0,024 | 0,057 |
| 10 | 48,6 | 16,40 | 0,025 | 0,056 |
| 11 | 48,4 | 16,40 | 0,024 | 0,056 |

Tabla 5-23. Sedimento 5, Apertura 10

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 46,8 | 16,40 | 0,023 | 0,053 |
| 2 | 46,7 | 16,40 | 0,022 | 0,052 |
| 3 | 46,7 | 16,40 | 0,023 | 0,053 |
| 4 | 46,7 | 16,40 | 0,023 | 0,052 |
| 5 | 46,6 | 16,40 | 0,023 | 0,053 |
| 6 | 46,8 | 16,40 | 0,022 | 0,052 |
| 7 | 46,8 | 16,40 | 0,023 | 0,052 |
| 8 | 46,7 | 16,40 | 0,022 | 0,053 |
| 9 | 46,6 | 16,50 | 0,023 | 0,053 |
| 10 | 46,7 | 16,50 | 0,022 | 0,052 |
| 11 | 46,7 | 16,50 | 0,022 | 0,053 |

Tabla 5-24. Sedimento 5, Apertura 11

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 45,1 | 16,20 | 0,021 | 0,049 |
| 2 | 45,1 | 16,30 | 0,020 | 0,048 |
| 3 | 45,1 | 16,30 | 0,020 | 0,049 |
| 4 | 45,0 | 16,30 | 0,020 | 0,049 |
| 5 | 45,0 | 16,30 | 0,020 | 0,048 |
| 6 | 45,0 | 16,30 | 0,021 | 0,048 |
| 7 | 45,1 | 16,30 | 0,021 | 0,048 |
| 8 | 45,1 | 16,30 | 0,021 | 0,048 |
| 9 | 45,0 | 16,40 | 0,021 | 0,049 |
| 10 | 45,0 | 16,40 | 0,020 | 0,048 |
| 11 | 45,1 | 16,40 | 0,021 | 0,049 |

Tabla 5-25. Sedimento 5, Apertura 13

| Ensayo N° | H Menisco(cm) | Temperatura(°C) | Hint(m) | Hext(m) |
|-----------|---------------|-----------------|---------|---------|
| 1 | 42,5 | 16,00 | 0,017 | 0,043 |
| 2 | 45,4 | 16,00 | 0,016 | 0,043 |
| 3 | 42,5 | 16,00 | 0,017 | 0,044 |
| 4 | 42,5 | 16,00 | 0,016 | 0,044 |
| 5 | 42,4 | 16,00 | 0,016 | 0,043 |
| 6 | 42,4 | 16,00 | 0,016 | 0,043 |
| 7 | 42,4 | 16,00 | 0,017 | 0,044 |
| 8 | 42,5 | 16,10 | 0,017 | 0,043 |
| 9 | 42,4 | 16,10 | 0,016 | 0,044 |
| 10 | 42,6 | 16,10 | 0,016 | 0,044 |
| 11 | 42,6 | 16,10 | 0,016 | 0,043 |

Para las tablas anteriormente mostradas, de izquierda a derecha se mencionan los componentes de cada columna:

- Columna 1. Ensayo N°, Número del ensayo realizado
- Columna 2. H Menisco (cm), lectura del valor de la altura del menisco de mercurio en el manómetro
- Columna 3. Temperatura (°C), valor de la temperatura en el momento del ensayo.
- Columna 4. Hint (m), valor leído de la altura interna de la lámina de agua en el momento del ensayo.
- Columna 5. Hext (m), valor leído de la altura externa de la lámina de agua en el momento del ensayo.

A continuación en la tabla 5-26, se presentan los datos anteriores en forma de promedios para cada grupo de valores, es decir:

- Columna 1. Sedim, clase de sedimento utilizado para el ensayo

- Columna 2. Qs (m³/s), promedio de las lecturas del valor de los caudales sólidos para cada uno de los ensayos.
- Columna 3. H Menisco (cm), promedio de las lecturas del valor de las alturas del menisco de mercurio en el manómetro para cada uno de los ensayos.
- Columna 4. Temp (°C), promedio de los valores de la temperatura en el momento de los ensayos para cada uno de los mismos.
- Columna 5. Hint (m), promedio de los valores leídos de la altura interna de la lámina de agua, para cada ensayo.
- Columna 6. Hext (m), promedio de los valores leídos de la altura externa de la lámina de agua, para cada ensayo.
- Columna 7. H mercurio (cm), promedio de las diferencias de altura leídas en el manómetro de mercurio, para cada ensayo. Calculado mediante la ecuación 4-2.
- Columna 8. Ql (m³/s), caudal líquido promedio para cada ensayo. Calculado por la ecuación 4-1.
- Columna 9. Qm (m³/s), caudal de la mezcla resultado de la sumatoria de Qs y Ql para cada ensayo.

Tabla 5-26. Promedios de datos obtenidos experimentalmente

| Sedim | Qs (m ³ /s) | H Menisco (cm) | Temp (°C) | Hint(m) | Hext(m) | H mercurio(cm) | Ql (m ³ /s) | Qm (m ³ /s) |
|-------|------------------------|----------------|-----------|---------|---------|----------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 3,4177E-05 | 47,8 | 17,1 | 0,021 | 0,058 | 12,73 | 0,002669 | 0,002703 |
| 1 | 2,8983E-05 | 45,9 | 17,0 | 0,020 | 0,051 | 9,07 | 0,002262 | 0,002291 |
| 1 | 2,5786E-05 | 44,6 | 16,9 | 0,019 | 0,048 | 6,31 | 0,001894 | 0,001920 |
| 1 | 2,5138E-05 | 43,0 | 17,0 | 0,018 | 0,046 | 3,11 | 0,001340 | 0,001365 |
| 1 | 2,1076E-05 | 41,8 | 16,6 | 0,014 | 0,041 | 0,71 | 0,000651 | 0,000672 |
| 2 | 4,1982E-05 | 49,5 | 17,0 | 0,029 | 0,058 | 16,11 | 0,002995 | 0,003037 |
| 2 | 3,8830E-05 | 48,2 | 17,0 | 0,027 | 0,054 | 13,64 | 0,002761 | 0,002800 |
| 2 | 3,2912E-05 | 46,0 | 16,7 | 0,023 | 0,049 | 9,15 | 0,002271 | 0,002304 |
| 2 | 2,6095E-05 | 42,8 | 16,7 | 0,020 | 0,046 | 2,89 | 0,001293 | 0,001319 |
| 2 | 1,7551E-05 | 41,6 | 16,8 | 0,011 | 0,035 | 0,33 | 0,000446 | 0,000463 |
| 3 | 2,5646E-05 | 53,0 | 16,4 | 0,029 | 0,061 | 23,22 | 0,003581 | 0,003607 |
| 3 | 1,7906E-05 | 45,0 | 16,4 | 0,021 | 0,048 | 7,20 | 0,002020 | 0,002038 |
| 3 | 1,5062E-05 | 43,0 | 16,1 | 0,018 | 0,045 | 3,13 | 0,001344 | 0,001359 |
| 3 | 1,3299E-05 | 42,4 | 16,1 | 0,016 | 0,041 | 1,98 | 0,001075 | 0,001089 |
| 3 | 1,8384E-06 | 41,5 | 15,9 | 0,008 | 0,029 | 0,25 | 0,000394 | 0,000396 |
| 4 | 3,0646E-05 | 45,6 | 16,3 | 0,020 | 0,050 | 8,40 | 0,002178 | 0,002209 |
| 4 | 2,6830E-05 | 44,5 | 16,1 | 0,019 | 0,047 | 6,22 | 0,001881 | 0,001907 |
| 4 | 2,2585E-05 | 43,6 | 16,9 | 0,016 | 0,045 | 4,35 | 0,001578 | 0,001601 |
| 4 | 1,6300E-05 | 42,5 | 16,1 | 0,014 | 0,041 | 2,13 | 0,001113 | 0,001129 |
| 4 | 1,3560E-05 | 42,0 | 16,0 | 0,013 | 0,036 | 1,29 | 0,000872 | 0,000885 |
| 5 | 4,6112E-05 | 51,1 | 16,0 | 0,028 | 0,059 | 19,38 | 0,003278 | 0,003325 |
| 5 | 3,9921E-05 | 48,5 | 16,4 | 0,025 | 0,056 | 14,22 | 0,002818 | 0,002858 |
| 5 | 3,4855E-05 | 46,7 | 16,4 | 0,023 | 0,053 | 10,62 | 0,002443 | 0,002478 |
| 5 | 2,9365E-05 | 45,1 | 16,3 | 0,021 | 0,048 | 7,31 | 0,002035 | 0,002065 |
| 5 | 1,8754E-05 | 42,7 | 16,0 | 0,016 | 0,043 | 2,69 | 0,001249 | 0,001267 |

De igual forma y en un formato similar al anterior se muestran a continuación los datos experimentales para el análisis de la pérdida de energía en el flujo de la mezcla.

Tabla 5-27. Datos Experimentales para Pérdida de Energía

| Sedim | Qs (m3/s) | H Menisco (cm) | Temp (°C) | Hint(m) | Hext(m) | H mercurio(cm) | Ql (m3/s) | Qm (m3/s) |
|-------|------------|----------------|-----------|---------|---------|----------------|-----------|-----------|
| 1 | 3,4177E-05 | 49,0 | 17,10 | 0,026 | 0,063 | 15,20 | 0,002911 | 0,002945 |
| 1 | 3,4177E-05 | 48,5 | 17,10 | 0,025 | 0,061 | 14,20 | 0,002816 | 0,002850 |
| 1 | 3,4177E-05 | 48,0 | 17,10 | 0,023 | 0,058 | 13,20 | 0,002717 | 0,002751 |
| 1 | 2,8983E-05 | 47,0 | 17,00 | 0,023 | 0,055 | 11,20 | 0,002507 | 0,002536 |
| 1 | 2,8983E-05 | 46,0 | 17,00 | 0,022 | 0,052 | 9,20 | 0,002278 | 0,002306 |
| 1 | 2,5786E-05 | 45,5 | 16,90 | 0,021 | 0,051 | 8,20 | 0,002153 | 0,002179 |
| 1 | 2,5786E-05 | 45,0 | 16,90 | 0,02 | 0,05 | 7,20 | 0,002020 | 0,002046 |
| 1 | 2,5138E-05 | 44,5 | 17,00 | 0,021 | 0,05 | 6,20 | 0,001878 | 0,001903 |
| 1 | 2,5138E-05 | 44,0 | 17,00 | 0,021 | 0,05 | 5,20 | 0,001723 | 0,001748 |
| 1 | 2,5138E-05 | 43,5 | 17,00 | 0,02 | 0,049 | 4,20 | 0,001552 | 0,001577 |
| 1 | 2,1076E-05 | 43,5 | 16,60 | 0,02 | 0,045 | 4,20 | 0,001552 | 0,001573 |
| 1 | 2,1076E-05 | 43,0 | 16,60 | 0,018 | 0,044 | 3,20 | 0,001359 | 0,001380 |
| 1 | 2,1076E-05 | 42,5 | 16,60 | 0,016 | 0,043 | 2,20 | 0,001132 | 0,001153 |
| 2 | 4,1982E-05 | 51,0 | 16,80 | 0,034 | 0,065 | 19,20 | 0,003263 | 0,003305 |
| 2 | 4,1982E-05 | 50,5 | 16,80 | 0,033 | 0,063 | 18,20 | 0,003179 | 0,003221 |
| 2 | 4,1982E-05 | 50,0 | 16,80 | 0,031 | 0,062 | 17,20 | 0,003093 | 0,003135 |
| 2 | 3,8830E-05 | 49,5 | 17,00 | 0,031 | 0,061 | 16,20 | 0,003003 | 0,003042 |
| 2 | 3,8830E-05 | 49,0 | 17,00 | 0,027 | 0,06 | 15,20 | 0,002911 | 0,002950 |
| 2 | 3,8830E-05 | 48,5 | 17,00 | 0,027 | 0,056 | 14,20 | 0,002816 | 0,002855 |
| 2 | 3,2912E-05 | 47,5 | 16,80 | 0,026 | 0,054 | 12,20 | 0,002614 | 0,002647 |
| 2 | 3,2912E-05 | 47,0 | 16,80 | 0,025 | 0,053 | 11,20 | 0,002507 | 0,002540 |
| 2 | 2,6095E-05 | 44,5 | 16,70 | 0,021 | 0,048 | 6,20 | 0,001878 | 0,001904 |
| 2 | 2,6095E-05 | 44,0 | 16,70 | 0,02 | 0,048 | 5,20 | 0,001723 | 0,001749 |
| 2 | 2,6095E-05 | 43,5 | 16,70 | 0,019 | 0,046 | 4,20 | 0,001552 | 0,001578 |
| 2 | 1,7551E-05 | 43,0 | 16,80 | 0,019 | 0,041 | 3,20 | 0,001359 | 0,001377 |
| 3 | 2,5646E-05 | 54,5 | 16,40 | 0,035 | 0,068 | 26,20 | 0,003799 | 0,003825 |
| 3 | 2,5646E-05 | 54,0 | 16,40 | 0,034 | 0,066 | 25,20 | 0,003727 | 0,003753 |
| 3 | 2,5646E-05 | 53,5 | 16,40 | 0,033 | 0,064 | 24,20 | 0,003654 | 0,003680 |
| 3 | 1,7906E-05 | 46,5 | 16,40 | 0,024 | 0,054 | 10,20 | 0,002395 | 0,002413 |
| 3 | 1,7906E-05 | 46,0 | 16,40 | 0,023 | 0,052 | 9,20 | 0,002278 | 0,002295 |
| 3 | 1,7906E-05 | 45,5 | 16,40 | 0,022 | 0,051 | 8,20 | 0,002153 | 0,002171 |
| 3 | 1,5062E-05 | 44,5 | 16,00 | 0,022 | 0,048 | 6,20 | 0,001878 | 0,001893 |
| 3 | 1,5062E-05 | 44,0 | 16,00 | 0,022 | 0,046 | 5,20 | 0,001723 | 0,001738 |
| 3 | 1,5062E-05 | 43,5 | 16,00 | 0,02 | 0,045 | 4,20 | 0,001552 | 0,001567 |
| 3 | 1,3299E-05 | 44,0 | 16,20 | 0,023 | 0,047 | 5,20 | 0,001723 | 0,001736 |
| 3 | 1,3299E-05 | 43,5 | 16,20 | 0,021 | 0,044 | 4,20 | 0,001552 | 0,001566 |
| 3 | 1,8384E-06 | 43,0 | 15,80 | 0,019 | 0,039 | 3,20 | 0,001359 | 0,001361 |
| 4 | 3,0646E-05 | 47,0 | 16,30 | 0,023 | 0,055 | 11,20 | 0,002507 | 0,002538 |
| 4 | 3,0646E-05 | 46,5 | 16,30 | 0,023 | 0,054 | 10,20 | 0,002395 | 0,002426 |
| 4 | 3,0646E-05 | 46,0 | 16,30 | 0,022 | 0,052 | 9,20 | 0,002278 | 0,002308 |
| 4 | 2,6830E-05 | 46,0 | 16,10 | 0,023 | 0,052 | 9,20 | 0,002278 | 0,002304 |
| 4 | 2,6830E-05 | 45,5 | 16,10 | 0,021 | 0,051 | 8,20 | 0,002153 | 0,002180 |
| 4 | 2,6830E-05 | 45,0 | 16,10 | 0,02 | 0,049 | 7,20 | 0,002020 | 0,002047 |
| 4 | 2,2585E-05 | 44,5 | 16,90 | 0,02 | 0,046 | 6,20 | 0,001878 | 0,001900 |
| 4 | 2,2585E-05 | 44,0 | 16,90 | 0,019 | 0,045 | 5,20 | 0,001723 | 0,001746 |
| 4 | 1,6300E-05 | 44,0 | 16,10 | 0,019 | 0,046 | 5,20 | 0,001723 | 0,001739 |
| 4 | 1,6300E-05 | 43,5 | 16,10 | 0,018 | 0,044 | 4,20 | 0,001552 | 0,001569 |
| 4 | 1,6300E-05 | 43,0 | 16,10 | 0,016 | 0,043 | 3,20 | 0,001359 | 0,001375 |
| 4 | 1,3560E-05 | 43,5 | 16,00 | 0,018 | 0,043 | 4,20 | 0,001552 | 0,001566 |
| 4 | 1,3560E-05 | 42,5 | 16,00 | 0,015 | 0,039 | 2,20 | 0,001132 | 0,001145 |
| 5 | 4,6112E-05 | 52,5 | 16,00 | 0,032 | 0,063 | 22,20 | 0,003503 | 0,003550 |
| 5 | 4,6112E-05 | 52,0 | 16,00 | 0,032 | 0,061 | 21,20 | 0,003425 | 0,003472 |
| Sedim | Qs (m3/s) | H Menisco (cm) | Temp (°C) | Hint(m) | Hext(m) | H mercurio(cm) | Ql (m3/s) | Qm (m3/s) |
| 5 | 4,6112E-05 | 51,5 | 16,00 | 0,03 | 0,06 | 20,20 | 0,003345 | 0,003392 |
| 5 | 3,9921E-05 | 50,0 | 16,30 | 0,029 | 0,06 | 17,20 | 0,003093 | 0,003132 |
| 5 | 3,9921E-05 | 49,5 | 16,30 | 0,029 | 0,059 | 16,20 | 0,003003 | 0,003043 |
| 5 | 3,9921E-05 | 49,0 | 16,30 | 0,027 | 0,057 | 15,20 | 0,002911 | 0,002951 |
| 5 | 3,4855E-05 | 49,0 | 16,40 | 0,027 | 0,056 | 15,20 | 0,002911 | 0,002946 |

| | | | | | | | | |
|---|------------|------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|
| 5 | 3,4855E-05 | 48,0 | 16,40 | 0,026 | 0,056 | 13,20 | 0,002717 | 0,002752 |
| 5 | 2,9365E-05 | 46,5 | 16,30 | 0,023 | 0,054 | 10,20 | 0,002395 | 0,002425 |
| 5 | 2,9365E-05 | 46,0 | 16,30 | 0,022 | 0,053 | 9,20 | 0,002278 | 0,002307 |
| 5 | 2,9365E-05 | 45,5 | 16,30 | 0,022 | 0,051 | 8,20 | 0,002153 | 0,002182 |
| 5 | 1,8754E-05 | 44,0 | 16,00 | 0,021 | 0,047 | 5,20 | 0,001723 | 0,001742 |
| 5 | 1,8754E-05 | 43,5 | 16,00 | 0,019 | 0,046 | 4,20 | 0,001552 | 0,001571 |
| 5 | 1,8754E-05 | 43,0 | 16,00 | 0,018 | 0,044 | 3,20 | 0,001359 | 0,001378 |

El paso a seguir en la investigación llevada a cabo es la realización de los cálculos pertinentes, los que se muestran en el siguiente capítulo.

CAPITULO 6

PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, todo ensayo o prueba de laboratorio puede generar una serie de valores descriptivos, obtenidos del mismo ensayo o prueba; pero hasta ese punto aquellos valores no son más que una pila de caracteres agrupados con cierto criterio, es necesario tomar esa agrupación de valores y trabajarla hasta poder obtener una relación coherente entre ellos. Esta relación puede expresarse en forma de un gráfico, una tabla ó una ecuación mediante la cual se represente el fenómeno estudiado y se pueda repetir simulando sus condiciones u otras condiciones dadas. Es este el mecanismo conocido como procesamiento y análisis de datos, es aquí en donde el compendio de valores proveniente de los ensayos experimentales es trabajado para darle coherencia entre sí y poder conocer su comportamiento y como describe el fenómeno estudiado.

Ya se conoce de antemano el objeto de estudio de la presente investigación, y los valores arrojados por los ensayos realizados para recrear dicho objeto de estudio; en el presente capítulo se tomará ese grupo de valores y se procesará y analizará con el fin de establecer la coherencia entre ellos y el comportamiento del fenómeno que describen.

Para este propósito se ha utilizado herramientas como hojas de cálculo, para realizar operaciones entre los valores y graficar los mismos; y metodologías de correlación de variables, para obtener ecuaciones que relacionen los parámetros en estudio. A continuación se presentan los cálculos realizados a los datos experimentales, los resultados obtenidos a partir de dichos cálculos y las relaciones obtenidas entre los parámetros en estudio, como primer paso se mencionan los parámetros a calcular y se muestran sus respectivas ecuaciones de cálculo.

6.1. PARÁMETROS ADIMENSIONALES A CALCULAR Y ECUACIONES UTILIZADAS

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de esta investigación es estudiar el efecto de la curvatura de un canal en el flujo de mezclas sedimentables a

diferentes velocidades del mismo, es necesario en un principio establecer cuáles son los parámetros adimensionales que ayudaran en la caracterización de este flujo.

6.1.1. Número de Froude Densimétrico (F_L). La Velocidad crítica de depósito V_d , es la velocidad media de la mezcla que separa el flujo heterogéneo y el flujo con depósito. Para la cuantificación de esta velocidad se propone usar el número adimensional denominado Número de Froude Densimétrico (F_L), dado para transporte de sedimentos en tubos a presión, pero modificado para una canal, dando el diámetro como cuatro veces el radio hidráulico(R_H):

$$F_L = \frac{V_d}{\sqrt{8gR_H\Delta}}$$

Ecuación 6-1. Número de Froude Densimétrico

Donde Δ es un parámetro que relaciona la densidad de los sólidos (ρ_s) y la densidad del fluido (ρ_f), dado como:

$$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}$$

Ecuación 6-2. Parámetro de Relación de Densidad de Sólidos y Densidad del Fluido

6.1.2. Número de Dean, (De). Número adimensional que relaciona la fuerza de viscosidad que actúa sobre un fluido que fluye en una tubería curvada y la fuerza centrífuga. De es igual al número de Reynolds multiplicado por la raíz cuadrada de la relación entre el radio del tubo y el radio de curvatura del mismo.¹¹

Para un canal según Ookawara et. Al (2004), el número de Dean se podría dar como:

¹¹ **JOHNSON**, Mark; **KAMM**, Roger , Numerical studies of steady flow dispersion at low Dean number in a gently curving tube, disponible en ["http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract;jsessionid=2D13FACA437B29003D3FD591E12EDEFAtomcat1?fromPage=online&aid=392568"](http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract;jsessionid=2D13FACA437B29003D3FD591E12EDEFAtomcat1?fromPage=online&aid=392568)

$$De = \left(\frac{D_{eq} V \rho}{\mu} \right) \left(\frac{D_{eq}}{2R} \right)^{1/2}$$

Ecuación 6-3. Número de Dean

Donde μ es la viscosidad cinemática del fluido, V es la velocidad del flujo, que para condiciones críticas correspondería a V_d , ρ es la densidad del fluido, R es el radio de la curvatura y Deq es el diámetro equivalente, dado como $Deq = 4R_H$, R_H es el radio hidráulico de la sección mojada.

6.1.3. Coeficiente de Arrastre Afectado por la Concentración de Partículas ($C'd$). Dado por Cheng (1997), como:

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

Ecuación 6-4. Coeficiente de arrastre afectado por la concentración de partículas

Donde R_m es el número de Reynolds de las partículas afectadas por la mezcla.

6.1.4. Número de Reynolds de las partículas afectadas por la mezcla (R_m). Dado por Cheng (1997), como:

$$R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2 (d'_*)^2)} - 5 \right)^{1.5}$$

Ecuación 6-5. Número de Reynolds de las partículas afectadas por la mezcla

Donde d'_* Es el parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla.

6.1.5. Parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla (d'_*). Dado por Cheng (1997), como:

$$d'_{*} = \left(\frac{\Delta' g}{\nu_m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d$$

Ecuación 6-6. Parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla

Donde Δ' es el coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla, ν_m es la viscosidad de la mezcla y d es el diámetro de las partículas, para el presente caso $d = d_{50}$.

6.1.6. Coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla (Δ'). Dado por Cheng (1997), como:

$$\Delta' = \left[\frac{(1 - C)(G_s - 1)}{1 + C(G_s - 1)} \right]$$

Ecuación 6-7. Coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla

Donde G_s es la gravedad específica de los sólidos en (gr/cm^3) y C es la concentración de la mezcla.

Concentración de la mezcla (C). Es el parámetro que relaciona el caudal de los sólidos con el caudal total de la mezcla agua – sedimento, obteniendo así una concentración volumétrica de partículas.

$$C = \frac{Q_s}{Q_m}$$

Ecuación 6-8. Concentración de la mezcla

Donde Q_s es el caudal de sólidos y Q_m es el caudal de la mezcla.

A continuación se presentan los parámetros adimensionales propios de la investigación

- Columna 1. Sedimento, clase de sedimento utilizado para el ensayo
- Columna 2. FL, número de Froude Densimétrico dado por la ecuación 6-1.
- Columna 3. Δ , es un parámetro que relaciona la densidad de los sólidos (ρ_s) y la densidad del fluido (ρ_f), dado por la ecuación 6-2.

- Columna 4.De, Número de Dean dado por la ecuación 6-3.
- Columna 5. C'd, coeficiente de arrastre afectado por la concentración de partículas dado por la ecuación 6-4.
- Columna 6.Rm, es el número de Reynolds de las partículas afectadas por la mezcla dado por la ecuación 6-5.
- Columna 7.d*, es el parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla, dado por la ecuación 6-6.
- Columna 8.Δ', coeficiente de densidad de partículas dentro de una mezcla por la ecuación 6-7.
- Columna 9.C, es la concentración de la mezcla dado por la ecuación 6-8.

Tabla 6-1. Parámetros adimensionales

| Sedimento | FL | Δ | De | C'd | Rm | d* | Δ' | C |
|-----------|-------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|---------|
| 1 | 0,776 | 1,602470 | 24502,96 | 1,237499 | 536,5570 | 64,68074 | 1,548449 | 0,01264 |
| 1 | 0,752 | 1,602457 | 21514,57 | 1,237664 | 536,0148 | 64,64002 | 1,548417 | 0,01265 |
| 1 | 0,676 | 1,602412 | 18257,33 | 1,238699 | 532,6526 | 64,38724 | 1,545297 | 0,01343 |
| 1 | 0,502 | 1,602433 | 12973,15 | 1,241721 | 523,0304 | 63,66080 | 1,525591 | 0,01841 |
| 1 | 0,308 | 1,602311 | 6410,80 | 1,251855 | 492,8440 | 61,35206 | 1,475696 | 0,03138 |
| 2 | 0,780 | 1,632475 | 26562,11 | 1,404571 | 249,6999 | 40,50631 | 1,572046 | 0,01382 |
| 2 | 0,776 | 1,632457 | 25036,66 | 1,404989 | 249,3341 | 40,47073 | 1,571855 | 0,01387 |
| 2 | 0,747 | 1,632368 | 21364,66 | 1,407377 | 247,2596 | 40,26859 | 1,570151 | 0,01429 |
| 2 | 0,472 | 1,632348 | 12353,64 | 1,414368 | 241,3563 | 39,69015 | 1,547856 | 0,01978 |
| 2 | 0,259 | 1,632396 | 4505,91 | 1,435239 | 225,1086 | 38,07260 | 1,477052 | 0,03788 |
| 3 | 0,859 | 1,722325 | 31080,58 | 2,728151 | 34,4262 | 13,47275 | 1,687136 | 0,00711 |
| 3 | 0,668 | 1,722339 | 19198,45 | 2,737756 | 34,1794 | 13,42393 | 1,679512 | 0,00878 |
| 3 | 0,499 | 1,722204 | 12947,82 | 2,769917 | 33,3760 | 13,26407 | 1,669115 | 0,01108 |
| 3 | 0,451 | 1,722214 | 10600,03 | 2,776421 | 33,2177 | 13,23240 | 1,664019 | 0,01222 |
| 3 | 0,295 | 1,722144 | 4182,52 | 2,733590 | 34,2861 | 13,44504 | 1,698456 | 0,00464 |
| 4 | 0,883 | 1,132915 | 20447,70 | 1,105871 | 1750,6518 | 137,08810 | 1,098186 | 0,01387 |
| 4 | 0,806 | 1,132852 | 17787,60 | 1,106334 | 1739,4193 | 136,51999 | 1,097734 | 0,01407 |
| 4 | 0,751 | 1,133087 | 15584,07 | 1,104862 | 1775,5753 | 138,34434 | 1,097638 | 0,01411 |
| 4 | 0,593 | 1,132852 | 11003,26 | 1,106429 | 1737,1341 | 136,40425 | 1,096880 | 0,01443 |
| 4 | 0,562 | 1,132829 | 8844,43 | 1,106814 | 1727,9110 | 135,93665 | 1,094824 | 0,01531 |
| 5 | 0,865 | 1,556837 | 28273,84 | 1,077319 | 2786,2906 | 185,26452 | 1,500850 | 0,01387 |
| 5 | 0,810 | 1,556948 | 25148,77 | 1,076907 | 2808,4641 | 186,22253 | 1,500468 | 0,01397 |
| 5 | 0,770 | 1,556973 | 22423,90 | 1,076827 | 2812,7523 | 186,40750 | 1,500098 | 0,01407 |
| 5 | 0,712 | 1,556935 | 19133,96 | 1,077005 | 2803,1293 | 185,99227 | 1,499506 | 0,01422 |
| 5 | 0,522 | 1,556837 | 12113,37 | 1,077502 | 2776,5617 | 184,84338 | 1,497326 | 0,01480 |

6.2. PARÁMETROS DIMENSIONALES A CALCULAR Y ECUACIONES UTILIZADAS

Además de los parámetros adimensionales es necesario calcular otros parámetros que serán de suma importancia en el desarrollo de los análisis de la presente investigación, como lo son:

6.2.1. Densidad del agua (ρ_w). Dada por Streeter (1999), como:

$$\rho_w = 1000 - \frac{(T - 4)^2}{180}$$

Ecuación 6-9. Densidad del agua

Donde ρ_w está dada en $[\text{kg}_m/\text{m}^3]$ y T en grados centígrados.

6.2.2. Viscosidad cinemática del agua (ν_w). Dada por Yang (1996), como:

$$\nu_w = \frac{1.792 * 10^{-6}}{1 + 0.0337T + 0.000221T^2}$$

Ecuación 6-10. Viscosidad cinemática del Agua

Donde T es la temperatura del agua en grados centígrados y ν_w es la viscosidad cinemática, dada en (m^2/s) .

6.2.3. Viscosidad dinámica del agua (μ_w). Es la constante de proporcionalidad que relaciona el esfuerzo cortante y la deformación del flujo de agua, expresada como el gradiente de velocidad transversal a la dirección del movimiento en la ley de viscosidad de Newton. Se puede expresar como:

$$\mu_w = \nu_w * \rho_w$$

Ecuación 6-11. Viscosidad dinámica del agua

6.2.4. Densidad de la mezcla fluido-sólido (ρ_m). Dada por Ducwortk (1978) y Cheng (1997), como:

$$\rho_m = C \rho_s + (1 - C) \rho$$

Ecuación 6-12. Densidad de la mezcla fluido-sólido

Donde ρ_m es la densidad de la mezcla fluido-sólido, ρ es la densidad del fluido sin sedimentos, ρ_s es la densidad de las partículas de sedimentos y C es la concentración de la mezcla

6.2.5. Viscosidad cinemática de la mezcla (ν_m). Dada por Einstein y referenciada por Graf (1971), como:

$$\frac{\nu_m}{\nu_f} = 1 + k_e C$$

Ecuación 6-13. Viscosidad cinemática de la mezcla

Donde ν_m es la viscosidad cinemática de la mezcla, ν_f es la viscosidad cinemática del fluido en el cual se deposita la partícula, en este caso agua, que generalmente es agua, C es la concentración de la mezcla y k_e es la constante de viscosidad de Einstein, cuyo valor ha sido deducido teóricamente, tomando un valor de 2,5.

6.2.6. Viscosidad dinámica de la mezcla (μ_m). Es la constante de proporcionalidad que relaciona el esfuerzo cortante y la deformación de una sustancia fluida expresada como el gradiente de velocidad transversal a la dirección del movimiento en la ley de viscosidad de Newton. Se puede expresar como:

$$\mu_m = \nu_m * \rho_m$$

Ecuación 6-14. Viscosidad dinámica de la mezcla

A continuación se presentan los parámetros dimensionales obtenidos durante la investigación.

- Columna 1. Sedimento, clase de sedimento utilizado para el ensayo
- Columna 2. ρ_f , densidad del fluido, dado por la ecuación 6-9.

- Columna 3. ν_f , viscosidad cinemática del fluido, dado por la ecuación 6-10.
- Columna 4. μ_f , Viscosidad dinámica del fluido, dado por la ecuación 6-11.
- Columna 5. ρ_m , densidad de la mezcla fluido-sólido, dado por la ecuación 6-12.
- Columna 6. ν_m , viscosidad cinemática de la mezcla dado por la ecuación 6-13.
- Columna 7. μ_m , Viscosidad dinámica de la mezcla, dado por la ecuación 6-14.

Tabla 6-2. Parámetros dimensionales

| Sedimento | ρ_f | ν_f | μ_f | ρ_m | ν_m | μ_m |
|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|
| 1 | 999,050577 | 1,0928E-06 | 0,0010918 | 1019,29098 | 1,12738E-06 | 0,00114913 |
| 1 | 999,055851 | 1,0938E-06 | 0,00109281 | 1019,30893 | 1,12843E-06 | 0,00115022 |
| 1 | 999,072892 | 1,0971E-06 | 0,00109608 | 1020,57701 | 1,13394E-06 | 0,00115727 |
| 1 | 999,065046 | 1,0956E-06 | 0,00109457 | 1028,54421 | 1,14603E-06 | 0,00117874 |
| 1 | 999,111625 | 1,1047E-06 | 0,0011037 | 1049,34905 | 1,19135E-06 | 0,00125014 |
| 2 | 999,059798 | 1,095E-06 | 0,00109356 | 1021,60519 | 1,13242E-06 | 0,00115688 |
| 2 | 999,066356 | 1,096E-06 | 0,00109482 | 1021,68769 | 1,13384E-06 | 0,00115843 |
| 2 | 999,100092 | 1,102E-06 | 0,00110141 | 1022,39895 | 1,14177E-06 | 0,00116735 |
| 2 | 999,107789 | 1,104E-06 | 0,00110294 | 1031,3658 | 1,15851E-06 | 0,00119485 |
| 2 | 999,089778 | 1,100E-06 | 0,00109937 | 1060,87027 | 1,20458E-06 | 0,00127791 |
| 3 | 999,145778 | 1,112E-06 | 0,0011106 | 1011,38214 | 1,13134E-06 | 0,00114422 |
| 3 | 999,140760 | 1,111E-06 | 0,0011096 | 1014,25846 | 1,13494E-06 | 0,00115113 |
| 3 | 999,190274 | 1,121E-06 | 0,0011200 | 1018,26364 | 1,15194E-06 | 0,00117298 |
| 3 | 999,186611 | 1,120E-06 | 0,0011192 | 1020,21027 | 1,15431E-06 | 0,00117764 |
| 3 | 999,212075 | 1,126E-06 | 0,0011247 | 1007,19961 | 1,13864E-06 | 0,00114684 |
| 4 | 999,153276 | 1,113E-06 | 0,0011122 | 1014,85664 | 1,15173E-06 | 0,00116884 |
| 4 | 999,182940 | 1,119E-06 | 0,0011184 | 1015,10512 | 1,15868E-06 | 0,00117619 |
| 4 | 999,072892 | 1,097E-06 | 0,0010961 | 1015,04274 | 1,13579E-06 | 0,00115288 |
| 4 | 999,182940 | 1,119E-06 | 0,0011184 | 1015,51917 | 1,15971E-06 | 0,00117771 |
| 4 | 999,193928 | 1,122E-06 | 0,0011208 | 1016,52801 | 1,1646E-06 | 0,00118385 |
| 5 | 999,195144 | 1,122E-06 | 0,0011210 | 1020,77087 | 1,16082E-06 | 0,00118494 |
| 5 | 999,152029 | 1,113E-06 | 0,0011119 | 1020,88447 | 1,15173E-06 | 0,00117578 |
| 5 | 999,142016 | 1,111E-06 | 0,0011099 | 1021,02595 | 1,14988E-06 | 0,00117405 |
| 5 | 999,157013 | 1,114E-06 | 0,0011130 | 1021,2828 | 1,1535E-06 | 0,00117805 |
| 5 | 999,195144 | 1,122E-06 | 0,0011210 | 1022,21338 | 1,16343E-06 | 0,00118927 |

6.3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL FLUJO

Además de los parámetros adimensionales y dimensionales anteriormente mencionados, es necesario calcular los parámetros generales que serán utilizados en el desarrollo de los análisis de la presente investigación, como lo son:

6.3.1. Caudal líquido (Q_l). Es el valor del caudal de agua en el momento de la depositación del sedimento en el ensayo, dado por la ecuación 4-1.

6.3.2. Caudal de la mezcla (Q_m). Es el valor del caudal de la mezcla, en m^3/s , en el momento de la depositación del sedimento en el ensayo, es el resultado de la suma del caudal líquido más el caudal sólido, dado por la ecuación 6-15.

$$Q_m = Q_l + Q_s$$

Ecuación 6-15. Caudal de la mezcla

6.3.3. Área del ensayo (A_e). Es el área transversal en forma de trapecio que presenta el flujo en el momento de la depositación del sedimento en el ensayo, dada por la ecuación 6-16.

$$A_e = b \left[H_{int} + \frac{(H_{ext} - H_{int})}{2} \right]$$

Ecuación 6-16. Área del ensayo

Donde H_{int} es la lectura de la altura interna de la lámina del flujo y H_{ext} es la lectura de la altura externa de la lámina del flujo.

6.3.4. Velocidad de depósito (V_d). Es el valor de la velocidad del flujo en el momento que se presenta la depositación del sedimento en el fondo del canal para el ensayo, dada por la ecuación 6-17.

$$V_d = \frac{Q_m}{A_e}$$

Ecuación 6-17. Velocidad de depósito

6.3.5. Perímetro Mojado (P_M). Es el valor del perímetro mojado de la sección transversal en forma de trapecio que presenta el flujo en el momento de la depositación del sedimento en el ensayo, dada por la ecuación 6-18.

$$P_M = b + H_{ext} + H_{int}$$

Ecuación 6-18. Perímetro mojado

6.3.6. Radio Hidráulico (R_H). Es el valor del radio hidráulico de la sección transversal en forma de trapecio que presenta el flujo en el momento de la depositación del sedimento en el ensayo, dada por la ecuación 6-19.

$$R_H = \frac{A_e}{P_M}$$

Ecuación 6-19. Radio Hidráulico

6.3.7. Diámetro Equivalente (D_{eq}). Es el valor del diámetro equivalente de la sección transversal en forma de trapecio que presenta el flujo en el momento de la depositación del sedimento en el ensayo, dada por la ecuación 6-20.

$$D_{eq} = 4 R_H$$

Ecuación 6-20. Diámetro equivalente

A continuación se presentan los parámetros generales del flujo obtenidos durante la investigación.

- Columna 1. Sedimento, clase de sedimento utilizado para el ensayo
- Columna 2. Q_l (m^3/s), muestra el valor del caudal de agua de ensayo en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 4-1.
- Columna 3. Q_m (m^3/s), muestra el valor del caudal de la mezcla agua – sedimento en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 6-15.
- Columna 4. A_e , es el área que ocupa transversalmente el flujo en el ensayo medida en m^2 , dado por la ecuación 6-16.

- Columna 8. V_d , es la velocidad del flujo en el momento de la toma del dato, en el ensayo medida en m/s, donde comienza la depositación del sedimento en el fondo del canal, dado por la ecuación 6-17.
- Columna 6. P_M , es el perímetro mojado de la sección transversal que ocupa el fluido durante el ensayo, dado por la ecuación 6-18.
- Columna 7. R_H , es el radio hidráulico, dado por la ecuación 6-19.
- Columna 8. D_{eq} , es el diámetro equivalente dado por la ecuación 6-20.

Tabla 6-3. Parámetros generales del flujo

| Sedimento | Ql(m3/s) | Qm (m3/s) | A_e (m2) | V_d (m/s) | P_M (m) | R_H (m) | D_{eq} (m) |
|-----------|----------|-----------|------------|-------------|-----------|-----------|--------------|
| 1 | 0,002669 | 0,002703 | 0,002375 | 1,138018 | 0,139182 | 0,017067 | 0,068269 |
| 1 | 0,002262 | 0,002291 | 0,002130 | 1,075605 | 0,131000 | 0,016260 | 0,065038 |
| 1 | 0,001894 | 0,001920 | 0,002010 | 0,955093 | 0,127000 | 0,015827 | 0,063307 |
| 1 | 0,001340 | 0,001365 | 0,001942 | 0,703034 | 0,124727 | 0,015569 | 0,062274 |
| 1 | 0,000651 | 0,000672 | 0,001628 | 0,412494 | 0,114273 | 0,014248 | 0,056993 |
| 2 | 0,002995 | 0,003037 | 0,002585 | 1,174656 | 0,146182 | 0,017687 | 0,070746 |
| 2 | 0,002761 | 0,002800 | 0,002427 | 1,153364 | 0,140909 | 0,017226 | 0,068903 |
| 2 | 0,002271 | 0,002304 | 0,002135 | 1,078840 | 0,131182 | 0,016279 | 0,065114 |
| 2 | 0,001293 | 0,001319 | 0,001969 | 0,670001 | 0,125636 | 0,015673 | 0,062692 |
| 2 | 0,000446 | 0,000463 | 0,001383 | 0,335073 | 0,106091 | 0,013033 | 0,052134 |
| 3 | 0,003581 | 0,003607 | 0,002692 | 1,339898 | 0,149727 | 0,017978 | 0,071913 |
| 3 | 0,002020 | 0,002038 | 0,002070 | 0,984638 | 0,129000 | 0,016047 | 0,064186 |
| 3 | 0,001344 | 0,001359 | 0,001887 | 0,720041 | 0,122909 | 0,015355 | 0,061420 |
| 3 | 0,001075 | 0,001089 | 0,001715 | 0,634540 | 0,117182 | 0,014639 | 0,058557 |
| 3 | 0,000394 | 0,000396 | 0,001085 | 0,364882 | 0,096182 | 0,011285 | 0,045142 |
| 4 | 0,002178 | 0,002209 | 0,002089 | 1,057438 | 0,129636 | 0,016115 | 0,064460 |
| 4 | 0,001881 | 0,001907 | 0,001996 | 0,955432 | 0,126545 | 0,015776 | 0,063103 |
| 4 | 0,001578 | 0,001601 | 0,001835 | 0,872222 | 0,121182 | 0,015146 | 0,060585 |
| 4 | 0,001113 | 0,001129 | 0,001677 | 0,673360 | 0,115909 | 0,014471 | 0,057882 |
| 4 | 0,000872 | 0,000885 | 0,001445 | 0,612604 | 0,108182 | 0,013361 | 0,053445 |
| 5 | 0,003278 | 0,003325 | 0,002607 | 1,275121 | 0,146909 | 0,017748 | 0,070990 |
| 5 | 0,002818 | 0,002858 | 0,002430 | 1,175964 | 0,141000 | 0,017234 | 0,068936 |
| 5 | 0,002443 | 0,002478 | 0,002253 | 1,099880 | 0,135091 | 0,016676 | 0,066703 |
| 5 | 0,002035 | 0,002065 | 0,002070 | 0,997376 | 0,129000 | 0,016047 | 0,064186 |
| 5 | 0,001249 | 0,001267 | 0,001795 | 0,706257 | 0,119818 | 0,014977 | 0,059909 |

6.4. PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez conocidos los parámetros, tanto adimensionales como dimensionales, se realiza una metodología de cálculo paso por paso con el fin de identificar el orden en el cual se deben procesar todos y cada uno de los valores obtenidos de los ensayos. Mediante el uso de hojas de cálculo se puede realizar este procedimiento de manera rápida y con el mínimo margen de error.

Se establecerán arbitrariamente parámetros π_n , los cuales serán el resultado de una correlación multivariable entre parámetros adimensionales que permitirán establecer ecuaciones empíricas del comportamiento del fenómeno en estudio.

Se presentan a continuación los cálculos realizados para la determinación de la velocidad crítica de depósito, pérdida de energía y sobre elevación de la lámina del flujo, además se hace una comparación con el comportamiento del flujo en un canal recto.

6.4.1. Velocidad crítica de depósito. A continuación se describe la forma de cálculo de la velocidad crítica de depósito, llevada a cabo mediante el uso hojas de cálculo, columna por columna de la hoja de cálculo, se explica la metodología usada. Las hojas de cálculo para la determinación de la velocidad crítica de depósito de los sedimentos 1 al 5 se presentan más adelante en la tabla 6-4.

- Columna 1. Sedimento, tipo de sedimento utilizado
- Columna 2. Ql (m^3/s), muestra el valor del caudal de agua de ensayo en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 4-1.
- Columna 3. Qm (m^3/s), muestra el valor del caudal de la mezcla agua – sedimento en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 6-15.
- Columna 4. C , muestra el valor de la concentración de la mezcla en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 6-8.
- Columna 5. F_L , número de Froude, ecuación 6-1.
- Columna 6. De , número de Dean, ecuación 6-3.
- Columna 7. $C'd$, Coeficiente de Arrastre Afectado por la Concentración de Partículas, ecuación 6-4.
- Columna 8. d'^* , Parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla
- Columna 9. Π_1 , Parámetro arbitrario que dado viene dado por la ecuación 6-17.

$$\Pi_1 = \frac{De^2 S^{0.05} \sqrt{d'^*}}{1E + 04 * C'd^{0.013} \sqrt[3]{C}}$$

Ecuación 6-21. Parámetro Π_1 para determinación de velocidad crítica

Donde **De** es el Numero de Dean, **S** es la pendiente del canal, **C'd** es el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de partículas, **d'*** es el parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla y **C** es la concentración de la mezcla.

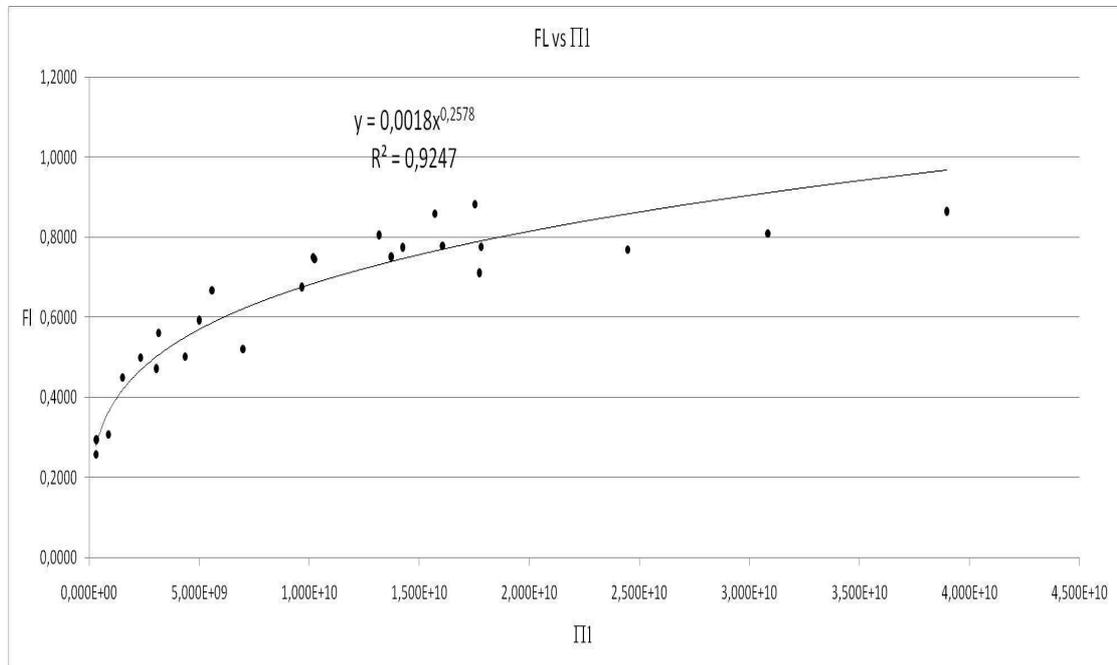
Paso a paso, se han encontrado parámetros que se pueden relacionar para llegar a encontrar una ecuación empírica de velocidad crítica de depósito del sedimento, para las condiciones de esta investigación, con los valores tomados del modelo experimental.

Tabla 6-4. Parámetros para el cálculo de velocidad crítica

| Sedimento | Ql (m3/s) | Qm (m3/s) | C | F_L | De | C'd | d* | Π_1 |
|-----------|-----------|-----------|---------|----------|----------|----------|-----------|--------------|
| 1 | 0,002669 | 0,002703 | 0,01264 | 0,776770 | 24502,96 | 1,237499 | 64,68074 | 1,780603E+06 |
| 1 | 0,002262 | 0,002291 | 0,01265 | 0,752187 | 21514,57 | 1,237664 | 64,64002 | 1,372040E+06 |
| 1 | 0,001894 | 0,001920 | 0,01343 | 0,676991 | 18257,33 | 1,238699 | 64,38724 | 9,665918E+05 |
| 1 | 0,001340 | 0,001365 | 0,01841 | 0,502439 | 12973,15 | 1,241721 | 63,66080 | 4,368390E+05 |
| 1 | 0,000651 | 0,000672 | 0,03138 | 0,308166 | 6410,80 | 1,251855 | 61,35206 | 8,766436E+04 |
| 2 | 0,002995 | 0,003037 | 0,01382 | 0,780344 | 26562,11 | 1,404571 | 40,50631 | 1,605288E+06 |
| 2 | 0,002761 | 0,002800 | 0,01387 | 0,776383 | 25036,66 | 1,404989 | 40,47073 | 1,423971E+06 |
| 2 | 0,002271 | 0,002304 | 0,01429 | 0,747068 | 21364,66 | 1,407377 | 40,26859 | 1,024167E+06 |
| 2 | 0,001293 | 0,001319 | 0,01978 | 0,472840 | 12353,64 | 1,414368 | 39,69015 | 3,050023E+05 |
| 2 | 0,000446 | 0,000463 | 0,03788 | 0,259309 | 4505,91 | 1,435239 | 38,07260 | 3,199710E+04 |
| 3 | 0,003581 | 0,003607 | 0,00711 | 0,859533 | 31080,58 | 2,728151 | 13,47275 | 1,571545E+06 |
| 3 | 0,002020 | 0,002038 | 0,00878 | 0,668571 | 19198,45 | 2,737756 | 13,42393 | 5,577848E+05 |
| 3 | 0,001344 | 0,001359 | 0,01108 | 0,499816 | 12947,82 | 2,769917 | 13,26407 | 2,333587E+05 |
| 3 | 0,001075 | 0,001089 | 0,01222 | 0,451104 | 10600,03 | 2,776421 | 13,23240 | 1,512245E+05 |
| 3 | 0,000394 | 0,000396 | 0,00464 | 0,295447 | 4182,52 | 2,733590 | 13,44504 | 3,277245E+04 |
| 4 | 0,002178 | 0,002209 | 0,01387 | 0,883408 | 20447,70 | 1,105871 | 137,08810 | 1,752181E+06 |
| 4 | 0,001881 | 0,001907 | 0,01407 | 0,806746 | 17787,60 | 1,106334 | 136,51999 | 1,317087E+06 |
| 4 | 0,001578 | 0,001601 | 0,01411 | 0,751559 | 15584,07 | 1,104862 | 138,34434 | 1,016743E+06 |
| 4 | 0,001113 | 0,001129 | 0,01443 | 0,593661 | 11003,26 | 1,106429 | 136,40425 | 4,994838E+05 |
| 4 | 0,000872 | 0,000885 | 0,01531 | 0,562073 | 8844,43 | 1,106814 | 135,93665 | 3,158541E+05 |
| 5 | 0,003278 | 0,003325 | 0,01387 | 0,865927 | 28273,84 | 1,077319 | 185,26452 | 3,895833E+06 |
| 5 | 0,002818 | 0,002858 | 0,01397 | 0,810371 | 25148,77 | 1,076907 | 186,22253 | 3,082777E+06 |
| 5 | 0,002443 | 0,002478 | 0,01407 | 0,770520 | 22423,90 | 1,076827 | 186,40750 | 2,446482E+06 |
| 5 | 0,002035 | 0,002065 | 0,01422 | 0,712285 | 19133,96 | 1,077005 | 185,99227 | 1,772769E+06 |
| 5 | 0,001249 | 0,001267 | 0,01480 | 0,522090 | 12113,37 | 1,077502 | 184,84338 | 6,990311E+05 |

Al graficar el parámetro F_L vs Π_1 , se obtiene la siguiente relación:

Gráfico 6-1. Relación entre el número de Froude Densimétrico y el parámetro adimensional Π_1



La ecuación de la línea de tendencia potencial que se obtiene es de la siguiente forma

$$F_L = 0.0186\pi_1^{0.2578}$$

Ecuación 6-22. Tendencia para F_L vs Π_1

Dado que la regresión realizada a los datos es de tipo potencial, las ecuaciones de esta regresión tendrán la forma $y = \alpha \cdot x^k$; por ser α un valor aproximado, se debe corregir realizando el cálculo del mínimo error, para así obtener una ecuación más exacta; el cual consiste en hacer iteraciones, variando el valor de α , de las que resulta un comportamiento más ajustado entre los valores experimentales y teóricos.

Para cada valor dado a α , se calcula un valor teórico de F_L , el cual se compara con el valor experimental de F_L determinando el error promedio entre los dos como se expresa en la ecuación 6-23.

$$E_{\text{prom}} = \left| \frac{F_{L_{\text{exp}}} - F_{L_{\text{teo}}}}{F_{L_{\text{exp}}}} \right| 100$$

Ecuación 6-23. Error promedio para el cálculo de F_L

Las tablas 6-5 a 6-8 reflejan el proceso de iteración realizado, la tabla 6-9 indica el resumen de este proceso.

Tabla 6-5. Mínimo Error 1

| α_1 | $F_{L_{\text{exp}}}$ | $F_{L_{\text{teo}}}$ | E prom |
|------------|----------------------|----------------------|---------|
| 0,0018 | 0,7768 | 0,78 | 0,1436 |
| 0,0018 | 0,7522 | 0,73 | 3,5616 |
| 0,0018 | 0,6770 | 0,66 | 2,0742 |
| 0,0018 | 0,5024 | 0,54 | 7,5850 |
| 0,0018 | 0,3082 | 0,36 | 16,0898 |
| 0,0018 | 0,7803 | 0,76 | 3,2138 |
| 0,0018 | 0,7764 | 0,73 | 5,6708 |
| 0,0018 | 0,7471 | 0,67 | 9,9305 |
| 0,0018 | 0,4728 | 0,49 | 4,2376 |
| 0,0018 | 0,2593 | 0,28 | 6,4800 |
| 0,0018 | 0,8595 | 0,75 | 12,6091 |
| 0,0018 | 0,6686 | 0,58 | 13,9072 |
| 0,0018 | 0,4998 | 0,46 | 7,9457 |
| 0,0018 | 0,4511 | 0,41 | 8,7655 |
| 0,0018 | 0,2954 | 0,28 | 5,9672 |
| 0,0018 | 0,8834 | 0,77 | 12,5598 |
| 0,0018 | 0,8067 | 0,72 | 11,0233 |
| 0,0018 | 0,7516 | 0,67 | 10,6359 |
| 0,0018 | 0,5937 | 0,56 | 5,7559 |
| 0,0018 | 0,5621 | 0,50 | 11,5195 |
| 0,0018 | 0,8659 | 0,95 | 9,5407 |
| 0,0018 | 0,8104 | 0,89 | 10,2165 |
| 0,0018 | 0,7705 | 0,84 | 9,2305 |
| 0,0018 | 0,7123 | 0,77 | 8,7733 |
| 0,0018 | 0,5221 | 0,61 | 16,8322 |

Tabla 6-6. Mínimo Error 2

| α_2 | $F_{L_{\text{exp}}}$ | $F_{L_{\text{teo}}}$ | E prom |
|------------|----------------------|----------------------|---------|
| 0,00185 | 0,7768 | 0,80 | 2,6302 |
| 0,00185 | 0,7522 | 0,75 | 0,8828 |
| 0,00185 | 0,6770 | 0,68 | 0,6459 |
| 0,00185 | 0,5024 | 0,56 | 10,5734 |
| 0,00185 | 0,3082 | 0,37 | 19,3145 |
| 0,00185 | 0,7803 | 0,78 | 0,5253 |
| 0,00185 | 0,7764 | 0,75 | 3,0506 |
| 0,00185 | 0,7471 | 0,69 | 7,4286 |
| 0,00185 | 0,4728 | 0,51 | 7,1331 |
| 0,00185 | 0,2593 | 0,28 | 9,4378 |
| 0,00185 | 0,8595 | 0,77 | 10,1816 |
| 0,00185 | 0,6686 | 0,59 | 11,5157 |
| 0,00185 | 0,4998 | 0,47 | 5,3886 |
| 0,00185 | 0,4511 | 0,42 | 6,2312 |
| 0,00185 | 0,2954 | 0,29 | 3,3552 |
| 0,00185 | 0,8834 | 0,79 | 10,1309 |
| 0,00185 | 0,8067 | 0,74 | 8,5517 |

| α_2 | $F_{L_{exp}}$ | $F_{L_{teo}}$ | E prom |
|------------|---------------|---------------|---------|
| 0,00185 | 0,7516 | 0,69 | 8,1536 |
| 0,00185 | 0,5937 | 0,58 | 3,1380 |
| 0,00185 | 0,5621 | 0,51 | 9,0617 |
| 0,00185 | 0,8659 | 0,97 | 12,5835 |
| 0,00185 | 0,8104 | 0,92 | 13,2781 |
| 0,00185 | 0,7705 | 0,87 | 12,2647 |
| 0,00185 | 0,7123 | 0,80 | 11,7948 |
| 0,00185 | 0,5221 | 0,63 | 20,0775 |

Tabla 6-7. Mínimo Error 3

| α_3 | $F_{L_{exp}}$ | $F_{L_{teo}}$ | E prom |
|------------|---------------|---------------|---------|
| 0,00186 | 0,7768 | 0,80 | 3,1849 |
| 0,00186 | 0,7522 | 0,75 | 0,3470 |
| 0,00186 | 0,6770 | 0,69 | 1,1900 |
| 0,00186 | 0,5024 | 0,56 | 11,1711 |
| 0,00186 | 0,3082 | 0,37 | 19,9594 |
| 0,00186 | 0,7803 | 0,78 | 0,0124 |
| 0,00186 | 0,7764 | 0,76 | 2,5265 |
| 0,00186 | 0,7471 | 0,70 | 6,9282 |
| 0,00186 | 0,4728 | 0,51 | 7,7122 |
| 0,00186 | 0,2593 | 0,29 | 10,0294 |
| 0,00186 | 0,8595 | 0,78 | 9,6961 |
| 0,00186 | 0,6686 | 0,59 | 11,0374 |
| 0,00186 | 0,4998 | 0,48 | 4,8772 |
| 0,00186 | 0,4511 | 0,43 | 5,7244 |
| 0,00186 | 0,2954 | 0,29 | 2,8328 |
| 0,00186 | 0,8834 | 0,80 | 9,6452 |
| 0,00186 | 0,8067 | 0,74 | 8,0574 |
| 0,00186 | 0,7516 | 0,69 | 7,6571 |
| 0,00186 | 0,5937 | 0,58 | 2,6144 |
| 0,00186 | 0,5621 | 0,51 | 8,5701 |
| 0,00186 | 0,8659 | 0,98 | 13,1920 |
| 0,00186 | 0,8104 | 0,92 | 13,8904 |
| 0,00186 | 0,7705 | 0,87 | 12,8715 |
| 0,00186 | 0,7123 | 0,80 | 12,3991 |
| 0,00186 | 0,5221 | 0,63 | 20,7266 |

Tabla 6-8. Mínimo Error 4

| α_4 | $F_{L_{exp}}$ | $F_{L_{teo}}$ | E prom |
|------------|---------------|---------------|---------|
| 0,00189 | 0,7768 | 0,83 | 7,3534 |
| 0,00189 | 0,7522 | 0,78 | 3,6517 |
| 0,00189 | 0,6770 | 0,71 | 5,2135 |
| 0,00189 | 0,5024 | 0,58 | 15,4998 |
| 0,00189 | 0,3082 | 0,38 | 24,4303 |
| 0,00189 | 0,7803 | 0,81 | 4,0419 |
| 0,00189 | 0,7764 | 0,79 | 1,3885 |
| 0,00189 | 0,7471 | 0,72 | 3,2218 |
| 0,00189 | 0,4728 | 0,53 | 11,8660 |
| 0,00189 | 0,2593 | 0,30 | 14,0152 |
| 0,00189 | 0,8595 | 0,81 | 6,0597 |
| 0,00189 | 0,6686 | 0,62 | 7,5509 |
| 0,00189 | 0,4998 | 0,49 | 1,2353 |
| 0,00189 | 0,4511 | 0,44 | 2,1574 |
| 0,00189 | 0,2954 | 0,30 | 0,6895 |
| 0,00189 | 0,8834 | 0,83 | 5,9965 |
| 0,00189 | 0,8067 | 0,77 | 4,3720 |
| 0,00189 | 0,7516 | 0,72 | 3,9805 |
| 0,00189 | 0,5937 | 0,60 | 1,1910 |
| 0,00189 | 0,5621 | 0,53 | 5,0409 |

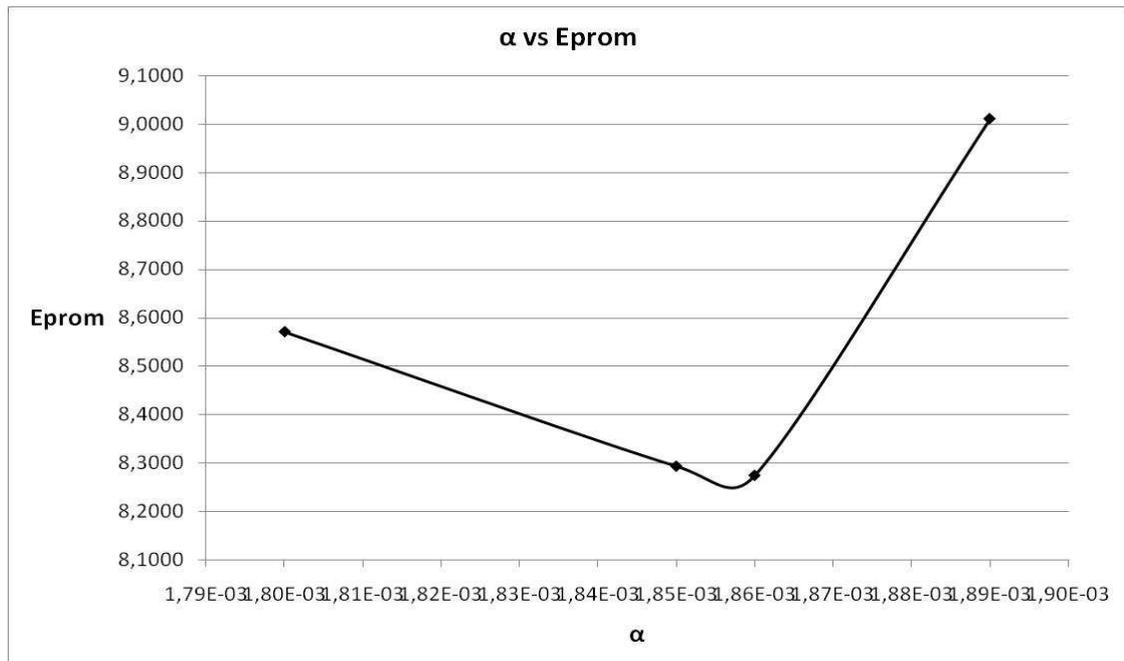
| α_4 | F_{L_exp} | F_{L_teo} | E.prom |
|------------|--------------|--------------|---------|
| 0,00189 | 0,8659 | 1,02 | 17,8570 |
| 0,00189 | 0,8104 | 0,96 | 18,5563 |
| 0,00189 | 0,7705 | 0,91 | 17,4686 |
| 0,00189 | 0,7123 | 0,83 | 16,9392 |
| 0,00189 | 0,5221 | 0,66 | 25,4863 |

Tabla 6-9. Resumen del proceso de mínimo error para F_L

| α_i | E.prom |
|------------|--------|
| 0,0018000 | 8,5708 |
| 0,0018500 | 8,2932 |
| 0,0018600 | 8,2741 |
| 0,0018900 | 9,0105 |

Se procede a graficar los valores promedio de los resultados obtenidos y se toma el valor más bajo de error, como se observa en el Gráfico 6-2.

Gráfico 6-2. Mínimo error para F_L



El valor de α para el cual se obtiene el mínimo error es **0,00186**.

Se sustituye el parámetro Π_1 y se reemplaza el valor α por el corregido, en la ecuación 6-22, obteniendo así la siguiente ecuación.

$$F_L = 0.00186 \left[\frac{De^2 S^{0.05} \sqrt{d'_*}}{C'd^{0.01} \sqrt[3]{C}} \right]^{0.257}$$

Ecuación 6-24. Ecuación Empírica para F_L

Luego se hace la relación de la ecuación 6-24 y la velocidad de depósito dada por la ecuación 6-1, y se obtiene la ecuación 6-25.

$$V_d = \frac{1}{10} * \left[0.00186 \left[\frac{De^2 S^{0.05} \sqrt{d'_*}}{C'd^{0.01} \sqrt[3]{C}} \right]^{0.257} \sqrt{8gR_H \Delta} \right]$$

Ecuación 6-25. Velocidad de depósito experimental para canales curvos con sección rectangular

6.4.2. Comparación entre canales rectos con sección rectangular y canales curvos con sección rectangular. El uso de un canal curvo está íntimamente ligado a la existencia de un canal recto, es muy común observar en canales rectos el cambio de su alineamiento a causa de obstáculos en el terreno que obligan a modificar la dirección del mismo, en este caso es necesario implementar un sector curvo para realizar el cambio de dirección. Por esta razón, establecer una relación entre el comportamiento de estos sectores del canal, tanto recto como curvo, facilita la implementación de los mismos al mostrar características de uno en función del otro.

En la investigación realizada por Gómez (2008), denominada “Transporte Hidráulico de Mezclas en Canales Abiertos”, en la cual se abordan los canales rectos con sección rectangular se propone la ecuación 6-26.

$$V_{dr} = 0.748 \left[C.S^4 \sqrt{d'_*} \right]^{0.11} \sqrt{8.g.R_H.\Delta}$$

Ecuación 6-26. Velocidad de depósito para canales rectos con sección rectangular

Como objetivo de la presente investigación se ha propuesto el estudio de la velocidad crítica de depósito, para lo cual se utilizó la ecuación 6-25, descrita anteriormente. Usando las ecuaciones 6-25 y 6-26, se calculan los valores correspondientes a velocidades de depósito para el tramo recto y curvo en condiciones similares, se obtiene de esta forma la relación de los parámetros

V_{dc}/V_{dr} , siendo V_{dc} la velocidad de depósito en tramo curvo y V_{dr} la velocidad de depósito del tramo recto.

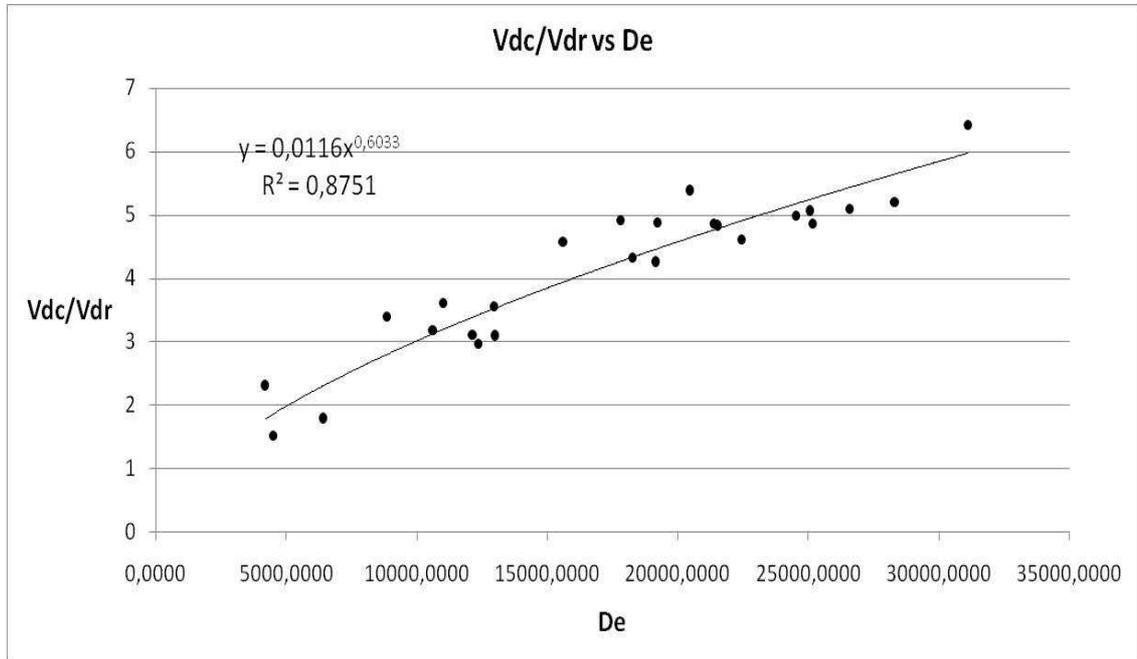
La tabla 6-10 contiene los valores de la relación entre las velocidades para tramo recto y curvo V_{dc}/V_{dr} y el Número de Dean De .

Tabla 6-10. Relación V_{dc}/V_{dr} y Dean

| V_{dc}/V_{dr} | De |
|-----------------|------------|
| 4,9894 | 24502,9637 |
| 4,8313 | 21514,5655 |
| 4,3207 | 18257,3273 |
| 3,0992 | 12973,1508 |
| 1,7963 | 6410,7990 |
| 5,0928 | 26562,1093 |
| 5,0653 | 25036,6639 |
| 4,8596 | 21364,6641 |
| 2,9700 | 12353,6357 |
| 1,5199 | 4505,9129 |
| 6,4119 | 31080,5829 |
| 4,8736 | 19198,4540 |
| 3,5538 | 12947,8173 |
| 3,1737 | 10600,0283 |
| 2,3101 | 4182,5154 |
| 5,3894 | 20447,6953 |
| 4,9153 | 17787,6005 |
| 4,5743 | 15584,0689 |
| 3,6070 | 11003,2589 |
| 3,3935 | 8844,4267 |
| 5,1961 | 28273,8435 |
| 4,8575 | 25148,7716 |
| 4,6148 | 22423,8962 |
| 4,2614 | 19133,9621 |
| 3,1110 | 12113,3655 |

Al enfrentar las dos columnas de la tabla 6-10, en un gráfico y obtener una línea de tendencia de los datos de la misma se obtiene una relación con una muy buena aproximación, como se observa en el Gráfico 6-3.

Gráfico 6-3. Relación propuesta de las velocidades de depósito para los tramos curvo y recto V_{dc}/V_{dr} frente al Parámetro adimensional De .



Luego de efectuar el cálculo del mínimo error, similar al realizado para velocidad crítica de depósito, para esta línea de tendencia se obtiene una relación de la siguiente forma:

$$\frac{V_{dc}}{V_{dr}} = 0.0011 D_e^{0.603}$$

Ecuación 6-27. Tendencia para V_{dc}/V_{dr} vs De

Entonces podemos obtener una relación entre la forma de calcular la velocidad crítica de depósito en un canal recto para obtener el valor correspondiente en un canal curvo a partir de los parámetros para el canal recto y el radio de curvatura, inmerso en el número de Dean De , como lo indica la ecuación 6-3.

Al reemplazar la ecuación 6-27 en 6-26 y despejar, se obtiene la ecuación 6-28 que se propone a continuación, y que permitirá calcular la velocidad crítica de depósito para un canal curvo con sección rectangular, conociendo los parámetros para un canal recto con sección rectangular y el radio de curvatura solicitado.

$$V_{dc} = 8.67 E - 04 * \left[\left[C.S^4 \sqrt{d_*} \right]^{0.11} \sqrt{8.g.R_H \cdot \Delta} \right] [D_e]^{0.603}$$

Ecuación 6-28. Velocidad crítica de depósito en un canal curvo a partir de un canal recto

Se encuentra entonces que el promedio de los valores de V_{dr}/V_{dc} , según la tabla 6-10, es de 4,1115 veces, por lo cual se puede asegurar que la velocidad de depósito en el tramo curvo es 4,1115 veces la velocidad de depósito en el tramo recto.

6.4.3. Cálculo de la pérdida de energía de mezclas sedimentables en canales curvos. *Las mezclas sedimentables* son aquellas en las cuales las partículas solidas contenidas en el agua, son lo suficientemente pesadas para que se produzca depositación en el fondo del canal bajo ciertas condiciones del flujo.

Teniendo en cuenta la linealidad de la fricción, las pérdidas por fricción total de una mezcla se puede tomar como la suma lineal de la pérdida por fricción del agua y la pérdida debido a los sólidos. Aunque según Graf (1971), la contribución del fluido y los sólidos a la pérdida de energía, no puede ser necesariamente independiente, esto debido a que las partículas contenidas en el fluido, afectan en menor o mayor grado el flujo y tienen efectos pronunciados sobre la distribución de la velocidad. Sin embargo este criterio ha sido usado por varios investigadores, y han partido de él, para establecer las ecuaciones. De este modo la pérdida de energía de la mezcla se puede expresar matemáticamente de la siguiente forma.

$$S_m = S_w + S_s$$

Ecuación 6-29. Pérdida de energía de la mezcla

Donde S_m , S_w y S_s representan las pérdidas de energía de la mezcla, del fluido y del material sólido, respectivamente. Los autores proponen la siguiente ecuación para estimar el factor de fricción de la mezcla f_m .

$$f_m = f_w + f_s$$

Ecuación 6-30. Factor de fricción de la mezcla

Donde, f_w es el coeficiente de fricción del agua limpia y f_s es el coeficiente de fricción adicional producido por la inclusión de los sedimentos en suspensión.

A continuación se describe la forma de cálculo de la pérdida de energía de mezclas sedimentables en canales curvos, llevada a cabo mediante el uso hojas

de cálculo, columna por columna de la hoja de cálculo, se explica la metodología usada. Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 6-11.

- Columna 1. Sedimento, tipo de sedimento utilizado
- Columna 2. Q_l (m^3/s), muestra el valor del caudal de agua de ensayo en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 4-1.
- Columna 3. Q_m (m^3/s), muestra el valor del caudal de la mezcla agua – sedimento en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 6-15.
- Columna 4. n_m , coeficiente de fricción de Manning para la mezcla n_m , usando la ecuación 1-14, con valores experimentales para flujo de mezcla.
- Columna 5. n_w , coeficiente de fricción de Manning para el agua n_w , usando la ecuación 4-6.
- Columna 6. n_s , coeficiente de fricción de Manning para el sedimento n_s , utilizando la ecuación 6-31.

$$n_s = n_m - n_w$$

Ecuación 6-31. Coeficiente n para los sedimentos

- Columna 7. n_s/n_w , relación entre los parámetros n_s y n_w
- Columna 8. f_m , factor de fricción de la mezcla f_m , despejando la ecuación 1-15, en función de n_m .
- Columna 9. f_w , factor de fricción del agua f_w , despejando la ecuación 1-15, en función de n_w .
- Columna 10. f_s , factor de fricción del sedimento f_s , utilizando la ecuación 6-32.

$$f_s = f_m - f_w$$

Ecuación 6-32. Factor de fricción de los sedimentos f_s

- Columna 11. f_s/f_w , relación entre los parámetros f_s y f_w
- Columna 12. Π_2 , Parámetro arbitrario que dado viene dado por la ecuación 6-33.

$$\Pi_2 = \left[\frac{SCd^{0.25} C^{0.7}}{3.5E - 06De^{0.1} d^{*0.258}} \right]$$

Ecuación 6-33. Parámetro Π_2 para determinación de pérdida de energía

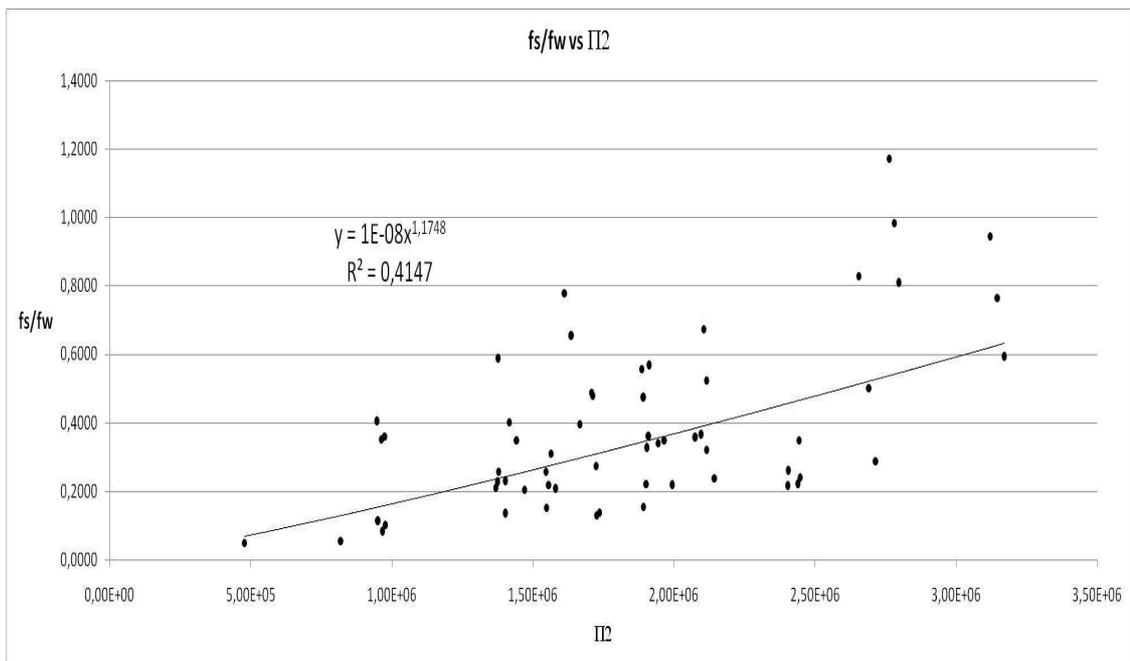
Tabla 6-11. Parámetros para el cálculo de pérdida de energía

| Sedi men to | Ql(m3/ s) | Qm (m3/s) | nm | nw | ns | ns/nw | fm | fw | fs | fs/ fw | Π_2 |
|-------------------|--------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 1 | 0,0029 | 0,00295 | 0,0211 | 0,0163 | 0,0048 | 0,2935 | 0,1331 | 0,0795 | 0,0535 | 0,6732 | 2,11E+06 |
| 1 | 0,0028 | 0,00285 | 0,0210 | 0,0170 | 0,0040 | 0,2346 | 0,1325 | 0,0869 | 0,0456 | 0,5243 | 2,12E+06 |
| 1 | 0,0027 | 0,00275 | 0,0203 | 0,0183 | 0,0021 | 0,1127 | 0,1255 | 0,1014 | 0,0241 | 0,2381 | 2,14E+06 |
| 1 | 0,0025 | 0,00254 | 0,0211 | 0,0191 | 0,0020 | 0,1053 | 0,1362 | 0,1114 | 0,0247 | 0,2217 | 1,90E+06 |
| 1 | 0,0023 | 0,00231 | 0,0218 | 0,0203 | 0,0015 | 0,0747 | 0,1466 | 0,1269 | 0,0197 | 0,1550 | 1,89E+06 |
| 1 | 0,0022 | 0,00218 | 0,0224 | 0,0210 | 0,0014 | 0,0670 | 0,1545 | 0,1357 | 0,0188 | 0,1385 | 1,74E+06 |
| 1 | 0,0020 | 0,00205 | 0,0230 | 0,0216 | 0,0014 | 0,0634 | 0,1642 | 0,1452 | 0,0190 | 0,1309 | 1,73E+06 |
| 1 | 0,0019 | 0,00190 | 0,0252 | 0,0213 | 0,0039 | 0,1821 | 0,1961 | 0,1403 | 0,0558 | 0,3974 | 1,67E+06 |
| 1 | 0,0017 | 0,00175 | 0,0274 | 0,0213 | 0,0061 | 0,2868 | 0,2324 | 0,1403 | 0,0920 | 0,6557 | 1,64E+06 |
| 1 | 0,0016 | 0,00158 | 0,0293 | 0,0220 | 0,0073 | 0,3335 | 0,2672 | 0,1503 | 0,1169 | 0,7782 | 1,61E+06 |
| 1 | 0,0016 | 0,00157 | 0,0273 | 0,0235 | 0,0038 | 0,1614 | 0,2333 | 0,1729 | 0,0603 | 0,3490 | 1,44E+06 |
| 1 | 0,0014 | 0,00138 | 0,0292 | 0,0247 | 0,0045 | 0,1841 | 0,2703 | 0,1928 | 0,0775 | 0,4021 | 1,42E+06 |
| 1 | 0,0011 | 0,00115 | 0,0328 | 0,0260 | 0,0068 | 0,2605 | 0,3425 | 0,2156 | 0,1270 | 0,5889 | 1,38E+06 |
| 2 | 0,0033 | 0,00331 | 0,0210 | 0,0142 | 0,0067 | 0,4738 | 0,1300 | 0,0599 | 0,0702 | 1,1720 | 2,76E+06 |
| 2 | 0,0032 | 0,00322 | 0,0209 | 0,0148 | 0,0061 | 0,4089 | 0,1291 | 0,0650 | 0,0641 | 0,9849 | 2,78E+06 |
| 2 | 0,0031 | 0,00313 | 0,0207 | 0,0154 | 0,0053 | 0,3455 | 0,1282 | 0,0708 | 0,0574 | 0,8105 | 2,80E+06 |
| 2 | 0,0030 | 0,00304 | 0,0211 | 0,0156 | 0,0055 | 0,3522 | 0,1332 | 0,0729 | 0,0604 | 0,8285 | 2,66E+06 |
| 2 | 0,0029 | 0,00295 | 0,0205 | 0,0167 | 0,0038 | 0,2252 | 0,1267 | 0,0844 | 0,0423 | 0,5012 | 2,69E+06 |
| 2 | 0,0028 | 0,00285 | 0,0201 | 0,0177 | 0,0024 | 0,1350 | 0,1227 | 0,0953 | 0,0275 | 0,2883 | 2,72E+06 |
| 2 | 0,0026 | 0,00265 | 0,0208 | 0,0185 | 0,0023 | 0,1234 | 0,1320 | 0,1046 | 0,0274 | 0,2620 | 2,41E+06 |
| 2 | 0,0025 | 0,00254 | 0,0211 | 0,0191 | 0,0020 | 0,1036 | 0,1357 | 0,1114 | 0,0243 | 0,2180 | 2,40E+06 |
| 2 | 0,0019 | 0,00190 | 0,0243 | 0,0220 | 0,0023 | 0,1048 | 0,1834 | 0,1503 | 0,0331 | 0,2206 | 1,99E+06 |
| 2 | 0,0017 | 0,00175 | 0,0260 | 0,0223 | 0,0036 | 0,1619 | 0,2100 | 0,1556 | 0,0545 | 0,3501 | 1,97E+06 |
| 2 | 0,0016 | 0,00158 | 0,0272 | 0,0235 | 0,0037 | 0,1578 | 0,2318 | 0,1729 | 0,0589 | 0,3404 | 1,94E+06 |
| 2 | 0,0014 | 0,00138 | 0,0281 | 0,0255 | 0,0025 | 0,0984 | 0,2505 | 0,2076 | 0,0429 | 0,2064 | 1,47E+06 |
| 3 | 0,0038 | 0,00382 | 0,0188 | 0,0135 | 0,0053 | 0,3951 | 0,1045 | 0,0537 | 0,0508 | 0,9462 | 3,12E+06 |
| 3 | 0,0037 | 0,00375 | 0,0187 | 0,0140 | 0,0046 | 0,3283 | 0,1028 | 0,0582 | 0,0445 | 0,7645 | 3,15E+06 |
| 3 | 0,0037 | 0,00368 | 0,0184 | 0,0146 | 0,0038 | 0,2630 | 0,1009 | 0,0633 | 0,0376 | 0,5952 | 3,17E+06 |
| 3 | 0,0024 | 0,00241 | 0,0222 | 0,0191 | 0,0031 | 0,1617 | 0,1504 | 0,1114 | 0,0390 | 0,3496 | 2,44E+06 |
| 3 | 0,0023 | 0,00230 | 0,0223 | 0,0200 | 0,0023 | 0,1144 | 0,1525 | 0,1228 | 0,0297 | 0,2419 | 2,45E+06 |
| 3 | 0,0022 | 0,00217 | 0,0228 | 0,0206 | 0,0022 | 0,1061 | 0,1605 | 0,1312 | 0,0293 | 0,2234 | 2,44E+06 |
| 3 | 0,0019 | 0,00189 | 0,0249 | 0,0216 | 0,0032 | 0,1495 | 0,1918 | 0,1452 | 0,0467 | 0,3213 | 2,12E+06 |
| 3 | 0,0017 | 0,00174 | 0,0261 | 0,0223 | 0,0038 | 0,1693 | 0,2127 | 0,1556 | 0,0571 | 0,3673 | 2,10E+06 |
| 3 | 0,0016 | 0,00157 | 0,0274 | 0,0235 | 0,0039 | 0,1659 | 0,2351 | 0,1729 | 0,0621 | 0,3593 | 2,08E+06 |
| 3 | 0,0017 | 0,00174 | 0,0271 | 0,0216 | 0,0055 | 0,2531 | 0,2280 | 0,1452 | 0,0828 | 0,5702 | 1,91E+06 |
| 3 | 0,0016 | 0,00157 | 0,0274 | 0,0235 | 0,0039 | 0,1672 | 0,2356 | 0,1729 | 0,0627 | 0,3624 | 1,91E+06 |
| 3 | 0,0014 | 0,00136 | 0,0271 | 0,0265 | 0,0007 | 0,0251 | 0,2353 | 0,2239 | 0,0114 | 0,0509 | 4,78E+05 |
| 4 | 0,0025 | 0,00254 | 0,0211 | 0,0191 | 0,0020 | 0,1046 | 0,1360 | 0,1114 | 0,0245 | 0,2201 | 1,56E+06 |
| 4 | 0,0024 | 0,00243 | 0,0217 | 0,0194 | 0,0024 | 0,1213 | 0,1447 | 0,1151 | 0,0296 | 0,2574 | 1,55E+06 |
| 4 | 0,0023 | 0,00231 | 0,0218 | 0,0203 | 0,0015 | 0,0740 | 0,1464 | 0,1269 | 0,0195 | 0,1534 | 1,55E+06 |
| 4 | 0,0023 | 0,00230 | 0,0222 | 0,0200 | 0,0022 | 0,1101 | 0,1513 | 0,1228 | 0,0285 | 0,2323 | 1,40E+06 |
| 4 | 0,0022 | 0,00218 | 0,0223 | 0,0210 | 0,0014 | 0,0665 | 0,1543 | 0,1357 | 0,0186 | 0,1374 | 1,40E+06 |
| 4 | 0,0017 | 0,00174 | 0,0247 | 0,0235 | 0,0012 | 0,0506 | 0,1909 | 0,1729 | 0,0179 | 0,1037 | 9,77E+05 |
| 4 | 0,0016 | 0,00157 | 0,0257 | 0,0247 | 0,0010 | 0,0418 | 0,2093 | 0,1928 | 0,0165 | 0,0854 | 9,66E+05 |
| 4 | 0,0014 | 0,00138 | 0,0275 | 0,0260 | 0,0015 | 0,0564 | 0,2406 | 0,2156 | 0,0250 | 0,1159 | 9,50E+05 |
| 4 | 0,0011 | 0,00115 | 0,0292 | 0,0284 | 0,0008 | 0,0275 | 0,2763 | 0,2617 | 0,0146 | 0,0558 | 8,18E+05 |
| 4 | 0,0035 | 0,00355 | 0,0187 | 0,0150 | 0,0037 | 0,2480 | 0,1042 | 0,0669 | 0,0373 | 0,5575 | 1,89E+06 |
| 4 | 0,0034 | 0,00347 | 0,0187 | 0,0154 | 0,0033 | 0,2149 | 0,1045 | 0,0708 | 0,0337 | 0,4761 | 1,89E+06 |
| 4 | 0,0033 | 0,00339 | 0,0185 | 0,0161 | 0,0025 | 0,1528 | 0,1026 | 0,0772 | 0,0254 | 0,3289 | 1,90E+06 |
| 4 | 0,0031 | 0,00313 | 0,0198 | 0,0163 | 0,0035 | 0,2163 | 0,1176 | 0,0795 | 0,0381 | 0,4793 | 1,71E+06 |
| 5 | 0,0030 | 0,00304 | 0,0201 | 0,0165 | 0,0036 | 0,2196 | 0,1218 | 0,0819 | 0,0399 | 0,4874 | 1,71E+06 |
| 5 | 0,0029 | 0,00295 | 0,0197 | 0,0175 | 0,0023 | 0,1290 | 0,1177 | 0,0924 | 0,0254 | 0,2746 | 1,73E+06 |
| 5 | 0,0029 | 0,00295 | 0,0195 | 0,0177 | 0,0018 | 0,0999 | 0,1152 | 0,0953 | 0,0200 | 0,2097 | 1,58E+06 |
| 5 | 0,0027 | 0,00275 | 0,0206 | 0,0180 | 0,0026 | 0,1447 | 0,1287 | 0,0982 | 0,0305 | 0,3103 | 1,56E+06 |

| Sedimento | Ql(m3/s) | Qm (m3/s) | nm | nw | ns | ns/nw | fm | fw | fs | fs/ fw | Π_2 |
|-----------|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| 5 | 0,0024 | 0,00242 | 0,0218 | 0,0194 | 0,0024 | 0,1219 | 0,1448 | 0,1151 | 0,0298 | 0,2587 | 1,38E+06 |
| 5 | 0,0023 | 0,00231 | 0,0222 | 0,0200 | 0,0022 | 0,1089 | 0,1510 | 0,1228 | 0,0282 | 0,2296 | 1,37E+06 |
| 5 | 0,0022 | 0,00218 | 0,0227 | 0,0206 | 0,0021 | 0,1003 | 0,1588 | 0,1312 | 0,0276 | 0,2106 | 1,37E+06 |
| 5 | 0,0017 | 0,00174 | 0,0261 | 0,0223 | 0,0037 | 0,1668 | 0,2118 | 0,1556 | 0,0562 | 0,3615 | 9,74E+05 |
| 5 | 0,0016 | 0,00157 | 0,0273 | 0,0235 | 0,0038 | 0,1632 | 0,2340 | 0,1729 | 0,0610 | 0,3529 | 9,64E+05 |
| 5 | 0,0014 | 0,00138 | 0,0293 | 0,0247 | 0,0046 | 0,1861 | 0,2712 | 0,1928 | 0,0784 | 0,4069 | 9,47E+05 |

Para evaluar la influencia de la curvatura del canal y la inclusión de sedimentos al flujo sobre la pérdida de energía, se evalúa la relación f_s/f_w en función de las variables medidas en laboratorio para el canal, incluidas en el parámetro Π_2 , al graficar la relación f_s/f_w vs Π_2 se obtiene la siguiente tendencia.

Gráfico 6-4. Relación entre f_s/f_w y el parámetro adimensional Π_2



La ecuación de la línea de tendencia potencial que se obtiene es de la siguiente forma

$$\frac{f_s}{f_w} = 1E - 08\pi_2^{1,174}$$

Ecuación 6-34. Tendencia para f_s/f_w vs Π_2

Al efectuar la respectiva corrección por mínimo error, de manera análoga al realizado en el estudio de velocidad crítica de depósito, se obtiene el valor α corregido. Se sustituye el parámetro Π_2 y se reemplaza el valor α por el corregido, en la ecuación 6-34, obteniendo así la siguiente ecuación.

$$\frac{f_s}{f_w} = 1.1E - 08 * \left[\frac{SC^0.25 C^{0.7}}{3.5E - 06 De^{-0.9} d^{*0.258}} \right]^{1.174}$$

Ecuación 6-35. Ecuación empírica para la relación f_s/f_w

Aplicando ecuación 6-30 se puede hallar el factor f_m , usando la ecuación 6-35 de la siguiente manera:

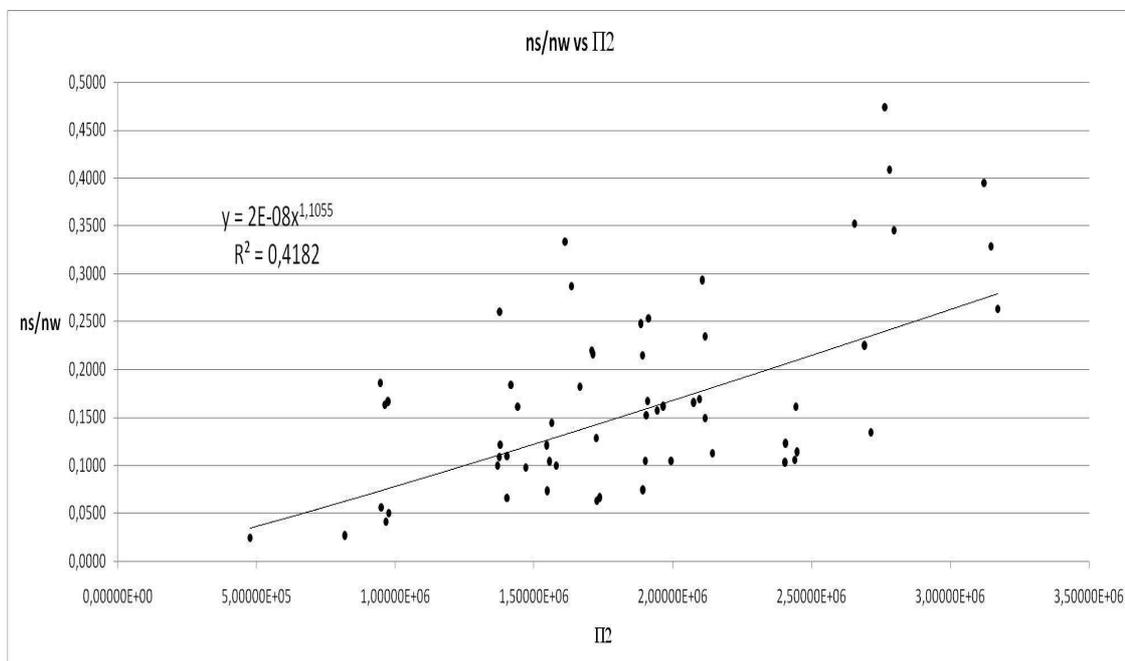
$$\frac{f_m}{f_w} = 1.1E - 08 * \left[\frac{SC^0.25 C^{0.7}}{3.5E - 06 De^{-0.9} d^{*0.258}} \right]^{1.174} + 1$$

Ecuación 6-36. Factor de fricción de la Mezcla

Donde S es la pendiente del canal, $C^0.25 d$ es el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de las partículas, De es el número de Dean, C es la concentración volumétrica de partículas y d^* es el parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla.

Ahora para encontrar la ecuación del coeficiente n de Manning en función del parámetro Π_2 , se procede de forma similar a la metodología usada para determinar la ecuación del factor de fricción de la mezcla f_m . Entonces se evalúa la relación n_s/n_w en función de las variables medidas en laboratorio para el canal, incluidas en el parámetro Π_2 , al graficar la relación n_s/n_w vs Π_2 se obtiene la siguiente tendencia.

Gráfico 6-5. Relación entre n_s/n_w y el parámetro adimensional Π_2



La ecuación de la línea de tendencia potencial que se obtiene es de la siguiente forma

$$\frac{n_s}{n_w} = 2E - 08 \pi_2^{1.105}$$

Ecuación 6-37. Tendencia para n_s/n_w vs Π_2

Al efectuar la respectiva corrección por mínimo error, de manera análoga al realizado en el estudio de velocidad crítica de depósito, se obtiene el valor α corregido. Se sustituye el parámetro Π_2 y se reemplaza el valor α por el corregido, en la ecuación 6-37, obteniendo así la siguiente ecuación.

$$\frac{n_s}{n_w} = 1.4E - 8 * \left[\frac{SC^d^{0.25} C^{0.7}}{3.5E - 06 D e^{-0.9} d^{*0.258}} \right]^{1.105}$$

Ecuación 6-38. Ecuación empírica para la relación n_s/n_w

Aplicando la relación $n_m = n_w + n_s$ se puede hallar el factor n_m , usando la ecuación 6-38 de la siguiente manera:

$$\frac{n_m}{n_w} = 1.4E - 8 * \left[\frac{SC^0.25 C^{0.7}}{3.5E - 06De^{-0.9} d^{*0.258}} \right]^{1.105} + 1$$

Ecuación 6-39. Coeficiente n de la Mezcla

Donde **S** es la pendiente del canal, **C`d** es el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de las partículas, **De** es el numero de Dean, **C** es la concentración volumétrica de partículas y **d`*** es el parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla.

6.4.4. Cálculo de la pérdida de energía de mezclas sedimentables en canales curvos para condiciones de depósito. De la misma manera como se contempló la pérdida de energía en el punto anterior, antes de que ocurra la depositación, se realiza un análisis en el momento exacto en que las partículas se depositan, es decir, usando los valores del estudio de velocidad critica de depósito. Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 6-12.

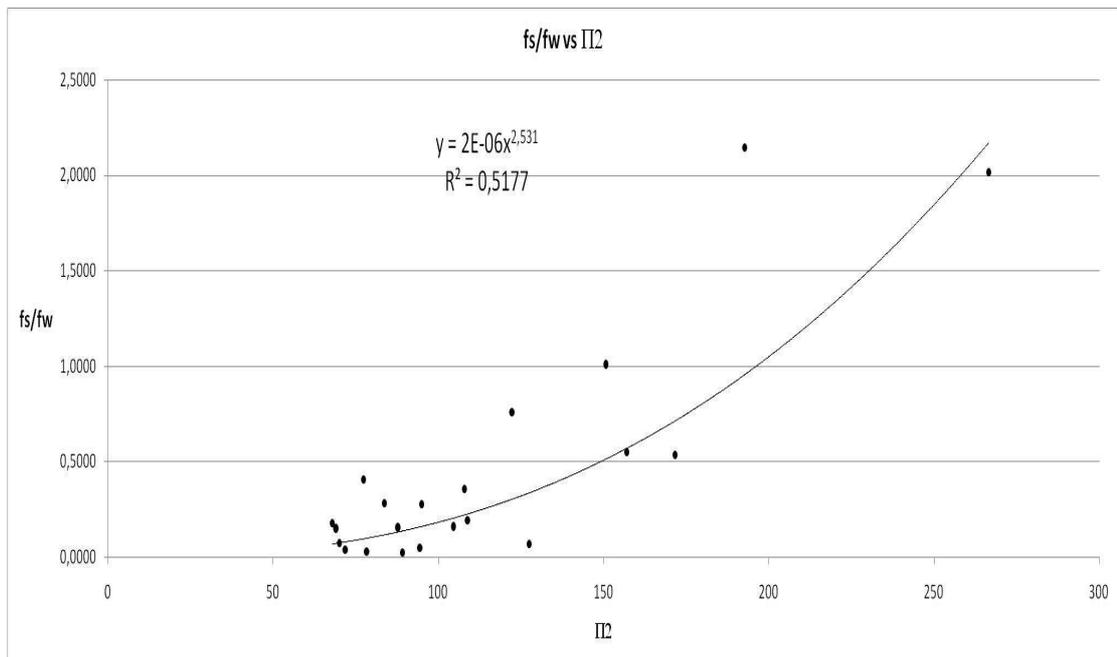
Tabla 6-12. Parámetros para el cálculo de pérdida de energía para condiciones de depósito

| Sedimento | Ql(m3/s) | Qm (m3/s) | nm | nw | ns | ns/nw | fm | fw | fs | fs/ fw | Π ₂ |
|-----------|----------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| 1 | 0,00267 | 0,00270 | 0,0202 | 0,0188 | 0,0014 | 0,0741 | 0,1238 | 0,1073 | 0,0165 | 0,1537 | 87,746 |
| 1 | 0,00226 | 0,00229 | 0,0232 | 0,0227 | 0,0005 | 0,0224 | 0,1684 | 0,1611 | 0,0073 | 0,0453 | 94,414 |
| 1 | 0,00189 | 0,00192 | 0,0312 | 0,0236 | 0,0077 | 0,3254 | 0,3067 | 0,1746 | 0,1321 | 0,7566 | 122,265 |
| 1 | 0,00134 | 0,00137 | 0,0501 | 0,0283 | 0,0219 | 0,7732 | 0,8139 | 0,2589 | 0,5551 | 2,1441 | 192,755 |
| 2 | 0,00300 | 0,00304 | 0,0197 | 0,0169 | 0,0028 | 0,1643 | 0,1172 | 0,0865 | 0,0308 | 0,3557 | 107,908 |
| 2 | 0,00276 | 0,00280 | 0,0199 | 0,0183 | 0,0017 | 0,0907 | 0,1209 | 0,1016 | 0,0193 | 0,1896 | 108,837 |
| 2 | 0,00227 | 0,00230 | 0,0329 | 0,0232 | 0,0097 | 0,4173 | 0,3396 | 0,1690 | 0,1705 | 1,0088 | 150,748 |
| 2 | 0,00129 | 0,00132 | 0,0573 | 0,0330 | 0,0243 | 0,7368 | 1,0957 | 0,3633 | 0,7325 | 2,0164 | 266,595 |
| 3 | 0,00358 | 0,00361 | 0,0174 | 0,0161 | 0,0012 | 0,0764 | 0,0902 | 0,0778 | 0,0124 | 0,1587 | 104,606 |
| 3 | 0,00202 | 0,00204 | 0,0227 | 0,0220 | 0,0007 | 0,0320 | 0,1601 | 0,1503 | 0,0098 | 0,0651 | 127,512 |
| 3 | 0,00134 | 0,00136 | 0,0302 | 0,0243 | 0,0059 | 0,2447 | 0,2889 | 0,1865 | 0,1024 | 0,5494 | 157,013 |
| 3 | 0,00108 | 0,00109 | 0,0333 | 0,0268 | 0,0064 | 0,2390 | 0,3547 | 0,2311 | 0,1237 | 0,5352 | 171,689 |
| 3 | 0,00039 | 0,00040 | 0,0457 | 0,0405 | 0,0052 | 0,1288 | 0,7302 | 0,5731 | 0,1571 | 0,2741 | 94,941 |
| 4 | 0,00188 | 0,00191 | 0,0232 | 0,0229 | 0,0003 | 0,0127 | 0,1679 | 0,1637 | 0,0042 | 0,0255 | 78,291 |
| 4 | 0,00111 | 0,00113 | 0,0311 | 0,0275 | 0,0036 | 0,1318 | 0,3110 | 0,2427 | 0,0682 | 0,2811 | 83,652 |
| 4 | 0,00087 | 0,00089 | 0,0320 | 0,0317 | 0,0004 | 0,0112 | 0,3396 | 0,3322 | 0,0075 | 0,0225 | 89,210 |
| 5 | 0,00328 | 0,00332 | 0,0182 | 0,0168 | 0,0014 | 0,0846 | 0,0995 | 0,0846 | 0,0149 | 0,1763 | 67,953 |
| 5 | 0,00282 | 0,00286 | 0,0196 | 0,0183 | 0,0013 | 0,0713 | 0,1163 | 0,1014 | 0,0150 | 0,1478 | 69,003 |
| 5 | 0,00244 | 0,00248 | 0,0207 | 0,0200 | 0,0007 | 0,0353 | 0,1313 | 0,1224 | 0,0088 | 0,0719 | 70,120 |
| 5 | 0,00204 | 0,00206 | 0,0224 | 0,0220 | 0,0004 | 0,0189 | 0,1560 | 0,1503 | 0,0057 | 0,0381 | 71,836 |
| 5 | 0,00125 | 0,00127 | 0,0304 | 0,0256 | 0,0047 | 0,1844 | 0,2933 | 0,2091 | 0,0842 | 0,4029 | 77,441 |

Para evaluar la influencia del efecto de la curvatura del canal y la inclusión de sedimentos al flujo, sobre la pérdida de energía se evalúa la relación **f_s/f_w** en

función de las variables medidas en laboratorio para el canal, incluidas en el parámetro Π_2 , al graficar la relación f_s/f_w vs Π_2 se obtiene la siguiente tendencia.

Gráfico 6-6. Relación entre f_s/f_w y el parámetro adimensional Π_2 para condiciones de depósito



La ecuación de la línea de tendencia potencial que se obtiene es de la siguiente forma

$$\frac{f_s}{f_w} = 2.0E - 06 \pi_2^{2.531}$$

Ecuación 6-40 Tendencia para f_s/f_w vs Π_2 para condiciones de depósito

Al efectuar la respectiva corrección por mínimo error, de manera análoga al realizado en el estudio de velocidad crítica de depósito, se obtiene el valor α corregido. Se sustituye el parámetro Π_2 y se reemplaza el valor α por el corregido, en la ecuación 6-40, obteniendo así la siguiente ecuación.

$$\frac{f_s}{f_w} = 2E - 06 * \left[\frac{SC^d^{0.25} C^{0.7}}{3.5E - 06De^{0.1} d^{*0.258}} \right]^{2.531}$$

Ecuación 6-41. Ecuación empírica para la relación f_s/f_w para condiciones de depósito

Aplicando ecuación 6-30 se puede hallar el factor f_m , usando la ecuación 6-41 de la siguiente manera:

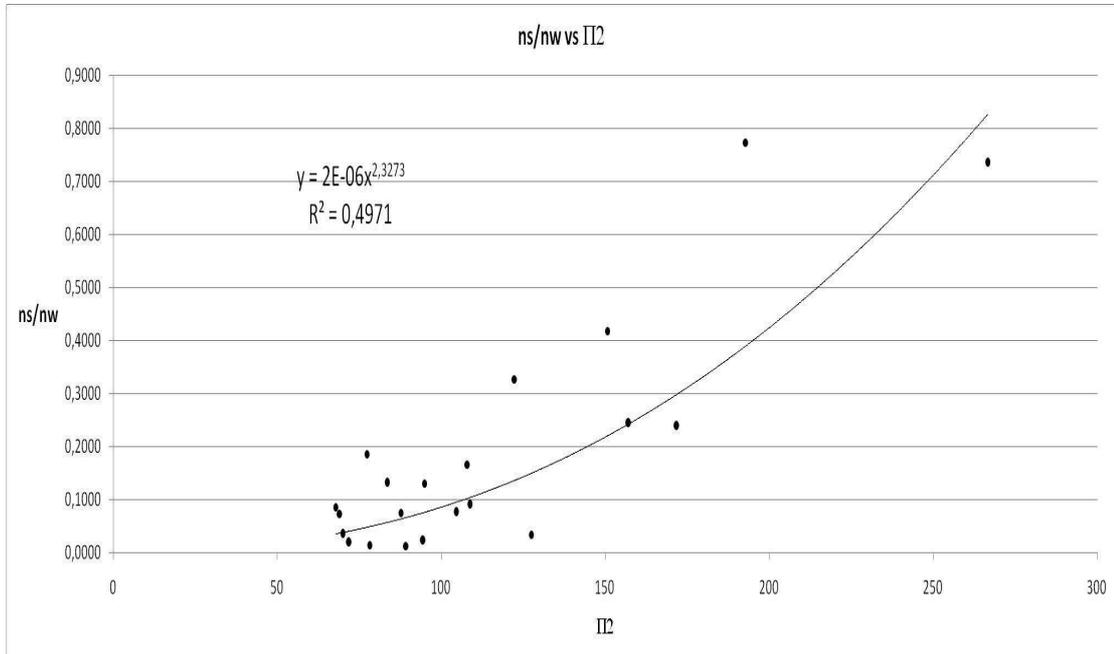
$$\frac{f_m}{f_w} = 2E - 06 * \left[\frac{SC^d^{0.25} C^{0.7}}{3.5E - 06De^{0.1} d^{*0.258}} \right]^{2.531} + 1$$

Ecuación 6-42. Factor de fricción de la Mezcla para condiciones de depósito

Donde S es la pendiente del canal, C^d es el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de las partículas, De es el número de Dean, C es la concentración volumétrica de partículas y d^* es el parámetro adimensional de la partícula afectado por la mezcla.

Ahora para encontrar la ecuación del coeficiente n de Manning en función del parámetro Π_2 para condiciones de depósito, se procede de forma similar a la metodología usada para determinar la ecuación del factor de fricción de la mezcla f_m para condiciones de depósito. Entonces se evalúa la relación n_s/n_w en función de las variables medidas en laboratorio para el canal, incluidas en el parámetro Π_2 , al graficar la relación n_s/n_w vs Π_2 se obtiene la siguiente tendencia.

Gráfico 6-7. Relación entre n_s/n_w y el parámetro adimensional Π_2 para condiciones de depósito



La ecuación de la línea de tendencia potencial que se obtiene es de la siguiente forma

$$\frac{n_s}{n_w} = 2.0E - 06 \pi_2^{2.3273}$$

Ecuación 6-43. Tendencia para n_s/n_w vs Π_2 para condiciones de depósito

Al efectuar la respectiva corrección por mínimo error, de manera análoga al realizado en el estudio de velocidad crítica de depósito, se obtiene el valor α corregido. Se sustituye el parámetro Π_2 y se reemplaza el valor α por el corregido, en la ecuación 6-43, obteniendo así la siguiente ecuación.

$$\frac{n_s}{n_w} = 2E - 06 * \left[\frac{SC \cdot d^{0.25} C^{0.7}}{3.5E - 06 De^{0.1} d^{*0.258}} \right]^{2.3273}$$

Ecuación 6-44. Ecuación empírica para la relación n_s/n_w para condiciones de depósito

Aplicando la relación $n_m = n_w + n_s$ se puede hallar el factor n_m , usando la ecuación 6-44 de la siguiente manera:

$$\frac{n_m}{n_w} = 2E - 06 * \left[\frac{SCd^{0.25} C^{0.7}}{3.5E - 06De^{0.1} d^{*0.258}} \right]^{2.3273} + 1$$

Ecuación 6-45. Coeficiente n de la Mezcla para condiciones de depósito

6.4.5. Cálculo de la sobre elevación de la lámina del flujo en canales curvos. El flujo en canales curvos difiere de aquel en canales rectos a causa de la aceleración centrípeta. Como consecuencia, se produce una sobre elevación de la superficie del agua la cual conduce, bajo ciertas condiciones, a un movimiento helicoidal en respuesta a un flujo secundario que produce un depósito de partículas en el margen interno de la curvatura y un fenómeno de erosión al margen externo de la misma; ambos casos observados en el desarrollo de la investigación.

Partiendo de los conceptos y ecuaciones planteadas en el marco teórico de la investigación, se realiza un análisis del fenómeno de la sobre elevación para el presente caso aplicando estas ecuaciones al modelo de estudio con los datos geométricos del mismo y con los valores tomados de velocidades de trabajo; los resultados obtenidos serán a su vez comparados con datos obtenidos de mediciones directas en el modelo para comprobar de esta forma la aplicabilidad de estas ecuaciones al caso de estudio y obtener relaciones entre estas y el modelo de estudio; todo lo anterior será aplicado tanto al flujo de agua limpia como al flujo de mezclas sedimentables con el fin de obtener también una relación entre los dos fluidos y el fenómeno de la sobre elevación.

A continuación se presenta la comparación que se hace entre las tres ecuaciones planteadas, para ver cuál es la más precisa y así poder determinar cual ecuación utilizar en el cálculo de la sobre elevación propio de esta investigación.

A continuación, en las tablas 6-13 a 6-15 se describe el tratamiento dado al fenómeno de la sobre elevación por la ecuación determinada por la segunda ley de movimiento de Newton, por la ecuación 1-8; según la ecuación de Grashof, dado por la ecuación 1-9 y por último según la ecuación de Woodward, dado por la ecuación 1-10.

- Columna 1. Ensayo N^o, Número asignado al ensayo.
- Columna 2. H Menisco, muestra el valor en cm de la altura del menisco en el ensayo en el instante de la toma del dato.
- Columna 3. H mercurio, muestra el valor en cm de la altura de la altura del mercurio en el momento de la toma del dato.
- Columna 4. Ql (m³/s), muestra el valor del caudal de agua de ensayo en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 4-1.

- Columna 5. Hint (m), altura interna de la lámina de agua en el tramo curvo del modelo experimental.
- Columna 6. Hext (m), altura externa de la lámina de agua en el tramo curvo del modelo experimental.
- Columna 7. Aensayo, es el área que ocupa transversalmente el flujo en el ensayo medida en m².
- Columna 8. Vensayo, es la velocidad del flujo en el momento de la toma del dato, en el ensayo medida en m/s.
- Columna 9. Δh(m) observada, sobre elevación en m de la lamina de agua observada en el momento de la toma del dato en el ensayo.
- Columna 10. Δh(m) calculada, sobre elevación en m de la lamina de agua calculada por la metodología pertinente, en el momento de la toma del dato en el ensayo.

Tabla 6-13. Tratamiento de sobre elevación, Segunda ley de Newton.

| Ensayo N ^o | H Menisco (cm) | H mercurio (cm) | Ql(m3/s) | Hint (m) | Hext (m) | Aensayo (m2) | Vensayo (m/s) | Δh(m) observada | Δh(m) calculada |
|-----------------------|----------------|-----------------|----------|----------|----------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 53,1 | 23,40 | 0,003595 | 0,020 | 0,067 | 0,00261 | 1,3773179 | 0,0470 | 0,038675 |
| 2 | 52,5 | 22,20 | 0,003503 | 0,021 | 0,067 | 0,00264 | 1,3270678 | 0,0460 | 0,035904 |
| 3 | 51,6 | 20,40 | 0,003362 | 0,020 | 0,065 | 0,00255 | 1,3182660 | 0,0450 | 0,035430 |
| 4 | 50,3 | 17,80 | 0,003145 | 0,020 | 0,063 | 0,00249 | 1,2629788 | 0,0430 | 0,032520 |
| 5 | 49,5 | 16,20 | 0,003003 | 0,019 | 0,061 | 0,00240 | 1,2513699 | 0,0420 | 0,031925 |
| 6 | 45,1 | 7,40 | 0,002048 | 0,016 | 0,053 | 0,00207 | 0,9891499 | 0,0370 | 0,019947 |
| 7 | 44,5 | 6,20 | 0,001878 | 0,016 | 0,049 | 0,00195 | 0,9630099 | 0,0330 | 0,018907 |
| 8 | 43,7 | 4,60 | 0,001623 | 0,015 | 0,045 | 0,00180 | 0,9016020 | 0,0300 | 0,016573 |
| 9 | 42,6 | 2,40 | 0,001181 | 0,012 | 0,039 | 0,00153 | 0,7717185 | 0,0270 | 0,012142 |
| 10 | 42,1 | 1,40 | 0,000907 | 0,012 | 0,038 | 0,00150 | 0,6048056 | 0,0260 | 0,007457 |
| 11 | 41,5 | 0,20 | 0,000350 | 0,006 | 0,028 | 0,00102 | 0,3435093 | 0,0220 | 0,002406 |

Tabla 6-14. Tratamiento de sobre elevación, Grashof

| Ensayo N ^o | H Menisco (cm) | H mercurio (cm) | Ql (m3/s) | Hint (m) | Hext (m) | Aensayo (m2) | Vensayo (m/s) | Δh(m) observada | Δh(m) calculada |
|-----------------------|----------------|-----------------|-----------|----------|----------|--------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 53,1 | 23,40 | 0,003595 | 0,020 | 0,067 | 0,00261 | 1,3773179 | 0,047 | 0,043102 |
| 2 | 52,5 | 22,20 | 0,003503 | 0,021 | 0,067 | 0,00264 | 1,3270678 | 0,046 | 0,040014 |
| 3 | 51,6 | 20,40 | 0,003362 | 0,020 | 0,065 | 0,00255 | 1,3182660 | 0,045 | 0,039485 |
| 4 | 50,3 | 17,80 | 0,003145 | 0,020 | 0,063 | 0,00249 | 1,2629788 | 0,043 | 0,036243 |
| 5 | 49,5 | 16,20 | 0,003003 | 0,019 | 0,061 | 0,00240 | 1,2513699 | 0,042 | 0,035579 |
| 6 | 45,1 | 7,40 | 0,002048 | 0,016 | 0,053 | 0,00207 | 0,9891499 | 0,037 | 0,022231 |
| 7 | 44,5 | 6,20 | 0,001878 | 0,016 | 0,049 | 0,00195 | 0,9630099 | 0,033 | 0,021071 |
| 8 | 43,7 | 4,60 | 0,001623 | 0,015 | 0,045 | 0,00180 | 0,9016020 | 0,030 | 0,018470 |
| 9 | 42,6 | 2,40 | 0,001181 | 0,012 | 0,039 | 0,00153 | 0,7717185 | 0,027 | 0,013531 |
| 10 | 42,1 | 1,40 | 0,000907 | 0,012 | 0,038 | 0,00150 | 0,6048056 | 0,026 | 0,008311 |
| 11 | 41,5 | 0,20 | 0,000350 | 0,006 | 0,028 | 0,00102 | 0,3435093 | 0,022 | 0,002681 |

Tabla 6-15. Tratamiento de sobre elevación, Woodward

| Ensayo N° | H Menisco (cm) | H mercurio (cm) | Ql(m3/s) | Hint (m) | Hext (m) | Aensayo (m2) | Vensayo (m/s) | $\Delta h(m)$ observada | $\Delta h(m)$ calculada |
|-----------|----------------|-----------------|----------|----------|----------|--------------|---------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 53,1 | 23,40 | 0,003595 | 0,020 | 0,067 | 0,00261 | 1,3773179 | 0,047 | 0,025841 |
| 2 | 52,5 | 22,20 | 0,003503 | 0,021 | 0,067 | 0,00264 | 1,3270678 | 0,046 | 0,023990 |
| 3 | 51,6 | 20,40 | 0,003362 | 0,020 | 0,065 | 0,00255 | 1,3182660 | 0,045 | 0,023673 |
| 4 | 50,3 | 17,80 | 0,003145 | 0,020 | 0,063 | 0,00249 | 1,2629788 | 0,043 | 0,021729 |
| 5 | 49,5 | 16,20 | 0,003003 | 0,019 | 0,061 | 0,00240 | 1,2513699 | 0,042 | 0,021331 |
| 6 | 45,1 | 7,40 | 0,002048 | 0,016 | 0,053 | 0,00207 | 0,9891499 | 0,037 | 0,013328 |
| 7 | 44,5 | 6,20 | 0,001878 | 0,016 | 0,049 | 0,00195 | 0,9630099 | 0,033 | 0,012633 |
| 8 | 43,7 | 4,60 | 0,001623 | 0,015 | 0,045 | 0,00180 | 0,9016020 | 0,030 | 0,011073 |
| 9 | 42,6 | 2,40 | 0,001181 | 0,012 | 0,039 | 0,00153 | 0,7717185 | 0,027 | 0,008113 |
| 10 | 42,1 | 1,40 | 0,000907 | 0,012 | 0,038 | 0,00150 | 0,6048056 | 0,026 | 0,004983 |
| 11 | 41,5 | 0,20 | 0,000350 | 0,006 | 0,028 | 0,00102 | 0,3435093 | 0,022 | 0,001607 |

A continuación se indica un cuadro resumen de las tres tablas anteriores, en la cual se expresa la sobre elevación observada y las tres posibilidades calculadas.

- Columna 1. Ql (m³/s), muestra el valor del caudal de agua de ensayo en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 4-1.
- Columna 2. A flujo, es el área que ocupa transversalmente el flujo en el ensayo medida en m².
- Columna 3. V flujo, es la velocidad del flujo en el momento de la toma del dato, en el ensayo medida en m/s.
- Columna 4. y/R_H, relación entre la altura promedio *y* y el radio hidráulico **R_H**.
- Columna 5. $\Delta h(m)$ observada, sobre elevación en m de la lamina de agua observada en el momento de la toma del dato en el ensayo.
- Columna 6. Δh Segunda ley de Newton, sobre elevación Calculada en m, de la lamina de agua según la metodología de Newton, dado por la ecuación 1-8
- Columna 7. Δh Grashof, sobre elevación Calculada en m, de la lamina de agua según la metodología de Grashof, dado por la ecuación 1-9
- Columna 8. Δh Woodward, sobre elevación Calculada en m, de la lamina de agua según la metodología de Woodward, dado por la ecuación 1-10

Tabla 6-16. Resumen de las tres metodologías para tratamiento de sobre elevación de la lámina de agua

| Ql(m3/s) | A flujo (m2) | V flujo(m/s) | y/R _H | Δh observada | Δh Segunda Ley de Newton | Δh Grashof | Δh Woodward |
|----------|--------------|--------------|------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------|---------------------|
| 0,0036 | 0,0026 | 1,3773 | 2,4500 | 0,0470 | 0,0387 | 0,0431 | 0,0258 |
| 0,0035 | 0,0026 | 1,3271 | 2,4667 | 0,0460 | 0,0359 | 0,0400 | 0,0240 |
| 0,0034 | 0,0026 | 1,3183 | 2,4167 | 0,0450 | 0,0354 | 0,0395 | 0,0237 |
| 0,0031 | 0,0025 | 1,2630 | 2,3833 | 0,0430 | 0,0325 | 0,0362 | 0,0217 |
| 0,0030 | 0,0024 | 1,2514 | 2,3333 | 0,0420 | 0,0319 | 0,0356 | 0,0213 |
| 0,0020 | 0,0021 | 0,9891 | 2,1500 | 0,0370 | 0,0199 | 0,0222 | 0,0133 |
| 0,0019 | 0,0020 | 0,9630 | 2,0833 | 0,0330 | 0,0189 | 0,0211 | 0,0126 |
| 0,0016 | 0,0018 | 0,9016 | 2,0000 | 0,0300 | 0,0166 | 0,0185 | 0,0111 |
| 0,0012 | 0,0015 | 0,7717 | 1,8500 | 0,0270 | 0,0121 | 0,0135 | 0,0081 |
| 0,0009 | 0,0015 | 0,6048 | 1,8333 | 0,0260 | 0,0075 | 0,0083 | 0,0050 |
| 0,0004 | 0,0010 | 0,3435 | 1,5667 | 0,0220 | 0,0024 | 0,0027 | 0,0016 |

Para lograr una mayor comprensión de los datos obtenidos, se hace una grafica para cada sobre elevación obtenida y observada confrontadas con el caudal liquido, como se observa en las gráficas 6-8, 6-9 y 6-10.

Gráfico 6-8. Sobre elevación observada y calculada por la segunda ley de Newton vs caudal liquido

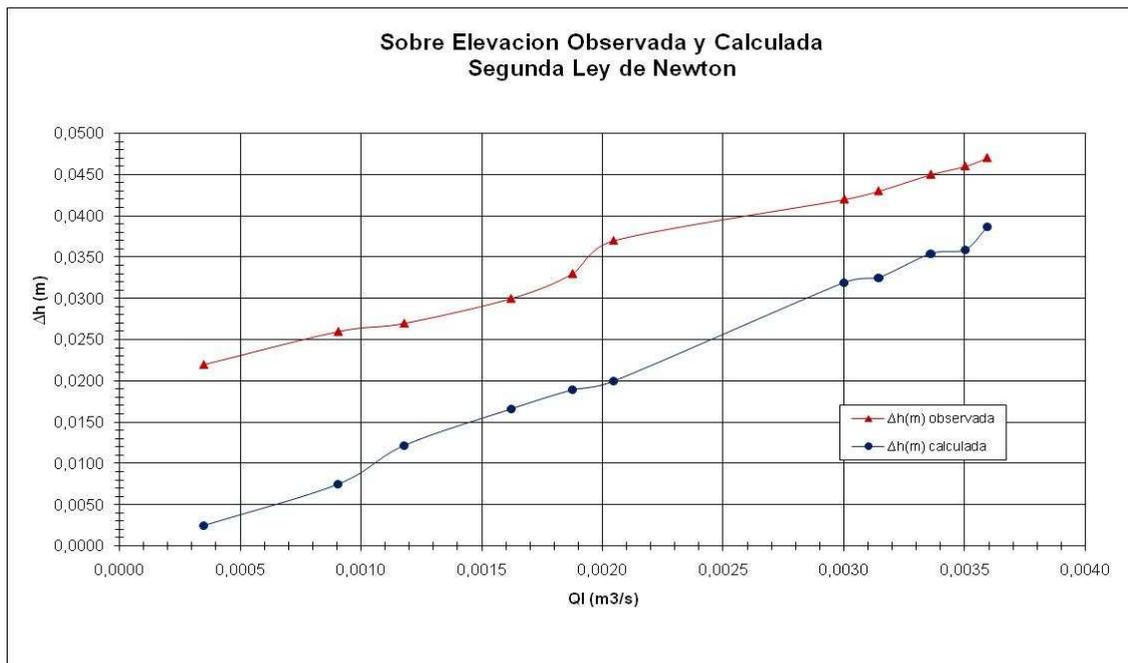


Gráfico 6-9. Sobre elevación observada y calculada por la ecuación de Grashof vs caudal líquido

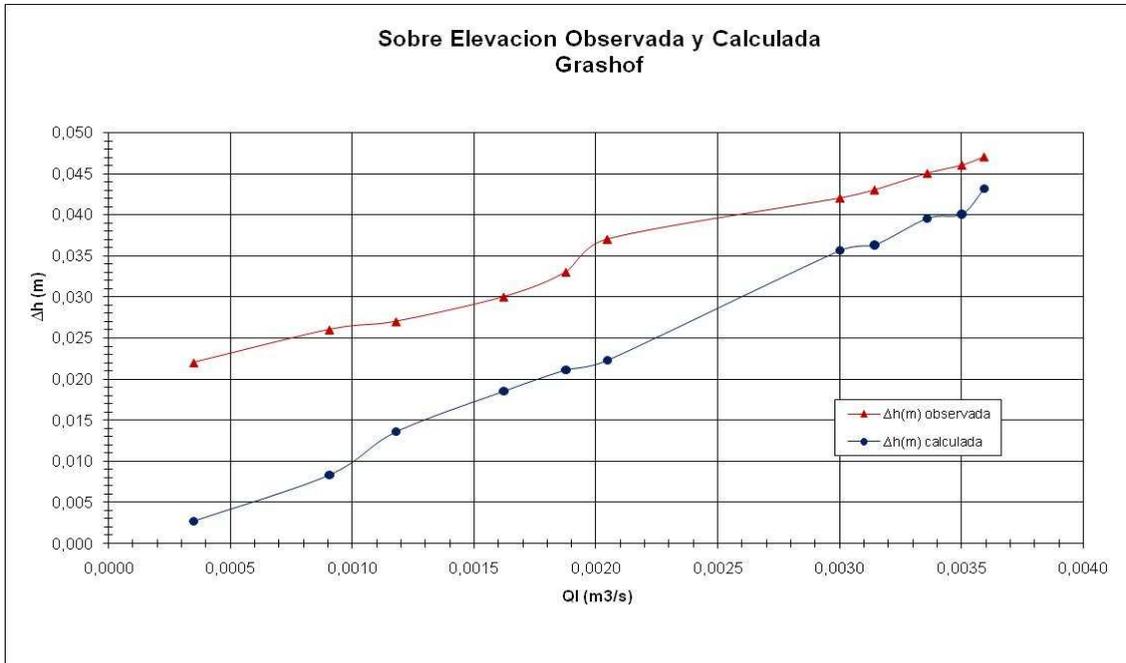
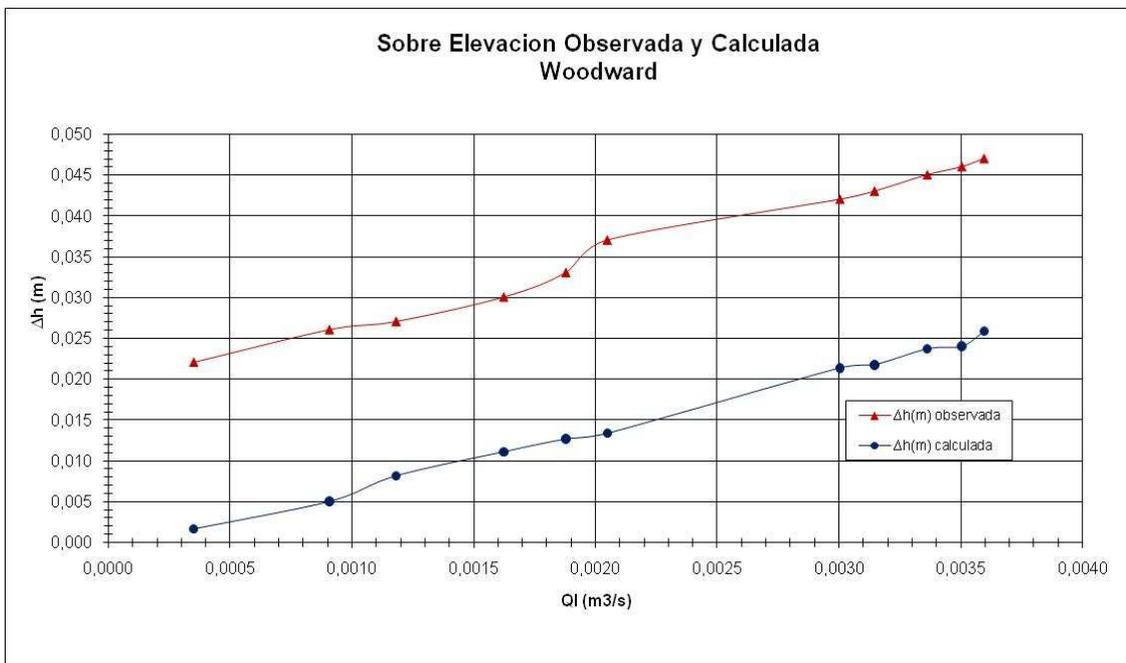


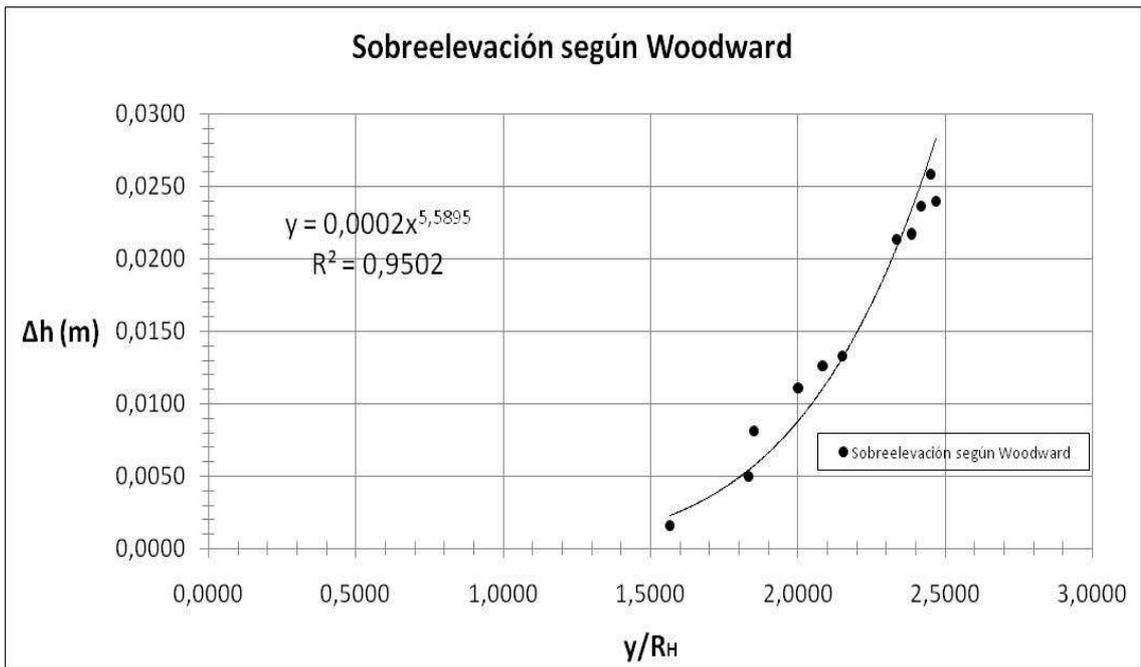
Gráfico 6-10. Sobre elevación observada y calculada por la ecuación de Woodward vs caudal líquido



Por lo que se observa que la ecuación de Woodward guarda una mejor relación respecto a lo observado durante los ensayos, razón por la cual la hemos adoptado para el estudio de la sobre elevación.

Entonces se grafica la relación Δh calculado según Woodward vs y/R_H para obtener una ecuación empírica que nos permita conocer Δh_w en función del caudal líquido para los posteriores cálculos

Gráfico 6-11. Sobre elevación para agua limpia según Woodward vs y/R_H



De acuerdo a lo anterior, y luego de realizar la corrección para el mínimo error, la ecuación para la sobre elevación del flujo de agua se determina por:

$$\Delta h_w = 2E - 04 \left(\frac{y}{R_H} \right)^{5.589}$$

Ecuación 6-46. Ecuación de Sobre elevación para agua limpia

El cálculo de la sobre elevación causada por los sedimentos Δh_s se hace como se indica en la siguiente ecuación.

$$\Delta h_s = \Delta h_m - \Delta h_w$$

Ecuación 6-47. Sobre elevación en los sedimentos Δh_s

Con los valores experimentales se calcula el valor de la sobre elevación Δh_m para la mezcla con la ecuación 6-48 y el valor de la sobre elevación del agua Δh_w para el agua usando la ecuación 6-46.

$$\Delta h_m = H_{ext} - H_{int}$$

Ecuación 6-48. Sobre elevación de la lámina de agua-sedimento

Donde H_{ext} y H_{int} son respectivamente las alturas de la lámina del flujo externa e interna medidas en el laboratorio para cada ensayo realizado.

La tabla 6-17 ilustra los parámetros necesarios para encontrar una relación para la sobre elevación, donde se encuentra un parámetro Π_3 , en función de parámetros adimensionales, es decir, $\Pi_3 = f(C, S, C'd, De, F_L)$, y que está dado por la ecuación 6-49, que cual se muestra posteriormente..

A continuación se describe la forma de cálculo de la sobre elevación del flujo de mezclas que se presenta en un canal curvo con sección rectangular, llevada a cabo mediante el uso hojas de cálculo, columna por columna de la hoja de cálculo, se explica la metodología usada. Los resultados de estos cálculos se muestran en la tabla 6-17.

- Columna 1. Sedimento, tipo de sedimento utilizado
- Columna 2. Q_l (m^3/s), muestra el valor del caudal de agua de ensayo en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 4-1.
- Columna 3. Q_m (m^3/s), muestra el valor del caudal de la mezcla agua – sedimento en el instante de la toma del dato. Se calcula mediante la ecuación 6-15.
- Columna 4. Δh_m , sobre elevación de la mezcla en metros, calculado por la ecuación 6-48.
- Columna 5. Δh_w , sobre elevación del agua limpia en metros, calculado según la ecuación de Woodward
- Columna 6. Δh_s , sobre elevación de los sólidos en metros, calculado según la diferencia de Δh_m y Δh_w
- Columna 7. $\Delta h_s/\Delta h_w$, relación entre la sobre elevación por sólidos y la sobre elevación por agua.
- Columna 8. Π_3 , Parámetro arbitrario que dado viene dado por la ecuación 6-49.

$$\Pi_3 = \frac{F_L * S^{0.05} * 1E + 10}{De^{2.5} * C * d^{0.01} * \sqrt[3]{C}}$$

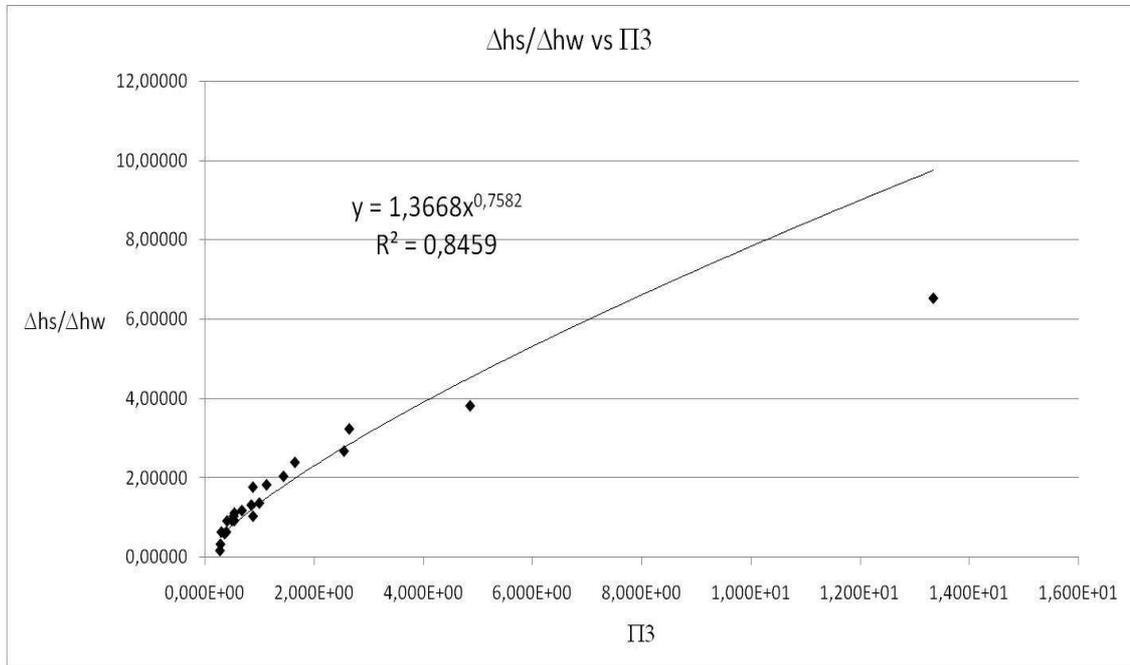
Ecuación 6-49. Parámetro Π_3 , para determinación de Sobre elevación de la lamina de flujo

Tabla 6-17. Parámetros para el cálculo de la sobre elevación

| sedimento | Ql(m3/s) | Qm (m3/s) | Δh_m | Δh_w | Δh_s | $\Delta h_s/\Delta h_w$ | Π_3 |
|-----------|----------|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------------------|------------|
| 1 | 0,002669 | 0,002703 | 0,0362727 | 0,0220601 | 0,0142126 | 0,64427 | 3,0478E-01 |
| 1 | 0,002262 | 0,002291 | 0,0302727 | 0,0157232 | 0,0145495 | 0,92535 | 4,0846E-01 |
| 1 | 0,001894 | 0,001920 | 0,0280909 | 0,0132210 | 0,0148699 | 1,12472 | 5,4320E-01 |
| 1 | 0,001340 | 0,001365 | 0,0278182 | 0,0119517 | 0,0158665 | 1,32755 | 8,5264E-01 |
| 1 | 0,000651 | 0,000672 | 0,0270000 | 0,0073270 | 0,0196730 | 2,68502 | 2,5503E+00 |
| 2 | 0,002761 | 0,00280 | 0,0278182 | 0,0236346 | 0,0041836 | 0,17701 | 2,7952E-01 |
| 2 | 0,002271 | 0,00230 | 0,0260909 | 0,0158456 | 0,0102453 | 0,64657 | 3,9593E-01 |
| 2 | 0,001293 | 0,00132 | 0,0254545 | 0,0124468 | 0,0130077 | 1,04506 | 8,8430E-01 |
| 2 | 0,000446 | 0,00046 | 0,0233636 | 0,0048371 | 0,0185266 | 3,83013 | 4,8596E+00 |
| 3 | 0,002020 | 0,00204 | 0,0279091 | 0,0144276 | 0,0134815 | 0,93442 | 5,4072E-01 |
| 3 | 0,001344 | 0,00136 | 0,0261818 | 0,0110099 | 0,0151719 | 1,37803 | 1,0014E+00 |
| 3 | 0,001075 | 0,00109 | 0,0257273 | 0,0084323 | 0,0172949 | 2,05103 | 1,4428E+00 |
| 3 | 0,000394 | 0,00040 | 0,0210909 | 0,0027961 | 0,0182948 | 6,54299 | 1,3343E+01 |
| 4 | 0,002178 | 0,00221 | 0,0303636 | 0,0148300 | 0,0155337 | 1,04745 | 5,2886E-01 |
| 4 | 0,001881 | 0,00191 | 0,0283636 | 0,0129587 | 0,0154050 | 1,18878 | 6,8112E-01 |
| 4 | 0,001578 | 0,00160 | 0,0282727 | 0,0101725 | 0,0181002 | 1,77933 | 8,8233E-01 |
| 4 | 0,001113 | 0,00113 | 0,0270000 | 0,0079330 | 0,0190670 | 2,40350 | 1,6512E+00 |
| 4 | 0,000872 | 0,00089 | 0,0229091 | 0,0053946 | 0,0175145 | 3,24667 | 2,6460E+00 |
| 5 | 0,002818 | 0,00286 | 0,0317273 | 0,0237200 | 0,0080073 | 0,33758 | 2,8859E-01 |
| 5 | 0,002443 | 0,00248 | 0,0300000 | 0,0186719 | 0,0113281 | 0,60669 | 3,6467E-01 |
| 5 | 0,002035 | 0,00206 | 0,0279091 | 0,0144276 | 0,0134815 | 0,93442 | 4,9939E-01 |
| 5 | 0,001249 | 0,00127 | 0,0270909 | 0,0095490 | 0,0175419 | 1,83705 | 1,1328E+00 |

Para evaluar la influencia del efecto de la curvatura del canal y la inclusión de sedimentos al flujo, en la sobre elevación del flujo de mezclas se evalúa la relación $\Delta h_s/\Delta h_w$ en función de las variables medidas en laboratorio para el canal, incluidas en el parámetro Π_3 , al graficar la relación $\Delta h_s/\Delta h_w$ vs Π_3 se obtiene la siguiente tendencia.

Gráfico 6-12. Relación entre $\Delta h_s/\Delta h_w$ y el parámetro adimensional Π_3



La ecuación de la línea de tendencia potencial que se obtiene es de la siguiente forma

$$\frac{\Delta h_s}{\Delta h_w} = 1.36 \pi_3^{0.7582}$$

Ecuación 6-50. Tendencia para $\Delta h_s/\Delta h_w$ vs Π_3

Para evaluar la influencia del efecto de la curvatura del canal y la inclusión de sedimentos al flujo, respecto a la sobre elevación se evalúa la relación $\Delta h_s/\Delta h_w$ en función de las variables medidas en laboratorio para el canal, siendo Δh_s la sobre elevación causada por los sedimentos; estableciendo una relación funcional adimensional entre la sobre elevación causada por la inclusión de sedimentos y las variables independientes, así:

$$\frac{\Delta h_s}{\Delta h_w} = 1.36 * \left[\frac{F_L * S^{0.05} * 1E + 10}{De^{2.5} * C \cdot d^{0.01} * \sqrt[3]{C}} \right]^{0.7582}$$

Ecuación 6-51. Ecuación empírica para la relación $\Delta h_s/\Delta h_w$

Aplicando ecuación 6-47 se puede hallar el factor Δh_m , usando la ecuación 6-51 de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta h_m}{\Delta h_w} = 1.36 * \left[\frac{F_L * S^{0.05} * 1E + 10}{De^{2.5} * C^d^{0.01} * \sqrt[3]{C}} \right]^{0.7582} + 1$$

Ecuación 6-52. Sobre elevación de la lámina del flujo en canales curvos

Donde F_L es el Número de Froude Densimétrico, S es la pendiente del canal, De es el numero de Dean, C^d es el coeficiente de arrastre afectado por la concentración de las partículas y C es la concentración volumétrica de partículas.

6.5. METODOLOGÍA DE DISEÑO PARA CANALES CURVOS CON SECCIÓN RECTANGULAR

A partir de las ecuaciones obtenidas en el presente estudio, se plantea una metodología para calcular la velocidad crítica de depósito y la sobre elevación que se presenta en la pared externa de canales curvos con sección rectangular.

A continuación se enuncia la secuencia para el cálculo.

1. Datos conocidos: caudal de agua limpia: Q_L (m³/s). caudal de sólido Q_s (m³/s). pendiente del canal S (m/m), base del canal b (m), el radio de curvatura del canal R (m), la temperatura T del flujo y las características del sedimento.
2. Se calcula el caudal de la mezcla Q_m , por medio de ecuación 6-15
3. Se calcula la concentración volumétrica de partículas C , según la ecuación 6-8, la densidad de la mezcla ρ_m según la ecuación 6-12, y la viscosidad dinámica de la mezcla μ_m según la ecuación 6-14.
4. Se procede a la obtención de los parámetros adimensionales Δ , C^d , R_m , d^+ , Δ' , según las ecuaciones, 6-2, 6-4, 6-5, 6-6, 6-7 respectivamente.
5. Se realiza una iteración, para conocer el valor de y a partir de un valor supuesto, siguiendo los siguientes pasos.
 - 5.1 Se supone y .
 - 5.2 Se calcula A_e , P_M y R_H según las ecuaciones 6-16, 6-18 y 6-19, respectivamente.

- 5.3 Se calcula n_w según la ecuación 4-6.
- 5.4 Se calcula y por la ecuación de Manning, denominada en el presente como ecuación 1-16.
- 5.5 Se inicia nuevamente el ciclo, una y otra vez hasta que y asumido sea igual a y calculado.
6. Se calcula la velocidad media de la mezcla V_m , según la ecuación 6-17.
7. Se calcula la velocidad de depósito para el tramo recto V_{dr} según la ecuación 6-26.
8. Usando la relación plasmada en el subcapítulo 6.4.2, que compara las velocidades de tramo recto V_{dr} y tramo curvo V_{dc_1} , cuya constante de proporcionalidad es del orden de 4,1152, se obtiene la velocidad de depósito en el tramo curvo a partir del tramo recto.
9. Se realiza un primer chequeo $V_m > 2 * V_{dc_1}$
10. Si no se cumple el chequeo, se rediseña la sección, es decir se vuelve al paso 1, variando b o S .
11. Se calculan los parámetros adimensionales De y FI , según las ecuaciones 6-3 y 6-1 respectivamente.
12. Cálculo de n_m según la ecuación 6-39.
13. Se calcula la velocidad de depósito V_{dc_2} según la ecuación experimental 6-25.
14. Se hace un segundo chequeo $V_m > 2 * V_{dc_2}$.
15. en caso de que no cumpla se vuelve al paso 1, y se rediseña.
16. Se determina el valor de Δh_w y Δh_m para la curva, según las ecuaciones 6-46 y 6-52 respectivamente.
17. Conocida la sobre elevación en la curva se determina la sección del tramo curvo para el canal.

Un ejemplo práctico de la metodología planteada sería:

DATOS CONOCIDOS

| | | | | |
|-----|----------|-------------------|-----|------------------------|
| QL | 1.5 | m ³ /s | | |
| Qs | 3,42E-03 | m ³ /s | | |
| b | 0,5 | m | | |
| R | 2,5 | m | | |
| S | 0,05 | = | 5 % | |
| ps | 2600 | kg/m ³ | = | 2,6 gr/cm ³ |
| d50 | 0,001758 | | | |

$$\begin{array}{ll} \rho_w & 998,5777778 \text{ kg/m}^3 \\ T^\circ & 20 \text{ }^\circ\text{C} \\ \nu_w & 1,01677E-06 \end{array}$$

CALCULOS PRIMARIOS

$$C = \frac{Q_s}{Q_m} \quad C = \frac{3,42E-03 \text{ m}^3/\text{s}}{1,50342 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$C = \underline{2,27E-03} \quad C = \underline{0,227\%}$$

$$\rho_m = C \rho_s + (1 - C) \rho$$

$$\rho_m = 2,27E-03 * 2600 \text{ Kg/m}^3 + (1 - 2,27E-03) 998,5777778 \text{ Kg/m}^3$$

$$\rho_m = \underline{1,0022E+03}$$

$$\frac{V_m}{V_f} = 1 + k_e C$$

$$\frac{V_m}{1,01677E-06} = 1 + (2,5 * 2,27E-03)$$

$$\nu_m = \underline{1,02E-06}$$

$$\mu_m = \nu_m * \rho_m$$

$$\mu_m = 1,02E-06 * 1,0022E+03$$

$$\mu_m = \underline{1,0248E-03}$$

CÁLCULO DE PARAMETROS ADIMENSIONALES

$$\Delta = \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}$$

$$\Delta = \underline{1,603703044}$$

$$\Delta = \frac{(2600 \text{ kg/m}^3 - 998,5777778 \text{ kg/m}^3)}{998,5777778 \text{ kg/m}^3}$$

$$\Delta' = \left[\frac{(1 - C)(G_s - 1)}{1 + C(G_s - 1)} \right]$$

$$\Delta' = \left[\frac{(1 - 2,27E-03)(2,6 \text{ gr/cm}^3 - 1)}{1 + 2,27E-03(2,6 \text{ gr/cm}^3 - 1)} \right]$$

$$\Delta' = \underline{1,5905710}$$

$$d'_* = \left(\frac{\Delta' g}{\nu_m^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} d$$

$$d'_* = \left(\frac{1,5905710 * 9,81 \text{ m/seg}^2}{1,03E-06^2} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} 0,001758$$

$$d^* = \underline{43,281458}$$

$$R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(d^*)^2)} - 5 \right)^{1.5} \quad R_m = \left(\sqrt{(25 + 1.2(281458)^2)} - 5 \right)^{1.5}$$

$$R_m = \underline{278,782853}$$

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

$$C'd = \left[\left(\frac{32}{278,782853} \right)^{2/3} + 1 \right]^{3/2}$$

$$C'd = \underline{1,374441456}$$

DETERMINACION DE FORMA ITERATIVA n_w Y y

PRIMERA ITERACION

Se supone $y = \underline{0,6m}$

Area = $0.6 m * 0.5m = \underline{0,3m^2}$

$$P_M = b + 2y \quad P_M = 0,5m + (2 * 0,6m)$$

$$P_m = \underline{1,7m}$$

$$R_H = \frac{A_e}{P_M} \quad R_H = \frac{0,3m^2}{1,7m}$$

$$R_H = \underline{0,176470588m}$$

$$y / R_H = 0.6m / 0.176470588m = \underline{3,4}$$

$$n_w = 0,108 \left(\frac{y}{R_H} \right)^{-2,08} \quad n_w = 0,108(3,4)^{-2,08}$$

$$n_w = \underline{0,008471252}$$

Por manning

$$Q = \frac{1}{n} (b * y) (b * y / (b + 2y))^{2/3} S^{1/2}$$

$$1,50342m^3 / s = \frac{1}{0,008471252} (0,5m * y) (0,5m * y / (0,5m + 2y))^{2/3} * 0,05^{1/2}$$

y calculado= 0,39m

SEGUNDA ITERACION

Se supone y= 0,5m

$$\text{Área} = 0,5m * 0,5m = \underline{0,25m^2}$$

$$P_M = b + 2y \quad P_M = 0,5m + (2 * 0,5m)$$

$$P_M = \underline{1,5m}$$

$$R_H = \frac{A_e}{P_M} \quad R_H = \frac{0,25m^2}{1,5m}$$

$$R_H = \underline{0,1666667m}$$

$$y / R_H = 0,5m / 0,1666667m = \underline{3}$$

$$n_w = 0,108 \left(\frac{y}{R_H} \right)^{-2,08} \quad n_w = 0,108(3)^{-2,08}$$

$$n_w = 0,01099035$$

Por manning

$$Q = \frac{1}{n} (b * y) (b * y / (b + 2y))^{2/3} S^{1/2}$$

$$1,50342m^3 / s = \frac{1}{0,01099035} (0,5m * y) (0,5m * y / (0,5m + 2y))^{2/3} * 0,05^{1/2}$$

y calculado= 0,4901m

TERCERA ITERACION

Se supone y= 0,495m

$$\text{Area} = 0.5m * 0.495m = \underline{0,2475m^2}$$

$$P_M = b + 2y \quad P_M = 0,5m + (2 * 0,495m)$$

$$P_M = \underline{1,49m}$$

$$R_H = \frac{A_e}{P_M} \quad R_H = \frac{0,2475m^2}{1,49m}$$

$$R_H = \underline{0,16610738m}$$

$$y / R_H = 0.495m / 0.16610738m = \underline{2,98}$$

$$n_w = 0,108 \left(\frac{y}{R_H} \right)^{-2,08} \quad n_w = 0,108(2,98)^{-2,08}$$

$$n_w = \underline{0,01114433}$$

Por manning

$$Q = \frac{1}{n} (b * y) (b * y / (b + 2y))^{2/3} S^{1/2}$$

$$1,50342m^3 / s = \frac{1}{0,01114433} (0,5m * y) (0,5m * y / (0,5m + 2y))^{2/3} * 0,05^{1/2}$$

$$y \text{ calculado} = \underline{0,495m}$$

DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD MEDIA

$$V_m = \frac{Q_m}{A_e} \quad V_m = \frac{1,50342m^3 / s}{0,2475m^2}$$

$$V_m = \underline{6,074424242m/s}$$

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE DEPÓSITO PARA EL TRAMO RECTO

$$V_{dr} = 0.748 \left[C \cdot S^4 \sqrt{d_*} \right]^{0.11} \sqrt{8 \cdot g \cdot R_H \cdot \Delta}$$

$$V_{dr} = 0.748 \left[2,27E-03 * 0.05^4 \sqrt{43,2815} \right]^{0.11} \sqrt{8 * 9.81m / s^2 * 0.1662m * 1.6037}$$

$$V_{dr} = \underline{5,77E-01m/s}$$

CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE DEPÓSITO PARA EL TRAMO CURVO

$$V_{dc1} = V_{dr} * 4,1152 = \underline{2,37m/s}$$

PRIMER CHEQUEO

$$V_m > 2V_{d_{c1}}$$

$$\underline{6,07442424\text{m/s} > 4,75\text{m/s}} \quad \text{Si cumple}$$

CÁLCULO DE PARAMETROS ADIMENSIONALES De Y F_l

En función n de la velocidad de depósito del tramo curvo.

$$De = \left(\frac{4 * R_H * V_{d_c} * \rho}{\mu} \right) \left(\frac{4 * R_H}{2R} \right)^{1/2}$$

$$De = \left(\frac{4 * 0,16610738\text{m} * 2,37 * 1,0022\text{E} + 03}{1,0248\text{E} - 03} \right) \left(\frac{4 * 0,16610738\text{m}}{2 * 2,5\text{m}} \right)^{1/2}$$

$$De = \underline{562001,9212}$$

$$F_l = \frac{V_d}{\sqrt{8gR_H\Delta}}$$

$$F_l = \frac{2,37\text{m/s}}{\sqrt{8 * 9,81\text{m/s}^2 * 0,16610738\text{m} * 1,6037}}$$

$$F_l = \underline{0,518919495}$$

$$\frac{n_m}{n_w} = 1,4\text{E} - 8 * \left[\frac{SC * d^{0,25} * C^{0,7}}{3,5\text{E} - 06 * De^{-0,9} * d^{*0,258}} \right]^{1,105} + 1$$

$$\frac{n_m}{0,01114433} = 1,4\text{E} - 8 * \left[\frac{0,05 * 1,374441456^{0,25} * 2,27\text{E} - 03^{0,7}}{3,5\text{E} - 06 * 562001,9212^{0,1} * 43,28145894^{0,258}} \right]^{1,105} + 1$$

$$n_m = \underline{1,010708398}$$

DETERMINACIÓN DE $V_{d_{c2}}$ SEGÚN LA ECUACION EXPERIMENTAL

$$V_{d_{c2}} = \frac{1}{10} * \left[0,01846 \left[\frac{De^2 S^{0,05} \sqrt{d^*}}{C d^{0,013} \sqrt{C}} \right]^{0,257} \sqrt{8gR_H\Delta} \right]$$

$$V_{d_{c2}} = \frac{1}{10} * \left[0,01846 \left[\frac{562001,9212^2 * 0,05^{0,05} \sqrt{43,28145894}}{1,374441456^{0,013} * \sqrt{2,27\text{E} - 03}} \right]^{0,257} \sqrt{8 * 9,81\text{m/s}^2 * 0,1662\text{m} * 1,6037} \right]$$

$$V_d = \underline{2,64\text{m/s}}$$

6,07442424m/s > 5,28m/s Si cumple

CALCULO DE LA SOBRE ELEVACION

$$\Delta h_w = 0,0002 * \left(\frac{y}{R_H} \right)^{5,5895} \quad \Delta h_w = 0,0002 * (2,98)^{5,5895}$$

$$\Delta h_w = \underline{0,089466779}$$

$$\frac{\Delta h_m}{0,089466779} = 1,36 * \left[\frac{0,518919495 * 0,05^{0,05} * 1E + 10}{562001,9212^{2,5} * 1,374441456^{0,01} * \sqrt[3]{2,27E - 03}} \right]^{0,7582} + 1$$

$$\Delta h_m = \underline{0,089614752}$$

La pared externa del canal en el tramo curvo es de 0,584614752m de alto.

En resumen, el diseño del canal es:

| | | | | |
|------------------|-------------|-------------------|-----|------------------------|
| QL | 1.5 | m ³ /s | | |
| Qs | 3,42E-03 | m ³ /s | | |
| b | 0,5 | m | | |
| R | 2,5 | m | | |
| S | 0,05 | = | 5 % | |
| ρs | 2600 | kg/m ³ | = | 2,6 gr/cm ³ |
| d50 | 0,001758 | | | |
| ρw | 998,5777778 | kg/m ³ | | |
| T° | 20 | °C | | |
| vw | 1,01677E-06 | | | |
| y _{ext} | 0,5846 | m | | |
| y _{int} | 0.495 | m | | |

CONCLUSIONES

La sedimentación se presenta en el borde interno del canal, con lo que se aprecia el comportamiento del flujo secundario de mezclas, lo cual es coherente con lo expresado por Chow (2004). Mayores velocidades en la margen externa del canal y por lo tanto la erosión que se presenta en esa zona, así como también la depositación de sedimentos en la parte interna es producto de una conjunción de efectos tales como: la separación del flujo, las corrientes transversales dirigidas hacia la zona de la margen externa, la aceleración y desaceleración local del flujo. Los parámetros adimensionales como ***Fl, De, C'd, d', Δ'***, son una gran herramienta para lograr una correlación que se ajuste a los requerimientos de la investigación, con lo cual se relaciona el comportamiento del fluido, características de la mezcla y la geometría del modelo.

La relación propuesta para el canal curvo con sección rectangular en cuanto a la velocidad crítica de depósito presenta una mayor correlación frente a la del canal recto, además como se pudo observar en la presente investigación la velocidad de depósito es directamente proporcional a la pendiente, al radio de curvatura del modelo y a las propiedades del sólido como densidad y tamaño de partícula.

En general, se encontró que sí fue factible generar una relación matemática que describa el comportamiento del flujo en cuanto a su velocidad crítica de depósito, con lo cual predice el comportamiento de mezclas sedimentables en canales curvos, muy importante para diseño y construcción de este tipo de canales, con sección rectangular a gran escala.

La relación entre la velocidad crítica de depósito entre los tramos curvo y recto tiene una proporción de 4.11 veces, con lo que se indica que la diferencia entre las dos velocidades de depósito presentan una gran diferencia, razón por la cual se reitera la importancia del cálculo del tramo curvo como tal y no como si se tratara de un tramo de canal recto. De otra forma, la ecuación experimental para velocidad de depósito obtenida en este estudio corrobora la anterior conclusión y brinda excelentes resultados para este cálculo.

RECOMENDACIONES

Realizar un estudio para canales curvos de lecho móvil, sobre el movimiento en forma de dunas del sedimento que se presenta en el lecho del canal.

Profundizar en el fenómeno de la sobre elevación, estudiando su posible disminución mediante el uso de peraltado en el fondo del canal, además de averiguar la influencia de este peralte en la velocidad de depósito.

Identificar por medio del uso de modelos experimentales de canal curvo con diferentes radios de curvatura las zonas del canal en las cuales inicia el fenómeno de sedimentación.

BIBLIOGRAFÍA

ANÓNIMO. Numero de Dean. Última actualización 19 jul 2008. “http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Dean”.

CHOW, Ven Te. Hidráulica de canales abiertos. Bogotá: Mc Graw Hill, 2004. 655 p.

JOHNSON, Mark; **KAMM,** Roger. Numerical studies of steady flow dispersion at low Dean number in a gently curving tube. “<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract;jsessionid=2D13FACA437B29003D3FD591E12EDEFAtomcat1?fromPage=online&aid=392568>”

KARLYKHANOV, O. K.; **SHEVCHENKO,** O. B. Transporte de sedimento en un canal curvo. En *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo* No 1, p. 41-43. Moscow: Plenum Publishing Corp, 1991.

MERRIT S, Frederick. Manual del Ingeniero Civil Vol III, Mc Graw Hill.

MOOT, Robert L. Mecánica de Fluidos. Sexta Edición. México: Editorial Pearson, 2006.

MORILLO Mario; **ROMERO** Rolando, Investigación experimental sobre la pérdida de energía y velocidad crítica de depósito en el transporte de mezclas sedimentables en canales abiertos, Universidad de Nariño, Colombia, 2008.

ROCHA, Arturo. Hidráulica de tuberías y canales. Sexta Edición. Bogotá: Mc Graw Hill. 1994. 515 p.

RODI, W. Calculo numérico de flujo y de transporte de sedimentos en ríos. Institute for Hydromechanics, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 2000.

ANEXOS

ANEXO A

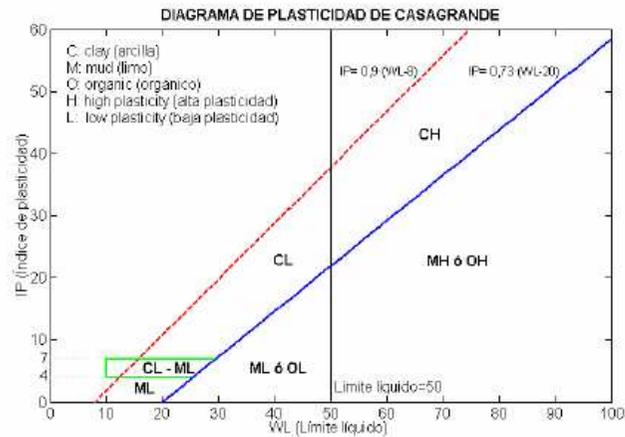
UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
“EFECTO DE LA CURVATURA DE UN CANAL ABIERTO SOBRE LA
VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS”

CLASIFICACION DE SEDIMENTOS UTILIZADOS SISTEMA USCS

| Sedimento | R_{200} | R_4 | R_4/R_{200} | $R_4/R_{200} \geq 0.5$ | $R_4/R_{200} < 0.5$ | $R_{200} > 95$ | $88 < R_{200} < 95$ | C_c | C_u | $C_u > 6$ | CLASIFICACION USCS |
|-----------|-----------|-------|---------------|------------------------|---------------------|----------------|---------------------|-------|-------|-----------|--------------------|
| 1 | 100 | 0 | 0 | NO | SI | SI | NO | 0.790 | 1.577 | NO | SP |
| 2 | 100 | 0 | 0 | NO | SI | SI | NO | 0.889 | 1.458 | NO | SP |
| 3 | 100 | 0 | 0 | NO | SI | SI | NO | 0.478 | 2.825 | NO | SP |
| 4 | 100 | 0 | 0 | NO | SI | SI | NO | 0.848 | 3.067 | NO | SP |
| 5 | 100 | 0 | 0 | NO | SI | SI | NO | 0.971 | 3.011 | NO | SP |

SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS
Unified System of Classification of Soils (U.S.C.S.)

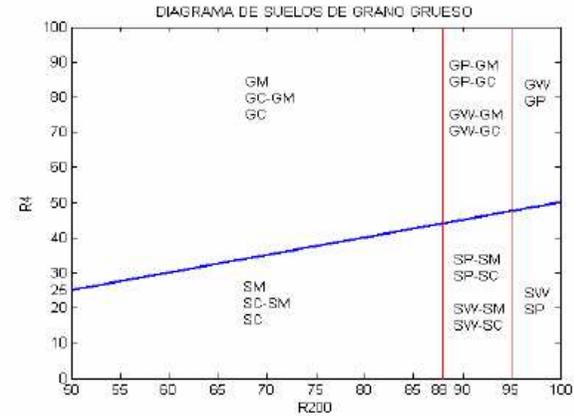
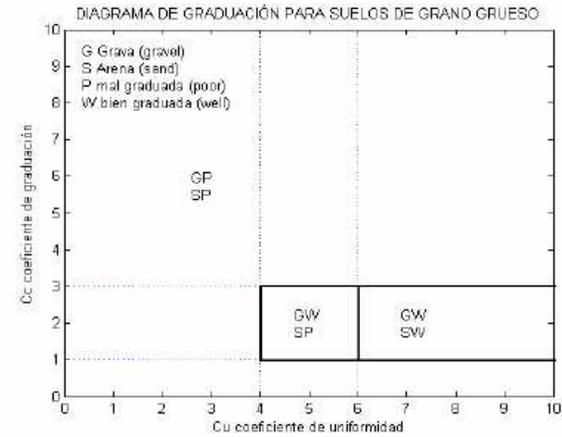
| Tipos de suelos | | Suelos muy orgánicos $\frac{w_L}{w_p} < 0,75$ e identificables por inspección visual | | | | PT Turba (peat) | | | | |
|-----------------|-----------------|--|--|--|---|--|--|--|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Tipos de suelos | Resto de suelos | Suelo de grano fino $R_{200} < 50\%$ | $\frac{w_L}{w_p} < 0,75$ | O Suelo orgánico (organic soil) | | Diagrama de plasticidad I_p vs w_L | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ y $w_L \leq 50\%$ | OL Orgánico de baja plasticidad | | |
| | | | | | | | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ y $w_L > 50\%$ | OH orgánico de alta plasticidad | | |
| | | | | | | | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ ó $I_p < 4$ y $w_L \leq 50\%$ | ML limo de baja plasticidad | | |
| | | | | | | | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ y $w_L > 50\%$ | MH limo de alta plasticidad | | |
| | | | | | | | $I_p \in [4,7]$, $I_p > 0,73(w_L - 20)$ y $w_L \leq 50\%$ | CL-ML limo y arcilla de baja plasticidad | | |
| | | | | | | | $I_p > 7$ y $I_p > 0,73(w_L - 20)$ | CL arcilla de baja plasticidad | | |
| | Tipos de suelos | Resto de suelos | Suelo de grano grueso $R_{200} > 50\%$ | $\frac{w_L}{w_p} \geq 0,75$ | Suelo inorgánico: M limo (mud) C arcilla (clay) | | Diagrama de plasticidad I_p vs w_L | $I_p > 0,73(w_L - 20)$ y $w_L > 50\%$ | CH arcilla de alta plasticidad | |
| | | | | | | | | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ ó $I_p < 4$ | GM Grava limosa | |
| | | | | | | | | $I_p \in [4,7]$ y $I_p > 0,73(w_L - 20)$ | GC-GM Grava limo-arcillosa | |
| | | | | | | | | $I_p > 7$ y $I_p > 0,73(w_L - 20)$ | GC Grava arcillosa | |
| | | | | | | | | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ ó $I_p < 4$ | GW-GM Grava limosa bien graduada | |
| | | | | | | | | $I_p > 7$ y $I_p > 0,73(w_L - 20)$ | GW-GC Grava arcillosa bien graduada | |
| Tipos de suelos | | | Resto de suelos | Suelo de grano grueso $R_{200} > 50\%$ | $\frac{R_4}{R_{200}} \geq 0,5$ | G Grava (gravel) % Grava > % Arena | | Diagrama de gradación: C_u, C_c | $C_u > 4$ y $C_c \in [1,3]$ | GW Grava bien graduada |
| | | | | | | | | | Cualquier otro caso | GP Grava mal graduada |
| | | | | | | | | | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ ó $I_p < 4$ | GW-GM Grava limosa bien graduada |
| | | | | | | | | | $I_p > 7$ y $I_p > 0,73(w_L - 20)$ | GW-GC Grava arcillosa bien graduada |
| | | | | | | | | | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ ó $I_p < 4$ | GP-GM Grava limosa mal graduada |
| | | | | | | | | | $I_p > 7$ y $I_p > 0,73(w_L - 20)$ | GP-GC Grava arcillosa mal graduada |
| Tipos de suelos | Resto de suelos | Suelo de grano grueso $R_{200} > 50\%$ | $\frac{R_4}{R_{200}} < 0,5$ | S Arena (sand) % Arena > % Grava | | Diagrama de gradación: C_u, C_c | $C_u > 6$ y $C_c \in [1,3]$ | SW Arena bien graduada | | |
| | | | | | | | Cualquier otro caso | SP Arena mal graduada | | |
| | | | | | | | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ ó $I_p < 4$ | SM Arena limosa | | |
| | | | | | | | $I_p \in [4,7]$ y $I_p > 0,73(w_L - 20)$ | SC-SM Arena limo-arcillosa | | |
| | | | | | | | $I_p > 7$ y $I_p > 0,73(w_L - 20)$ | SC Arena arcillosa | | |
| | | | | | | | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ ó $I_p < 4$ | SW-SM Arena limosa bien graduada | | |
| | | | $I_p > 7$ y $I_p > 0,73(w_L - 20)$ | SW-SC Arena arcillosa bien graduada | | | | | | |
| | | | $I_p < 0,73(w_L - 20)$ ó $I_p < 4$ | SP-SM Arena limosa mal graduada | | | | | | |
| | | | $I_p > 7$ y $I_p > 0,73(w_L - 20)$ | SP-SC Arena arcillosa mal graduada | | | | | | |
| | | | $R_{200} > 95\%$ | Arena con pocos finos | Diag. grad.: C_u, C_c | $C_u > 6$ y $C_c \in [1,3]$ | SW Arena bien graduada | | | |
| | | | | | | Cualquier otro caso | SP Arena mal graduada | | | |



Coefficiente de uniformidad: $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Coefficiente de graduación: $C_c = \frac{D_{50}^2}{D_{60} D_{10}}$

R_{200} = % retenido en el tamiz n° 200
 R_4 = % retenido en el tamiz n° 4

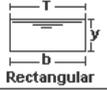


ANEXO B

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
“EFECTO DE LA CURVATURA DE UN CANAL ABIERTO SOBRE LA
VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS”

DISEÑOS TENTATIVOS DEL CANAL

Tabla 10-1. Elementos Geométricos de la Sección del Canal

| Sección | Area hidráulica A | Perímetro mojado P | Radio hidráulico R | Espejo de agua T |
|--|----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
|  Rectangular | by | $b+2y$ | $\frac{by}{b+2y}$ | b |

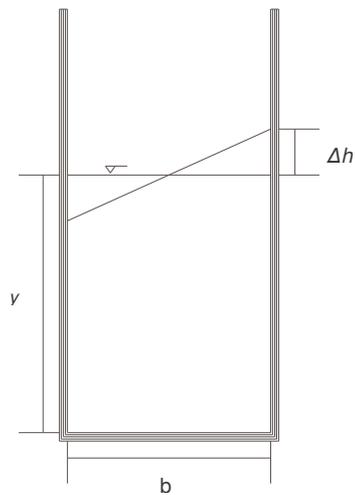


Figura 10-1. Esquema Ilustrativo de la Sobre elevación

10.1. Primer diseño del canal de sección rectangular.

Datos

Q (m³/s) = 0,013
n = 0,009
b (m) = 0,050
S (%) = 0,050

Altura de la lamina de agua **y (m)= 0,137**
Velocidad del flujo **V_z (m/s) = 1,900**

Tabla 10-2 Variación de y en función de S

| Valores de S (%) | Valores de Y (m) |
|------------------|------------------|
| 0,02 | 0,2086 |
| 0,03 | 0,1729 |
| 0,04 | 0,1515 |
| 0,05 | 0,1368 |
| 0,06 | 0,1260 |
| 0,07 | 0,1176 |
| 0,08 | 0,1108 |
| 0,09 | 0,1051 |
| 0,10 | 0,1003 |
| 0,11 | 0,0962 |
| 0,12 | 0,0926 |
| 0,25 | 0,0675 |

Δh (m) = **0,061** (según la Segunda Ley de Movimiento de Newton)
 Δh (m) = **0,067** (según la ecuación de Grashof)
 Δh (m) = **0,066** (según la ecuación de Woodward)

10.2. Segundo diseño del canal de sección rectangular .

Datos

Q (m³/s) = 0,013
n = 0,009
b (m) = 0,040
S (%) = 0,050

Altura de la lamina de agua
Velocidad del flujo

y (m)= 0,189
V_z (m/s) = 1,719

Tabla 10-3 Variación de y en función de S

| Valores de S (%) | Valores de Y (m) |
|------------------|------------------|
| 0,02 | 0,293 |
| 0,03 | 0,241 |
| 0,04 | 0,210 |
| 0,05 | 0,189 |
| 0,06 | 0,174 |
| 0,07 | 0,162 |
| 0,08 | 0,152 |
| 0,09 | 0,144 |
| 0,10 | 0,137 |
| 0,11 | 0,131 |
| 0,12 | 0,126 |
| 0,25 | 0,09 |

Δh (m) = **0,040** (según la Segunda Ley de Movimiento de Newton)

Δh (m) = **0,043** (según la ecuación de Grashof)

Δh (m) = **0,044** (según la ecuación de Woodward)

10.3. Tercer diseño del canal de sección rectangular.

Datos

Q (m³/s) = 0,013

n = 0,009

b (m) = 0,060

S (%) = 0,050

Altura de la lamina de agua
Velocidad del flujo

y (m)= 0,106
V_z (m/s) = 2,044

Tabla 10-4 Variación de y en función de S

| Valores de S (%) | Valores de Y (m) |
|------------------|------------------|
| 0,02 | 0,1600 |
| 0,03 | 0,1334 |
| 0,04 | 0,1175 |
| 0,05 | 0,1065 |
| 0,06 | 0,0984 |
| 0,07 | 0,0921 |
| 0,08 | 0,0870 |
| 0,09 | 0,0827 |
| 0,10 | 0,0791 |
| 0,11 | 0,0760 |
| 0,12 | 0,0732 |
| 0,25 | 0,0541 |

Δh (m) = **0,085** (según la Segunda Ley de Movimiento de Newton)

Δh (m) = **0,094** (según la ecuación de Grashof)

Δh (m) = **0,045** (según la ecuación de Woodward)

10.4. Cuarto diseño del canal de sección rectangular.

Datos

Q (m³/s) = 0,006

n = 0,009

b (m) = 0,050

S (%) = 0,050

Altura de la lamina de agua

y (m) = 0,069

Velocidad del flujo

V_z (m/s) = 1,731

Tabla 10-5 Variación de y en función de S

| Valores de S (%) | Valores de Y (m) |
|------------------|------------------|
| 0,02 | 0,1032 |
| 0,03 | 0,0863 |
| 0,04 | 0,0762 |
| 0,05 | 0,0693 |
| 0,06 | 0,0642 |
| 0,07 | 0,0601 |
| 0,08 | 0,0569 |
| 0,09 | 0,0542 |
| 0,10 | 0,0519 |
| 0,11 | 0,0499 |
| 0,12 | 0,0481 |
| 0,25 | 0,0359 |

Δh (m) = **0,050** (según la Segunda Ley de Movimiento de Newton)

Δh (m) = **0,055** (según la ecuación de Grashof)

Δh (m) = **0,027** (según la ecuación de Woodward)

10.5. Quinto diseño del canal de sección rectangular.

Datos

Q (m³/s) = 0,006

n = 0,009

b (m) = 0,040

S (%) = 0,050

Altura de la lamina de agua

y (m) = 0,093

Velocidad del flujo

V_z (m/s) = 1,609

Tabla 10-6 Variación de y en función de S

| Valores de S (%) | Valores de Y (m) |
|------------------|------------------|
| 0,02 | 0,1415 |
| 0,03 | 0,1174 |
| 0,04 | 0,1031 |
| 0,05 | 0,0932 |
| 0,06 | 0,0859 |
| 0,07 | 0,0803 |
| 0,08 | 0,0757 |
| 0,09 | 0,0719 |
| 0,10 | 0,0687 |
| 0,11 | 0,0659 |
| 0,12 | 0,0634 |
| 0,25 | 0,0465 |

Δh (m) = **0,035** (según la Segunda Ley de Movimiento de Newton)

Δh (m) = **0,037** (según la ecuación de Grashof)

Δh (m) = **0,018** (según la ecuación de Woodward)

10.6. Sexto diseño del canal de sección rectangular.

Datos

Q (m³/s) = 0,006

n = 0,009

b (m) = 0,060

S (%) = 0,050

Altura de la lamina de agua

y (m) = 0,055

Velocidad del flujo

V_z (m/s) = 1,801

Tabla 10-7 Variación de y en función de S

| Valores de S (%) | Valores de Y (m) |
|------------------|------------------|
| 0,02 | 0,0812 |
| 0,03 | 0,0685 |
| 0,04 | 0,0608 |
| 0,05 | 0,0555 |
| 0,06 | 0,0516 |
| 0,07 | 0,0485 |
| 0,08 | 0,0460 |
| 0,09 | 0,0439 |
| 0,10 | 0,0421 |
| 0,11 | 0,0406 |
| 0,12 | 0,0392 |
| 0,25 | 0,0296 |

Δh (m) = **0,066** (según la Segunda Ley de Movimiento de Newton)

Δh (m) = **0,073** (según la ecuación de Grashof)

Δh (m) = **0,035** (según la ecuación de Woodward)

ANEXO C

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
 FACULTAD DE INGENIERIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 “EFECTO DE LA CURVATURA DE UN CANAL ABIERTO SOBRE LA
 VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS”

CALIBRACION DEL ORIFICIO

| 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 | |

| | | | | | |
|------------------|------------|--------------------------|------------------|------------|--------------------------|
| 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 | |

ANEXO D

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
“EFECTO DE LA CURVATURA DE UN CANAL ABIERTO SOBRE LA
VELOCIDAD CRÍTICA DE DEPÓSITO EN EL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS”

REGISTRO DE PLANOS

**UNIVERSIDAD
DE
NARIÑO**

FACULTAD
DE
INGENIERIA
CIVIL

PROYECTO:

EFFECTO DE LA CURVATURA DE UN
CANAL ABIERTO SOBRE LA
VELOCIDAD CRITICA DE DEPOSITO
EN EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS

PROYECTADO POR:

DIEGO FERNANDO AGUIRRE ORTIZ
MARCELO MARTINEZ MEDINA

ASESOR:

INGENIERO
HORNAN JAVIER GOMEZ ZAIBERANO
M.Sc.

FECHA:

2008

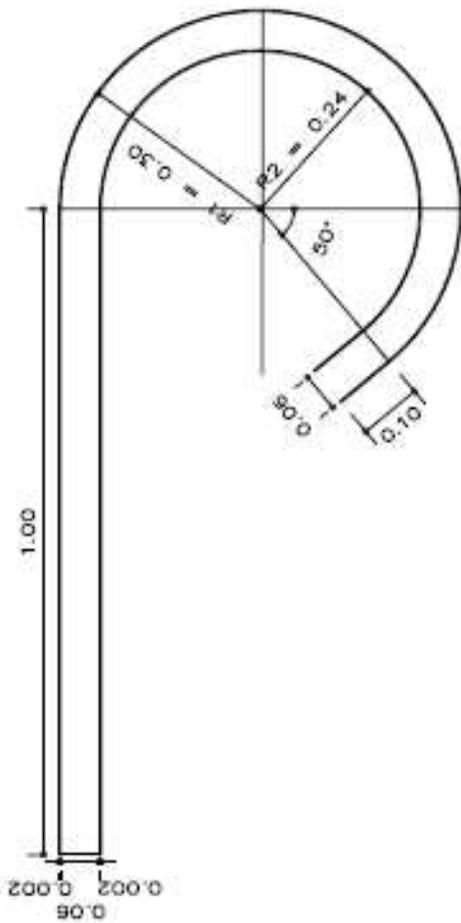
PLANTA:

1

ESCALA:

1:10

IC 3



CANAL - VISTA EN PLANTA

esc: 1:10

**UNIVERSIDAD
DE
NARIÑO**

**FACULTAD
DE
INGENIERIA
CIVIL**

PROYECTO:

EFFECTO DE LA CURVATURA DE UN
CANAL ABIERTO SOBRE LA
VELOCIDAD CRITICA DE DEPÓSITO
EN EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS

PRESENTADO POR:

DIEGO FERNANDO AGUIRRE ORTIZ
MARCULO MARTINEZ MEDINA

ASESOR:

INGENIERO
HERNAN JAVIER GOMEZ ZAMBRANO
M.Sc.

FECHA:

2008

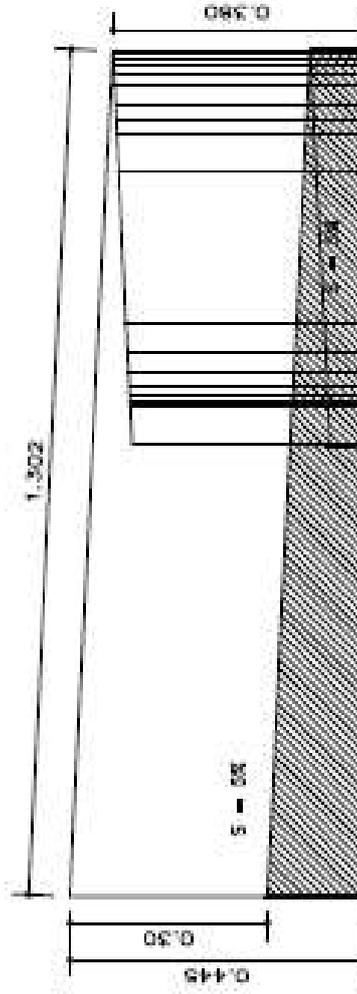
PLANO N.º

2

ESCALA

1-10

DE 3



CANAL - VISTA EN PERFIL

esc: 1:10

**UNIVERSIDAD
DE
NARIÑO**

FACULTAD
DE
INGENIERIA
CIVIL

PROYECTO:

EFFECTO DE LA CURVATURA DE UN
CANAL ABIERTO SOBRE LA
VELOCIDAD CRITICA DE DEPOSITO
EN EL TRANSPORTE DE
SEDIMENTOS

PROFESOR:

DIEGO AGUIRRE ORTIZ
MARCELLA ACEZ MEDINA

ALUMNO:

INGENIERO
HEINER JAMER GOMEZ ZAMBRANO
M.S.C.

TEMA:

30008

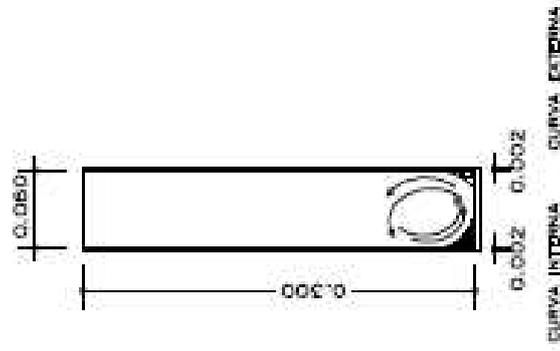
PLANO:

3

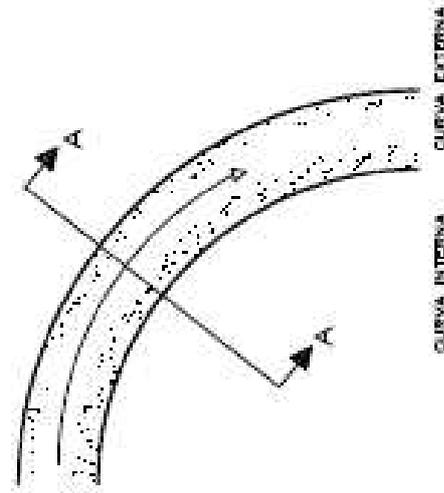
ESCALA:

1:5

DE 3



CORTE A-A
esc: 1,5



DETALLE CURVA DEL CANAL
esc: 1,5