

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE PRESAS DE CONTROL O RETENCIÓN DE SEDIMENTOS, ABIERTAS Y CERRADAS, A TRAVÉS DE LA REALIZACIÓN DE MODELAJE FÍSICO

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Mauro Nalesso

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por los Brs.:

Franchi, Marian

De Barros, María

Para optar al Título de

Ingeniero Civil

Caracas, 2007

ACTA DE APROBACIÓN

El día 16 de Marzo de 2007 se reunió el jurado formado por los profesores:

Marielena Bello

Yuri Medina

José de Jesús Gaspar

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: “EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE PRESAS DE CONTROL O RETENCIÓN DE SEDIMENTOS, ABIERTAS Y CERRADAS, A TRAVÉS DE LA REALIZACIÓN DE MODELAJE FÍSICO”.

Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de INGENIERO CIVIL.

Una vez oída la defensa oral que los bachilleres hicieron de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

| NOMBRE | CALIFICACIÓN | |
|---------------------------|--------------|--------|
| | Números | Letras |
| Br. Marian Franchi R. | | |
| Br. María I. De Barros L. | | |

Recomendaciones:

FIRMAS DEL JURADO

Caracas, 16 de Marzo de 2007

DEDICATORIA

Antes que nada a Dios por acompañarme en todo momento, a mis padres Cesar Franchi M y Griselda Roa por motivarme siempre a lograr este sueño.

Marian Franchi R.

A mis padres, Conceição y Manuel y mis hermanos José Manuel, Ana Rita y Ma. Graciela.

Ma. Idalina De Barros.

Esta investigación fue realizada gracias al apoyo del Proyecto G-2005000507, titulado: **EVALUACIÓN DE OBRAS DE CONTROL PARA ALUDES TORRENCIALES Y DEL COMPORTAMIENTO DEL FLUJO EN SUS PROXIMIDADES**, financiado por el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONACIT).

AGRADECIMIENTOS

Quisiera darle las gracias antes que nada a todos aquellos profesores del IMF: Berrios R., Bello M., López J. L., Martínez E., Gaspar J. y Nalesso M., que debido a su larga experiencia y sabiduría en el tema, nos brindaron la mejor orientación que pudimos tener; gracias por ofrecer sus conocimientos a mejorar la vida de los demás y ser con los años un selecto grupo de investigadores.

Al Sr. Pablo por su ingenio y ayuda desinteresada en la elaboración de cada una de los ensayo

A las profesoras Jimena Arcaya y Yuri Medina por ser dos mujeres excepcionales dignas de admiración, que a pesar de las dificultades vividas siempre nos tuvieron paciencia y jamás nos negaron su ayuda desinteresada. Le doy gracias a Dios por ponerlas en mi camino.

A mis compañeros Denis Meaza, Nelson Fernandes, Maria Castro (mayiyi) y Jorge Campos, por siempre darnos sus consejos y sacarnos una sonrisa en los momentos más difíciles, gracias por aderezarme la vida.

A mis amigos Verónica Valera, Ma. Idalina De Barros, Daniel Del Pino y, Aurimar L., por ser personas Muy valiosas en las que se puede contar en cualquier momento de la vida.

Marian Franchi Roa

Al haber culminado este trabajo especial de grado quiero agradecer:

A Dios por estar siempre conmigo y darme la oportunidad de estudiar en la mejor universidad de Venezuela, la casa que vence las sombras y permitirme terminar con éxito este trabajo de investigación.

A mis padres, por ser mi mayor apoyo y ejemplo a seguir de constancia y trabajo.

Al tutor, Mauro Nalesso, por motivarnos, darnos apoyo y creer en nosotras.

A Marian y Verónica por acompañarme en este reto y ser mis amigas.

Al Sr. Pablo por toda su colaboración invaluable para la culminación exitosa de este trabajo de grado.

Al prof. Abilio Carrillo por su colaboración oportuna y apoyo desinteresado.

A mis compañeros y amigos: Nelson Fernandes, Norberto Planchart, Henry Sarmiento, Jorge Campos, Denis Meaza y María Castro por brindarme su apoyo incondicional.

A los ingenieros Eduardo Martínez, Jimena Arcaya, Yuri Medina, Rodolfo Berrios, José Gaspar, José Luis López, Marielena Bello y Marcos Falcón por toda la ayuda prestada de manera desinteresada y generosa para que resultara un trabajo de calidad.

A todos aquellos que de una u otra forma colaboraron en la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Ma. Idalina De Barros L.

Franchi R., Marian

De Barros L., María I.

**EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL COMPORTAMIENTO
HIDRÁULICO DE PRESAS DE CONTROL O RETENCIÓN DE
SEDIMENTOS, ABIERTAS Y CERRADAS, A TRAVÉS DE LA
REALIZACIÓN DE MODELAJE FÍSICO**

Tutor Académico: Prof. Mauro Nalesso.

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Civil. 2006.

Palabras Clave: Aludes Torrenciales, Presas de control o retención de sedimentos y modelaje físico.

El presente trabajo especial de grado tiene como propósito estudiar, a nivel cualitativo, el comportamiento hidráulico de presas para el control o retención de sedimentos, abiertas y cerradas, ante aludes torrenciales y condiciones de escorrentía normal mediante un modelaje físico. El estudio se realizó en un canal experimental, en el Edificio Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. Se ensayaron tres tipos de presas; cerrada, con ventanas y con ranura central, con tres pendientes del fondo del canal (3, 5 y 7%) y dos densidades de mezcla de lodo (1,25 y 1,42 gr./cm³), con el objeto de comparar sus cualidades: vacías y colmatadas y establecer las condiciones de su efectividad en la detención de lodos con base en dichas variables.

Se determinó que, tanto en presas vacías como colmatadas, se forma un resalto hidráulico producto del choque del lodo con la misma, que disipa una parte de la energía del flujo. Como consecuencia del almacenamiento temporal, producido por la presa, se reduce el caudal pico de la creciente, se propicia detrás de la presa la sedimentación y queda así reducida la concentración del flujo hacia aguas abajo.

En todas las pendientes (3, 5 y 7%) pasa parte del lodo por encima de la presa por efecto del choque. La cantidad de lodo que pasa por encima de la presa aumenta con la pendiente, al igual que la altura del resalto.

Para pendiente del canal de 7% la situación se hace crítica pues la cantidad que pasa por encima de la presa parece ser excesiva.

La densidad del lodo parece dejar de ser una variable importante cuando las presas están vacías a partir de 7% de pendiente y cuando están colmatadas para todos los valores de pendiente.

Las presas abiertas, de ventanas y ranurada, retienen el lodo por un tiempo limitado y lo liberan de forma continua y constante, en la medida que continua el escurrimiento, posterior a la creciente.

De acuerdo con lo observado, se puede concluir que todos los tipos de presa actúan como buenos disipadores de energía. Además, que las presas abiertas son igualmente efectivas en la detención de aludes torrenciales que las presas cerradas, con la diferencia de que desalojan la mayor cantidad del flujo y no se colmatan tan rápidamente como éstas últimas.

Si consideramos que en el Estado Vargas actualmente predomina el arrastre de sedimentos (material removido por el deslave de 1999) a la formación de aludes torrenciales, resulta más eficiente el uso de presas abiertas en lugar de cerradas, pues ameritan menores costos de mantenimiento o limpieza (remoción de sedimentos). Con esto no se concluye que las presas cerradas no sean eficientes, sino que se deben colocar en sitios específicos, como por ejemplo donde se necesite reducir la pendiente del cauce. Si se utilizan para detener aludes torrenciales se debe estar consciente de que es necesario hacerle mantenimiento o dragado periódico para que resulten realmente efectivas.

Entre las presas abiertas, es más efectiva la presa de ventanas que la ranurada, pues si bien ambas propician acumulación de sedimentos detrás de la presa, que reduce la pendiente y disminuye la velocidad del alud torrencial, antes de llegar a la misma, el hecho de que tenga mayor número de aberturas propicia el desalojo más rápido de la matriz fina. Esta matriz es la que transporta los grandes peñones responsables de los mayores daños. Si esta matriz es removida del alud, se inmovilizan los grandes peñones antes de que lleguen a las poblaciones asentadas aguas abajo.

Sin importar la densidad del lodo y el tipo de presa, para pendientes mayores a 7% no se aplica el uso eficiente de una sola presa de retención de sedimentos. Será necesario el uso de más presas u otro dispositivo adicional para la detención efectiva de un alud torrencial.

Por último, se recomienda en el Estado Vargas el uso de presas abiertas con gran número de aberturas. Por tener este Estado pendientes en sus cauces mayores a 7%, se recomienda la construcción de gran número de ellas. Una sola no es suficientemente efectiva.

ÍNDICE GENERAL

| | Página |
|---|---------------|
| LISTA DE TABLAS..... | XII |
| LISTA DE GRÁFICOS..... | XIII |
| LISTA DE FIGURAS | XIV |
| LISTA DE FOTOS..... | XV |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN..... | 3 |
| 2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 4 |
| 2.2. ANTECEDENTES | 8 |
| 2.3. OBJETIVOS..... | 9 |
| 3. MARCO TEÓRICO..... | 10 |
| 3.1. CORRIENTES NATURALES DE AGUA | 11 |
| 3.1.1. Ríos..... | 11 |
| 3.1.2. Torrentes | 12 |
| 3.1.2.1. Partes de un Torrente..... | 14 |
| 3.2. ASPECTOS SEDIMENTOLÓGICOS DE LAS CORRIENTES NATURALES | 16 |
| 3.2.1. Origen de los sedimentos | 16 |
| 3.2.2. Clasificación de los sedimentos | 17 |
| 3.2.3. Tamaño de los sedimentos | 17 |
| 3.2.4. Transporte de los sedimentos..... | 18 |
| 3.2.5. Transporte individual y transporte de masa | 19 |
| 3.3. MOVIMIENTOS DE LADERA | 19 |
| 3.3.1. Clasificación de los movimientos de ladera..... | 21 |
| 3.4. ALUDES TORRENCIALES | 24 |
| 3.4.1. Mecanismo de transporte de aludes torrenciales..... | 25 |
| 3.4.2. Clasificación de los Aludes Torrenciales..... | 26 |
| 3.4.4. Detención de Aludes Torrenciales | 31 |
| 3.4.4.1. Estabilización de la cuenca para reducir la erosión..... | 31 |
| 3.4.4.2. Presas de control de sedimentos..... | 31 |
| 3.4.4.2.1. PRESAS CERRADAS | 31 |
| 3.4.4.2.2. PRESAS ABIERTAS..... | 34 |
| 3.4.5. La pendiente de compensación | 38 |

| | |
|---|------------|
| 3.4.6. Presas de control de sedimentos en el estado vargas..... | 39 |
| 4. MÉTODO..... | 44 |
| 4.1. ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE LODO DE 25, 50 Y 75% DE CONCENTRACIÓN EN PESO | 45 |
| 4.2. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MUESTRAS DE LODO..... | 46 |
| 4.3. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LOS MODELOS DE PRESAS | 47 |
| 4.4. REALIZACIÓN DEL MODELADO FÍSICO | 48 |
| 4.4.1. Descripción del equipo experimental..... | 48 |
| 4.4.2. Descripción de los ensayos experimentales: | 49 |
| 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS | 52 |
| 5.1. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MUESTRAS DE LODO..... | 53 |
| 5.2. REALIZACIÓN DEL MODELADO FÍSICO | 59 |
| 5.2.1. Ensayos con las presas vacías | 59 |
| 5.2.2. Ensayos con presas colmatadas..... | 82 |
| 5.2.2.1. Proceso de colmatación de las presas | 82 |
| 5.2.2.2. Proceso de lanzamiento de lodo | 87 |
| 5.2.2.3. Proceso de escorrentía normal..... | 105 |
| 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 108 |
| 6.1. CONCLUSIONES | 109 |
| 6.2. RECOMENDACIONES..... | 113 |
| 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 114 |
| 8. APÉNDICES..... | 116 |
| APÉNDICE 1: GRANULOMETRÍA DE LA ARENA UTILIZADA EN LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES:..... | 117 |
| APÉNDICE 2: PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS UTILIZADAS EN LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES:..... | 118 |
| APÉNDICE 3: TABLAS UTILIZADAS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS EN LOS ENSAYOS EXPERIMENTALES: | 120 |
| APÉNDICE 4: PERFILES DE LA CUÑA DE ARENA SEDIMENTADA AGUAS ARRIBA DE LA PRESA DE VENTANAS, ANTES Y DESPUÉS DE LANZAMIENTO DE LODO DE DENSIDAD 1.25 GR/CM ³ | 123 |
| APÉNDICE 5: PERFILES DE LA CUÑA DE ARENA SEDIMENTADA AGUAS ARRIBA DE LA PRESA RANURADA, ANTES Y DESPUÉS DE LANZAMIENTO DE LODO DE DENSIDAD 1.25 GR/CM ³ | 124 |
| APÉNDICE 6: PERFILES DE LA CUÑA DE ARENA SEDIMENTADA AGUAS ARRIBA DE LA PRESA DE VENTANAS, ANTES Y DESPUÉS DE LANZAMIENTO DE LODO DE DENSIDAD 1.42 GR/CM ³ | 125 |
| APÉNDICE 7: PERFILES DE LA CUÑA DE ARENA SEDIMENTADA AGUAS ARRIBA DE LA PRESA RANURADA, ANTES Y DESPUÉS DE LANZAMIENTO DE LODO DE DENSIDAD 1.42 GR/CM ³ | 126 |
| APÉNDICE 8: PERFILES DE LA CUÑA DE ARENA SEDIMENTADA AGUAS ARRIBA DE LA PRESA RANURADA, ANTES Y DESPUÉS DE LA ESCORRENTÍA. DENSIDAD DE LODO 1.25 GR/CM ³ | 127 |

| | |
|---|-----|
| APÉNDICE 9: PERFILES DE LA CUÑA DE ARENA SEDIMENTADA AGUAS ARRIBA DE LA PRESA DE VENTANAS, ANTES Y DESPUÉS DE LA ESCORRENTÍA. DENSIDAD DE LODO 1.25 GR/CM ³ | 128 |
| APÉNDICE 10: PERFILES DE LA CUÑA DE ARENA SEDIMENTADA AGUAS ARRIBA DE LA PRESA RANURADA, ANTES Y DESPUÉS DE LA ESCORRENTÍA. DENSIDAD DE LODO 1.42 GR/CM ³ | 129 |
| APÉNDICE 11: PERFILES DE LA CUÑA DE ARENA SEDIMENTADA AGUAS ARRIBA DE LA PRESA DE VENTANAS, ANTES Y DESPUÉS DE LA ESCORRENTÍA. DENSIDAD DE LODO 1.42 GR/CM ³ | 130 |

LISTA DE TABLAS

| | Página |
|--|---------------|
| <i>Tabla 1. Clasificación de tamaños de partículas.</i> | <i>18</i> |
| <i>Tabla 2. Proporciones de cada uno de los materiales en cada una de las concentraciones.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Tabla 3. Resultados de la medición de las propiedades de las mezclas de lodo.....</i> | <i>53</i> |
| <i>Tabla 4. Tiempos de estabilización aparente de las mezclas de lodo.....</i> | <i>58</i> |
| <i>Tabla 5. Resultados obtenidos del lanzamiento de lodo de densidad 1,25 gr. /cm³ sobre presas vacías.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Tabla 6. Resultados obtenidos del lanzamiento de lodo de densidad 1,42 gr. /cm³ sobre presas vacías.....</i> | <i>63</i> |
| <i>Tabla 7. Comparación de las características de la cuña de sedimento por tipo de presa.</i> | <i>82</i> |
| <i>Tabla 8. Resultados obtenidos del lanzamiento de lodo de densidad 1,25 gr. /cm³ sobre presas colmatadas.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Tabla 9. Resultados obtenidos del lanzamiento de lodo de densidad 1,42 gr. /cm³ sobre presas colmatadas.....</i> | <i>89</i> |
| <i>Tabla 10. Resultados obtenidos del proceso de escorrentía normal sobre presas colmatadas.....</i> | <i>105</i> |

LISTA DE GRÁFICOS

| | Página |
|---|---------------|
| <i>Gráfico 1. Relación entre velocidad de deformación angular y viscosidad cinemática en lodos de 25% de concentración.</i> | 56 |
| <i>Gráfico 2. Relación entre velocidad de deformación angular y viscosidad cinemática en lodos de 50% de concentración.</i> | 56 |
| <i>Gráfico 3. Relación entre velocidad de deformación angular y viscosidad cinemática en lodos de 75% de concentración.</i> | 57 |
| <i>Gráfico 4. Relación entre volumen de lodo retenido y pendiente del canal en presas vacías. Densidad del lodo 1,25gr/cm³.</i> | 60 |
| <i>Gráfico 5. Relación entre volumen de lodo pasante y pendiente del canal en presas vacías. Densidad del lodo 1,25gr/cm³.</i> | 60 |
| <i>Gráfico 6. Relación entre volumen de lodo retenido y pendiente del canal en presas vacías. Densidad del lodo 1,42gr/cm³.</i> | 63 |
| <i>Gráfico 7. Relación entre volumen de lodo pasante y pendiente del canal en presas vacías. Densidad del lodo 1,42gr/cm³.</i> | 64 |
| <i>Gráfico 8. Relación entre volumen de lodo retenido y pendiente del fondo del canal en función de la densidad en presa cerrada vacía.</i> | 68 |
| <i>Gráfico 9. Relación entre volumen de lodo y pendiente del fondo del canal en función de la densidad en presa de ventanas vacía.</i> | 69 |
| <i>Gráfico 10. Relación entre volumen de lodo pasante y pendiente del canal en presas colmatadas. Densidad de lodo 1.25 gr/cm³.</i> | 88 |
| <i>Gráfico 11. Relación entre volumen de lodo pasante y pendiente del canal en presas colmatadas. Densidad de lodo 1.42 gr/cm³.</i> | 91 |
| <i>Gráfico 12. Relación entre volumen pasante y pendiente del canal en presa ranurada colmatada por tipo de lodo.</i> | 91 |
| <i>Gráfico 13. Relación entre volumen pasante y pendiente del canal en presa de ventana colmatada por tipo de lodo.</i> | 92 |
| <i>Gráfico 14. Relación entre volumen pasante de arena y pendiente del canal en el proceso de escorrentía normal sobre presas colmatadas.</i> | 106 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|---------------|
| <i>Figura 1. Partes de un torrente.....</i> | <i>14</i> |
| <i>Figura 2. Diagrama esquemático de una onda típica de alud torrencial.....</i> | <i>26</i> |
| <i>Figura 3. Efecto de estabilización en los deslizamientos.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Figura 4. Pendiente de compensación.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 5. Modelos de presas utilizados en los ensayos experimentales: presa cerrada, presa de ventana, presa ranurada, de izquierda a derecha.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 6. Esquema del equipo experimental utilizado en los ensayos experimentales.....</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 7. Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de las presas antes del lanzamiento del lodo.....</i> | <i>86</i> |
| <i>Figura 8. Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de las presas después de lanzamiento de lodo.....</i> | <i>93</i> |
| <i>Figura 9. Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de las presas después de la escorrentía.....</i> | <i>107</i> |

LISTA DE FOTOS

| | Página |
|---|---------------|
| <i>Foto 1. Cono de deyección de Macuto, Edo. Vargas-Venezuela para 1998</i> | 4 |
| <i>Foto 2. Presa cerrada en Venezuela funcionando en condiciones hidráulicas normales</i> | 5 |
| <i>Foto 3. Presa con ranura de paredes verticales en Austria</i> | 5 |
| <i>Foto 4. Río</i> | 12 |
| <i>Foto 5. Torrente</i> | 12 |
| <i>Foto 6. Vista de un deslizamiento en la cuenca del río Tzafa, Guatemala</i> | 20 |
| <i>Foto 7. Desastre por aludes torrenciales en diciembre de 1999 en el Estado Vargas en Venezuela (Cuenca baja del río Cerro Grande)</i> | 21 |
| <i>Foto 8. Arrastre de sedimentos por alud torrencial en diciembre de 1999 en el Estado Vargas-Venezuela</i> | 22 |
| <i>Foto 9. Flujo de agua y barro en Macuto y en Tanaguarena, de izquierda a derecha</i> | 27 |
| <i>Foto 10. Flujo de detrito en Los Corales</i> | 27 |
| <i>Foto 11. Presa cerrada de gaviones en Venezuela funcionando en condiciones hidráulicas normales</i> | 32 |
| <i>Foto 12. Presa de Ventana en Venezuela funcionando en condiciones hidráulicas normales</i> | 37 |
| <i>Foto 13. Presa ranurada en Venezuela funcionando en condiciones hidráulicas normales</i> | 37 |
| <i>Foto 14. Vista de sedimentación de la ranura de una presa ranurada</i> | 38 |
| <i>Foto 15. Vistas desde aguas abajo de la Presa Guanape en dos diferentes épocas: después de finalizada la construcción en Mayo 2001 y Después de la creciente de Diciembre 2001, de izquierda a derecha</i> | 40 |
| <i>Foto 16. Presa Guanape: Vista del vaso sedimentado en Diciembre 2001 y después de la creciente de Febrero 2005, de izquierda a derecha</i> | 40 |
| <i>Foto 17. Presa abierta ranurada en el río El Cojo: Vista desde aguas abajo después de su construcción en Octubre 2002 (izquierda). Vista de la acumulación de sedimentos gruesos aguas arriba del dique después de la tormenta de Febrero 2005 (derecha)</i> | 41 |
| <i>Foto 18. Vista de la presa de Camurí Chico desde aguas abajo (izquierda) y de la abertura central de la presa desde aguas arriba (derecha)</i> | 42 |
| <i>Foto 19. Vista de la presa de Camurí Chico desde aguas arriba</i> | 42 |
| <i>Foto 20. Panorámica de la presa de control de sedimentos y canalización de gaviones en el Río Macuto (San José de Galipán)</i> | 43 |
| <i>Foto 21. Vista del vaso de la presa Macuto aguas arriba en Enero 2005 y después del evento de Febrero 2005</i> | 43 |
| <i>Foto 22. Viscosímetro digital y la balanza de densidad, de izquierda a derecha</i> | 47 |
| <i>Foto 23. Partes del equipo experimental utilizado en el modelaje físico</i> | 49 |
| <i>Foto 24. Muestras lodos de Cw 25%, 50%, 75%, de izquierda a derecha</i> | 57 |
| <i>Foto 25. Retención del lodo aguas arriba de la presa cerrada. Pendiente del canal 7%. Densidad del lodo 1,25gr/cm³</i> | 61 |

| | |
|---|----|
| <i>Foto 26. Retención del lodo aguas arriba de la presa ranurada. Pendiente del canal 7%. Densidad del lodo 1,25gr/cm³.</i> | 62 |
| <i>Foto 27. Retención del lodo aguas arriba de la presa de ventana. Pendiente del canal 7%. Densidad del lodo 1,25gr/cm³.</i> | 62 |
| <i>Foto 28. Vista de la deposición de lodo aguas arriba de la presa ranurada. Pendiente del fondo del canal 3%. Densidad del lodo 1,42gr/cm³.</i> | 65 |
| <i>Foto 29. Vista de la deposición de lodo aguas arriba de la presa Ranurada. Pendiente del canal 7%. Densidad del lodo 1,42gr/cm³.</i> | 65 |
| <i>Foto 30. Retención del lodo aguas arriba de la presa cerrada. Pendiente del fondo del canal 3%. Densidad del lodo 1,42gr/cm³.</i> | 66 |
| <i>Foto 31. Retención del lodo aguas arriba de la presa ranurada. Pendiente del fondo del canal 3%. Densidad del lodo 1,42gr/cm³.</i> | 67 |
| <i>Foto 32. Retención del lodo aguas arriba de la presa de ventana. Pendiente del fondo del canal 5%. Densidad del lodo 1,42gr/cm³.</i> | 67 |
| <i>Foto 33. Impacto inicial del lodo con la presa. Pendiente 5% y densidad del lodo 1.42 gr/cm³. Derecha a izquierda presa de ventana, cerrada y ranurada.</i> | 69 |
| <i>Foto 34. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa cerrada vacía. Densidad de lodo 1,42 gr./cm³. Pendiente del canal 5%.</i> | 71 |
| <i>Foto 35. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa ranurada vacía. Densidad de lodo 1,42 gr./cm³. Pendiente del canal 5%.</i> | 72 |
| <i>Foto 36. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa de ventanas vacía. Densidad de lodo 1,25 gr./cm³. Pendiente del canal 5%.</i> | 73 |
| <i>Foto 37. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa cerrada vacía. Densidad de lodo 1,42 gr./cm³. Pendiente del canal 5%.</i> | 74 |
| <i>Foto 38. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa ranurada vacía. Densidad de lodo 1,42 gr./cm³. Pendiente del canal 5%.</i> | 75 |
| <i>Foto 39. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa de ventanas vacía. Densidad de lodo 1,42 gr./cm³. Pendiente del canal 5%.</i> | 76 |
| <i>Foto 40. Vista del la mancha que deja el lodo por efecto del resalto en presa de ventana vacía. Densidad de lodo 1,42 gr/cm³. De arriba hacia abajo Pendiente del canal 3, 5 y 7%.</i> | 77 |
| <i>Foto 41. Vista del la mancha que deja el lodo por efecto del resalto en presa de cerrada vacía. Pendiente del canal 3%. Densidad de lodo 1,25 y 1,42 gr/cm³, de izquierda a derecha.</i> | 78 |
| <i>Foto 42. Vista del la mancha que deja el lodo por efecto del resalto en presa de ranurada vacía. Pendiente del canal 3%. Densidad de lodo 1,25 y 1,42 gr/cm³, de arriba hacia abajo.</i> | 78 |
| <i>Foto 43. Vista de la mancha que deja el lodo por efecto del resalto sobre presa de ventana vacía. Pendiente del canal 7%. De arriba hacia abajo densidad del lodo 1,25 y 1,42 gr./cm³.</i> | 79 |
| <i>Foto 44. Comparación del tamaño del resalto formado en los tres tipos de presa. De arriba hacia abajo presa cerrada, ranurada y de ventanas. Densidad de lodo 1,42 gr./cm³. Pendiente del canal 5%.</i> | 80 |

| | |
|---|------------|
| <i>Foto 45. Vista de la mancha que deja el paso del lodo sobre las presas vacías. De arriba hacia abajo presa cerrada, ranurada y ventana. Pendiente 3%. Densidad de lodo 1,42 gr/cm³.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Foto 46. Vista de la cuña de sedimentos en presa ranurada para una inclinación del canal de 3%. De arriba hacia abajo antes del lanzamiento de lodo de densidad 1,42 y 1,25 gr./cm³ respectivamente.</i> | <i>83</i> |
| <i>Foto 47. Forma de la cuña de sedimentos en las adyacencias a la abertura en presa ranurada. De Izquierda a derecha pendiente del canal 3, 5 y 7%......</i> | <i>83</i> |
| <i>Foto 48. Turbulencia aguas arriba de la presa ranurada. Pendiente del canal de 3%.</i> | <i>84</i> |
| <i>Foto 49. Forma de la cuña de sedimentos en las adyacencias a las aberturas en presa de ventana. De Izquierda a derecha pendiente del canal 3, 5 y 7%......</i> | <i>84</i> |
| <i>Foto 50. Turbulencia aguas arriba de la presa de ventanas. Pendiente del canal de 3%.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Foto 51. Lodo adherido sobre la cuña de sedimentos en presa ranurada. Densidad de lodo 1,25 gr/cm³. Pendiente del canal 3, 5 y 7% de izquierda a derecha.....</i> | <i>88</i> |
| <i>Foto 52. Lodo adherido sobre la cuña de sedimentos en presa de ventana. Densidad de lodo 1,25 gr/cm³. Pendiente del canal 3, 5 y 7% de izquierda a derecha.....</i> | <i>89</i> |
| <i>Foto 53. Lodo adherido sobre la cuña de sedimentos en presa ranurada. Densidad de lodo 1,42 gr/cm³. Pendiente del canal 3, 5 y 7% de izquierda a derecha.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Foto 54. Lodo adherido sobre la cuña de sedimentos en presa de ventana. Densidad de lodo 1,42 gr/cm³. Pendiente del canal 3, 5 y 7% de izquierda a derecha.....</i> | <i>90</i> |
| <i>Foto 55. Depresión detrás de la presa ranurada colmatada en pendiente de 3%. De izquierda a derecha, antes y después del paso de lodo de densidad 1,42 gr/cm³.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Foto 56. Depresión detrás de la presa de ventanas colmatada en pendiente de 5%. De izquierda a derecha, antes y después del paso de lodo de densidad 1,25 gr/cm³.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Foto 57. Cuña de arena e presa de ventanas para pendiente de 3%. De izquierda a derecha antes y después del paso del lodo de densidad 1,25 gr/cm³.</i> | <i>94</i> |
| <i>Foto 58. Cuña de arena en presa ranurada para pendiente de 3%. De izquierda a derecha antes y después del paso del lodo de densidad 1,25 gr/cm³.</i> | <i>95</i> |
| <i>Foto 59. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa ranurada colmatada. Densidad de lodo 1,25gr/cm³ y pendiente del canal 3%.</i> | <i>97</i> |
| <i>Foto 60. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa de ventanas colmatada. Densidad de lodo 1,42gr/cm³ y pendiente del canal 5%.</i> | <i>98</i> |
| <i>Foto 61. Impacto inicial del lodo con la presa. Densidad de lodo 1,42gr/cm³ y pendiente del canal 3%. Presa de ventanas y ranurada, de izquierda a derecha.</i> | <i>99</i> |
| <i>Foto 62. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo (1,25gr/cm³) y la presa de ranurada para una pendiente del canal de 3%.....</i> | <i>99</i> |
| <i>Foto 63. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo (1,25gr/cm³) y la presa de ranurada para una pendiente del canal de 5%.</i> | <i>99</i> |
| <i>Foto 64. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo (1,25gr/cm³) y la presa de ranurada para una inclinación del canal de 7%.</i> | <i>100</i> |

| | |
|--|-----|
| <i>Foto 65. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo (1,42gr/cm³) y la presa de ventana para una inclinación del canal de 3%.</i> | 100 |
| <i>Foto 66. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo (1,42gr/cm³) y la presa de ventana para una inclinación del canal de 5%.</i> | 100 |
| <i>Foto 67. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo (1,42gr/cm³) y la presa de ventana para una inclinación del canal de 7%.</i> | 101 |
| <i>Foto 68. Desbordamiento de lodo en presas colmatadas. Pendiente del canal 7%. Densidad de lodo 1,25 gr/cm³.</i> | 101 |
| <i>Foto 69. Mancha de lodo sobre presa ranurada colmatada para pendiente de 3%. De izquierda a derecha densidad de lodo 1,25 y 1,42 g/cm³.</i> | 101 |
| <i>Foto 70. Mancha de lodo sobre presa ventana colmatada para pendiente de 3%. De izquierda a derecha densidad de lodo 1,25 y 1,42 g/cm³.</i> | 102 |
| <i>Foto 71. Mancha de lodo sobre presa ventana colmatada para pendiente de 5%. De izquierda a derecha densidad de lodo 1,25 y 1,42 g/cm³.</i> | 102 |
| <i>Foto 72. Mancha de lodo de 1,25gr/cm³ de densidad para inclinación del canal de 3%.</i> | 102 |
| <i>Foto 73. Tamaño del resalto en presa de ventana vacía y colmatada. Densidad del lodo 1,25gr/cm³ De arriba hacia abajo pendiente 3, 5 y 7%.</i> | 103 |
| <i>Foto 74. Tamaño del resalto en presa ranurada vacía y colmatada. Densidad de lodo 1,42gr/cm³. Pendiente del canal 5%.</i> | 104 |
| <i>Foto 75. Escorrentía sobre presa de ventana después del paso de un lodo de densidad 1,42gr/cm³. De izquierda a derecha pendiente 3 y 7%.</i> | 106 |
| <i>Foto 76. Escorrentía sobre presa Ranurada lodo de 1,42. Pendiente 3 y 7%.</i> | 107 |

1. INTRODUCCIÓN

A medida que la presencia del hombre, sus actividades e infraestructura, se extienden sobre la superficie del planeta, se produce una interferencia cada vez mayor con la naturaleza y su dinámica, como es el caso de la invasión humana de las márgenes y zonas de desbordamiento de los cursos de agua.

Los torrentes tienen un importante potencial destructivo, producto de la gran energía del flujo, la cual a su vez proviene principalmente de la elevada pendiente de los cauces y de la presencia de materiales sólidos transportados por la corriente, los cuales, junto con el agua, pueden causar enormes daños al alcanzar las planicies aguas abajo, donde normalmente se concentran las actividades y la infraestructura humana.

Cuando estos cursos de agua aumentan su caudal, como consecuencia de las lluvias en su cuenca, o el deshielo, el flujo reclama su territorio invadido por el hombre, produciendo cada vez con mayor frecuencia catástrofes que involucran pérdidas económicas y de vidas humanas. Las lluvias prolongadas e intensas en áreas montañosas pueden producir derrumbes y deslizamientos, debido a la saturación de los suelos que reduce su capacidad de resistencia a la fuerza de gravedad. El colapso de estas grandes masas de suelo puede dar origen a los denominados aludes torrenciales. Ejemplo de esto fue lo vivido en el Estado Vargas (Venezuela) en Diciembre de 1999. No fue sino hasta esa fecha que se comenzó a tomar conciencia del peligro que corría y corre su población.

Para la mitigación de catástrofes relativas a aludes torrenciales en el Estado Vargas se han venido construyendo obras de control de sedimentos en el cauce de los ríos, basándose en la experiencia de otros países, en obras ya construidas y el criterio personal de cada ingeniero basado en su experiencia.

Estudios hechos luego de las lluvias de febrero de 2005 de las presas construidas hasta el momento en Vargas, expresan que aproximadamente un 50% de ellas están totalmente colmatadas con los sedimentos arrastrados y proponen la construcción de nuevas presas del tipo

abierta. Sin embargo, no se cuenta con un estudio detallado de como funcionarán las presas actualmente construidas en Vargas ante otro alud torrencial o bajo las condiciones imperantes del sitio, ni de lo efectiva que sería la implementación de la propuesta en la detención de aludes.

Por lo antes expuesto, el presente trabajo especial de grado tiene como propósito estudiar, a nivel cualitativo, el comportamiento hidráulico de presas para el control o retención de sedimentos, abiertas y cerradas, ante aludes torrenciales y condiciones de escorrentía normal, a través de la realización de un modelaje físico en un canal experimental, en el Edificio Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, ensayando tres tipos de presas; cerrada, con ventanas y con ranura central, con tres tipos de pendiente del fondo del canal y dos tipos de concentraciones de mezcla de lodo, con el fin de comparar sus cualidades: vacías y colmatadas, y establecer las condiciones de su efectividad en la detención de lodos con base en dichas variables.

2. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Al norte de Venezuela se encuentra un estrecho y extenso borde costero llamado Litoral Central, con límites entre el Mar Caribe y la Cordillera de la Costa en el que se encuentra ubicado el Estado Vargas. En esta zona, en repetidas oportunidades han ocurrido deslaves o movimientos de masa que han arrastrado sedimentos de lo interno de las montañas, generando así los abanicos aluviales o conos de deyección (ver foto 1) donde el río desemboca en el mar. Estos abanicos son zonas propicias para la formación de asentamientos urbanos debido a que representan las únicas extensiones considerables de terreno entre el mar y el sistema montañoso de la Cordillera de la Costa.



Foto 1. Cono de deyección de Macuto, Edo. Vargas-Venezuela para 1998 (Tomado por: Dirección de geografía y cartografía de las Fuerzas Armadas).

Las montañas que bordean al Litoral Central presentan una vegetación xerofítica que protege poco a las vertientes, por lo que las rocas afloran a la superficie y hacen propicia la meteorización mecánica que da origen a guijarros de diferentes tamaños, y la meteorización química que descompone la roca en limo, arena y arcilla. Si un suelo con estas características, sumado a las grandes pendientes de las laderas, es sometido a largos períodos de precipitación, alcanzándose la saturación de los mismos, es muy probable que se generen deslizamientos que pueden transformar las crecidas de los cauces de los torrentes en aludes torrenciales, que finalmente llegarán a los abanicos aluviales, donde se encuentran los asentamientos urbanos, dejando destrucción a su paso. Estos eventos han ocurrido en el Litoral Central en repetidas ocasiones a lo largo de la historia pero los más recientes y devastadores (debido a la gran cantidad de habitantes

que residían en la zona) fueron los de Diciembre del año 1999. Para mitigar los daños que puedan producir lluvias torrenciales como éstas, es común la construcción de presas de retención o control de sedimentos sobre el cauce de los ríos. El diseño de obras de control de sedimentos es un proceso que se debe llevar a cabo cuidadosamente ya que existen diversos tipos (presas cerradas para retención de sedimentos, presas abiertas para el control de aludes, reductores de energía, etc.), ver fotos 2 y 3. Cada una de ellas es utilizada bajo condiciones distintas y con finalidades diferentes.



Foto 2. Presa cerrada en Venezuela funcionando en condiciones hidráulicas normales (Tomada por: El Instituto de Mecánica de los Fluidos en Febrero del 2.005)



Foto 3. Presa con ranura de paredes verticales en Austria (Tomado de: "Presas de corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos", Suárez V. Luís M. Pág. 10-7)

Luego de los catastróficos eventos de Diciembre de 1999 fueron construidas una serie de presas de retención de sedimentos de diversos tipos en diferentes ríos, y en febrero de 2005 estas presas

fueron puestas a prueba por la naturaleza. Las lluvias de Febrero de 2005, aún cuando no fueron comparables a las de 1999, fueron capaces de producir crecientes importantes, desbordamientos, deslizamientos y daños en las obras de infraestructura de algunas poblaciones de la costa, lo cual ameritó la declaración de un estado de emergencia en el estado Vargas.

Las estaciones hidrometeorológicas de Macuto, San José de Galipán y Caraballeda, registraron las mayores precipitaciones: 432, 427 y 382 mm respectivamente, entre los días 7 y 10. Estos valores representan magnitudes notables al compararlos con la precipitación media anual, estimada en 523 mm., pero inferiores a los valores máximos registrados en Diciembre de 1999 (1200 mm. en 17 días).

El Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCT) ante los efectos causados por las lluvias ocurridas entre el 7 y el 10 de Febrero de 2005, solicitó al Instituto de Mecánica de Fluidos (IMF) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela (UCV) y a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sísmicas (FUNVISIS) la realización de la evaluación técnica del estado en que se encontraban las obras de control de sedimentos. Los resultados del mismo fueron: “En general su comportamiento fue satisfactorio, con respuestas diferentes dependiendo del tipo de obra y de las condiciones de cada sitio particular. Las fallas detectadas en algunas obras, son factibles de corregirse mediante un mantenimiento adecuado. Debe entenderse que un programa de conservación y protección de cuencas como las del Estado Vargas, no terminará con la ejecución de estas obras, siempre habrá necesidad de realizar mejoras y modificaciones atendiendo a las experiencias obtenidas hasta el presente”. Además, en este informe se recomendaba: “que las futuras presas que se construyan en las cuencas de Vargas sean presas con aberturas o ventanas para permitir el paso de los sedimentos finos que son arrastrados con las crecientes ordinarias de frecuencia anual”. Con base en estas conclusiones y recomendaciones surgen varias interrogantes: ¿Qué tan efectiva sería la implementación de esta solución?, ¿Bajo qué condiciones (pendiente del cauce, concentración del fluido circulante y geometría de la presa) son más efectivas las presas abiertas en lugar de las cerradas en la detención de aludes torrenciales?, En general, ¿Que características hacen de las presas abiertas una opción más efectiva que las presas cerradas?

Actualmente se están construyendo presas de control o retención de sedimentos en algunos de los ríos y quebradas del Estado Vargas, basándose en la experiencia de otros países o la experiencia del ingeniero que las diseña. En algunos casos, las obras se encuentran en fase de proyecto, por lo que se necesita un estudio detallado del comportamiento de las mismas ante aludes torrenciales, de manera de poder garantizar la reducción del efecto o impacto del desastre sobre los conos de deyección y las poblaciones asentadas sobre ellos.

Bajo este panorama, es importante la realización del presente trabajo especial de grado que involucra el modelaje físico de diversos tipos de presas de control o retención de sedimentos con el fin de evaluar su comportamiento: vacías y colmatadas, ante aludes torrenciales y condiciones de esorrentía normal, con el fin de establecer las variables y condiciones de uso efectivo de los diferentes tipos de presa y para que, a través del entendimiento detallado de las consecuencias físicas de las presas poder recomendar modificaciones o la construcción de obras adicionales que garanticen la seguridad de las poblaciones.

2.2. ANTECEDENTES

Las investigaciones que han servido de base para la realización del siguiente Trabajo Especial de Grado son las siguientes:

- Protocolo para elaboración de mezclas de lodo a ser usadas en el modelaje de aludes torrenciales, elaborado por Armando Blanco en 2004.
- Análisis de mezclas homogéneas, de arena y arcilla, saturadas en agua de diferentes concentraciones, realizado por Julán Aguirre, en 2004. En este se consideraron los diferentes esfuerzos cortantes que se establecen en el flujo de lodos, generado por remoción súbita de una pantalla que retiene el fluido en un canal de plexiglás de 4,0 m de longitud de alta pendiente (entre 0,046 y 0,160). Obtuvo que: la viscosidad es una función decreciente de la concentración de arena para una concentración constante de arcilla, que el efecto de agregar partículas de arena a suspensiones de arcilla bentonítica o matrices de barro es despreciable siempre que la arena permanezca en concentraciones volumétricas menores que el 20%, que el esfuerzo de cedencia es inversamente proporcional a la concentración de arena y directamente proporcional a la concentración de arcilla y que el flujo establecido en el equipo experimental, uniforme y permanente, mostró ser un flujo de Bingham.

2.3. OBJETIVOS

Objetivo General:

- ✓ Evaluar el comportamiento hidráulico de presas para el control o retención de sedimentos, abiertas y cerradas, ante aludes torrenciales y condiciones de escorrentía normal, a través de la realización de modelaje físico.

Objetivos Específicos:

- ✓ Comparar el desempeño de las presas abiertas y cerradas inicialmente vacías, variando la pendiente del fondo del canal y concentración del fluido circulante.
- ✓ Comparar el desempeño de las presas abiertas, variando la pendiente del fondo del canal y concentración del fluido circulante, estando colmatadas.
- ✓ Establecer las variables que influyen en la eficiencia de las presas de control o retención de sedimentos.
- ✓ Establecer las condiciones en que se aplica el uso eficiente de una presa de control o retención de sedimentos sobre el cauce de los ríos.

3. MARCO TEÓRICO

3. MARCO TEÓRICO

3.1. CORRIENTES NATURALES DE AGUA

Las corrientes naturales de agua están sometidas continuamente a procesos de erosión, gradación, cambios de cursos y desbordamientos. Las magnitudes y frecuencia de estos procesos dependen de las características pluviométricas de la zona, y de la geomorfología de las hoyas vertientes y de los cauces. Estos cauces pueden dividirse, según sus características en dos grandes categorías: ríos y torrentes (Suárez, 1993).

3.1.1. Ríos

Se caracterizan por tener caudales importantes aún en periodos de estiaje. Las variaciones del caudal son relativamente lentas ya que el curso de agua es alimentado por una extensa red de afluentes que drena una cuenca de gran tamaño, lo que hace que el río tenga una cierta inercia a los cambios climáticos, en especial a las precipitaciones, las cuales para hacerse sentir, deben cubrir una parte significativa de la cuenca. Las lluvias aisladas, de pequeña extensión superficial, no afectan el caudal de los ríos. Las crecientes se forman lentamente y son de larga duración (días, meses) (Suárez, 1993).

Las pendientes longitudinales de los ríos suelen ser constantes en tramos relativamente largos (varios kilómetros) y de pequeña magnitud, no sobrepasando el 1%. Los materiales sólidos transportados son finos, constituidos por arena, limo y arcilla, predominando el transporte en suspensión sobre el arrastre de fondo.

Los cauces de los ríos suelen comprender dos partes: una más profunda y definida que se conoce como cauce de estiaje y otra más amplia y difusa que es ocupada por el flujo durante las crecientes. Algunos ríos recorren zonas muy planas en las cuales divagan formando curvas alternadas llamadas meandros. Los meandros se caracterizan por presentar procesos de erosión en las márgenes cóncavas y de sedimentación en las convexas, lo que suele causar que la parte más estrecha de las curvas (cuello) llegue a cortarse, por lo que el flujo abandona el meandro y sigue una trayectoria más rectilínea, dejando en la planicie un cauce abandonado o madre vieja. Ver foto 4.



Foto 4. Río. (Tomado de:www.geocities.com/gsilvam/cauces)

3.1.2. Torrentes

Son cursos de agua de zonas montañosas que se caracterizan por tener fuertes pendientes longitudinales, mayores al 5%, las cuales son irregulares. Los cauces de los torrentes están formados por material grueso: peñones, cantos rodados, grava y arena, entremezclados. En ellos predomina el arrastre de fondo sobre el transporte en suspensión (ver foto 5).



Foto 5. Torrente (Tomado de:www.geocities.com/gsilvam/cauces)

Las cuencas de los torrentes son poco extensas y muy pendientes, lo que produce un respuesta rápida a las precipitaciones localizadas sobre ellas, las crecientes son violentas y de corta duración (Suárez, 1993).

Debido a su gran capacidad de transporte de sedimentos, los cauces de régimen torrencial presentan a lo largo de sus trayectorias fenómenos de socavación y agradación; la segunda como consecuencia de la primera (geocities.com/gsilvam/cauces).

La socavación es el descenso del fondo en un tramo del cauce y está asociado a una tendencia de reducir la pendiente del cauce y con ella disminuir la capacidad erosiva. La socavación en un tramo de una corriente natural es la suma de dos componentes, la socavación general y la socavación local.

La Socavación general es la que se produce en lechos aluviales o cohesivos por efecto de la dinámica de la corriente y está relacionada con la conformación del nivel de base. Es un fenómeno a largo plazo, aun cuando eventos catastróficos pueden acelerarlo.

La socavación local se presenta en sitios particulares de la corriente y es ocasionada por el paso de crecientes y por la acción de obras civiles, como obras de encauzamiento, espolones, puentes con pilas o estribos dentro del cauce, obras transversales de control, etc.

Debido a la gran pendiente que tienen estos cauces, la capacidad de transporte de sedimentos es alta, la cual es alimentada por los procesos erosivos que se presentan en el fondo y contra los taludes. Cuando se producen deslizamientos de los taludes existe el peligro de que se formen presas naturales en el cauce. Al romperse las presas se generan las avalanchas.

Existe una categoría entre ríos y torrentes, conocidas como ríos torrenciales para indicar que se trata de un caso intermedio, o de transición entre ambos. Los ríos torrenciales suelen presentarse en las zonas de piedemonte, donde los torrentes depositan sus sedimentos, se suaviza la pendiente y comienzan a aparecer las características fluviales.

Los ríos torrenciales presentan cauces múltiples (trenzados) que se entrecruzan y cambian de posición constantemente. El material del lecho es grueso, formado por gravas, cantos rodados y arena. La sección transversal es muy irregular y cambiante.

En general, un curso de agua comienza siendo un torrente en la zona montañosa, pasa a la categoría de río torrencial en el piedemonte y se transforma en río en la planicie aguas abajo. De un modo global que en la mayoría de los casos los afluentes de los ríos son ríos torrenciales y los de estos torrentes (Suárez, 1993).

3.1.2.1. Partes de un Torrente

En la mayoría de los torrentes es posible distinguir tres partes bien diferenciadas donde se producen fenómenos diferentes, esas partes son: cuenca tributaria, la garganta y el cono de deyección. Ver la figura 1 (Suárez, 1993).



Figura 1. Partes de un torrente (Cortesía del Ing. José Luís López).

Cuenca tributaria: Es la parte más alta y más extensa del torrente, tiene una forma semejante a la de un embudo y en ella se capta la mayor parte del flujo proveniente de las precipitaciones y el deshielo. La cuenca está surcada por una serie de zanjones, o cauces menores muy pendientes, que concentran el flujo captado en el punto más estrecho de la cuenca. La mayor parte de los

sedimentos transportados por el torrente provienen de la cuenca, ya que en ella predomina la erosión, la profundización, ensanchamiento y ramificación de los cauces.

Garganta: Generalmente está constituida por un cauce encajonado y profundo, situado aguas abajo de la cuenca. Por la garganta transitan hacia la planicie de aguas abajo el agua y los sedimentos provenientes de la cuenca. La pendiente suele ser muy elevada y variable, aunque menor que la de los cauces ramificados de la cuenca. Las velocidades del flujo en creciente son muy altas. Este tramo identifica lo que comúnmente se denomina el torrente. Su longitud puede ser muy variable desde cero en algunos casos, hasta de varios kilómetros en otros.

El inicio de la garganta se caracteriza por corresponder al estrechamiento de la cuenca y por que aguas abajo de este punto no existen afluentes importantes. El fin de la garganta corresponde al cono de deyección.

En la garganta predomina el transporte de los materiales, el cual a su vez puede originar procesos de erosión en el lecho y en las márgenes. Los bloques angulares provenientes de la cuenca chocan entre sí durante el transporte, se fragmentan y sus aristas se redondean. Si la garganta tiene la longitud suficiente, los bloques se transforman a lo largo del recorrido en cantos rodados y estos en grava y arena. Es común encontrar en la garganta, materiales de todos los tamaños, la mayor parte de ellos provenientes de las cuencas y algunos de deslizamientos locales, de la erosión de las márgenes o del fondo.

Cono de deyección: En la desembocadura del torrente en la planicie o en un valle transversal, la pendiente se reduce bruscamente, la corriente disminuye de velocidad y se produce la sedimentación de los materiales transportados, los cuales se acumulan formando una especie de cono que tiene su vértice al final de la garganta, de ahí la denominación de cono de deyección para este componente del torrente. Es común encontrar en los conos de deyección una mezcla de materiales de diferentes tamaños, sin una estratificación definida.

3.2. ASPECTOS SEDIMENTOLÓGICOS DE LAS CORRIENTES NATURALES

3.2.1. Origen de los sedimentos

La mayor parte de los ríos y torrentes transportan materiales sólidos juntos con el agua. Al peso de los materiales sólidos que pasa por la sección transversal de un cauce por unidad de tiempo se le denomina caudal sólido. En general, este volumen sólido transportado se incrementa de manera muy importante durante las crecientes. Las principales causas que contribuyen a la formación del caudal sólido son las siguientes (Suárez, 1993):

La erosión de la cuenca

Los cambios de temperatura y humedad, el hielo y el deshielo, el granizo, la lluvia, el viento, las raíces de las plantas, los animales, la intervención del hombre, etc., van despedazando y destruyendo las rocas, cuyos fragmentos caen por las pendientes hacia los cauces, suministrándoles materiales sólidos. Como consecuencia de las lluvias, las partículas de los suelos son desprendidas por el impacto de las gotas de agua y desplazadas ladera abajo por la acción combinada de la gravedad y el escurrimiento superficial, especialmente en las cuencas con escasa cobertura vegetal. De esta forma las partículas de suelo alcanzan los cauces de la cuenca.

La erosión del cauce

Los cambios de dirección del cauce ocasionan el choque alternado del flujo contra sus márgenes, arrancando material de las mismas que luego es incorporado a la corriente. Este tipo de erosión se conoce como transversal y se produce principalmente en las partes cóncavas de las curvas.

La fuerza cortante que ejerce el flujo en el fondo, puede tener energía suficiente como para arrastrar las partículas del mismo, especialmente durante la creciente, incorporando estas partículas al flujo. Este tipo de erosión se denomina longitudinal y actúa sobre los materiales sueltos que constituyen el fondo de los cauces.

Los deslizamientos de terreno

En algunas zonas de la cuenca alejadas de los cauces, pueden producirse deslizamientos de terreno, inducidos por la presión hidrostática asociada a la saturación de suelos y rocas, efectos que sumados a la disminución de los parámetros resistentes de los materiales a consecuencia de la meteorización y a las condiciones topográficas (fuertes pendientes), traen como resultado que se sobrepase la resistencia al deslizamiento. Los deslizamientos pueden suministrar grandes cantidades de sólidos a los cursos de agua y en ciertos casos son los responsables de la formación de las lavas torrenciales.

3.2.2. Clasificación de los sedimentos

Los sedimentos pueden clasificarse en dos grandes categorías, sedimentos cohesivos y sedimentos no cohesivos (Suárez, 2001).

Los sedimentos no cohesivos comprenden los cantos, bloques, gravas y arenas y los cohesivos son esencialmente mezcla de limos y arcillas. Existen diferencias substanciales entre los dos grupos de sedimentos y su interacción con el flujo.

En los sedimentos no cohesivos la principal fuerza de resistencia a la erosión es el peso sumergido de los sedimentos, mientras que en los sedimentos cohesivos las fuerzas netas de atracción entre partículas y las fuerzas electroquímicas controlan la resistencia a la erosión. Estas mismas fuerzas controlan el comportamiento hidrodinámico de las suspensiones de sedimentos finos.

3.2.3. Tamaño de los sedimentos

Los cauces naturales generalmente presentan un rango amplio de tamaño de partículas, pudiéndose encontrar desde partículas muy finas (limos y arcillas) hasta piedras y rocas de gran tamaño, ver tabla 1(Suárez, 2001).

Tabla 1. Clasificación de tamaños de partículas. (Tomada de: “Control de Erosión en zonas tropicales” Suárez D. Jaime. Pág.95)

| Partículas | Rango de tamaño en mm |
|------------|-----------------------|
| Cantos | Más de 256 |
| Guijarros | 64 a 256 |
| Grava | 2 a 64 |
| Arena | 0.064 a 2 |
| Limos | 0.004 a 0.064 |
| Arcillas | Menos de 0.004 |

3.2.4. Transporte de los sedimentos

Las corrientes naturales de agua transportan materiales sólidos según diferentes mecanismos (Suárez, 1993):

Transporte en Solución: Al escurrir por la superficie de la cuenca e infiltrarse en las diferentes formaciones de suelos y rocas, las aguas de lluvia van disolviendo minerales tales como sal común, carbonato de calcio, yeso, etc., que luego son transportados en solución a lo largo de los torrentes y los ríos.

Transporte en suspensión: Las partículas más finas de los suelos (arcillas, limos y arenas) pueden ser transportadas en suspensión por las corrientes fluviales y torrenciales. La tendencia de estos materiales a sedimentar es contrarrestada por la turbulencia, cuyas componentes oscilatorias dirigidas hacia arriba tienen la capacidad de levantar las partículas más finas y mantenerlas en suspensión en el agua. Según este mecanismo, los sedimentos finos son transportados en el seno de la corriente, en un estado de flotación y agitación permanente, a pesar de tener un peso unitario mayor del doble que el del agua. La velocidad del agua con materiales en suspensión es aproximadamente igual a la del agua clara

Arrastre de fondo: Las partículas de mayor tamaño (arena, grava, cantos rodados, peñones) son transportadas por las corrientes como arrastre de fondo. La turbulencia no posee la energía suficiente como para levantar esas partículas y mantenerlas en suspensión, pero la fuerza cortante del flujo en el fondo es capaz de moverlas, haciéndolas rodar y saltar unas sobre otras,

especialmente durante las crecientes. La velocidad de las partículas es sensiblemente inferior a la velocidad media de la corriente.

La repartición del transporte de sólidos entre suspensión y arrastre de fondo depende básicamente del tamaño de las partículas y de las características del flujo.

3.2.5. Transporte individual y transporte de masa

Cuando la corriente lleva una cantidad reducida de sólidos., según los mecanismos descritos en la sección anterior, cada partícula se desplaza con una velocidad igual a la que tendría en el caso de que fuese la única transportada por el flujo. A medida que la cantidad de partículas aumenta éstas cada vez tienen una mayor influencia unas sobre otras, debido a los choques que se producen. Asimismo, afectan cada vez más las características del flujo debido a la influencia que ejercen sobre la turbulencia, pero siempre que la concentración de sólidos en el agua no sea excepcionalmente elevada existirá una notable diferencia entre la velocidad relativamente lenta de los materiales más gruesos y la velocidad casi igual a la del agua de los más finos. Es posible hablar de una velocidad individual de arrastre, para una partícula de tamaño dado. A esta forma de arrastre se le denomina transporte individual.

Si por alguna circunstancia los sólidos presentes en el flujo aumentan extraordinariamente las diferentes partículas estarán prácticamente en contacto aumentando el número de choques por lo que todas tenderán a desplazarse con la misma velocidad, en forma conjunta. A esta forma excepcional de arrastre se la denomina transporte de masa.

Se podría decir que el transporte en masa es el límite hacia el que tiende el transporte individual cuando la concentración de sólidos crece indefinidamente (Suárez, 1993).

3.3. MOVIMIENTOS DE LADERA

En forma general, los movimientos de ladera se conocen con el nombre de "deslizamientos", involucrando una variedad de formas y procesos de movimientos de masas en laderas que incluye el transporte ladera abajo de suelo y material de roca bajo la influencia gravitacional, y que

constituyen una clara amenaza, principalmente en áreas montañosas y volcánicas (insivumeh.gob.gt/geofisica/laderas). Ver foto 6.

Aunque en lo individual, los movimientos de ladera pueden no ser tan espectaculares o dañinos como otras amenazas naturales, si tienen una mayor presencia en el terreno y en forma colectiva causan enormes pérdidas económicas.

Para que se generen los movimientos de ladera, deben de presentarse al menos dos elementos: relieve (topografía del terreno) y un estímulo externo o disparador (lluvias, sismicidad, actividad volcánica y/o actividad antrópica).



Foto 6. Vista de un deslizamiento en la cuenca del río Tzafa, Guatemala (Tomado de: insivumeh.gob.gt/geofisica/laderas).

3.3.1. Clasificación de los movimientos de ladera

Según el tipo de movimiento, los movimientos de ladera se clasifican en (insivumeh.gob.gt/geofisica/laderas):

Caídas: generadas a partir del desprendimiento de suelo o roca en un talud empinado o vertical, provocando la caída del material a través del aire.

Deslizamientos: Movimientos de masas de suelo o roca que ocurre sobre superficies preexistentes y que son lubricadas en forma natural, regularmente por la presencia de agua.

Flujos: Movimientos que por su contenido de agua, se comportan como fluidos viscosos. Los flujos pueden ser de lodo o de escombros, dependiendo del contenido de fragmentos presentes. Ocasionalmente, estos eventos son llamados avalanchas o aludes torrenciales. Ver foto 7.



Foto 7. Desastre por aludes torrenciales en diciembre de 1999 en el Estado Vargas en Venezuela (Cuenca baja del río Cerro Grande) (Cortesía del Ing. José Luís López).

De los eventos anteriores, se estima que los flujos son los más peligrosos, ya que los mismos pueden ser repentinos, pueden alcanzar grandes velocidades y llegan a tener tal poder de arrastre, que pueden arrastrar bloques de piedra de varios metros de diámetro y hasta grandes camiones. Ver foto 8.

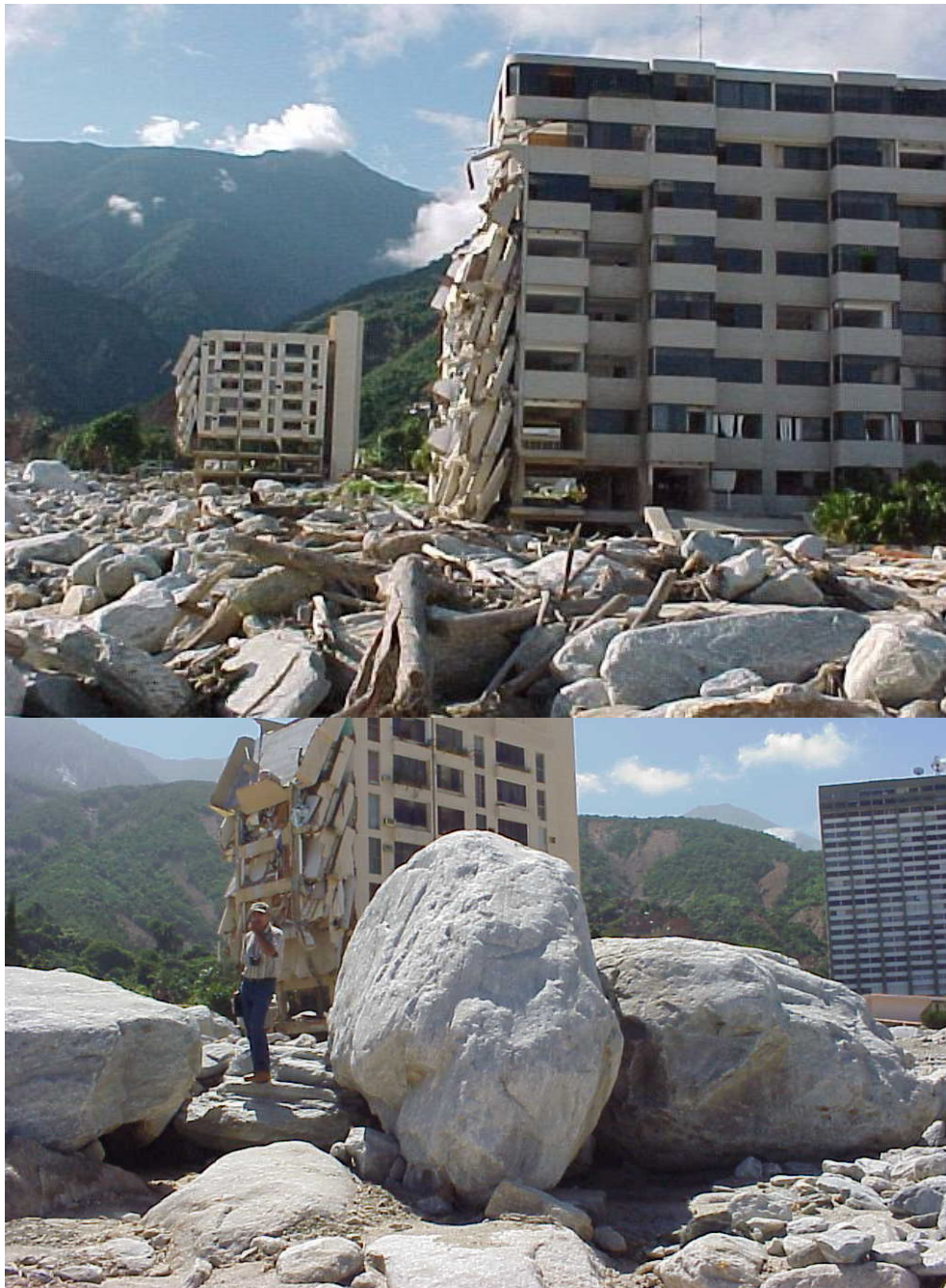


Foto 8. Arrastre de sedimentos por alud torrencial en diciembre de 1999 en el Estado Vargas-Venezuela (Cortesía del Ing. José Luís López).

Debido a sus características, una vez que se inicia un flujo, éste es capaz de moverse por áreas relativamente llanas o de poca inclinación, siendo las áreas más peligrosas, aquellas localizadas en el fondo de un cañón y en taludes que han sido excavados para construir carreteras y edificios.

Usualmente los flujos comienzan como pequeños deslizamientos de suelo que luego se licuan y aceleran a grandes velocidades, y cuándo se originan múltiples eventos de este tipo en las partes altas de cañones, éstos terminan convergiendo en los mismos canales donde ganan volumen y terminan moviéndose a grandes distancias, lejos de donde se originan.

El agente disparador más frecuente de los deslizamientos es la lluvia, la cuál permite que los suelos se saturen de agua, adicionándoles más peso, lo cual facilita la generación de eventos de este tipo.

Debido a que los deslizamientos se originan en las partes altas de las laderas de las montañas, las áreas localizadas cuesta abajo de las laderas, son particularmente peligrosas. Por otro lado, en los cortes de carreteras y todas las áreas de un talud que han sido excavadas o alteradas por el hombre, son particularmente peligrosas, ya los movimientos de ladera son más comunes durante las lluvias, debido a que es usual que estos taludes artificiales, necesiten lluvias menos intensas para generar eventos de este tipo, que en laderas naturales.

Zonas susceptibles a deslizamientos:

- Antiguos deslizamientos
- A lo largo o en la base de taludes, laderas de montañas y orillas de barrancos.
- A lo largo o en la base de cuencas de drenaje menores u otras depresiones.
- En el tope o en la base de antiguos taludes de relleno.
- En el tope o en la base de cortes en taludes empinados.
- En laderas desarrolladas donde se usen pozos sépticos u otras estructuras de donde las aguas usadas se pueden filtrar.

Zonas menos susceptibles a deslizamientos:

- Superficies de roca masiva, libre de grietas y sin un historial de movimiento o deslizamientos.
- Terrenos llanos que se encuentren lejos de taludes o de cambios súbitos en los ángulos de las pendientes.
- A lo largo de la cima de montañas, lejos de los bordes de las pendientes.

3.4. ALUDES TORRENCIALES

Los aludes torrenciales son masas en las que el volumen de los sedimentos es superior al del agua, y fluyen en forma similar a la de un concreto fresco, poco espeso, bajo la acción de la gravedad (Suárez, 1993).

Son flujos con altas concentraciones de sedimentos que se generan en pendientes pronunciadas y que pueden estar conformadas por agua, barro, rocas, y grandes restos de vegetación, así como todo tipo de desperdicios y arrastres de materiales fabricados por el hombre. Los tamaños de los sedimentos arrastrados varían desde micrones (arcillas) hasta varios metros de diámetros (peñones) (Banesco Seguros, 2006).

Cuando grandes cantidades de sedimentos llegan al cauce se produce su acumulación, debido a que los caudales normales del torrente no suelen tener capacidad suficiente para arrastrarlos. Esta situación podría presentarse cuando ocurre un deslizamiento de terreno en una ladera, que produce un represamiento del agua dando origen a un embalse temporal. Si bajo estas condiciones se presenta una lluvia intensa en la cuenca, podría iniciarse una crecida excepcional, con capacidad para movilizar la masa de sedimento acumulada (rotura del represamiento). El agua se mezcla con los materiales de diferentes tamaños formando una especie de pasta con los más finos que envuelve a los más gruesos y que, propiciado por la fuerte pendiente del cauce, se pone en movimiento absorbiendo a su paso los materiales que encuentra en el lecho, los cuales se incorporan a la masa (efecto de bola de nieve). La incorporación de los materiales del cauce a la masa del alud torrencial se produce como consecuencia del elevado peso unitario y coeficiente de

roce de ésta, originando una erosión intensa en los sedimentos del lecho. La corriente así formada arrasa todo lo que encuentra a su paso.

En cierta forma la corriente se comporta como una colada de lava que desciende por una ladera desde el cráter de un volcán, por lo que se le conoce también como lavas torrenciales.

La presencia de muy grandes cantidades de partículas de sedimentos es de tal magnitud que influye notablemente en la mezcla, cambiando las propiedades del fluido y el comportamiento del flujo. A los flujos de estas características se les denomina flujos hiperconcentrados (Brea, 2003).

3.4.1. Mecanismo de transporte de aludes torrenciales

El volumen y las propiedades de la matriz del fluido (mezcla agua-sedimentos) gobiernan la hidráulica del flujo, su desplazamiento y la deposición de sedimentos. Las propiedades dependen de la concentración de sedimentos, de la distribución granulométrica y del contenido de arcillas (Brea, 2003).

El mecanismo de transporte en masa de los aludes torrenciales se caracteriza porque, una vez detenidas éstas, los bloques más grandes aparecen acumulados en la parte frontal, a diferencia del transporte individual, en el que ocurre lo contrario (Banesco Seguros, C.A., 2006).

En la figura 2 se distinguen tres partes en la onda: el frente, el cuerpo y la cola. El frente de onda consiste fundamentalmente de grandes clastos y es seguido por el cuerpo, donde la gran viscosidad de la mezcla puede dar origen a un flujo laminar. En la cola de la onda, la concentración de fino decrece (la concentración volumétrica varía entre un 20% y 40%) y el flujo es turbulento. Las tres fases forman un medio continuo donde el tamaño del sedimento, la concentración, y la viscosidad, decrecen desde el frente a la cola del flujo.



Figura 2. Diagrama esquemático de una onda típica de alud torrencial (Tomado de: Ingeniería Forense y Estudios de Sitio. Guía para la prevención de Gestión de Riesgos. Banesco Seguros (2006).

3.4.2. Clasificación de los Aludes Torrenciales

Algunos autores han estudiado la clasificación de los aludes torrenciales (Flujo Hiperconcentrado) desde diferentes puntos de vista: observación de campo, características del flujo, comportamiento de los materiales, composición, etc. A pesar de ello, no hay todavía un acuerdo en la bibliografía de una clasificación única (Brea 2006).

Según Julien y O' Brien (1997), los flujos hiperconcentrados se clasifican en tres categorías los cuales van a diferenciarse entre si por los procesos físicos involucrados en cada uno de ellos, que son función de la reología de la mezcla agua-sedimentos, de la distribución granulométrica y del contenido de arcilla (Banesco Seguros C.A., 2006):

Flujos de agua y Barros (mud floods): También llamados inundaciones o crecidas de barro (Brea, 2003), son hiperconcentraciones de partículas no cohesivas, tales como las arenas y los limos. La concentración volumétrica de sedimentos varía entre 20% y un máximo de 40% y el flujo es turbulento.

Flujo de Barro (mud flows): Se caracterizan por altas concentraciones de limo y arcillas lo cual cambia las propiedades de la matriz del fluido y se comporta como una masa viscosa capaz de transportar peñones sobre la superficie del mismo. Las concentraciones de sedimentos se encuentran entre 40 y 55% aproximadamente.

Flujo de Detritos (debris flows): Se refieren a una mezcla de clastos incluyendo peñones y restos de vegetales como ramas y troncos de árboles pudiendo incluir también a objetos como carro y otros materiales antropogénicos. La colisión lubricada entre las partículas es el mecanismo dominante de disipación de energía (Brea, 2003). En general se acepta, que si más de la mitad de la fracción sólida está compuesta por granos mayores que las arenas, se usa el término de flujos de detritos, en lugar de flujo de barro. Las fotos 9 y 10 presentan algunos ejemplos de diferentes aludes torrenciales observados en el Estado Vargas, donde se usa la clasificación de Julien y O'Brien (1997). La foto 9 a la izquierda muestra un carro semienterrado en una matriz fina cerca de la población de Macuto en Diciembre de 1999, en donde ocurrió posiblemente un flujo de barro. La foto 10 muestra la gran cantidad de peñones depositados en la Urbanización Los Corales en Diciembre de 1999, después del paso de un flujo de detritos (Banesco, 2006).

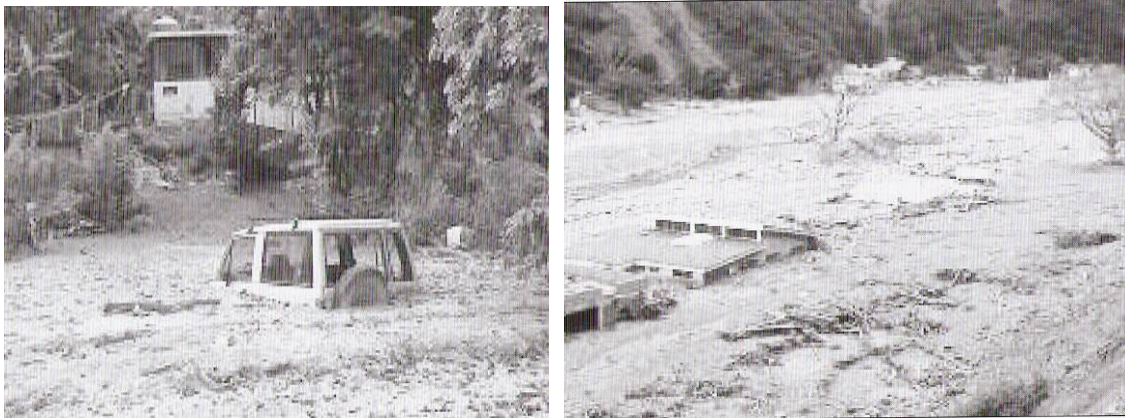


Foto 9. Flujo de agua y barro en Macuto y en Tanaguarena, de izquierda a derecha. (Tomada de “Guía para la prevención de Gestión de Riesgo”. Banesco Seguros. Pag35).



Foto 10. Flujo de detrito en Los Corales. (Tomada de “Guía para la prevención de Gestión de Riesgo”. Banesco Seguros. Pag35).

Considerando únicamente la concentración en peso C_w se tiene la siguiente clasificación (Aguirre, 1999):

Aluvión de agua: Consiste fundamentalmente en una masa de agua que se desplaza como avenida de caudales extremos, provocando generalmente inundaciones a su paso. La concentración de sedimentos se encuentra en un rango menor a 0,40.

Flujo hiperconcentrado: Es una mezcla hiperconcentrada de material fino suspendido, generalmente uniforme y viscosidad mayor que la del agua, que puede transportar sedimentos gruesos como carga de fondo. Las partículas en suspensión no están en contacto permanente entre sí. La concentración de sedimentos está entre un 0,40 y 0,70.

Flujo de barro y escombros: Es un flujo no permanente, pulsátil, de una mezcla de agua y sedimentos gruesos y finos. En este flujo existe una saturación del agua por parte del material sólido que presenta una alta gradación de diámetros. Las partículas más finas de arcilla generan una matriz de soporte que ofrece continuidad al elemento sólido, el cual se lubrica con agua al moverse. La concentración de sedimentos es mayor a 0,70.

3.4.3. Reología en los aludes torrenciales

Dentro de los flujos hiperconcentrados de sedimentos, el comportamiento reológico involucra la interacción de diversos y complejos procesos físicos. Las partículas sólidas pueden chocar, rozar, rotar y vibrar en el desarrollo del movimiento.

Los cuatro elementos clave en el intercambio de momentum de un flujo hiperconcentrado de sedimento son: la viscosidad de la matriz de fluido, la turbulencia, la fricción entre partículas y la colisión entre las mismas.

La cohesión entre partículas finas de sedimento controla el comportamiento no newtoniano de la matriz del fluido. Esta cohesión contribuye al esfuerzo de cedencia τ_y , que debe ser excedido por una tensión aplicada para iniciar el movimiento del fluido.

Para grandes tasas de corte (du/dy , velocidad de deformación), como puede ocurrir en abanicos aluviales empinados, pueden generarse tensiones turbulentas. Una componente adicional de la tensión de corte, la dispersiva, aparece en flujos turbulentos por la colisión de las partículas de sedimento bajo grandes tasas de deformación. Las tensiones dispersivas altas ocurren cuando las partículas más grandes de sedimento dominan el flujo y el porcentaje de partículas cohesivas es pequeño. A muy altas concentraciones de sedimentos finos, el impacto turbulento y dispersivo entre partículas es suprimido, y el flujo se aproxima a uno laminar.

La concentración de sedimentos puede variar drásticamente en un mismo evento de crecida, alternándose el dominio de las tensiones viscosas y turbulentas, produciéndose flujos pulsantes (Brea, 2003).

La tensión de corte total en flujos hiperconcentrados de sedimentos, puede ser calculada por la suma de cinco componentes:

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde la tensión de corte total τ depende del esfuerzo de cedencia cohesivo τ_c , la tensión de corte de Mohr-Coulomb τ_{mc} , la tensión de corte viscosa τ_v , la tensión de corte turbulenta τ_t , y la tensión de corte dispersiva τ_d . Escribiendo la ecuación anterior en términos de la tasa de corte dv/dy o gradiente de velocidad, se obtiene la ecuación cuadrática reológica publicada por O'Brien y Julien en 1985:

$$\tau = \tau_y + \mu (du/dy) + \eta(du/dy)^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde τ_y es el esfuerzo de cedencia, μ es la viscosidad dinámica, (du/dy) es el gradiente de velocidades normal a la dirección del flujo, η es el parámetro turbulento-dispersivo. El primer término del segundo miembro de la ecuación 2, que describe el esfuerzo debido a la cohesión entre las partículas finas de sedimento, es una propiedad del material y no depende de la tasa de deformación. El segundo término describe el esfuerzo viscoso del fluido interactuando con las

partículas de sedimento. La suma de los dos primeros términos corresponde a la ecuación de los fluidos de Bingham. El último término expresa los efectos de la turbulencia y los efectos del esfuerzo dispersivo inducido por las colisiones entre las partículas de sedimento (Aguirre, 2004).

La resolución de la ecuación presentada permite obtener resultados de interés para una aplicación ingenieril del problema de flujos hiperconcentrados. La ausencia de los datos básicos necesarios, más la dificultad de determinarlos o definirlos, complica el uso de esta herramienta en la mayoría de los casos, por lo que debe recurrirse al empirismo (Brea, 2003).

Una gran cantidad de investigaciones han subrayado lo complejo de la naturaleza de los materiales que “fluyen” en las distintas etapas de un aluvión torrencial. Hay que destacar que la mezcla de agua de lluvia con materiales presentes en el suelo, para formar un lodo o barro con un alto contenido de sólidos de gran diversidad de tamaños complica de manera importante el estudio de estos fenómenos. Por esta razón, la mayor parte de los autores consideran que la reología es un elemento crucial a la hora de modelar, ya que permite el análisis de las deformaciones de los distintos elementos presentes en el fluido durante su movimiento (Blanco, 2003).

Las tendencias utilizadas para modelar físicamente los aludes torrenciales pueden dividirse según la naturaleza del fluido en dos tipos (Blanco, 2003):

- ✓ Separar la fase sólida y líquida, modelándose de manera independiente el comportamiento reológico de la fase líquida o matriz.
- ✓ Se considera el conjunto como una mezcla con propiedades promedio, modelándose su comportamiento como un flujo único.

3.4.4. Detención de Aludes Torrenciales

El impacto directo de los aludes torrenciales contra puentes, casas, zonas cultivadas, industrias, etc., debe ser evitado por todos los medios, pues sus efectos son devastadores. Los métodos más utilizados para controlarlos, son los siguientes (Suárez, 1993):

3.4.4.1. Estabilización de la cuenca para reducir la erosión

Sembrar y mantener plantas de raíces profundas, terracear y prevenir el fuego. Este tipo de medidas pueden ser usadas solas o combinadas. El terraceo no es aplicable en áreas rocosas con una capa delgada de suelo. Este tipo de método es el menos efectivo, ya que se requieren muchos años para ver algunos resultados, por lo que es apreciable si no se necesita control inmediato y el costo de las otras medidas es prohibitivo.

3.4.4.2. Presas de control de sedimentos

Pueden ser del tipo cerrado o abierto, también llamadas impermeables o permeables, respectivamente. Ambas cumplen la función de reducir la concentración de sedimentos y la descarga pico de las crecientes.

La selección del tipo de presa a usar para el control de los sedimentos depende en buena medida del tipo de flujo o alud torrencial que se pueda generar en la cuenca; por ejemplo, los flujos de detritos exigen la construcción de presas abiertas ranuradas en el cañón de los torrentes para remover los grandes clastos de la matriz del flujo. Los flujos de barro por otro lado requieren de la construcción de presas abiertas con ventanas (Banesco Seguros C.A., 2006).

3.4.4.2.1. PRESAS CERRADAS

Son las más utilizadas para la corrección de torrentes, que retienen todos los sedimentos transportados por la corriente hasta que se produce la colmatación total del vaso de almacenamiento (Ver foto 11). Generalmente son de trazado recto y para su construcción se utilizan el concreto, concreto ciclópeo y mampostería hidráulica.



Foto 11. Presa cerrada de gaviones en Venezuela funcionando en condiciones hidráulicas normales (Tomada por: Instituto de Mecánica de los Fluidos, Febrero de 2.005)

Las presas cerradas han constituido por décadas la única forma efectiva de detener las lavas torrenciales. Ello se debe a lo siguiente:

- Una vez colmatado el embalse de una presa situada al pie de un deslizamiento potencial en una ladera, se produce un efecto estabilizante en la base del mismo por parte de la masa de sedimentos retenidos por la presa, que se opone al deslizamiento, ver figura 3. Los deslizamientos de terreno constituyen una de las causas principales de la formación de aludes torrenciales.
- Antes de que ocurra la colmatación del embalse las presas constituyen una barrera efectiva que corta el avance del alud torrencial.
- Una vez ocurrida la sedimentación completa del embalse se produce un efecto de frenado, favorable para la detención de los aludes. Ello se debe al aumento del ancho del cauce (superficie sedimentada del embalse) y disminución del caudal unitario por una parte, y por otra a la disminución de la pendiente de dicha superficie respecto a la del cauce original.

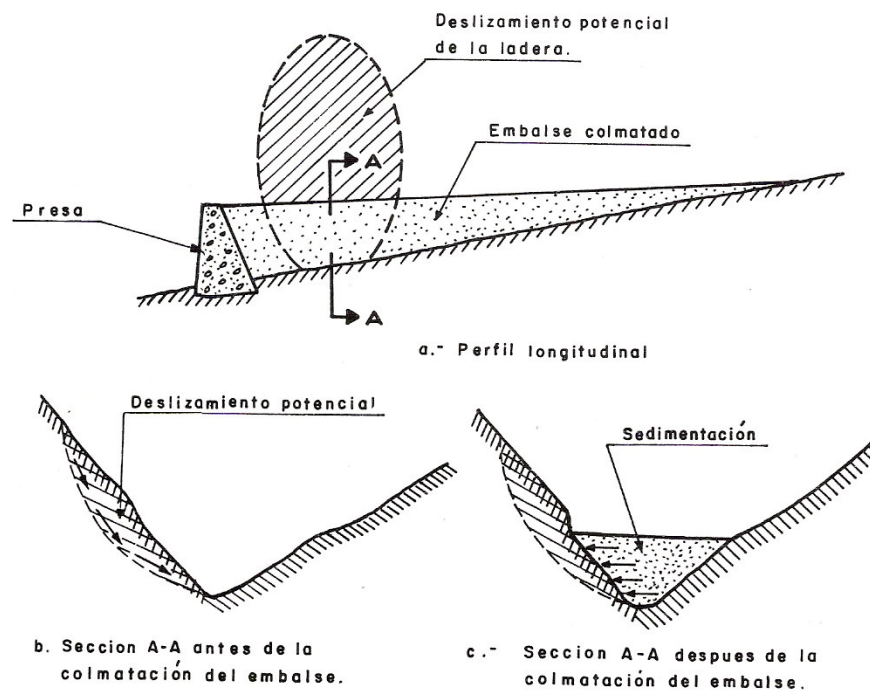


Figura 3. Efecto de estabilización en los deslizamientos. (Tomado de: “Presas de corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos”, Suárez V. Luís M).

De acuerdo a las investigaciones efectuadas por el Public Works Research Institute de Japón, un alud torrencial puede ser detenido cuando (Suárez, 1993):

- La pendiente del cauce es menor de 10° ($s < 0,17$)
- La pendiente del cauce se reduce a la mitad de la del tramo anterior.
- El ancho del cauce aumenta a más del doble respecto al del tramo anterior.

Generalidades de diseño:

Las presas cerradas poseen ciertos elementos que le permiten manejar las crecientes como vertederos o aliviaderos, ubicados generalmente sobre la presa, cumplen la función de dar salida a los caudales de las crecientes en forma segura para la estabilidad de la obra, evitando socavación lateral de la misma.

Para evitar la socavación al pié de la presa se recurre a la construcción de una protección de concreto, mamposterías o enrocado en la zona de incidencia del chorro aguas abajo de la presa.

También se puede construir un contra dique aguas abajo de la presa, el cual tiene por función crear un estanque disipador de la energía del flujo.

Posee mechinales o barbacanas que son pequeñas aberturas, generalmente de sección transversal circular, rectangular o cuadrada, que se dejan en el cuerpo de la presa y que cumplen las siguientes funciones:

- Aliviar parcialmente la presión hidrostática al permitir el drenaje del agua, tanto antes como después de la colmatación del embalse, lo que disminuye el empuje sobre la presa, mejorando su estabilidad.
- Permitir el paso del flujo durante la construcción de la presa.
- Permitir el vaciado del embalse después de la ocurrencia de una creciente, lo que permite disponer de una cierta capacidad de almacenamiento para mitigar el caudal pico de salida de la próxima creciente.
- Evitar la interrupción del flujo durante el llenado del embalse, proporcionando un caudal continuo a través de la presa, para su utilización aguas abajo.

3.4.4.2.2. PRESAS ABIERTAS

En los años 50 surgió en Francia un tipo de presa caracterizado por presentar grandes espacios abiertos en su estructura y que en las últimas décadas se ha venido difundiendo cada vez más por todo el mundo (Suárez, 1993).

Su funcionamiento básico es el de retener de manera selectiva los sedimentos transportados por la corriente, dejando pasar aguas abajo los materiales más finos junto con el agua y reteniendo los sólidos de mayores dimensiones. En realidad, todas las presas de corrección de torrentes cumplen en mayor o menor grado esta función.

Mediante la retención selectiva de los sólidos de mayor tamaño se logra una serie de ventajas que caracterizan el funcionamiento de las presas abiertas (Suárez, 1993):

- El volumen del embalse se utiliza en forma óptima, al retener en él los materiales sólidos de mayores dimensiones, que son los que causan los mayores daños a la infraestructura existente aguas abajo.
- Los materiales de tamaños medios y finos quedan depositados temporalmente en el embalse debido al remanso que se produce como efecto de la retención del flujo por la presa. Al ceder la creciente, éstos materiales son arrastrados gradualmente aguas abajo a través de las aberturas de la presa, con lo que se evita que el flujo tenga una concentración excesiva de sedimentos durante el pico de la misma. Los sólidos más voluminosos no pueden pasar por las aberturas de la presa y en consecuencia quedan retenidos.
- Los cuerpos flotantes voluminosos tales como árboles, troncos y ramas quedan retenidos, con lo cual se evita que los mismos se traben en los puentes existentes aguas abajo o en sitios estrechos del cauce, represando el flujo. Posteriormente al romperse la barrera, podría ocurrir una creciente de peores consecuencias que las naturales. Además, la obstrucción también podría dar origen a desbordamientos e inundaciones aguas arriba de la misma.
- Al permitir el tránsito aguas abajo de los sedimentos medios y finos estas presas no causan efectos de degradación importantes en el cauce, ni producen efectos notables de erosión (retroceso) en las playas fluviales, lacustre y marítimas, cuyo equilibrio está afectado por el caudal sólido transportado por el río o torrente.
- Por su estructura abierta, estas obras drenan las crecientes más rápidamente que las presas cerradas, provistas de mechinales (con menor capacidad de descarga), por lo que en un tiempo menor dejan espacio disponible en el embalse para el almacenamiento temporal de la siguiente creciente.

- El embalse se va colmatando gradualmente con los materiales sólidos más voluminosos, por lo que el relleno es altamente permeable. Una fracción importante del caudal aportado por la cuenca se infiltra en el sedimento, propiciando un flujo subterráneo beneficioso para la estabilidad del torrente.
- Efectividad en la detención de los aludes torrenciales, debido a que estas presas toman un tiempo mayor para colmatarse que las cerradas. De esta manera, mantienen su protección por más tiempo. Al separar el agua de los sólidos mayores, producen una gran disipación de la energía de la masa fluyente.

Tipos de Presas Abiertas:

En general, toda presa que posea grandes aberturas en su estructura, se considera abierta. Se construyen de diferentes materiales: concreto, concreto ciclópeo, concreto armado, perfiles y tubos de acero, gaviones, y roca en los diques laterales de cierre.

Existen presas abiertas de formas muy variadas, lo que responde a la idea de adaptarlas lo mejor posible a las características del torrente y de sus sedimentos. Entre las presas abiertas más comunes se encuentran:

Con Ventanas:

Son presas de concreto, generalmente de gravedad o de arco, que presenta una o varias aberturas cuadradas, rectangulares o circulares en la parte central, bajo el vertedero, la abertura no alcanza la cresta, ver foto 12. El tamaño de las aberturas es función del diámetro de los peñones que se deseen retener.

Con Ranura:

Son presas cuya parte central está formada por una hendidura estrecha que llega o se acerca al fondo del cauce, la abertura alcanza la cresta del vertedero (Banescos Seguros, C.A., 2006), ver foto 13. Se puede considerar a la presa como dividida por la ranura en dos elementos de gravedad.



Foto 12. Presa de Ventana en Venezuela funcionando en condiciones hidráulicas normales (Tomada por: El Instituto de Mecánica de los Fluidos en Febrero de 2.005)



Foto 13. Presa ranurada en Venezuela funcionando en condiciones hidráulicas normales (Tomada por: El Instituto de Mecánica de los Fluidos en Febrero de 2.005)

La ranura se dimensiona para que se forme un resalto hidráulico aguas arriba de la presa durante las crecientes, produciéndose así una pérdida de energía al pasar el régimen de rápido a lento. El resalto propicia la sedimentación de los materiales más gruesos en el embalse, foto 14. Al terminar la creciente los caudales menores producen una erosión regresiva a partir de la ranura, que arrastra paulatinamente los sedimentos finos y medios, dejando en el embalse principalmente los más gruesos. Si las aberturas son lo suficientemente grandes, los eventos ordinarios (crecientes anuales) no deberían reducir su capacidad de almacenamiento, dejándola intacta para las grandes crecientes (Banesco Seguros C.A., 2006).

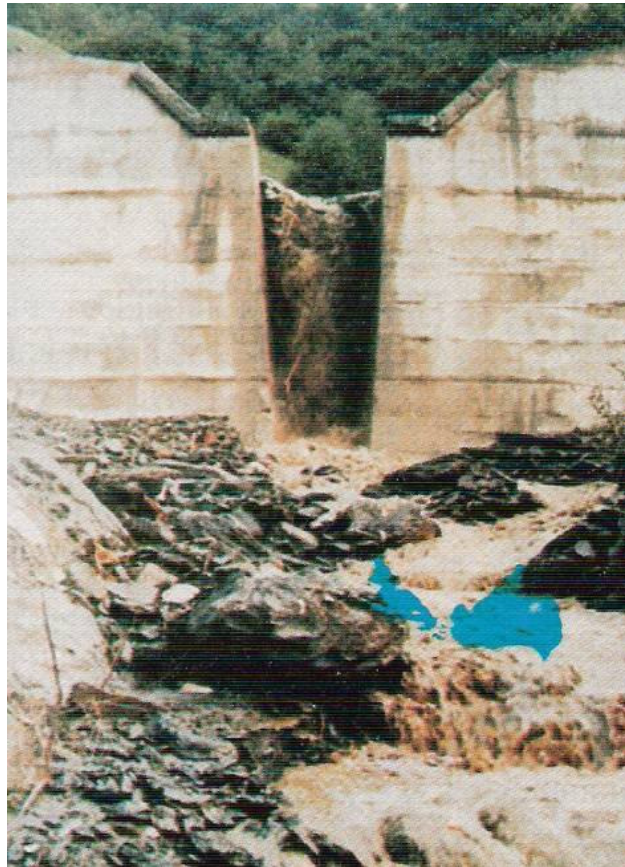


Foto 14. Vista de sedimentación de la ranura de una presa ranurada. Tomado de: "Presas de corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos". Suárez V., Luís M... 1993).

3.4.5. La pendiente de compensación

Al construirse en un cauce una presa de retención de sedimentos y una vez producida la colmatación de la misma, necesariamente deberá ajustarse la pendiente del sedimento a las nuevas condiciones impuestas por la obra, las cuales son (Suárez, 1993):

-Implantación de una barrera fija en el cauce, la cual controla su descenso progresivo por erosión.

-Formación de un nuevo lecho sobre los sedimentos retenidos por la obra, con secciones hidráulicas de mayor anchura, lo que causa la disminución del radio hidráulico y de la profundidad del flujo.

La nueva pendiente aguas arriba de la presa colmatada, siempre es menor que la del cauce natural en el mismo tramo. La pendiente se modifica tendiendo hacia el equilibrio entre los volúmenes sólidos extraídos del aluvión del fondo por la fuerza tractiva del flujo y los depósitos en el mismo, por lo que se denomina comúnmente pendiente de compensación. Ver figura 4.

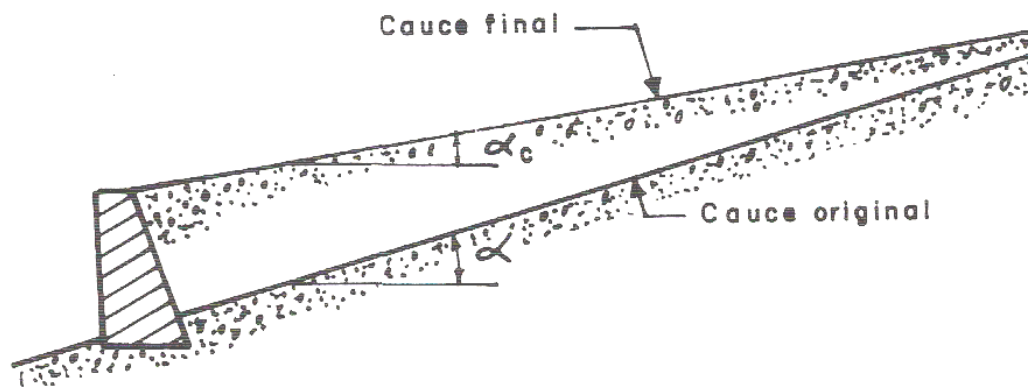


Figura 4. Pendiente de compensación (Tomado de: Luís M. Suárez Villar, “Presas de Corrección de Torrentes y Retención de Sedimentos” Pág. 3-30).

3.4.6. Presas de control de sedimentos en el Estado Vargas

Para Enero de 2005 se habían construido veinte (20) presas de retención de sedimentos en el Estado Vargas, repartidas entre las Cuencas de Curucutí, Guanape, Piedra Azul, Dos Comadres, Osorio, El Cojo, Alcantarilla, San José de Galipán (Macuto), Camurí Chico y Anare. Existen cuatro presas que tipifican el tipo de obra que se está utilizando en el Estado Vargas para el control de aludes torrenciales (Banesco Seguros, C.A., 2006), a continuación se discuten las características y el comportamiento que han tenido algunas de ellas:

La primera presa que se construyó en el Estado Vargas después de los eventos de 1999 fue la presa de Guanape, una presa ranurada de concreto armado de 4,5 m de altura. La presa se terminó

de construir en Mayo del 2001 y para Noviembre del mismo año estaba casi totalmente obstruida y sedimentada por la ocurrencia de una creciente importante del río, ver foto 15. A pesar de ser una presa abierta, la tormenta del 3 de Diciembre de 2001 (47mm de lluvia en dos horas con un período de retorno estimado de 2,5 años) la llenó completamente de sedimentos, debido a la obstrucción producida por los arrastres vegetales y troncos de árboles. Las crecientes de Febrero de 2005 (432mm en 4 días, medida en la estación Macuto), removieron una buena parte de los sedimentos y restos vegetales atrapados en la presa, los cuales pasaron a través de las ranuras y se acumularon entre el dique y el contradique, elevando el lecho del cauce del tramo aguas abajo en unos 3 m aproximadamente (ver foto 16).



Foto 15. Vistas desde aguas abajo de la Presa Guanape en dos diferentes épocas: después de finalizada la construcción en Mayo 2001 y Después de la creciente de Diciembre 2001, de izquierda a derecha. (Tomada por: El Instituto de Mecánica de los Fluidos)



Foto 16. Presa Guanape: Vista del vaso sedimentado en Diciembre 2001 y después de la creciente de Febrero 2005, de izquierda a derecha. (Tomada por: El Instituto de Mecánica de los Fluidos)

La presa de la Quebrada El Cojo (ver foto 17) es una presa abierta de altura 4m del tipo ranurada con aberturas de 1m de ancho, construida en gaviones. La presa abierta dispone de un contradique aguas abajo y su construcción fue finalizada en Octubre de 2002. La tormenta de Febrero de 2005 colmató casi totalmente con sedimentos gruesos el vaso de la presa, sobresaliendo peñones de más de 1m de diámetro.



Foto 17. Presa abierta ranurada en el río El Cojo: Vista desde aguas abajo después de su construcción en Octubre 2002 (izquierda). Vista de la acumulación de sedimentos gruesos aguas arriba del dique después de la tormenta de Febrero 2005 (derecha). (Tomada por: El Instituto de Mecánica de los Fluidos).

La presa de Camurí Chico (ver fotos 18 y 19) es también una presa abierta de 6 m de altura, hecha en gaviones, cuya construcción quedó inconclusa. El diseño contemplaba una estructura metálica en su parte central, para permitir el acceso de maquinaria con fines de mantenimiento. Por razones presupuestarias, la obra no pudo terminarse y se dejó la abertura central. La presa está provista de ventanas de 4m de altura por 1m de ancho para dejar pasar los sedimentos finos. La presa presenta un ligero grado de sedimentación. Se observa una acumulación de sedimentos gruesos en las márgenes aguas arriba y aguas abajo de la presa, sin embargo en la parte central de la sección ocupada por la abertura mayor, el material fue activamente removido.



Foto 18. Vista de la presa de Camurí Chico desde aguas abajo (izquierda) y de la abertura central de la presa desde aguas arriba (derecha). (Tomada por: El Instituto de Mecánica de los Fluidos)



Foto 19. Vista de la presa de Camurí Chico desde aguas arriba. (Tomada por: El Instituto de Mecánica de los Fluidos)

La presa de Macuto (ver foto 20) es una presa cerrada de gaviones de 7m de altura y se terminó de construir en Marzo de 2003. Levantamientos topográficos realizados por el IMF indicaban que para Enero de 2005 la presa presentaba una alta acumulación de sedimentos, conformado mayormente por material arenoso, limos y gravas, estando a tan solo 0,75 m de alcanzar la cresta del vertedero (ver foto 21). A pesar de no haberse producido tormentas significativas en la cuenca en el lapso de tiempo comprendido entre Marzo de 2003 y Enero de 2005, la presa se sedimentó

casi totalmente en esos 2 años. Esto es atribuible a la ausencia de ventanas o aberturas para dejar pasar los flujos ordinarios y su carga de sedimentos.



Foto 20. Panorámica de la presa de control de sedimentos y canalización de gaviones en el Río Macuto (San José de Galipán). (Tomada por: El Instituto de Mecánica de los Fluidos).



Foto 21. Vista del vaso de la presa Macuto aguas arriba en Enero de 2005 y después del evento de Febrero de 2005. (Tomada por: El Instituto de Mecánica de los Fluidos).

4. MÉTODO

4. MÉTODO

Para cumplir con los objetivos planteados en el presente Trabajo Especial de Grado se realizaron las siguientes actividades:

4.1. ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE LODO DE 25, 50 Y 75% DE CONCENTRACIÓN EN PESO

Se elaboraron tres (3) muestras de lodo de concentraciones en peso (C_w) de 25 %, 50 % y 75 %. Las mezclas estaban compuestas de agua, arcilla y arena. La parte sólida de la mezcla estaba constituida por 20% de arena para satisfacer los resultados de investigaciones acerca de la influencia de la arena en las muestras de lodo según Aguirre et al y Armanini et al (2004). Estas mezclas representan la matriz fina o fase líquida del alud torrencial. Las proporciones de cada uno de los materiales en cada una de las concentraciones se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Proporciones de cada uno de los materiales en cada una de las concentraciones.

| Concentración del lodo, C_w (%) | Kaolinita (Kg.) | Arena (Kg.) | Agua (Kg.) |
|-----------------------------------|-----------------|-------------|------------|
| 25 | 20 | 5 | 75 |
| 50 | 40 | 10 | 50 |
| 75 | 60 | 15 | 25 |

En la preparación de las muestras de lodo fueron necesarios los siguientes equipos:

- Balanza electrónica de precisión
- Recipientes con tapa de 150 litros
- Tobos calibrados en litros
- Pala

Siendo también necesarios los siguientes materiales:

- Arena suministrada por el Instituto de Mecánica de Fluidos, $d_{50}=1$ mm. Ver apéndice 1.
- Kaolinita comercial suministrada por VENECAOLIN, C.A.: Densidad de 2.6gr/cm^3 y partículas de diámetro menor a 0.002 mm. Ver apéndice 2.
- Agua de “chorro”.

Para la elaboración de las muestras de lodo se siguió el siguiente procedimiento basado en el propuesto por Blanco (2003):

1. Pesar en la balanza de precisión la cantidad de muestra sólida tanto de kaolinita como de arena.
2. Medir la cantidad agua de chorro con el tobo calibrado.
3. Mezclar la muestra sólida (kaolinita y arena) con la muestra líquida y almacenar en el recipiente con tapa de 150 litros.
4. Dejar reposar la muestra durante 10 minutos, para permitir la absorción del agua por parte de los sólidos y la presencia de las reacciones químicas.
5. Agitar periódicamente (ciclos de 15 a 20 oscilaciones cada 15 segundos) con pala y mano, durante 10 minutos.
6. Repetir los pasos 4 y 5 hasta obtener una apariencia homogénea.
7. Tomar una muestra del fluido y colocarla en una balanza de densidad para determinar la densidad de la misma.

4.2. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MUESTRAS DE LODO

Se midieron las propiedades físicas (viscosidad y densidad) de cada mezcla de lodo de concentraciones baja, media y alta (25%, 50%, 75%) semanalmente, por un periodo de nueve semanas (desde el 17/03/2006 hasta 12/05/2006) en el cual, las muestras se encontraban en estado de reposo.

En la medición de las propiedades físicas de las muestras de lodo fueron necesarios los siguientes equipos, ver foto 22:

- Viscosímetro digital: Marca Visco Star plus.
- Balanza de densidad: Origen chino, rango 1-3 gr. /cm³, apreciación 0,01.

Para realizar dichas mediciones se siguió el siguiente procedimiento:

1. Mezclar el lodo a analizar hasta lograr una consistencia homogénea
2. Tomar una muestra de lodo y dividirla en dos. Con una muestra se mide la densidad (ρ) mediante el uso de una balanza de densidad y con la otra medir la viscosidad cinemática

(v) mediante el uso de un viscosímetro digital, en el cual se introduce como dato la densidad obtenida y las revoluciones por minuto (rpm) estando éstas entre un rango de 30 a 200 rpm.

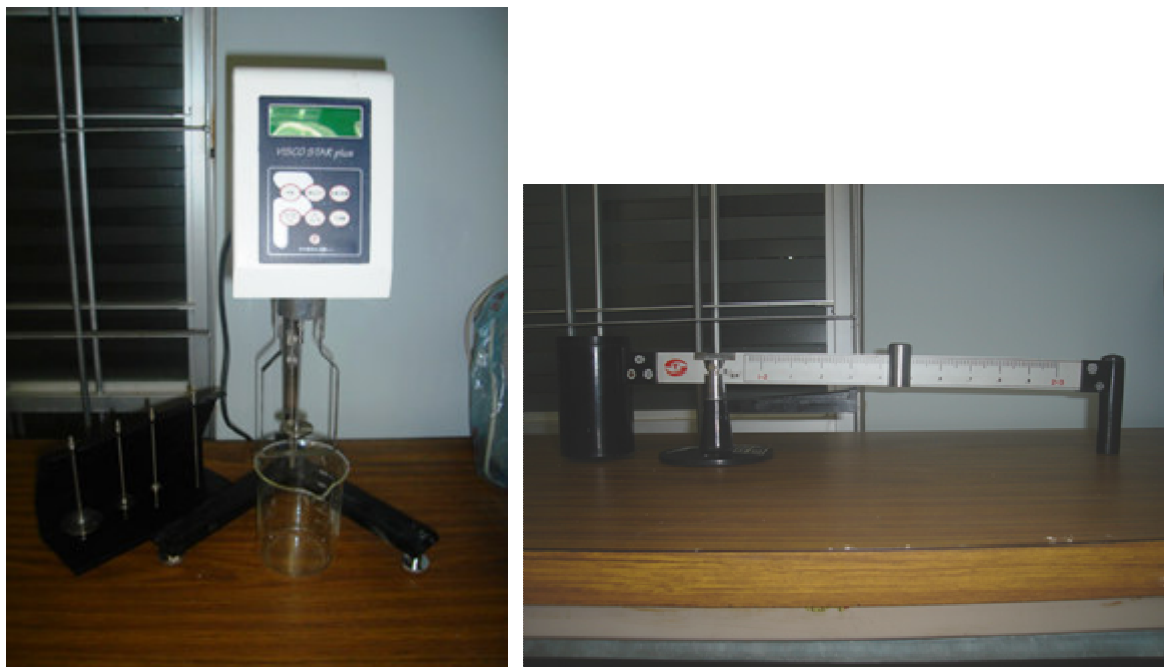


Foto 22. Viscosímetro digital y la balanza de densidad, de izquierda a derecha.

El procedimiento de medición de la viscosidad se realiza de forma rápida para evitar la sedimentación de las partículas sólidas.

4.3. DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LOS MODELOS DE PRESAS

Se diseñaron y elaboraron tres (3) tipos de presas, una cerrada y dos abiertas (una ranurada y una con ventanas), en madera, las cuales tipifican los tipos de presas construidas en el Estado Vargas (Venezuela), sitio geográfico utilizado como referencia.

Las presas no se diseñaron a escala sino en función de la necesidad de la visualización clara del fenómeno, de las dimensiones del canal utilizado y en proporciones similares a las del sitio de referencia, ver figura 5. Por lo tanto, no se tomó en cuenta el criterio teórico para el diseño del ancho de las aberturas que plantea Suárez (1993).

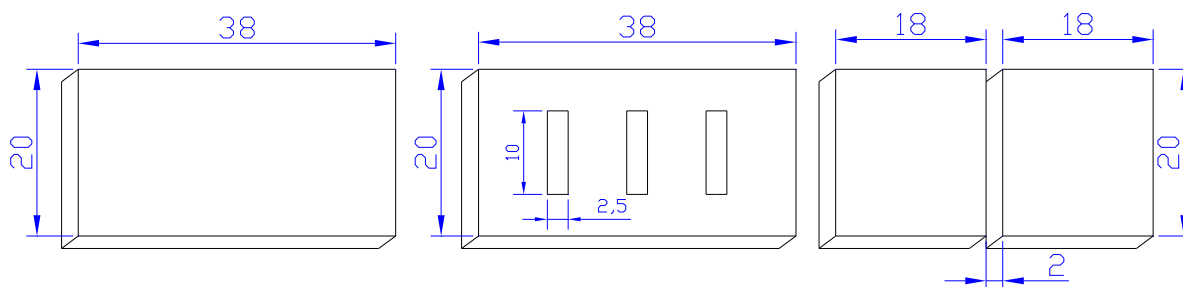


Figura 5. Modelos de presas utilizados en los ensayos experimentales: presa cerrada, presa de ventana, presa ranurada, de izquierda a derecha.

4.4. REALIZACIÓN DEL MODELAJE FÍSICO

4.4.1. Descripción del equipo experimental

El modelaje físico del comportamiento hidráulico de presas para el control o retención de sedimentos fue llevado a cabo en su totalidad en el Edificio Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela, en un canal experimental de sección transversal rectangular, que puede ser inclinado de 2% a 8% de pendiente. El canal tiene 8m de largo y 38cm de ancho, con paredes de vidrio de 40 cm. de alto y fondo de madera barnizada. Aguas arriba del canal se encuentran dos puertas deslizantes o compuertas móviles formando un tanque de almacenamiento de 70cm de largo por 38cm de ancho. El canal posee un sistema de recirculación de agua, ver figura 6 y foto 23.

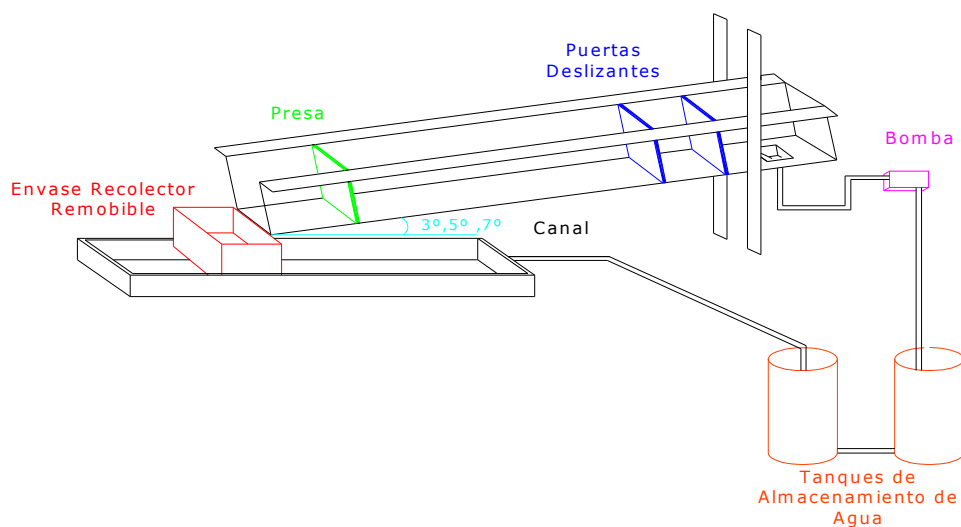


Figura 6. Esquema del equipo experimental utilizado en los ensayos experimentales.



Foto 23. Partes del equipo experimental utilizado en el modelaje físico.

4.4.2. Descripción de los ensayos experimentales:

En la realización de los ensayos experimentales se utilizaron, además de los anteriormente citados, los siguientes materiales y equipos:

- Cinta métrica: rango 3 m, marca Stanley y apreciación 1mm.
- Vaselina: marca Farmatodo en presentación de 100 gr.
- Cámaras Sony y Handycam

Ensayos con las presas vacías:

Condiciones de trabajo:

- **Tipos de presa:** Cerrada, Ranurada y de Ventana.
- **Densidad de lodo (ρ_i):** 1,25 y 1,42 g/cm³.
- **Pendiente del fondo del canal (S):** 3%, 5% y 7%.

Procedimiento experimental:

1. Posicionar los equipos de video.
2. Sellar las compuertas del tanque de almacenamiento untando vaselina en sus guías.
3. Colocar envase recolector en el borde inferior del canal.

4. Mezclar con la pala el lodo hasta lograr una consistencia homogénea.
5. Medir la densidad del lodo a través de una muestra representativa (ρ_i).
6. Llenar el tanque de almacenamiento con el volumen de control de 54lts de mezcla de lodo (V_t).
7. Realizar levantamiento súbito de la compuerta.
8. Medir el volumen de lodo retenido por la presa (V_r), a partir de mediciones de largo, ancho y profundidad de la cuña de lodo retenido aguas arriba por la presa.
9. Medir el volumen del lodo pasante o no retenido por la presa, recolectado en el envase recolector (V_p).

Ensayos con presas colmatadas:

Condiciones de trabajo:

- **Tipos de presa:** Ranurada y de Ventana.
- **Densidad del lodo (ρ_i):** 1,25 y 1,42 g/cm³.
- **Pendiente del fondo del canal (S):** 3%, 5% y 7%.

Procedimiento experimental:

1era Etapa: Proceso de colmatación de presas

1. Colmatar o sedimentar la presa, dejando escurrir agua de chorro con arena (la misma arena usada en la preparación de las mezclas de lodo) hasta observar que el nivel de arena, aguas arriba de la presa, se mantenga constante.
2. Medir variaciones de altura y de longitud en la cuña de arena formada, para la obtención del perfil longitudinal en el eje central y medir la longitud total de la misma (L_1).

2da Etapa: Proceso de lanzamiento de lodo

3. Lanzar la mezcla de lodo sobre la presa sedimentada siguiendo todos los pasos utilizados en los ensayos con las presas vacías, sin el paso 8.
4. Medir la densidad del lodo recolectado o pasante a través de una muestra representativa (ρ_f).

5. Medir variaciones de altura y de longitud en la cuña de arena formada y medir la longitud total de la misma (L2).

3era Etapa: Proceso de escorrentía normal (flujo de agua y arena)

6. Dejar pasar agua de chorro a razón de 1lt/s durante 30 min.
7. Simultáneamente al paso 6, agregar arena uniformemente hasta completar $0,05 \text{ m}^3$ (Va).
8. Medir el volumen de arena que no es retenido por la presa o pasante (Vap)
9. Medir variaciones de altura y de longitud en la cuña de arena formada y medir la longitud total de la misma (L3).

En la realización de los ensayos experimentales se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Se midió la densidad del flujo de lodo antes de cada ensayo, para garantizar que no ocurrieran cambios importantes en la composición del mismo diariamente.
- Para llevar un control de los ensayos se recopiló la información en planillas de datos. Ver Apéndice 3.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. MEDICIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LAS MUESTRAS DE LODO

Los resultados obtenidos de las mediciones de densidad y viscosidad cinemática en función de diferentes velocidades de deformación angular, de mezclas de lodo de tres (3) concentraciones distintas; baja, media y alta, durante nueve semanas se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Resultados de la medición de las propiedades de las mezclas de lodo

| Fecha | Concentración de Lodo, Cw (%) | Densidad del lodo, ρ (gr./cm ³) | Velocidad de deformación angular, ω rpm | Velocidad de deformación angular, ω (Rad./s) | Viscosidad cinemática, ν (mm ² /s) | |
|------------------------|-------------------------------|--|--|---|---|------|
| Semana 1 17/03/2006 | 25% | 1,16 | 30 | 3,14 | 10,5 | |
| | | | 50 | 5,24 | 8,8 | |
| | | | 100 | 10,47 | 14,4 | |
| | | | 200 | 20,94 | 19,2 | |
| | 50% | 1,38 | 30 | 3,14 | 325,2 | |
| | | | 50 | 5,24 | 208,9 | |
| | | | 100 | 10,47 | 124,7 | |
| | | | 200 | 20,94 | 85,0 | |
| | 75% | 1,70 | | | el instrumento no registra valor estable | |
| | Semana 2 23/03/2006 | 25% | 1,16 | 30 | 3,14 | 9,7 |
| | | | | 50 | 5,24 | 8,8 |
| | | | | 100 | 10,47 | 14,5 |
| 200 | | | | 20,94 | 18,8 | |
| 50% | | 1,37 | 30 | 3,14 | 29,8 | |
| | | | 50 | 5,24 | 21,5 | |
| | | | 100 | 10,47 | 24,5 | |
| | | | 200 | 20,94 | 27,2 | |
| 75% | | 1,70 | | | el instrumento no registra valor estable | |

Tabla 3. Continuación.

| | | | | | |
|------------------------|-----|------|-------|--------|---|
| Semana 3 31/03/2006 | 25% | 1,16 | 30 | 3,14 | 9,0 |
| | | | 50 | 5,24 | 8,1 |
| | | | 100 | 10,47 | 14,2 |
| | | | 200 | 20,94 | 18,5 |
| | 50% | 1,37 | 30 | 3,14 | 221,0 |
| | | | 50 | 5,24 | 144,6 |
| | | | 100 | 10,47 | 84,3 |
| | | | 200 | 20,94 | 68,1 |
| | 75% | 1,70 | 30 | 3,14 | el instrumento no registra valor estable |
| | | | 60 | 6,28 | 3950,0 |
| | | | 100 | 10,47 | 3240,0 |
| | | | 200 | 20,94 | 2430,0 |
| Semana 4 07/04/2006 | 25% | 1,16 | 30 | 3,14 | 9,3 |
| | | | 50 | 5,24 | 7,8 |
| | | | 100 | 10,47 | 14,2 |
| | | | 200 | 20,94 | 19,3 |
| | 50% | 1,37 | 30 | 3,14 | 266,8 |
| | | | 50 | 5,24 | 173,5 |
| | | | 100 | 10,47 | 101,3 |
| | | | 200 | 20,94 | 74,7 |
| | 75% | 1,70 | 30 | 3,14 | el instrumento no registra valor estable |
| | | | 60 | 6,28 | 3630,0 |
| | | | 100 | 10,47 | 3400,0 |
| | | | 200 | 20,94 | 2150,0 |
| Semana 6 21/04/2006 | 25% | 1,17 | 50 | 5,24 | 10,5 |
| | | | 100 | 10,47 | 13,4 |
| | | | 200 | 20,94 | 20,8 |
| | 50% | 1,31 | 50 | 5,24 | 64,4 |
| | | | 100 | 10,47 | 48,5 |
| | | | 200 | 20,94 | 47,9 |
| | 75% | 1,72 | 30 | 3,14 | el instrumento no registra valor estable |
| | | | 60 | 6,28 | 3322,0 |
| 100 | | | 10,47 | 2811,7 | |
| | | | 200 | 20,94 | 2026,5 |

Tabla 3. Continuación.

| | | | | | | |
|------------------------|------------------------|------|------|-------|---|------|
| Semana 7 28/04/2006 | 25% | 1,17 | 60 | 6,28 | 10,1 | |
| | | | 100 | 10,47 | 13,1 | |
| | | | 200 | 20,94 | 17,4 | |
| | 50% | 1,31 | 60 | 6,28 | 58,0 | |
| | | | 100 | 10,47 | 44,5 | |
| | | | 200 | 20,94 | 45,1 | |
| | 75% | 1,72 | 30 | 3,14 | el instrumento no registra valor estable | |
| | | | 60 | 6,28 | 3250,0 | |
| | | | 100 | 10,47 | 2390,0 | |
| | | | 200 | 20,94 | 1560,0 | |
| | Semana 9 12/05/2006 | 25% | 1,17 | 50 | 5,24 | 8,1 |
| | | | | 60 | 6,28 | 13,6 |
| 100 | | | | 10,47 | 18,0 | |
| 200 | | | | 20,94 | 19,7 | |
| 50% | | 1,39 | 50 | 5,24 | 175,2 | |
| | | | 60 | 6,28 | 145,2 | |
| | | | 100 | 10,47 | 102,6 | |
| | | | 200 | 20,94 | 76,4 | |
| 75% | | 1,71 | 50 | 5,24 | 2748,0 | |
| | | | 60 | 6,28 | 2851,9 | |
| | | | 100 | 10,47 | 2300,0 | |
| | | | 200 | 20,94 | 1545,1 | |

En esta tabla, en las tres concentraciones se cumple que, para valores iguales de velocidad de deformación de diferentes semanas, los valores de viscosidad presentan un comportamiento aleatorio, aumenta o disminuye sin patrón aparente que las relacione. Esta diferencia puede ser producto de las variaciones de presión atmosférica, humedad y temperatura del ambiente.

Pero si observamos una serie de mediciones de una misma semana con respecto a otra semana, se pueden apreciar dos tendencias distintas. Para lodo de 25% de concentración, la relación entre viscosidad y velocidad de deformación angular es creciente. Es decir, a medida que aumenta la velocidad disminuye la viscosidad (ver gráfico 1). En cambio, en los lodos de 50% y 75% de concentración, la relación entre estas variables es decreciente, a pesar de que las tres mezclas de

lodo están constituidas por los mismos elementos (ver gráficos 2 y 3). Lo que indica que la concentración de sólidos influye en el comportamiento de la mezcla y sus propiedades.

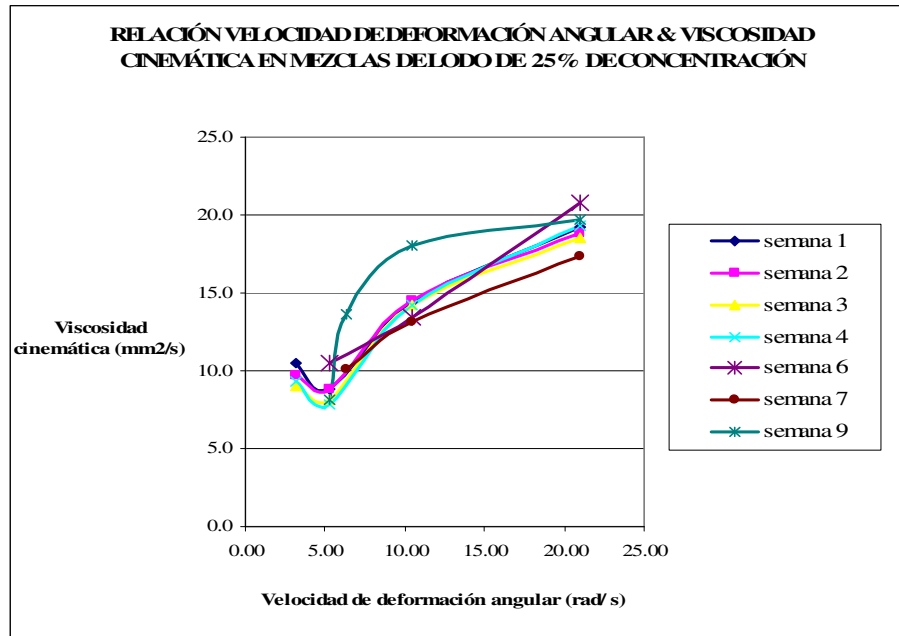


Gráfico 1. Relación entre velocidad de deformación angular y viscosidad cinemática en lodos de 25% de concentración.

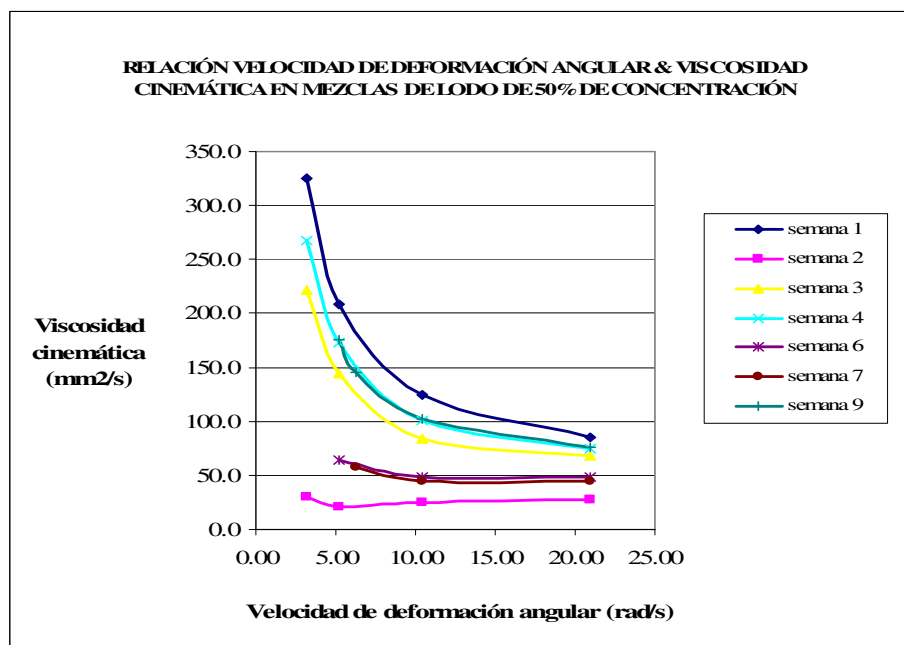


Gráfico 2. Relación entre velocidad de deformación angular y viscosidad cinemática en lodos de 50% de concentración.

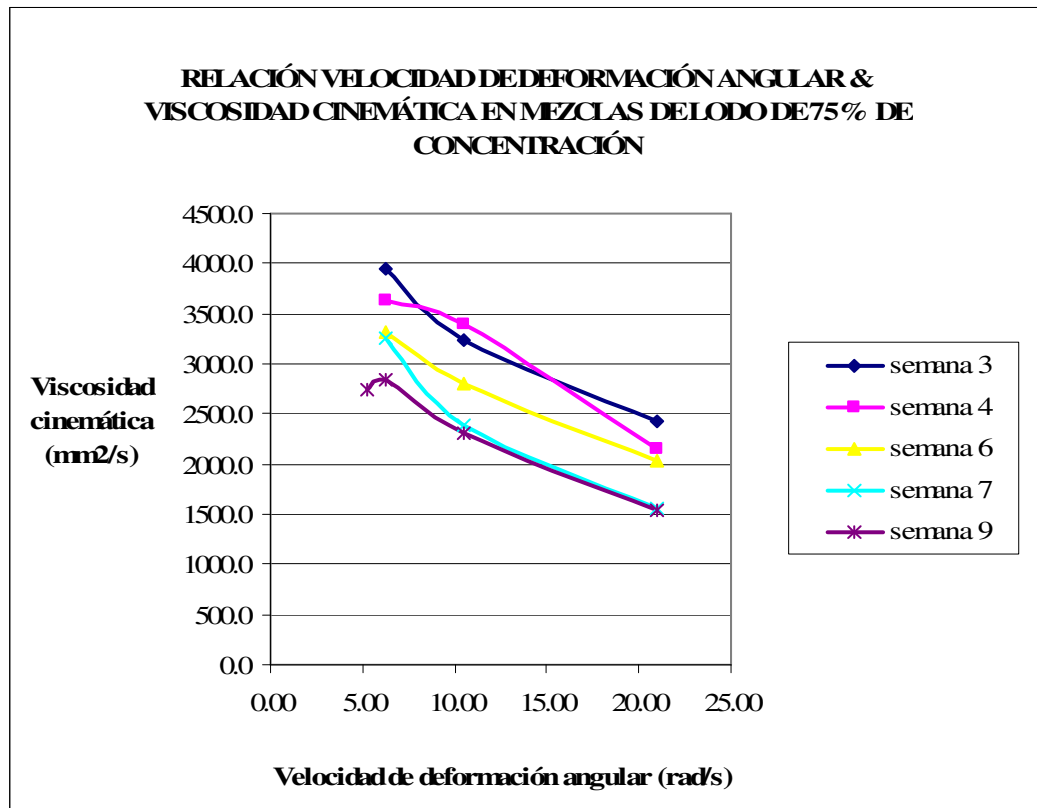


Gráfico 3. Relación entre velocidad de deformación angular y viscosidad cinemática en lodos de 75% de concentración.

Sin embargo, se observó a nivel cualitativo o visual que las mezclas lograron una estabilidad aparente en la consistencia de su textura que pudiera estar asociada a la estabilidad observada en los valores de densidad medidos, ver foto 24.



Foto 24. Muestras lodos de Cw 25%, 50%, 75%, de izquierda a derecha.

En base a lo anterior se establecieron los tiempos de estabilización de cada mezcla mostrados en la tabla 4.

Tabla 4. Tiempos de estabilización aparente de las mezclas de lodo.

| Concentración del lodo, C_w (%) | Tiempo de estabilización, T (semanas) |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 25 | 3 |
| 50 | 6 |
| 75 | 9 |

Es importante resaltar que el tiempo de estabilización de la mezcla de 50 % de concentración se definió tomando sólo en cuenta los datos de densidad superiores a $1,37 \text{ gr. /cm}^3$ y descartando aquellos datos de densidades inferiores.

Es de resaltar que, a pesar de haber seguido un protocolo para preparación de mezclas y medición de propiedades se demuestra que la mezcla no logra estabilizar o mantener constantes en el tiempo sus propiedades físicas. De lo que se infiere que no tiene que ver con la forma de elaboración sino con la naturaleza misma de la mezcla de lodo.

En todo caso, será necesario efectuar un mayor número de ensayos utilizando otra metodología o modificaciones en la misma con otros equipos para determinar si realmente no influye en las propiedades de la mezcla.

5.2. REALIZACIÓN DEL MODELAJE FÍSICO

5.2.1. Ensayos con las presas vacías

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el lanzamiento de mezclas de lodo, de dos concentraciones diferentes: 1,25 y 1,42 gr./cm³, sobre los tres tipos de presas vacías.

a) Lanzamiento de lodo de densidad 1.25mg/cm³:

Tabla 5. Resultados obtenidos del lanzamiento de lodo de densidad 1,25 gr./cm³ sobre presas vacías.

| Vt = 54 lts. | | Densidad de lodo, $\rho_i = 1,25 \text{ gr./cm}^3$ | | | | | | | | |
|--|----------------|--|----|-------------------|----|----|-----------------|----|----|--|
| Tipo de Presa | CERRADA | | | DE VENTANA | | | RANURADA | | | |
| Pendiente del fondo del Canal, S (%) | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 | |
| Volumen de lodo Retenido, Vr (lts) | 51 | 47 | 39 | 8 | 5 | 3 | 0 | 0 | 0 | |
| Volumen de lodo Pasante, Vp (lts) | 2 | 7 | 13 | 45 | 49 | 50 | 54 | 53 | 52 | |
| Pérdida de lodo, Vs (lts) $V_s = V_t - V_r - V_p$ | 1 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 | |

En la tabla 5, se observa que la presa ranurada no retienen lodo o esta cantidad es imperceptible por los instrumentos utilizados en la medición, a diferencia de lo que ocurre con las otras dos presas (cerrada y de ventana) donde permanece retenido un volumen considerable o medible. También se observa, en el caso de las presas cerrada y de ventana, que el volumen de lodo retenido es menor para pendientes mayores, esto esta relacionado con la capacidad de retención que presenta la presa por efecto de la geometría (volumen que se forma entre la presa, las paredes y el fondo del canal) aguas arriba de la misma. Este comportamiento se visualiza mejor en el gráfico 4.

En cuanto al volumen de lodo pasante parecen haber dos tendencias diferentes de comportamiento. Al aumentar la pendiente, en la presa cerrada y de ventana, el volumen de lodo pasante aumenta y en la presa ranurada disminuye, esto se debe a la diferencia tan pequeña entre los valores de volumen pasante (1 a 2 lt) que está relacionada con la pérdida de lodo. Ver gráfico 5.

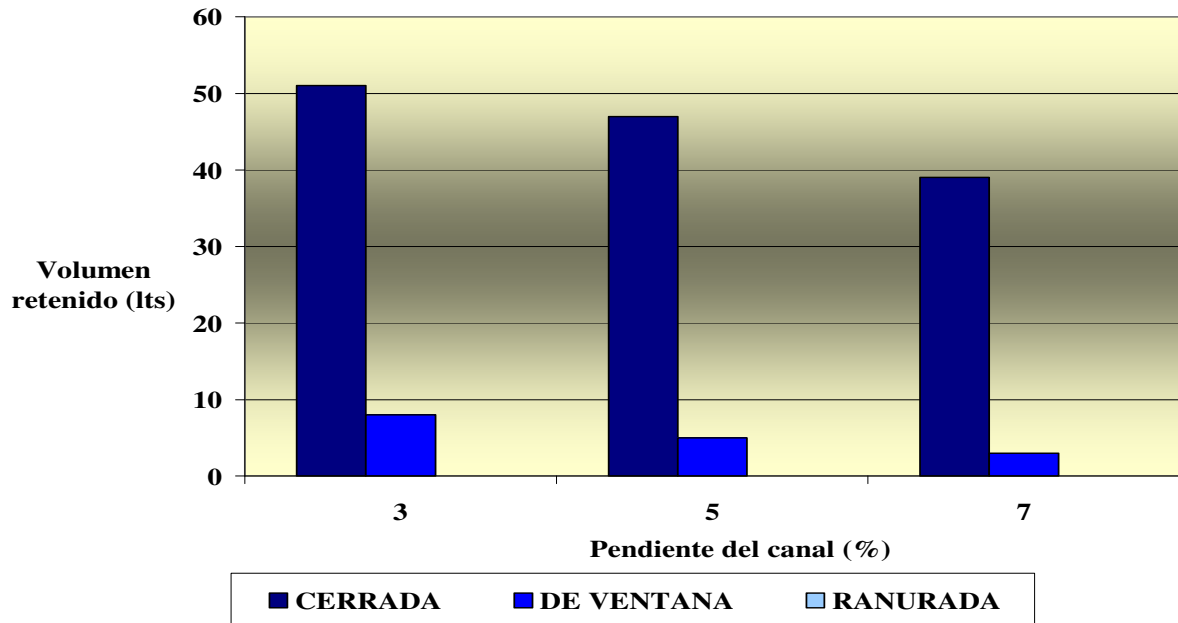


Gráfico 4. Relación entre volumen de lodo retenido y pendiente del canal en presas vacías. Densidad del lodo $1,25\text{gr}/\text{cm}^3$.

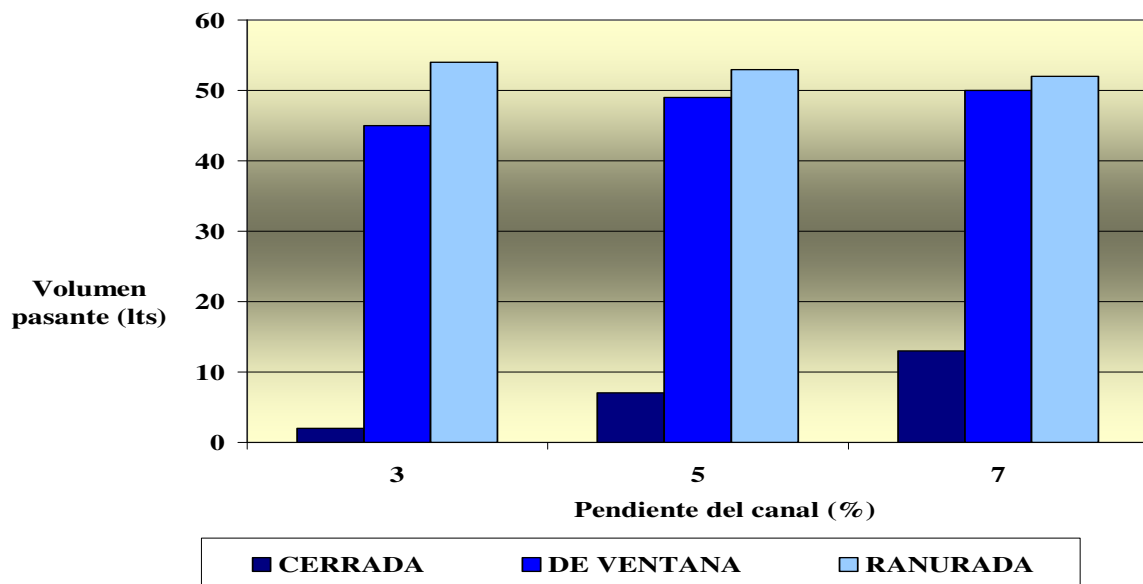


Gráfico 5. Relación entre volumen de lodo pasante y pendiente del canal en presas vacías. Densidad del lodo $1,25\text{gr}/\text{cm}^3$.

En general, las pérdidas de lodo son pequeñas y pudieran ser producto de la precisión y forma de la medición tanto del volumen retenido como del volumen pasante y del derramamiento del lodo a través de las paredes del canal en el momento del choque del mismo con la presa.

Como complemento de la información obtenida de la tabla, a continuación se muestran algunos ejemplos de la forma en que es retenido el lodo de manera permanente en los tres tipos de presa ensayados y del estado en que queda el fondo del canal. Ver fotos 25 a 27.

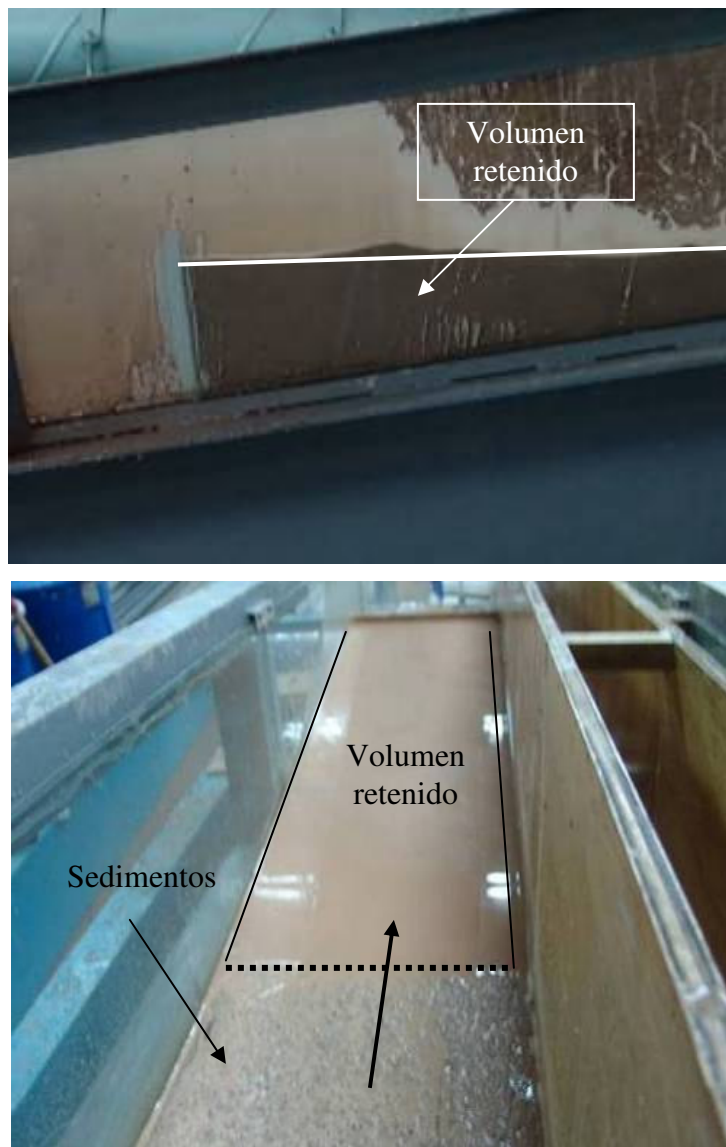


Foto 25. Retención del lodo aguas arriba de la presa cerrada. Pendiente del canal 7%. Densidad del lodo 1,25gr/cm³.

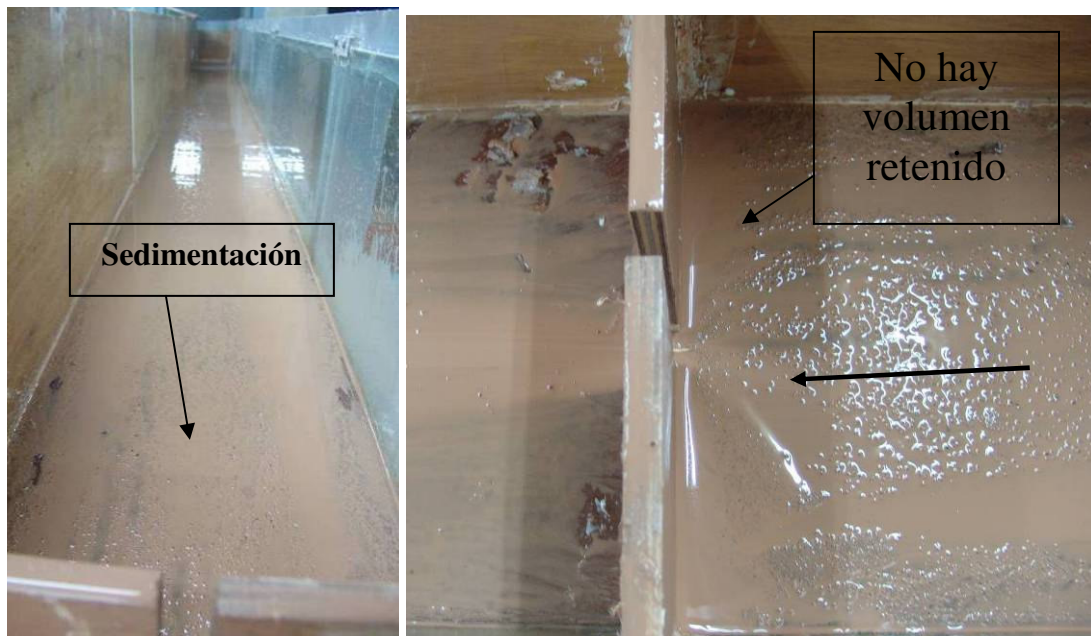


Foto 26. Retención del lodo aguas arriba de la presa ranurada. Pendiente del canal 7%. Densidad del lodo $1,25\text{gr}/\text{cm}^3$.

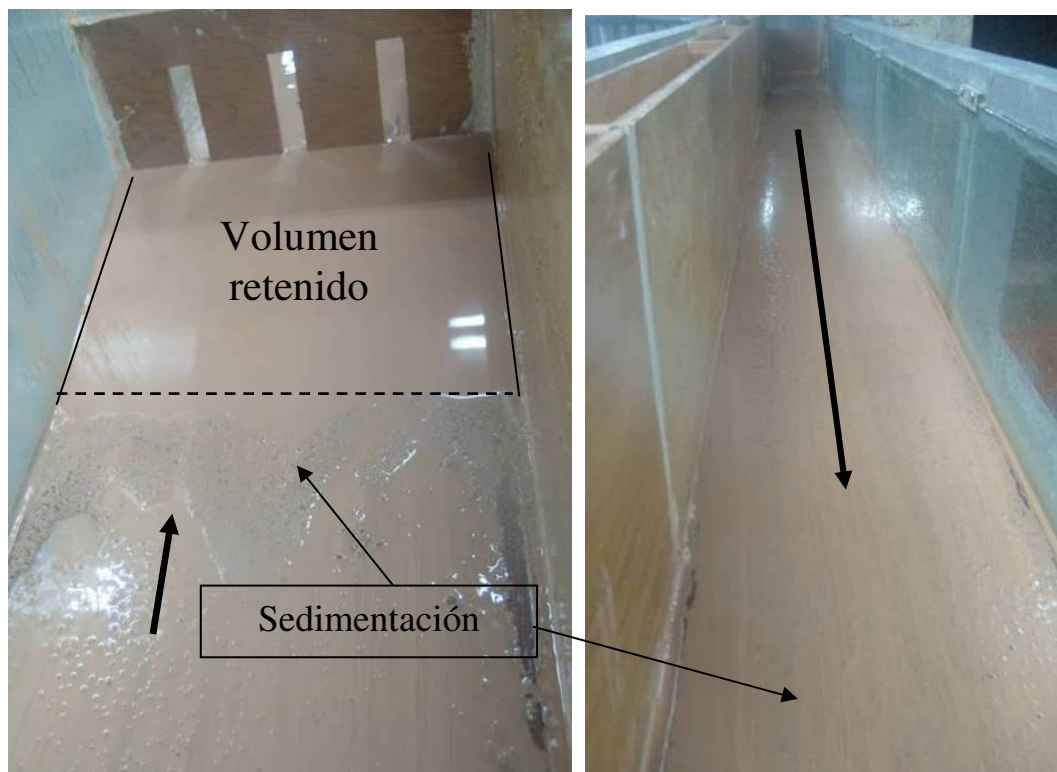
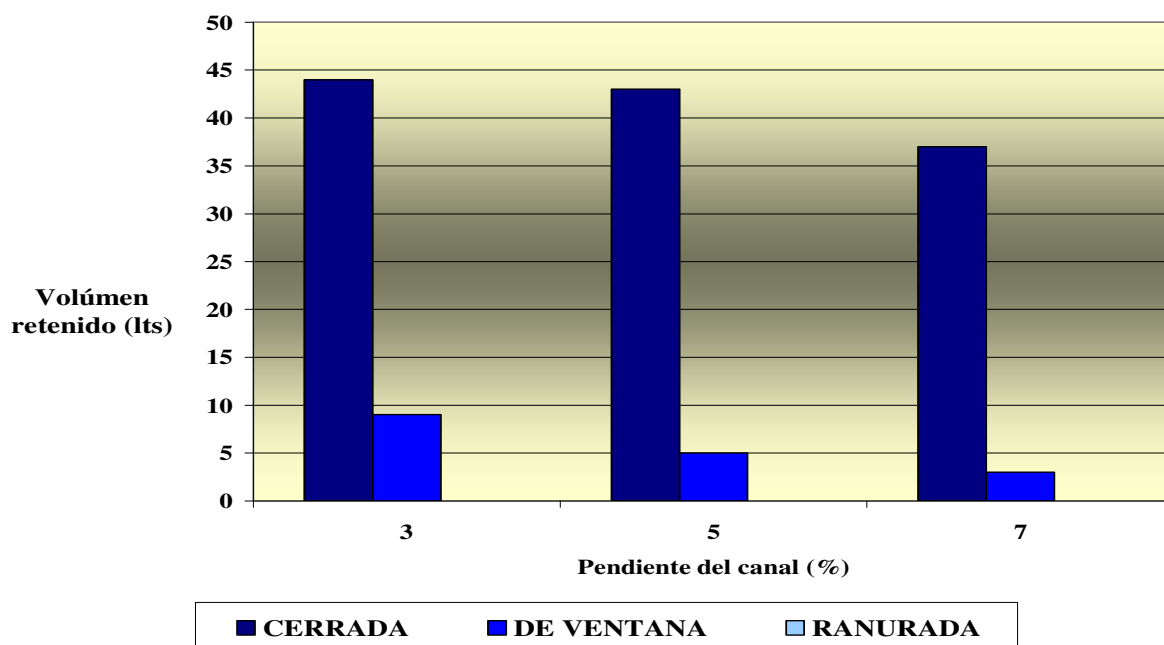


Foto 27. Retención del lodo aguas arriba de la presa de ventana. Pendiente del canal 7%. Densidad del lodo $1,25\text{gr}/\text{cm}^3$

b) Lanzamiento de lodo de densidad $1.42\text{mg}/\text{cm}^3$:**Tabla 6.** Resultados obtenidos del lanzamiento de lodo de densidad $1,42\text{ gr.}/\text{cm}^3$ sobre presas vacías.

| $V_t = 54\text{ lts.}$ | | Densidad de lodo, $\rho_i = 1,42\text{ gr.}/\text{cm}^3$ | | | | | | | | |
|---|--|--|----|----|------------|----|----|----------|----|----|
| Tipos de Presa | | CERRADA | | | DE VENTANA | | | RANURADA | | |
| Pendiente del fondo del Canal, S (%) | | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 |
| Volumen de lodo Retenido, V_r (lts) | | 44 | 43 | 37 | 9 | 5 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| Volumen de lodo Pasante, V_p (lts) | | 0 | 4 | 12 | 34 | 41 | 43 | 45 | 48 | 49 |
| Pérdida de lodo, V_s (lts) $V_s = V_t - V_r - V_p$ | | 10 | 7 | 5 | 11 | 8 | 8 | 9 | 6 | 5 |

En la tabla 6, se observa un comportamiento similar de variación de volúmenes de lodo (retenido y pasante) observado en la tabla 5 (ver gráfico 6 y 7), con la diferencia de que, en las presas cerrada y de ventana, los volúmenes de lodo retenido son menores para esta densidad de lodo, que en la presa ranurada los valores de volumen pasante aumentan a medida que aumenta la pendiente. Por ultimo, que los valores de pérdida son mucho mayores.

**Gráfico 6.** Relación entre volumen de lodo retenido y pendiente del canal en presas vacías. Densidad del lodo $1,42\text{gr}/\text{cm}^3$.

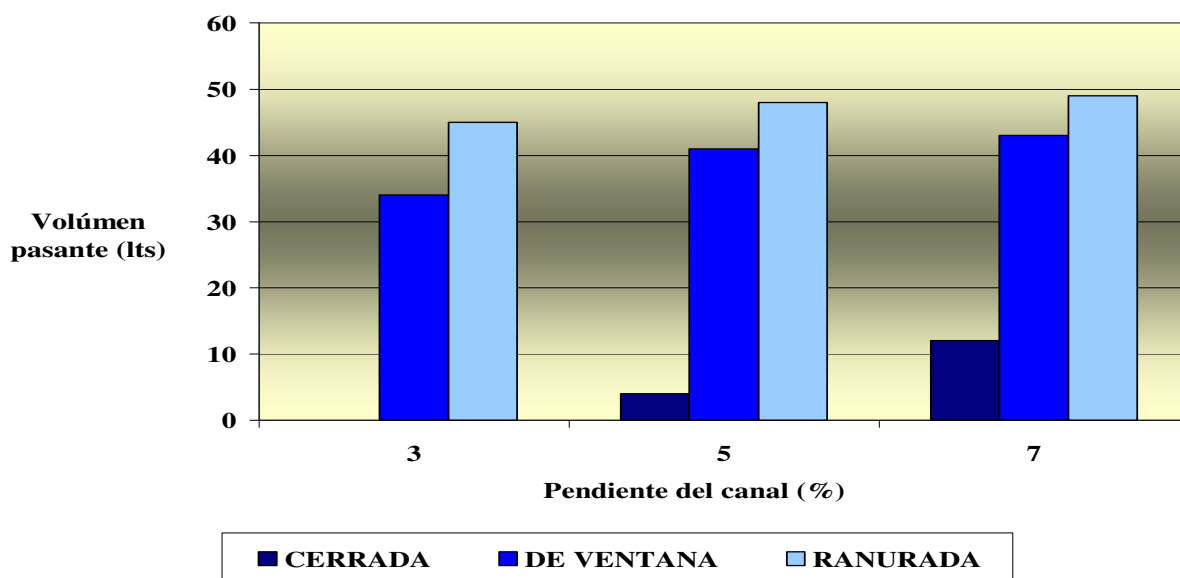


Gráfico 7. Relación entre volumen de lodo pasante y pendiente del canal en presas vacías. Densidad del lodo $1,42\text{gr}/\text{cm}^3$.

En general, las pérdidas de lodo se deben a que el mismo queda adherido o esparcido a todo lo largo del canal aguas arriba de la presa, a la precisión y forma de la medición tanto del volumen retenido como del volumen pasante y al derramamiento del lodo a través de las paredes del canal en el momento del choque del mismo con la presa.

En la tabla 6 para la presa ranurada, es nulo el volumen retenido pues a pesar de que queda una parte del lodo detrás de la presa no se puede considerar retenido porque se confunde con el que queda adherido al fondo y por ende con el volumen de pérdida (ver foto 28). En la foto 29, a la derecha, se observa la medida de aproximadamente 1,5 cm. de profundidad del lodo retenido detrás de la presa ranurada; ésta es la profundidad promedio del lodo adherido al fondo del canal.

De las tablas 5 y 6 se deduce que la pérdida de lodo en la elaboración de los ensayos aumenta significativamente con el aumento de la densidad del mismo.

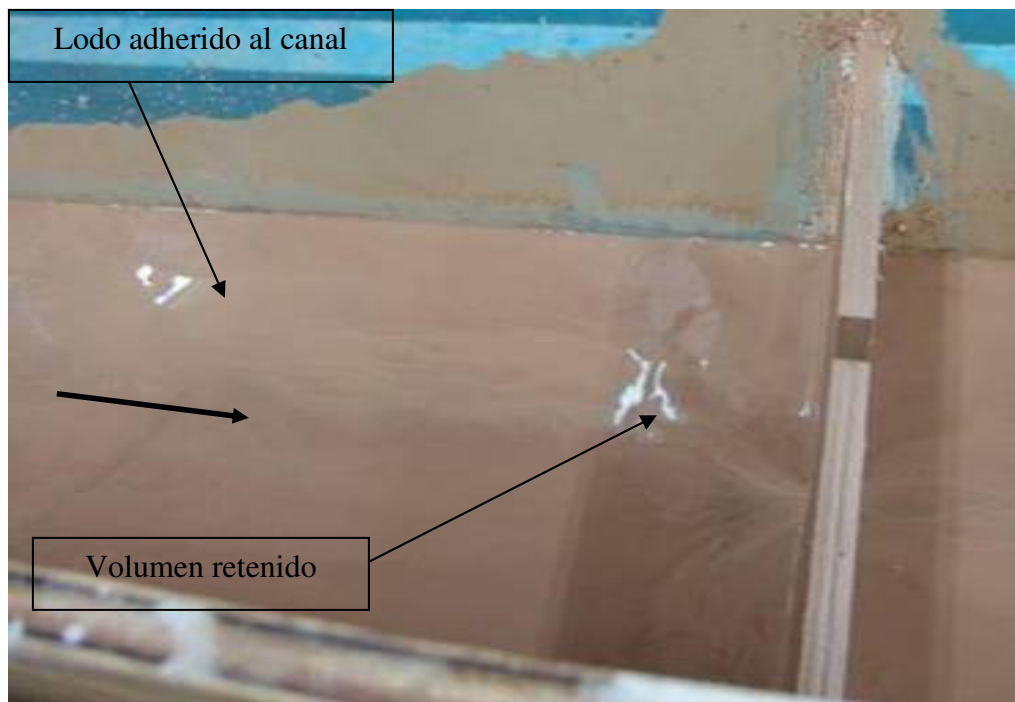


Foto 28. Vista de la deposición de lodo aguas arriba de la presa ranurada. Pendiente del fondo del canal 3%.
Densidad del lodo 1,42gr/cm³.

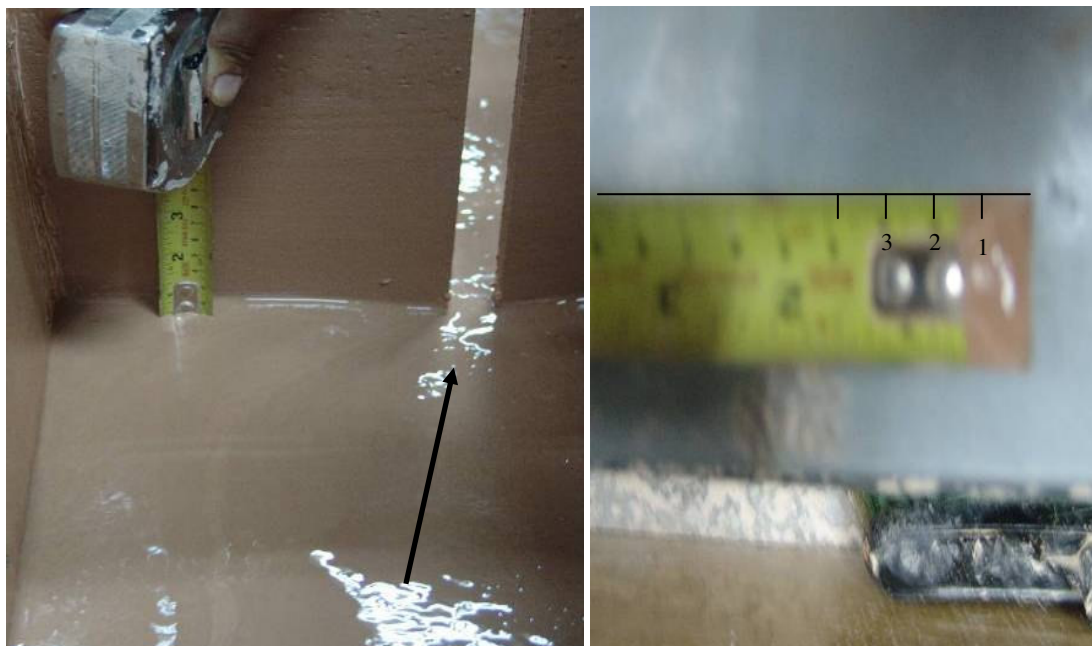


Foto 29. Vista de la deposición de lodo aguas arriba de la presa Ranurada. Pendiente del canal 7%. Densidad del lodo 1,42gr/cm³.

Como complemento de la información obtenida en la tabla, a continuación se muestran algunos ejemplos de la forma en que queda adherido el lodo al fondo del canal y retenido detrás de la presa. Ver foto 30 a 32.



Foto 30. Retención del lodo aguas arriba de la presa cerrada. Pendiente del fondo del canal 3%. Densidad del lodo $1,42\text{gr}/\text{cm}^3$.

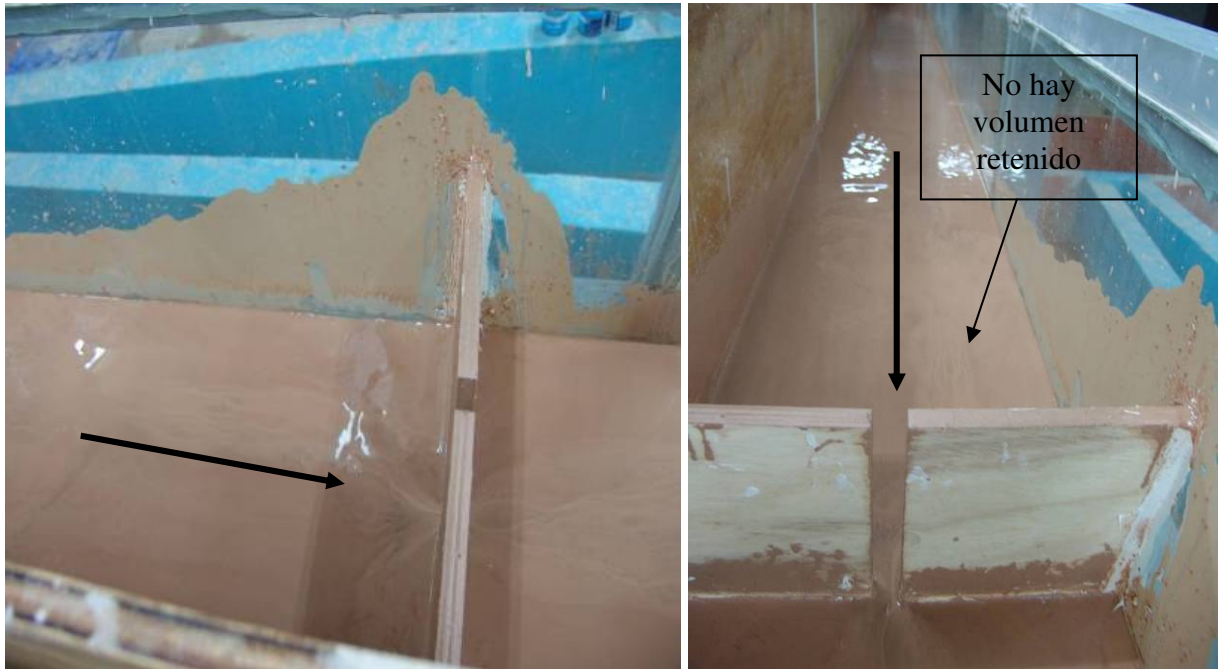


Foto 31. Retención del lodo aguas arriba de la presa ranurada. Pendiente del fondo del canal 3%. Densidad del lodo $1,42\text{gr/cm}^3$



Foto 32. Retención del lodo aguas arriba de la presa de ventana. Pendiente del fondo del canal 5%. Densidad del lodo $1,42\text{gr/cm}^3$.

Si se analizan los valores de volumen de lodo retenido obtenidos, por tipo de presa, en función de la densidad del lodo y de la pendiente del fondo del canal, se tiene que:

- En la presa cerrada, para ambas densidades de lodo, a mayor pendiente menor volumen retenido. Pero, para una misma pendiente, a mayor densidad de lodo menor volumen retenido, debido a que parte del lodo queda adherido agua arriba del canal y no puede ser considerado volumen retenido porque es producto de las propiedades del lodo (ver gráfico 8), esta diferencia disminuye al aumentar la pendiente. Se puede decir que a partir de 7%, el comportamiento es el mismo sin importar la densidad del lodo.
- En la presa de ventana, para ambas densidades de lodo, a mayor pendiente menor volumen de lodo retenido. Además, Se puede decir que en todas las pendientes el comportamiento es el mismo sin importar la densidad del lodo. Esto indica que la retención no tiene que ver con la densidad del lodo sino con la capacidad geométrica de almacenamiento de la presa. Ver gráfico 9.
- En las presas ranuradas, para todas las pendientes y sin importar la densidad del lodo, se observa que el volumen retenido es nulo y que el volumen pasante está relacionado con las pérdidas.

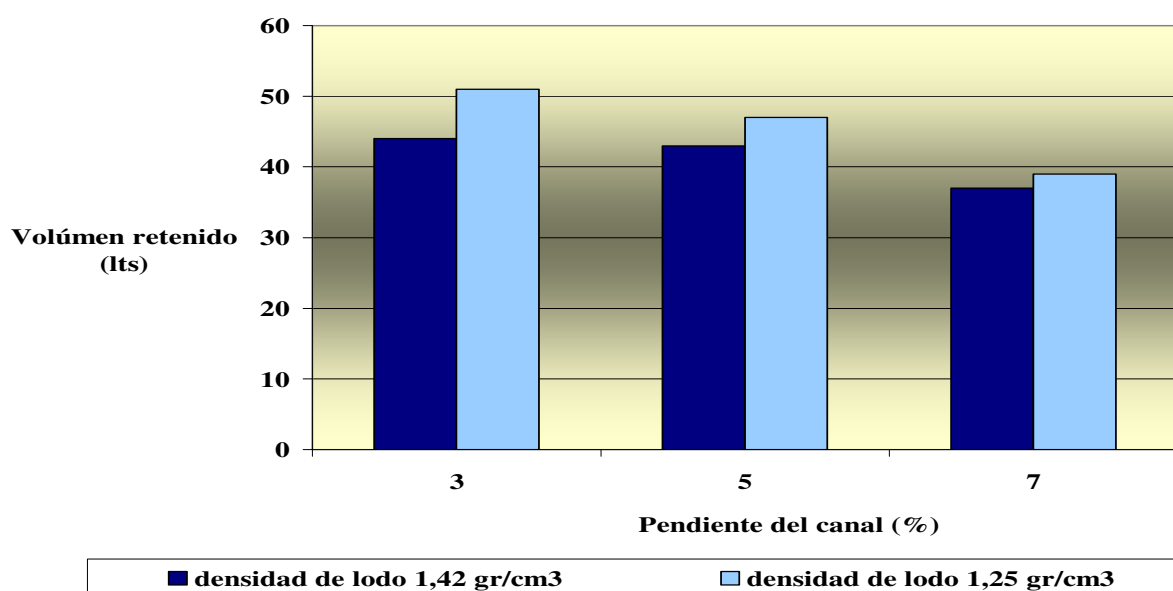


Gráfico 8. Relación entre volumen de lodo retenido y pendiente del fondo del canal en función de la densidad en presa cerrada vacía

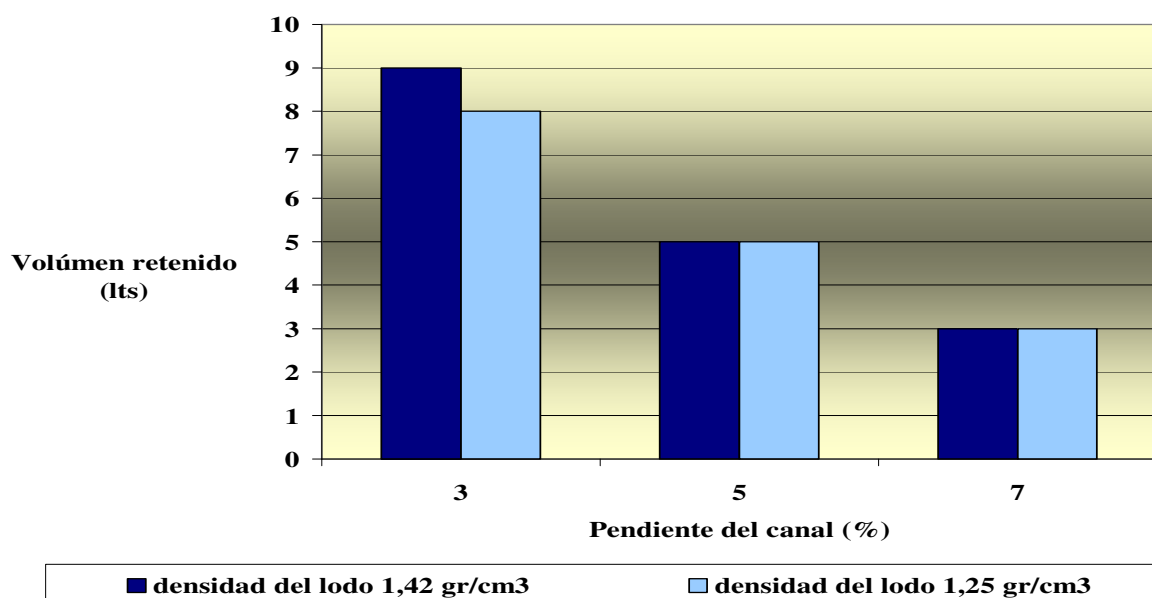


Gráfico 9. Relación entre volumen de lodo y pendiente del fondo del canal en función de la densidad en presa de ventanas vacía

Adicional a los resultados reflejados en las tablas 5 y 6 se cuenta con los registros audiovisuales (fotos y videos) de las experiencias, de los cuales surgen las siguientes consideraciones:

- En la presa de ventana, el lodo sube por la presa al momento del choque como si ésta fuera cerrada y luego, en cuestión de segundos, comienza a salir lodo por las aberturas, esto debido a que las ventanas no nacen en la base del canal a diferencia de la ranurada. En cambio, en la ranurada desde el inicio sale algo de lodo por la abertura (Ver foto 33).



Foto 33. Impacto inicial del lodo con la presa. Pendiente 5% y densidad del lodo 1.42 gr/cm³. Derecha a izquierda presa de ventana, cerrada y ranurada.

- En todas las presas se forma un resalto hidráulico producto del choque del lodo con la misma, que disipa una parte de la energía del flujo. Como consecuencia del almacenamiento temporal, producido por la presa, se reduce el caudal pico de la creciente, se propicia detrás de la presa la sedimentación y queda así reducida la concentración del flujo hacia aguas abajo (ver fotos 34 a 39).
- En todas las pendientes (3, 5 y 7%) pasa parte del lodo por encima de la presa por efecto del choque. La cantidad de lodo que pasa por encima de la presa aumenta con la pendiente, al igual que la altura del resalto. Para pendiente del canal de 7% la situación se hace crítica pues la cantidad que pasa por encima de la presa parece ser excesiva. Ver foto 40.
- En todos los tipos de presa, para una misma pendiente del canal, se cumple que a mayor densidad de lodo menor la altura del resalto (ver foto 41 y 42). Sin embargo, con la pendiente de 7% no se evidencia gran diferencia en el tamaño para distintas densidades de lodo, no parece influir la densidad para ese valor de pendiente y el desbordamiento es mucho más grande que en las demás pendientes (Ver foto 43).
- A igual pendiente y densidad de lodo, la altura del resalto es similar en todos los tipos de presa (Ver foto 44 y 45).
- Las presas abiertas (de ventana y ranurada) retienen el lodo por un tiempo limitado y lo liberan de forma continua y constante, en la medida que continúa el escurrimiento, posterior a la creciente.
- Las presas ranuradas tardan más tiempo en desalojar el lodo que las de ventana, esto tiene que ver con que tienen una sola abertura que por nacer en la base de la presa permite la salida de todo el lodo (se desaloja todo el volumen), a diferencia de la de ventana que tiene mayor número de aberturas y conserva un volumen remanente de lodo (es menor el lodo a descargar o desalojar).

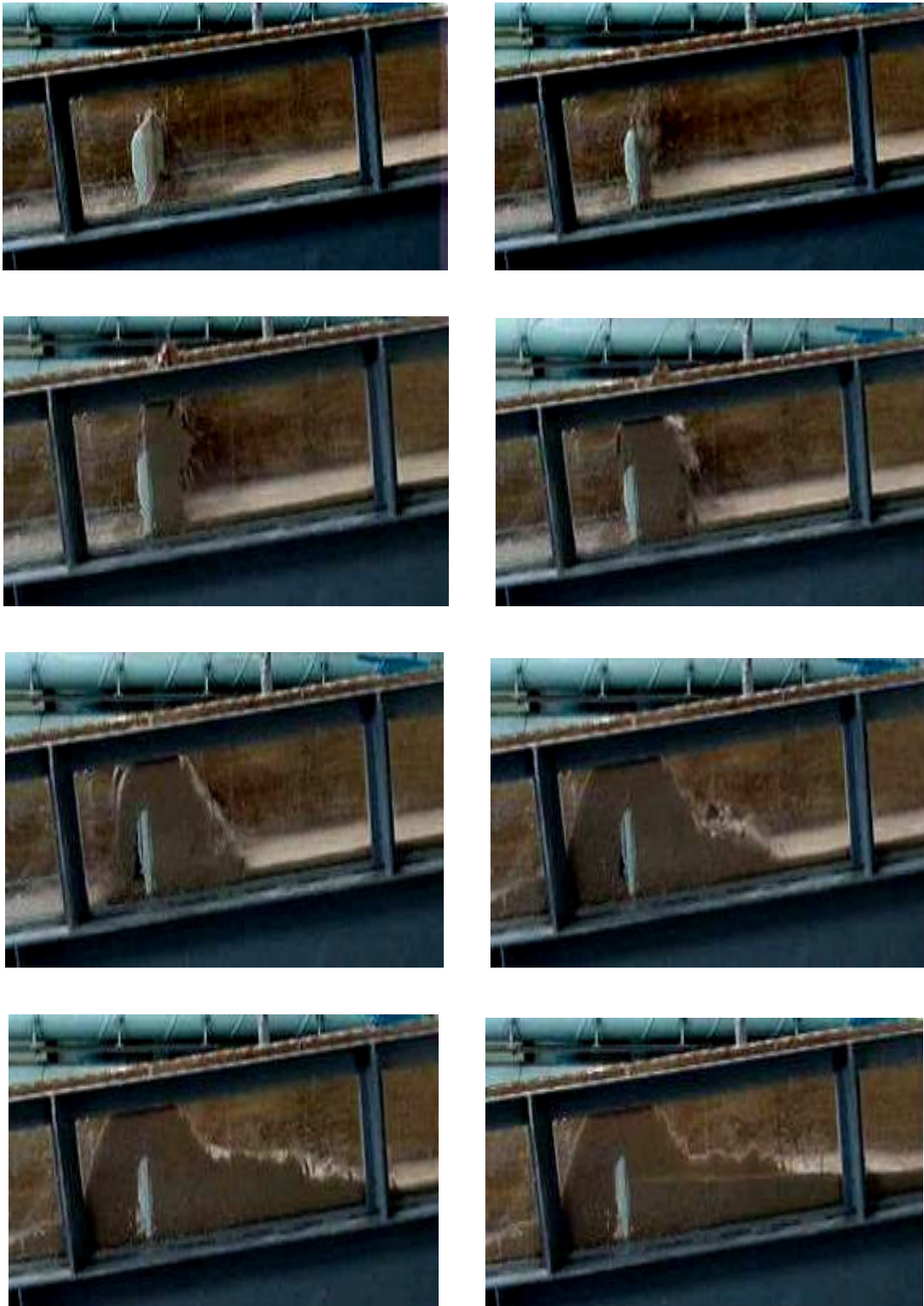


Foto 34. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa cerrada vacía. Densidad de lodo $1,42 \text{ gr./cm}^3$. Pendiente del canal 5%.

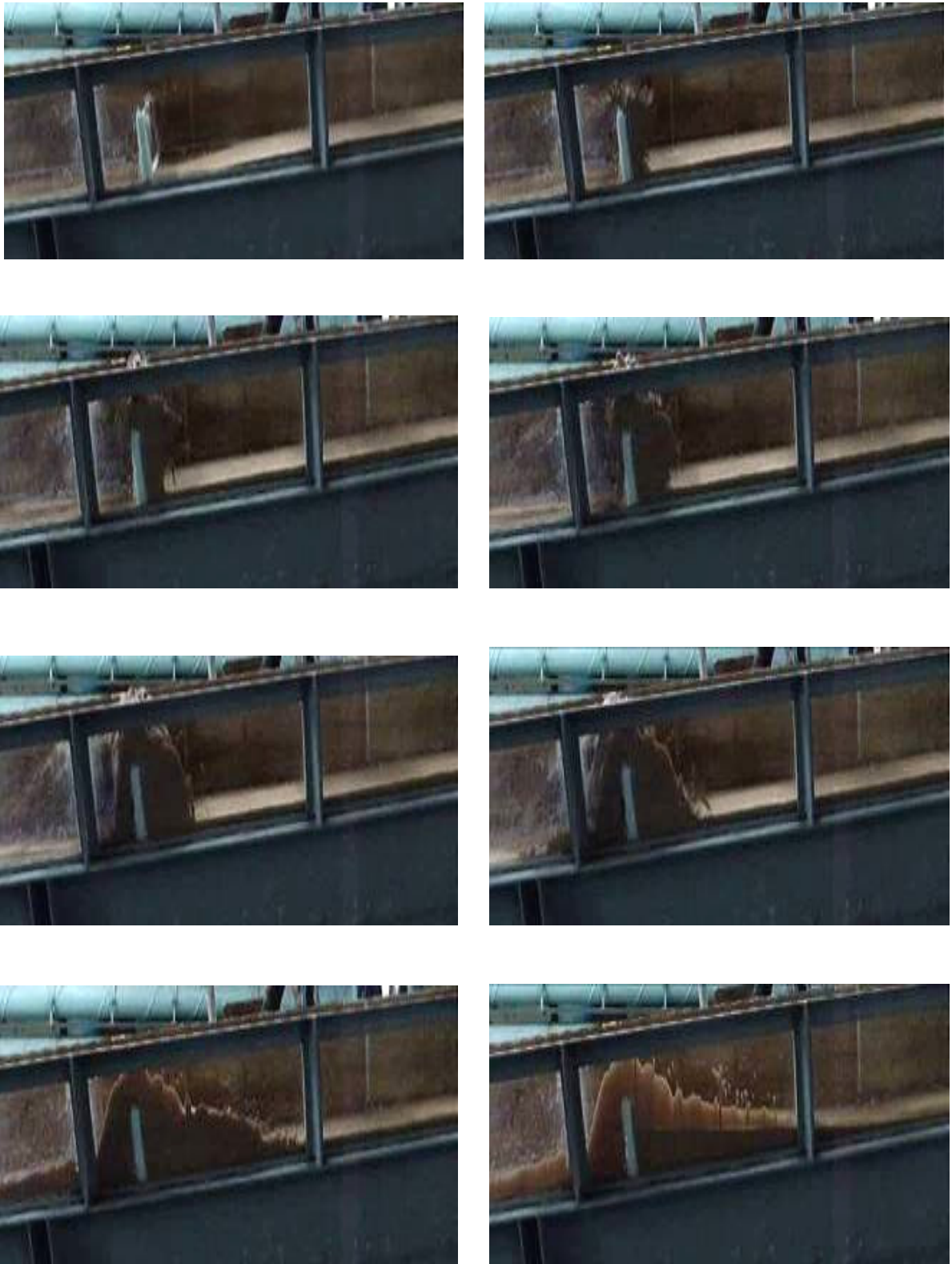


Foto 35. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa ranurada vacía. Densidad de lodo 1,42 gr./cm³.
Pendiente del canal 5%.



Foto 36. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa de ventanas vacía. Densidad de lodo 1,25 gr./cm³.
Pendiente del canal 5%.

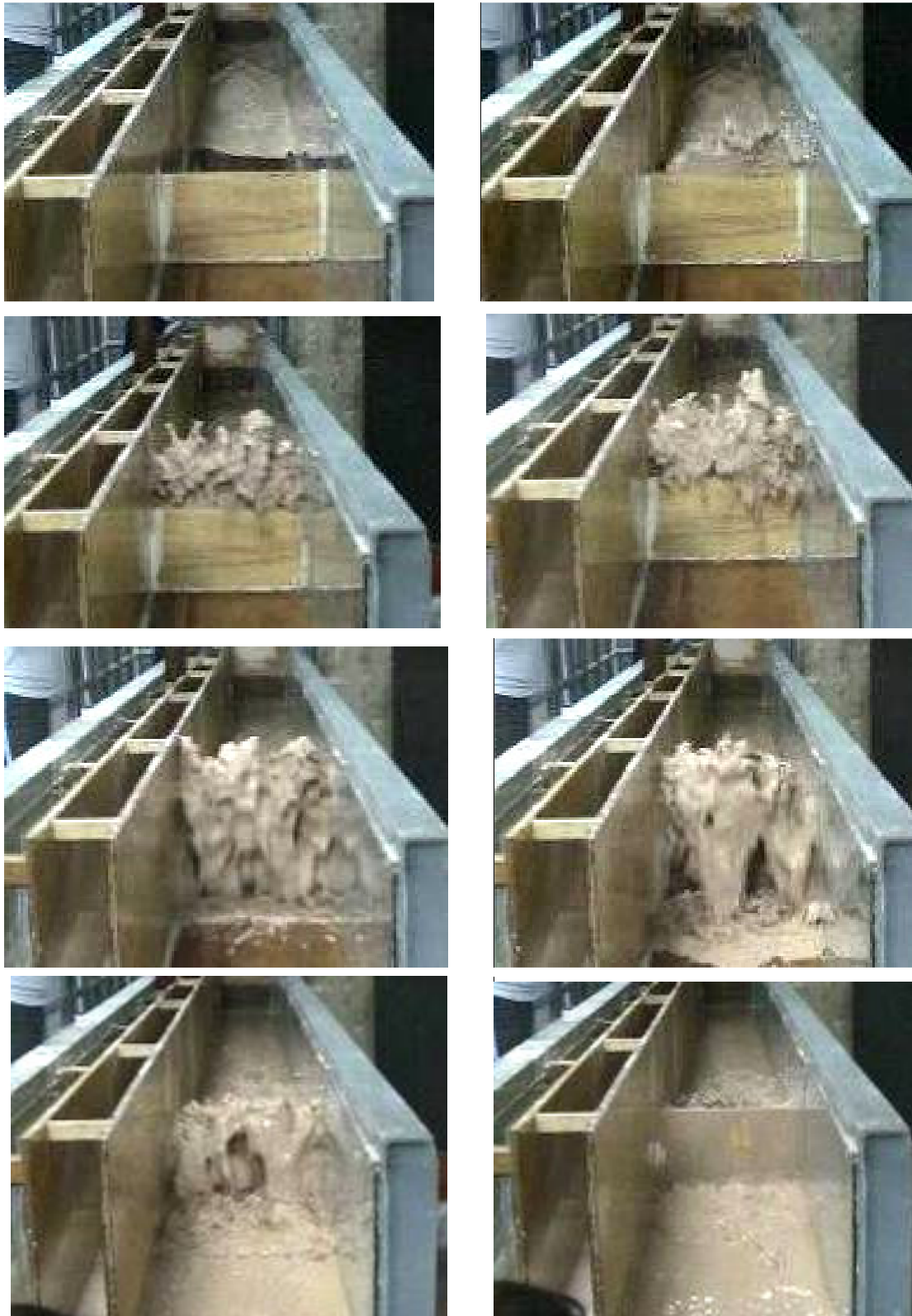


Foto 37. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa cerrada vacía. Densidad de lodo $1,42 \text{ gr./cm}^3$. Pendiente del canal 5%.

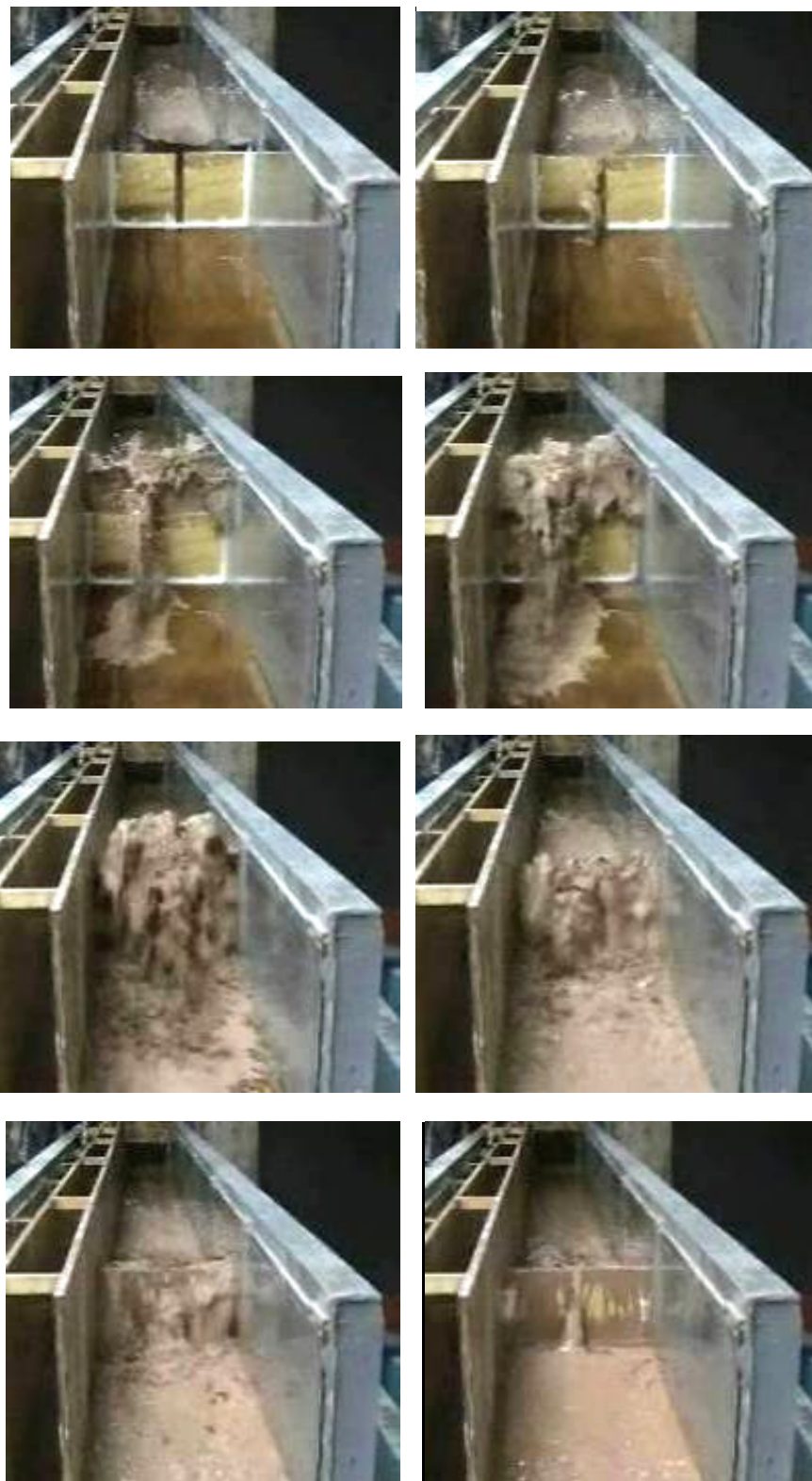


Foto 38. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa ranurada vacía. Densidad de lodo $1,42 \text{ gr./cm}^3$.
Pendiente del canal 5%.

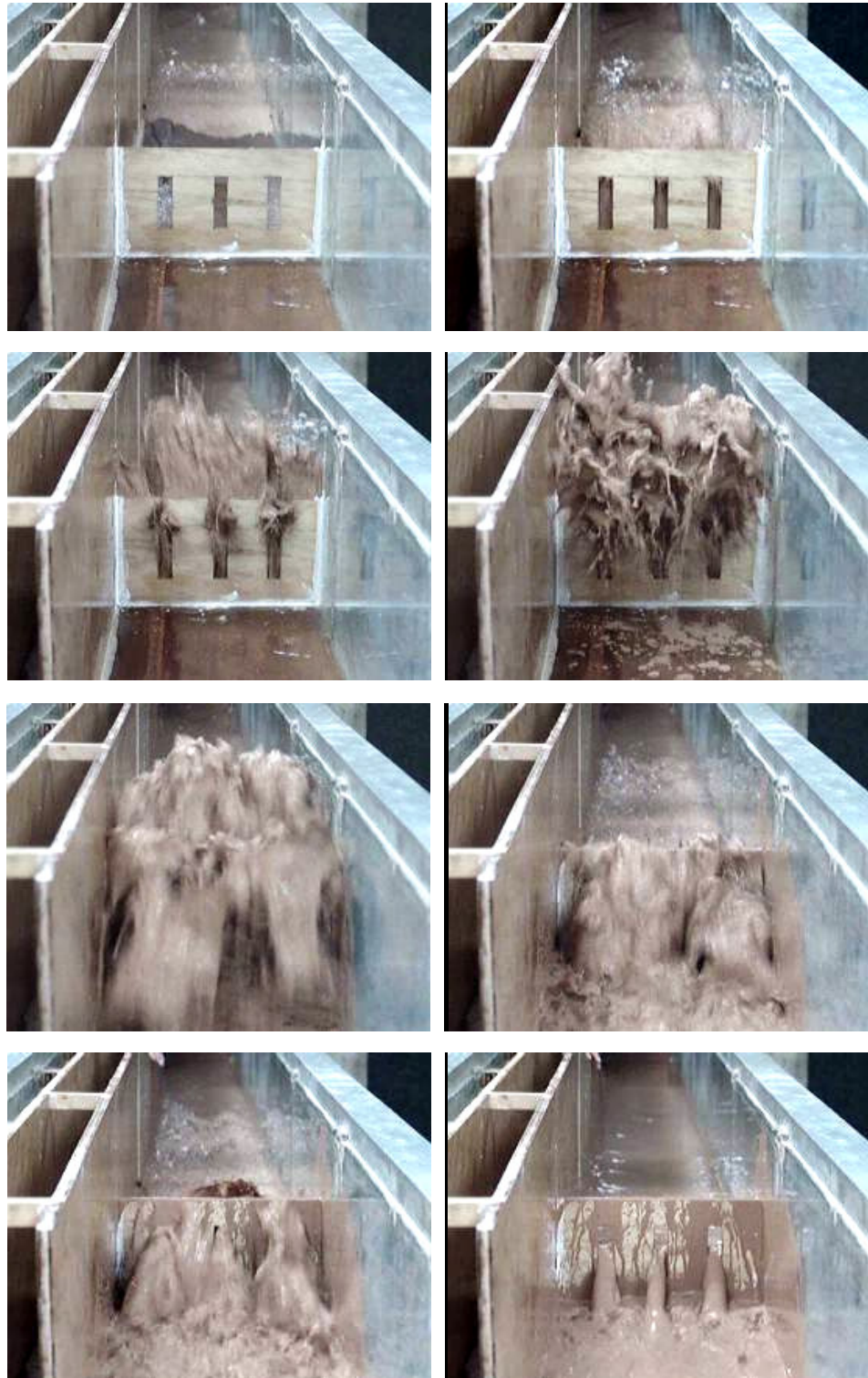


Foto 39. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa de ventanas vacía. Densidad de lodo $1,42 \text{ gr./cm}^3$.
Pendiente del canal 5%.



Foto 40. Vista del la mancha que deja el lodo por efecto del resalto en presa de ventana vacía. Densidad de lodo $1,42 \text{ gr/cm}^3$. De arriba hacia abajo Pendiente del canal 3, 5 y 7%.



Foto 41. Vista del la mancha que deja el lodo por efecto del resalto en presa de cerrada vacía. Pendiente del canal 3%. Densidad de lodo 1,25 y 1,42 gr/cm³, de izquierda a derecha.

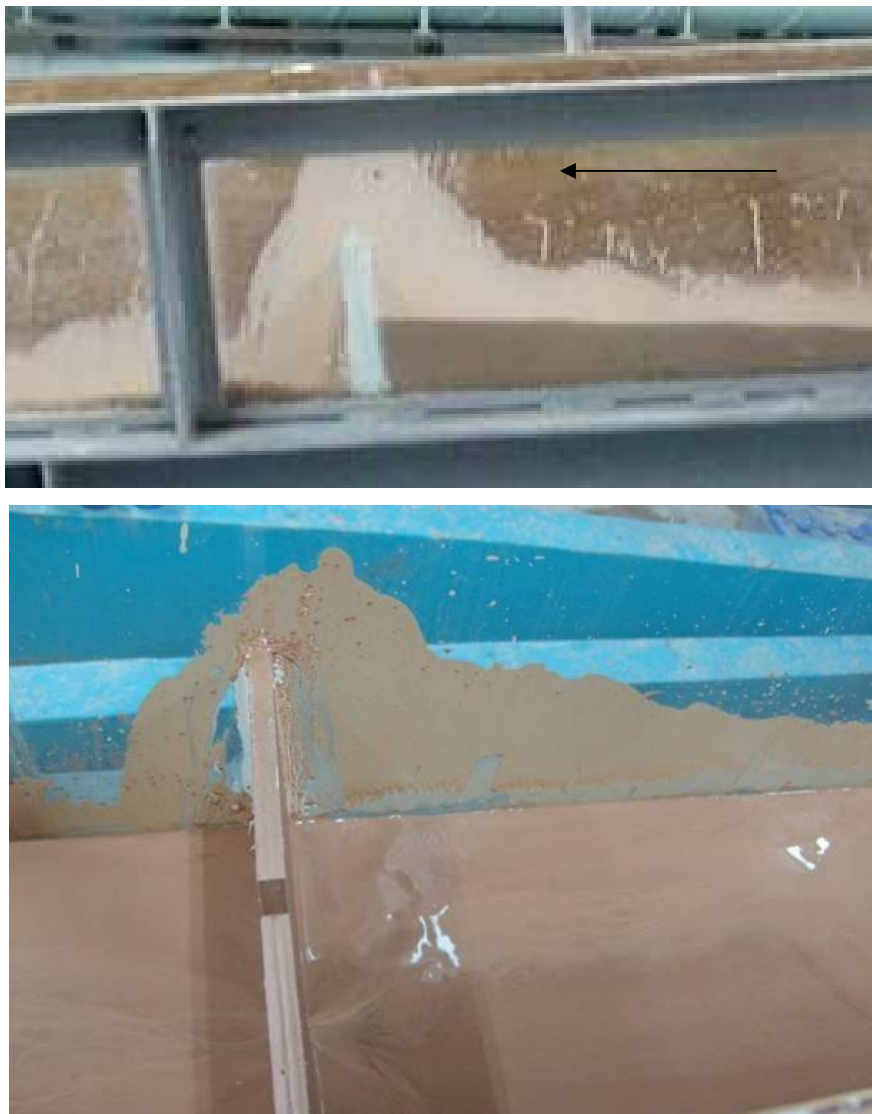


Foto 42. Vista del la mancha que deja el lodo por efecto del resalto en presa de ranurada vacía. Pendiente del canal 3%. Densidad de lodo 1,25 y 1,42 gr/cm³, de arriba hacia abajo.



Foto 43. Vista de la mancha que deja el lodo por efecto del resalto sobre presa de ventana vacía. Pendiente del canal 7%. De arriba hacia abajo densidad del lodo 1,25 y 1,42 gr./cm³.



Foto 44. Comparación del tamaño del resalto formado en los tres tipos de presa. De arriba hacia abajo presa cerrada, ranurada y de ventanas. Densidad de lodo 1,42 gr./cm³. Pendiente del canal 5%.



Foto 45. Vista de la mancha que deja el paso del lodo sobre las presas vacías. De arriba hacia abajo presa cerrada, ranurada y ventana. Pendiente 3%. Densidad de lodo 1,42 gr/cm³.

5.2.2. Ensayos con presas colmatadas

5.2.2.1. Proceso de colmatación de las presas

A continuación se muestra los resultados obtenidos del proceso de colmatación de los dos tipos de presas abiertas bajo las mismas condiciones de caudal líquido y sólido, previos al lanzamiento de las dos mezclas de lodo de diferente densidad.

Tabla 7. Comparación de las características de la cuña de sedimento por tipo de presa.

| Tipo de presa | Ranurada | | | | | | Ventana | | | | | |
|---|----------|-----|-----|------|-----|-----|---------|-----|-----|------|-----|-----|
| Densidad de lodo, ρ_i (gr./cm ³) | 1,42 | | | 1,25 | | | 1,42 | | | 1,25 | | |
| Pendiente del canal, S (%) | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 |
| Longitud inicial, L1 (cm.) | 210 | 192 | 170 | 195 | 188 | 170 | 195 | 190 | 190 | 203 | 176 | 178 |

En la tabla 7 se observa la tendencia que tiene la longitud de la cuña de arena a disminuir a medida que se incrementa la pendiente del canal. Sin embargo, las diferencias de longitud que se observan en algunos datos correspondientes a la misma pendiente del canal y tipo de presa pueden estar relacionadas al hecho de que la medición fue hecha luego de escurrir el último volumen de agua que implicó un reacomodo aleatorio de los sedimentos y erosión en la cola de la cuña y a su vez, este factor puede estar afectando la variación de longitud para igual presa y distintas pendientes. Ver foto 46.

Adicional a los resultados reflejados en la tabla 7 se cuenta con los registros audiovisuales del proceso de colmatación de las presas, en los cuales se muestran las diferentes formas que obtiene la cuña de arena:

En el caso de la presa ranurada, se forma una gran depresión alrededor de la abertura, siendo más pronunciada para la pendiente del canal de 7%. Ésta depresión es producto de la turbulencia en el flujo localizada en la abertura por la confluencia de las líneas de corriente. Ver foto 47 y 48.



Foto 46. Vista de la cuña de sedimentos en presa ranurada para una inclinación del canal de 3%. De arriba hacia abajo antes del lanzamiento de lodo de densidad 1,42 y 1,25 gr./cm³ respectivamente.



Foto 47. Forma de la cuña de sedimentos en las adyacencias a la abertura en presa ranurada. De Izquierda a derecha pendiente del canal 3, 5 y 7%.



Foto 48. Turbulencia aguas arriba de la presa ranurada. Pendiente del canal de 3%.

En la presa de ventana, se forma una depresión alrededor de las aberturas menos pronunciada y más alargada, relativamente similar para todas las pendientes del canal. Ésta depresión es producto de la turbulencia en el flujo extendida de manera uniforme a lo largo de la presa (ver foto 49 y 50).

Sin importar el tipo de presa, se produce acumulación de sedimentos a pesar de que el grano de arena es menor al tamaño de las aberturas. La sola presencia de un obstáculo propicia la sedimentación.

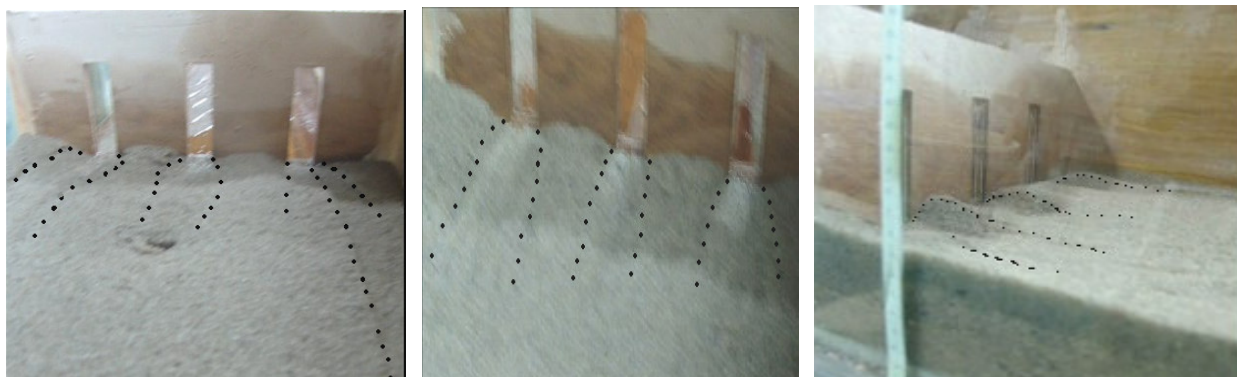


Foto 49. Forma de la cuña de sedimentos en las adyacencias a las aberturas en presa de ventana. De Izquierda a derecha pendiente del canal 3, 5 y 7%.

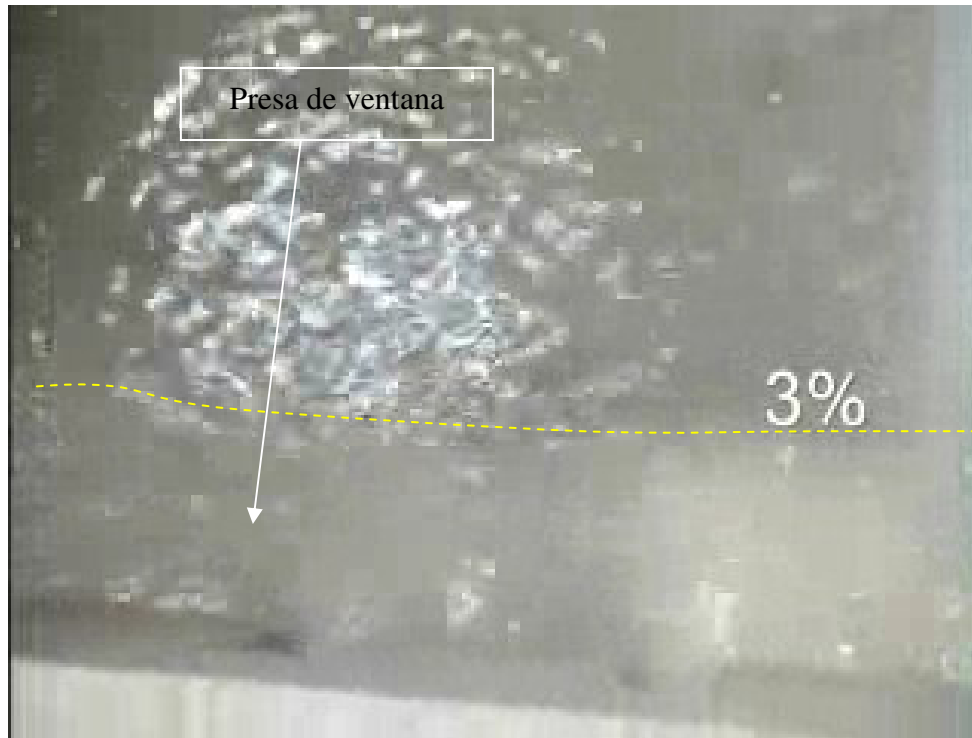
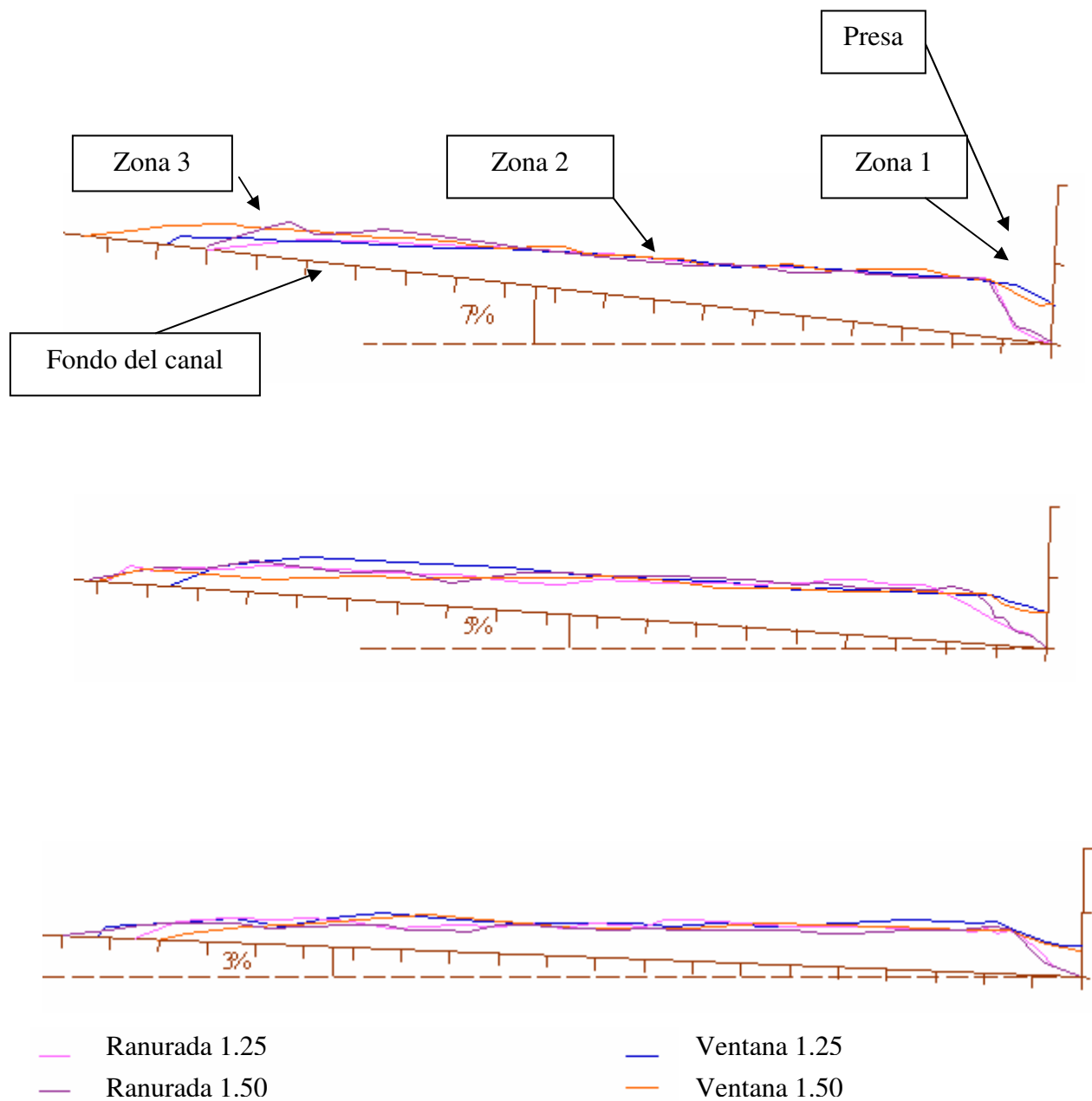


Foto 50. Turbulencia aguas arriba de la presa de ventanas. Pendiente del canal de 3%

A continuación en la figura 1 se muestran los perfiles tomados en el eje central del canal, en los cuales se pueden observar tres zonas distintas: la primera zona, ubicada en las adyacencias a la presa, muestra diferentes formas según el tipo. La segunda, ubicada en el centro, es similar en los dos tipos de presa y en todas las inclinaciones del canal, de la cual se infiere que no está influenciada por el tipo de presa. Además, se aprecia que es casi horizontal y pareciera no tener relación con la pendiente del canal. Por último, una tercera zona, ubicada en la cola de la cuña, muestra diferencias en longitud y forma, producto de las condiciones aguas arriba o volumen final de agua escurrido.



Nota: Escala gráfica sobre presa y fondo del canal. Cada segmento representa 10 cm reales

Figura 7. Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de las presas antes del lanzamiento del lodo.

5.2.2.2. Proceso de lanzamiento de lodo

a) Lanzamiento de lodo de densidad $1.25\text{mg}/\text{cm}^3$

A continuación se muestran los resultados obtenidos del lanzamiento de lodo sobre presas abiertas colmatadas.

Tabla 8. Resultados obtenidos del lanzamiento de lodo de densidad $1,25\text{ gr.}/\text{cm}^3$ sobre presas colmatadas.

| Volumen lanzado, $V_t = 54\text{ lts.}$ | Densidad de lodo $1.25\text{mg}/\text{cm}^3$ | | | | | |
|--|--|------|------|---------|------|------|
| Tipo de presa | RANURADA | | | VENTANA | | |
| Pendiente del canal, $S (\%)$ | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 |
| Volumen pasante, $V_p (\text{lts})$ | 48 | 54 | 59 | 54 | 55 | 60 |
| Longitud de cuña de arena inicial, $L_1 (\text{cm})$ | 195 | 188 | 170 | 203 | 176 | 178 |
| Longitud de cuña de arena final, $L_2 (\text{cm})$ | 134 | 107 | 122 | 150 | 92 | 130 |
| Densidad del lodo inicial, $\rho_i (\text{gr.}/\text{cm}^3)$ | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 1.24 | 1.25 | 1.25 |
| Densidad del lodo final, $\rho_f (\text{gr.}/\text{cm}^3)$ | 1.25 | 1.23 | 1.23 | 1.22 | 1.23 | 1.24 |

En la tabla 8 se observa que a mayor pendiente del canal, mayor volumen de lodo pasante. Además, que el volumen pasante siempre es mayor en la presa de ventana, esta diferencia es más notoria en 3% de pendiente que en 5 y 7%. De lo que se puede inferir que a partir de 5% de pendiente el tipo de presa no influye en la descarga de lodo (Ver gráfico 10).

Se observa además, disminución de longitud de la cuña de arena que evidencia erosión del lecho y justifica que a partir de 5% el volumen pasante sea mayor que el lanzado (54lts). Las diferencias en la longitud final de una pendiente a otra pueden estar afectadas por la dificultad en la medición, debido a la presencia de lodo en la cola de la cuña. (Ver fotos 51 y 52). Además, no es posible determinar una relación entre la longitud final de la cuña y la pendiente del canal debido a lo anteriormente expuesto y a que es irregular la deposición de lodo. En todo caso, será necesario efectuar un mayor número de ensayos para determinar una relación confiable.

Resalta también, que en todos los casos disminuye la densidad del lodo a pesar del arrastre de arena, el cual puede ser producto de cambios en las proporciones de arena y arcilla, es decir, el lodo, por una parte pierde arcilla, porque parte de ella queda adherida sobre la cuña de arena (cola y superficie) y por otra parte, gana arena pues esta es arrastrada.

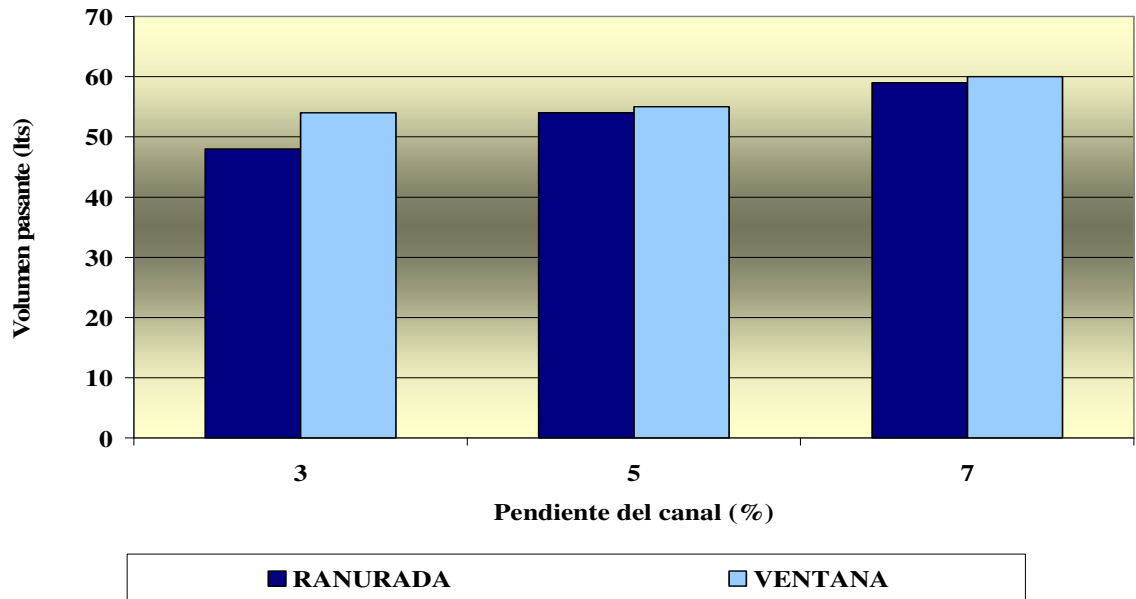


Gráfico 10. Relación entre volumen de lodo pasante y pendiente del canal en presas colmatadas. Densidad de lodo 1.25 gr/cm^3 .



Foto 51. Lodo adherido sobre la cuña de sedimentos en presa ranurada. Densidad de lodo $1,25 \text{ gr/cm}^3$. Pendiente del canal 3, 5 y 7% de izquierda a derecha.



Foto 52. Lodo adherido sobre la cuña de sedimentos en presa de ventana. Densidad de lodo $1,25 \text{ gr/cm}^3$. Pendiente del canal 3, 5 y 7% de izquierda a derecha.

b) Lanzamiento de lodo de densidad 1.42 gr/cm^3

Tabla 9. Resultados obtenidos del lanzamiento de lodo de densidad $1,42 \text{ gr./cm}^3$ sobre presas colmatadas.

| Vt = 54 lts. | | Densidad de lodo de 1.42 gr/cm^3 | | | | |
|--|-----------------|--|----------|----------------|----------|----------|
| Tipo de presa | RANURADA | | | VENTANA | | |
| Pendiente del canal, S (%) | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 |
| Volumen de lodo pasante, Vp (Lts) | 37 | 38 | 54 | 40 | 51 | 55 |
| Longitud de cuña de arena inicial, L1 (cm) | 210 | 192 | 170 | 195 | 190 | 190 |
| Longitud de cuña de arena final, L2 (cm) | 150 | 168 | 97 | 176 | 126 | 120 |
| Densidad del lodo inicial, pi (gr/cm^3) | 1.42 | 1.41 | 1.43 | 1.42 | 1.41 | 1.41 |
| Densidad del lodo final, pf (gr/cm^3) | 1.30 | 1.33 | 1.42 | 1.32 | 1.34 | 1.38 |

En la tabla 9 se observa un comportamiento similar al observado en la tabla 8, con la diferencia de que en este caso los volúmenes de lodo pasantes son menores y la disminución en la densidad es mayor debido a que una cantidad de lodo mayor queda adherido al canal (ver foto 53 y 54).

No es posible comparar las variaciones en longitudes de la cuña obtenidas en la tabla 8 con esta, pues se dificulta la medición de la misma debido a la presencia de lodo adherido a lo largo del

canal, en la cola y superficie de la cuña. Solo es posible agregar que se observa nuevamente una disminución en la longitud de la cuña que evidencia erosión.

La diferencia entre volúmenes de lodo pasante es más notoria en 3 y 5% de pendiente que en 7%, de lo que se puede inferir que a partir de 7% de pendiente el tipo de presa no influye en la descarga de lodo. Ver gráfico 11.



Foto 53. Lodo adherido sobre la cuña de sedimentos en presa ranurada. Densidad de lodo $1,42 \text{ gr/cm}^3$. Pendiente del canal 3, 5 y 7% de izquierda a derecha.

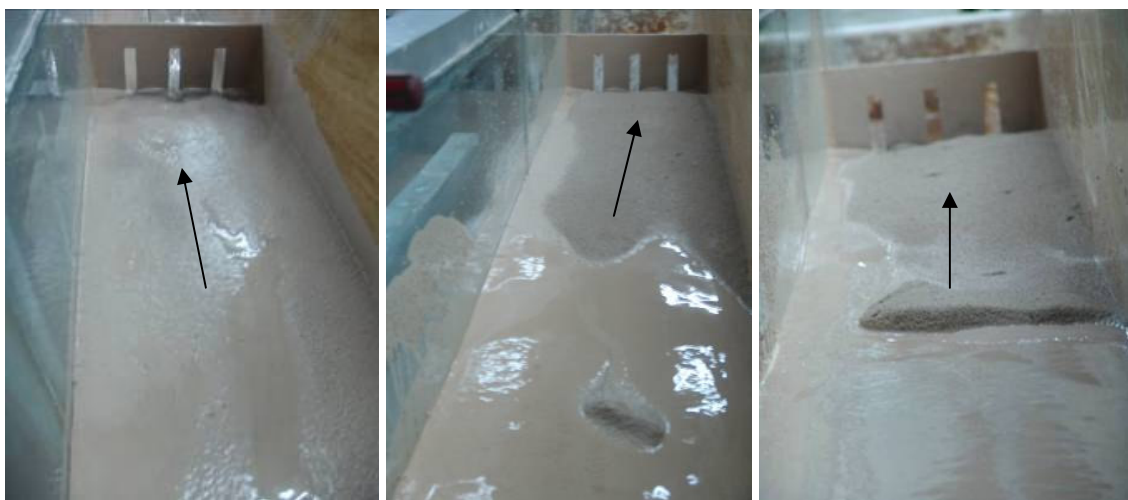


Foto 54. Lodo adherido sobre la cuña de sedimentos en presa de ventana. Densidad de lodo $1,42 \text{ gr/cm}^3$. Pendiente del canal 3, 5 y 7% de izquierda a derecha.

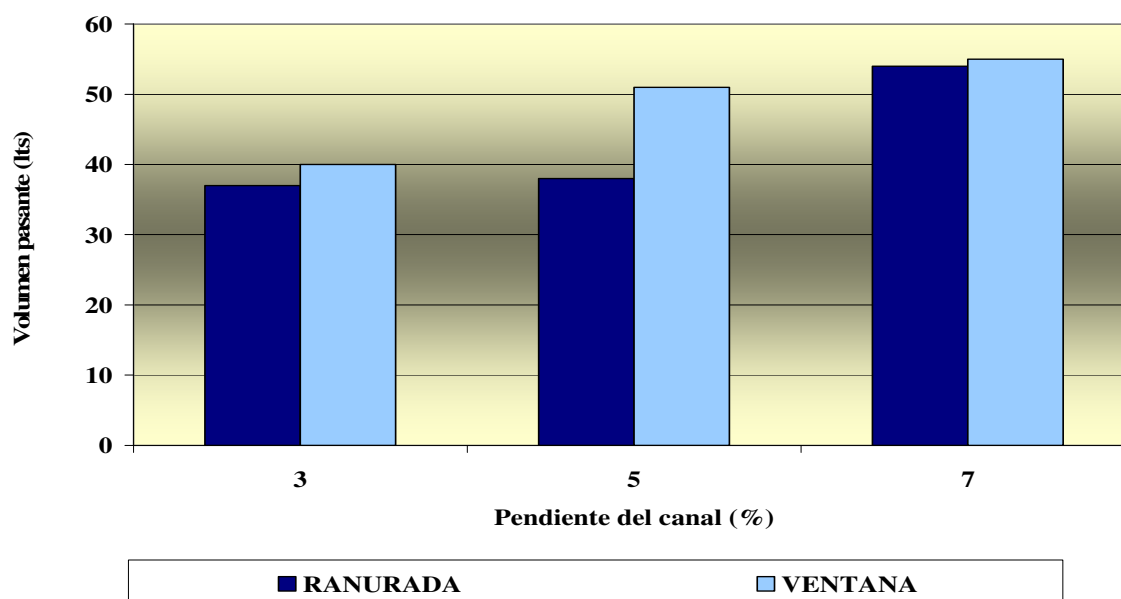


Gráfico 11. Relación entre volumen de lodo pasante y pendiente del canal en presas colmatadas. Densidad de lodo 1.42 gr/cm^3 .

Comparando cada presa según el tipo de lodo, se observa en los gráficos 12 y 13, que en ambas presas el volumen de lodo pasante es mayor con el lodo menos denso, sin embargo, esta diferencia disminuye en el caso de la presa ranurada para 7% de pendiente y en el caso de la presa de ventana a partir de 5% de pendiente.

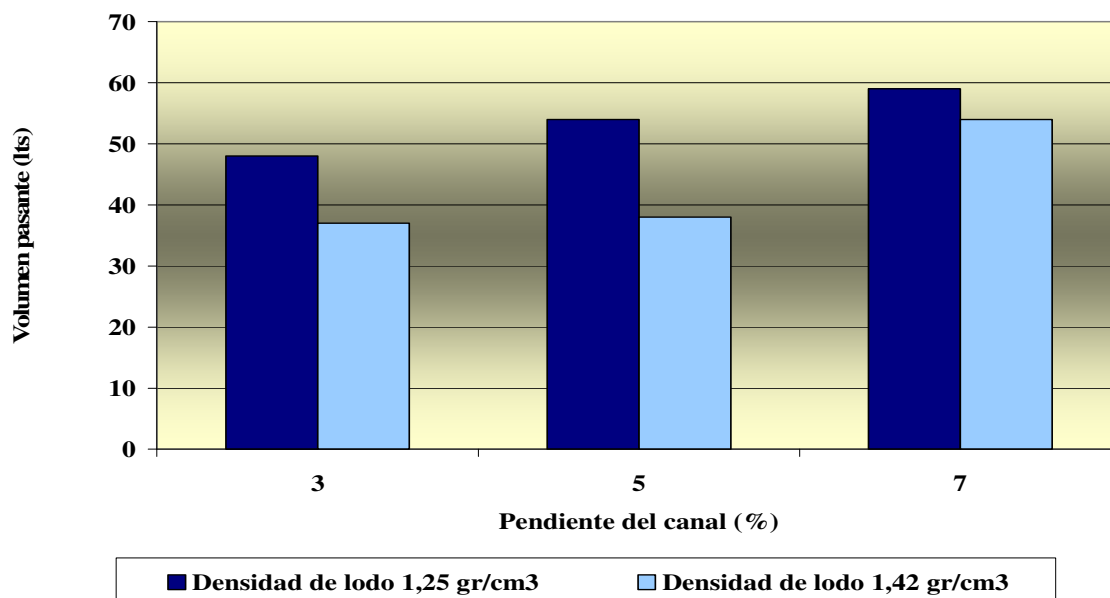


Gráfico 12. Relación entre volumen pasante y pendiente del canal en presa ranurada colmatada por tipo de lodo.

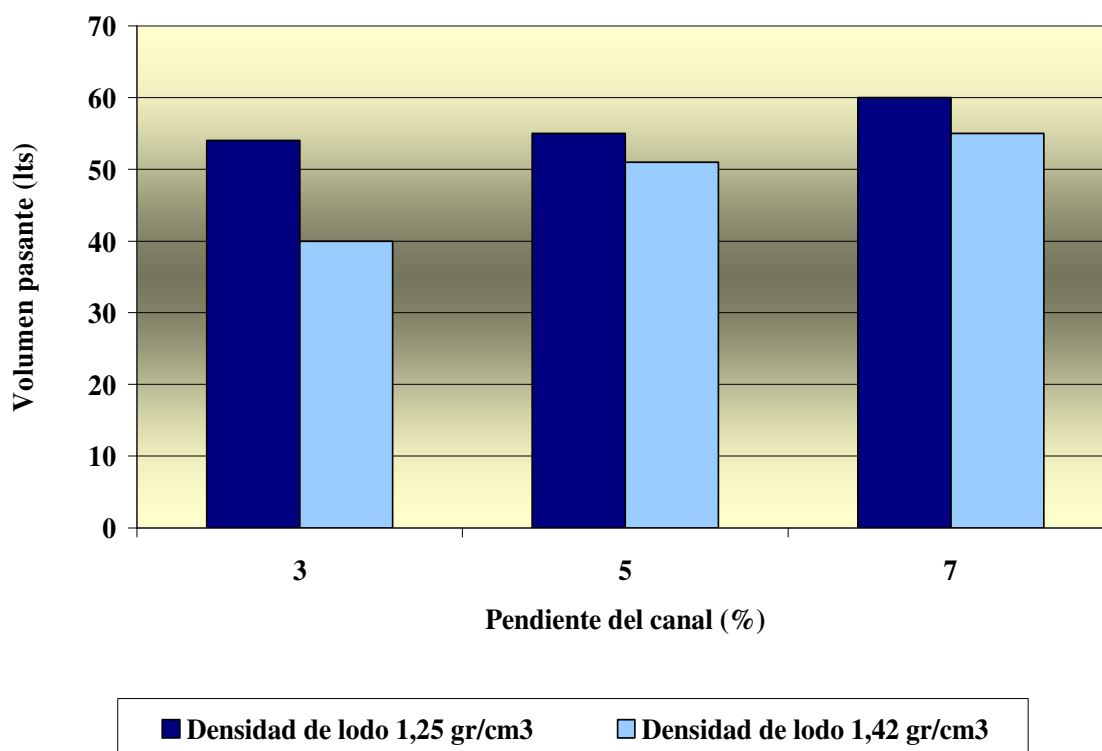


Gráfico 13. Relación entre volumen pasante y pendiente del canal en presa de ventana colmatada por tipo de lodo.

A continuación en la figura 8 se muestran los perfiles tomados en el eje central del canal, en los cuales se pueden distinguir tres zonas distintas: la primera zona, ubicada en las adyacencias a la presa, muestra diferentes formas según el tipo y mantiene las misma característica después del paso del lodo (ver foto 55 y 56). La segunda, ubicada en el centro, es similar en los dos tipos de presa y en todas las inclinaciones del canal (variaciones de milímetros), de la cual se infiere que no está influenciada por el tipo de presa. Por último, una tercera zona, ubicada en la cola de la cuña, muestra diferencias en longitud y forma, producto de la erosión y deposición del lodo (ver fotos 57 y 58).

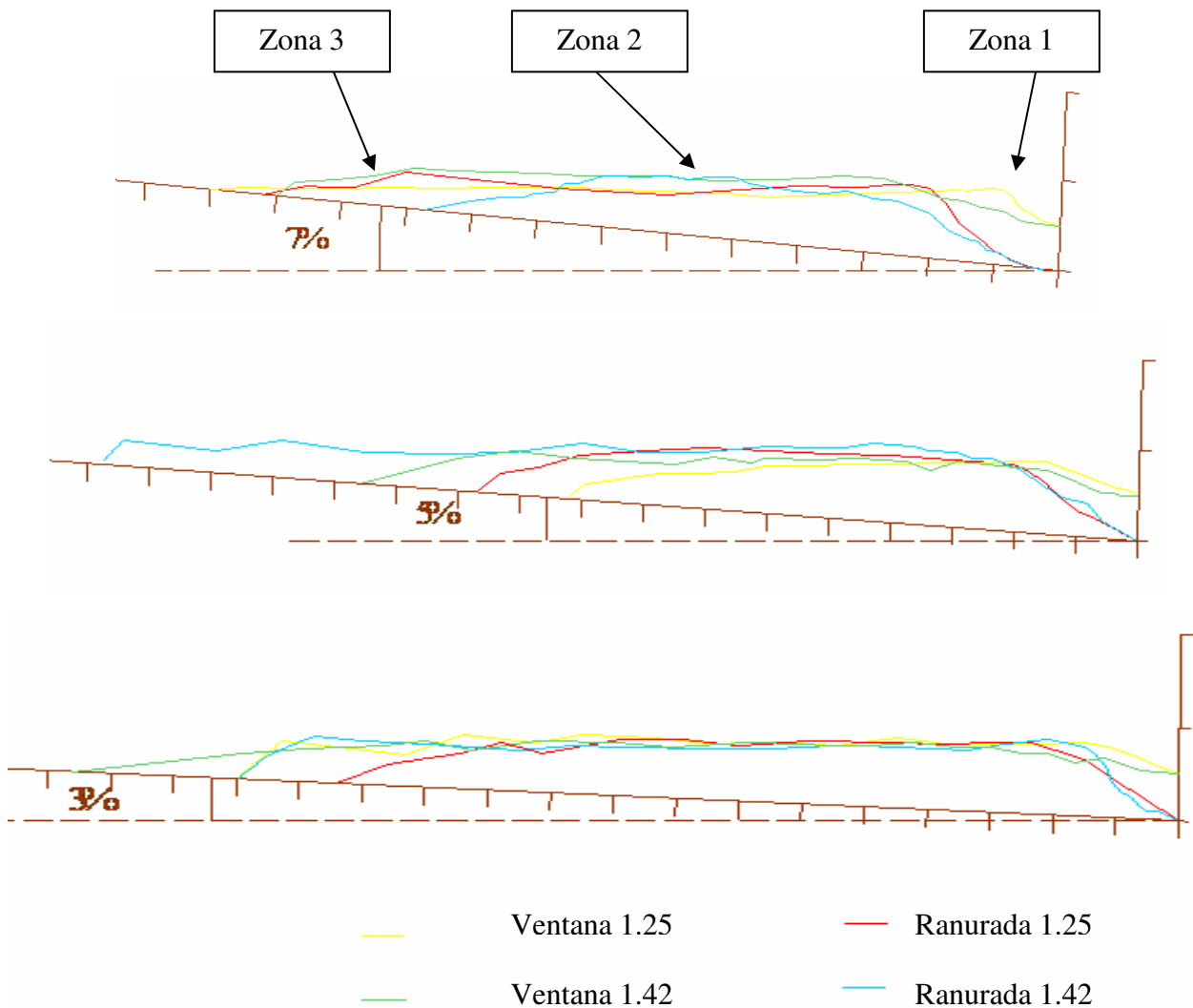


Figura 8. Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de las presas después de lanzamiento de lodo.

No es posible determinar si existe un patrón que relacione la variación de la longitud de la cuña de arena final con el tipo de presa, pendiente del canal y tipo de lodo debido a que en todos los casos queda algo de arcilla (volumen retenido) de manera irregular en la cola de la cuña de arena.



Foto 55. Depresión detrás de la presa ranurada colmatada en pendiente de 3%. De izquierda a derecha, antes y después del paso de lodo de densidad $1,42 \text{ gr/cm}^3$.



Foto 56. Depresión detrás de la presa de ventanas colmatada en pendiente de 5%. De izquierda a derecha, antes y después del paso de lodo de densidad $1,25 \text{ gr/cm}^3$.



Foto 57. Cuña de arena e presa de ventanas para pendiente de 3%. De izquierda a derecha antes y después del paso del lodo de densidad $1,25 \text{ gr/cm}^3$.



Foto 58. Cuña de arena en presa ranurada para pendiente de 3%. De izquierda a derecha antes y después del paso del lodo de densidad $1,25 \text{ gr/cm}^3$.

Adicional a los resultados reflejados en las tablas 8 y 9 se cuenta con los registros audiovisuales (fotos y videos) de las experiencias, de los cuales surgen las siguientes consideraciones:

- En todas las presas se forma un resalto hidráulico producto del choque del lodo con la misma, que disipa una parte de la energía del flujo. Como consecuencia del almacenamiento temporal, producido por la presa, se reduce el caudal pico de la creciente, se propicia detrás de la presa la sedimentación y queda así reducida la concentración del flujo hacia aguas abajo (ver fotos 59 y 60).
- Las presas abiertas, de ventana y ranurada, retienen el lodo por un tiempo limitado y lo liberan de forma continua y constante, en la medida que continúa el escurrimiento, posterior a la creciente, actuando como buenos disipadores de energía.
- Las presas ranuradas tardan más tiempo en desalojar el lodo que las de ventana, esto tiene que ver con que tienen una sola abertura, a diferencia de la de ventana que tiene mayor número de aberturas.

- En la presa de ventana, por estar colmatada hasta la base de las aberturas, desde el inicio sale algo de lodo por las ventanas al igual que en la ranurada. De esto se infiere que ambas están a igualdad de condiciones, a diferencia de lo que ocurre cuando están vacías (ver foto 61).
- En todas las pendientes (3, 5 y 7%) pasa parte del lodo por encima de la presa por efecto del choque. La cantidad de lodo que pasa por encima aumenta con la pendiente, al igual que la altura del resalto (ver foto 62 a 67).
- Para pendiente del canal de 7% la situación se hace crítica pues la cantidad que pasa por encima de la presa parece ser excesiva. Este comportamiento ocurre con ambos tipos de presa. Ver foto 68.
- Para una misma pendiente del canal y tipo de presa, el tamaño del resalto es el mismo sin importar la densidad del lodo, de lo que se deduce que la densidad del lodo parece dejar de ser una variable importante cuando están colmatadas (Ver fotos 69 a 71).
- El tamaño del resalto es ligeramente menor en la presa de ventana que en la ranurada (ver foto 72). Esto se debe a que en el momento del resalto parte del lodo sale por las ventanas y al desalojarlo, es menor el volumen que contribuye con el mismo.
- El tamaño del resalto es menor cuando la presa está colmatada que cuando está vacía. Ver foto 73 y 74.

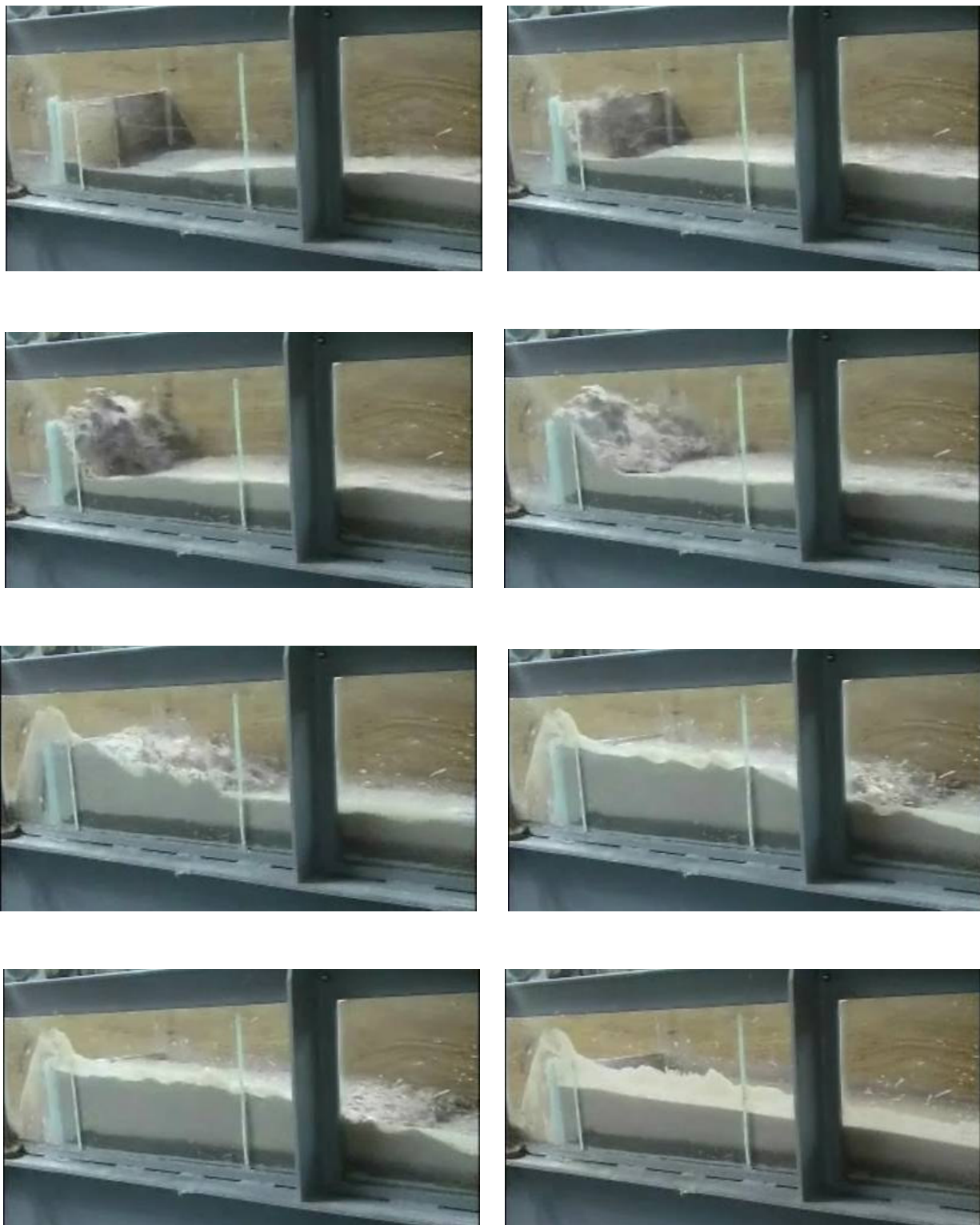


Foto 59. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa ranurada colmatada. Densidad de lodo $1,25\text{gr/cm}^3$ y pendiente del canal 3%.

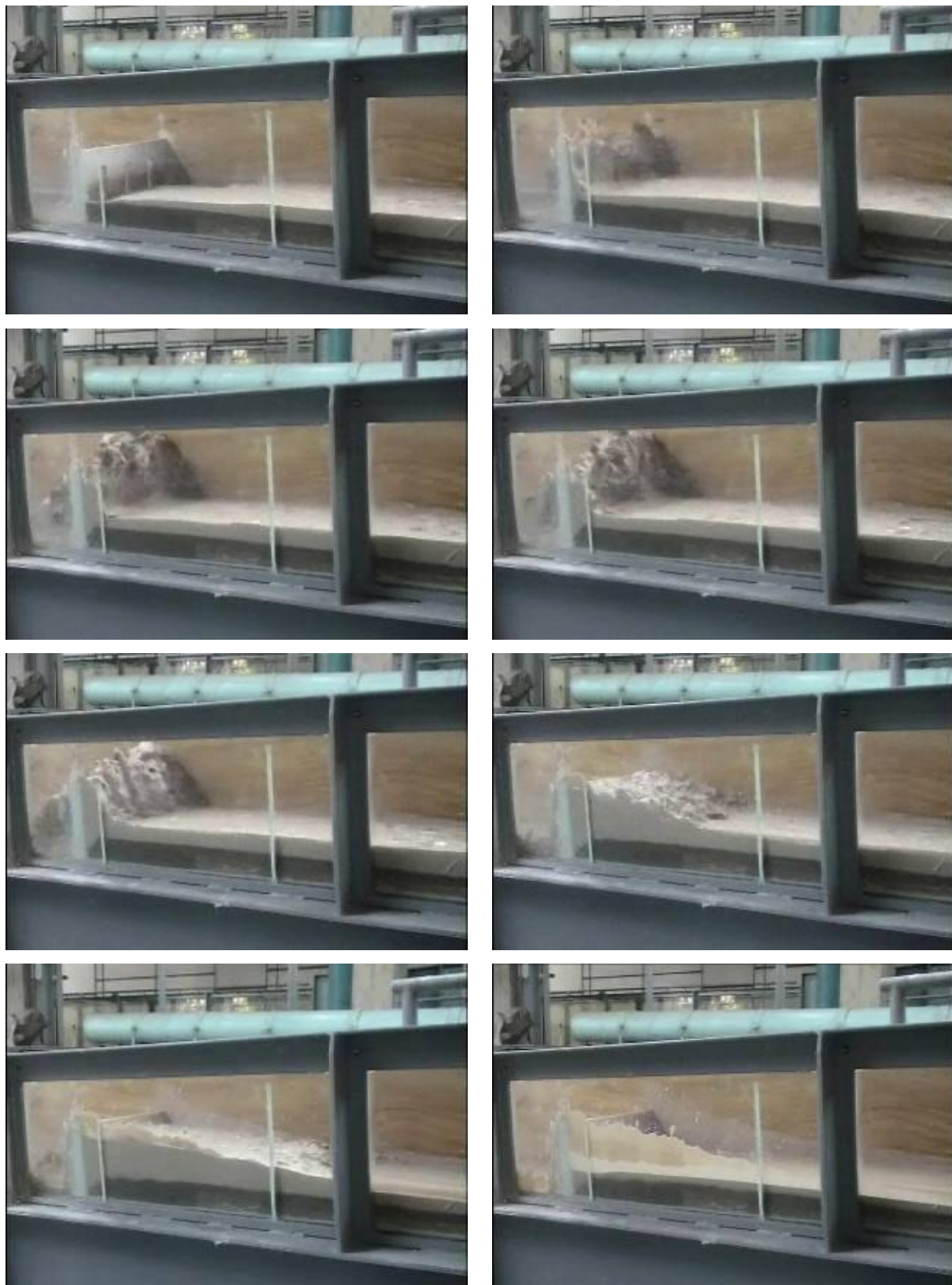


Foto 60. Secuencia del choque de la ola de lodo con la presa de ventanas colmatada. Densidad de lodo $1,42\text{gr/cm}^3$ y pendiente del canal 5%.



Foto 61. Impacto inicial del lodo con la presa. Densidad de lodo $1,42\text{gr/cm}^3$ y pendiente del canal 3%. Presa de ventanas y ranurada, de izquierda a derecha.



Foto 62. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo ($1,25\text{gr/cm}^3$) y la presa de ranurada para una pendiente del canal de 3%



Foto 63. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo ($1,25\text{gr/cm}^3$) y la presa de ranurada para una pendiente del canal de 5%.

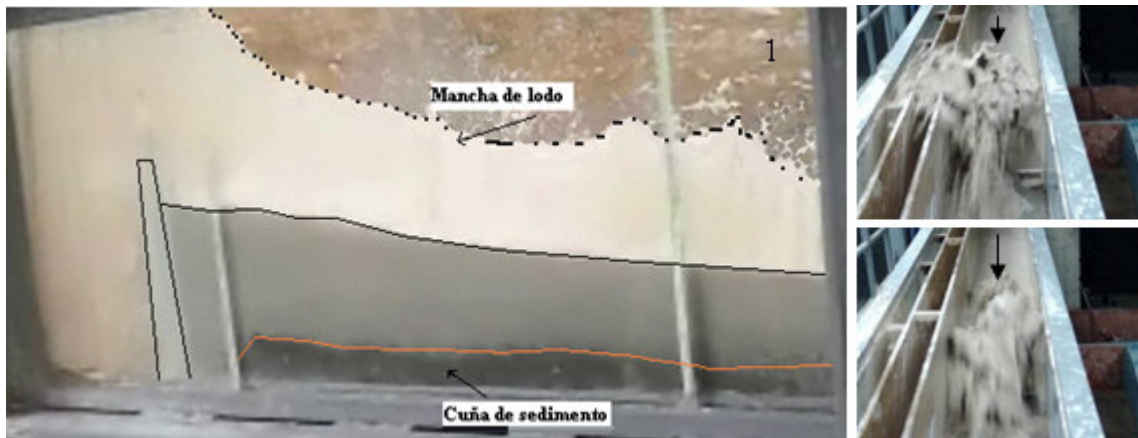


Foto 64. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo ($1,25\text{gr/cm}^3$) y la presa de ranurada para una inclinación del canal de 7%.



Foto 65. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo ($1,42\text{gr/cm}^3$) y la presa de ventana para una inclinación del canal de 3%.

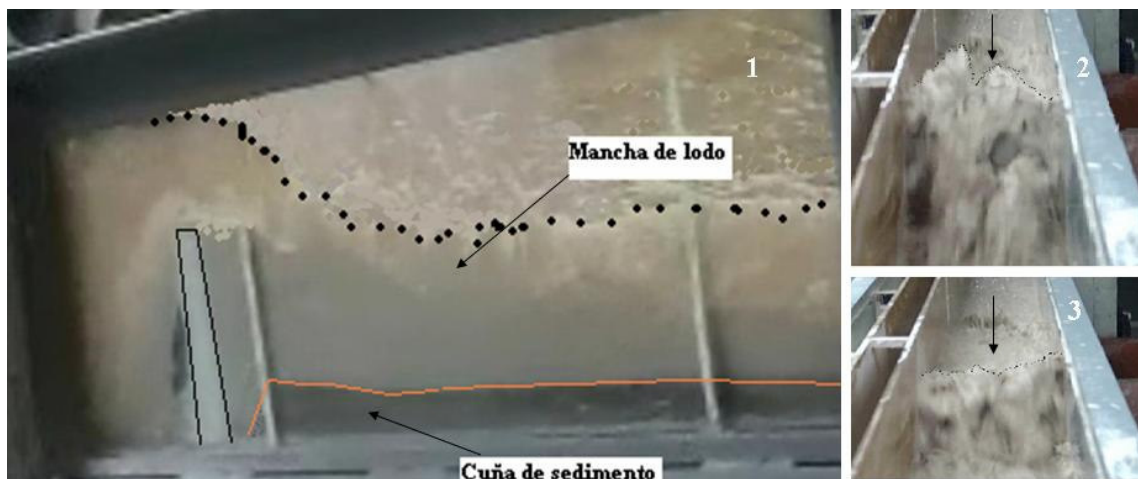


Foto 66. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo ($1,42\text{gr/cm}^3$) y la presa de ventana para una inclinación del canal de 5%.



Foto 67. Vista de frente y de perfil del choque entre el lodo ($1,42\text{gr/cm}^3$) y la presa de ventana para una inclinación del canal de 7%.



Foto 68. Desbordamiento de lodo en presas colmatadas. Pendiente del canal 7%. Densidad de lodo $1,25\text{ gr/cm}^3$.



Foto 69. Mancha de lodo sobre presa ranurada colmatada para pendiente de 3%. De izquierda a derecha densidad de lodo $1,25$ y $1,42\text{ g/cm}^3$.



Foto 70. Mancha de lodo sobre presa ventana colmatada para pendiente de 3%. De izquierda a derecha densidad de lodo 1,25 y 1,42 g/cm³.



Foto 71. Mancha de lodo sobre presa ventana colmatada para pendiente de 5%. De izquierda a derecha densidad de lodo 1,25 y 1,42 g/cm³.

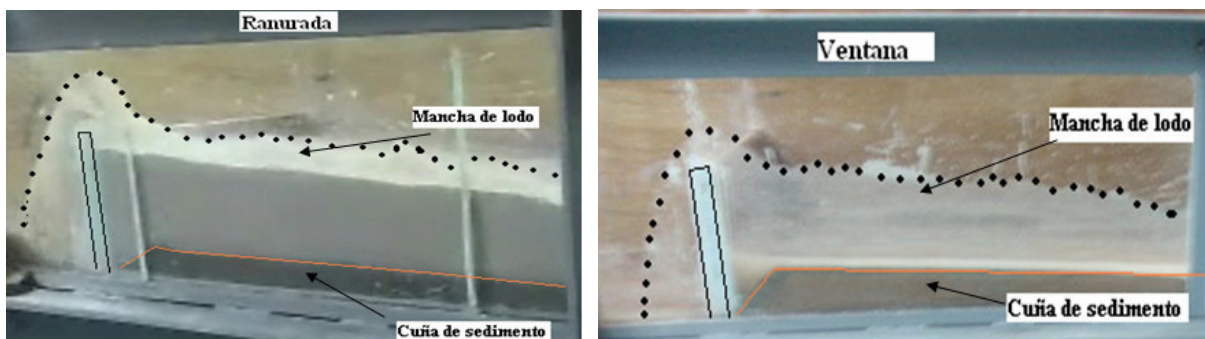


Foto 72. Mancha de lodo de 1,25gr/cm³ de densidad para inclinación del canal de 3%.

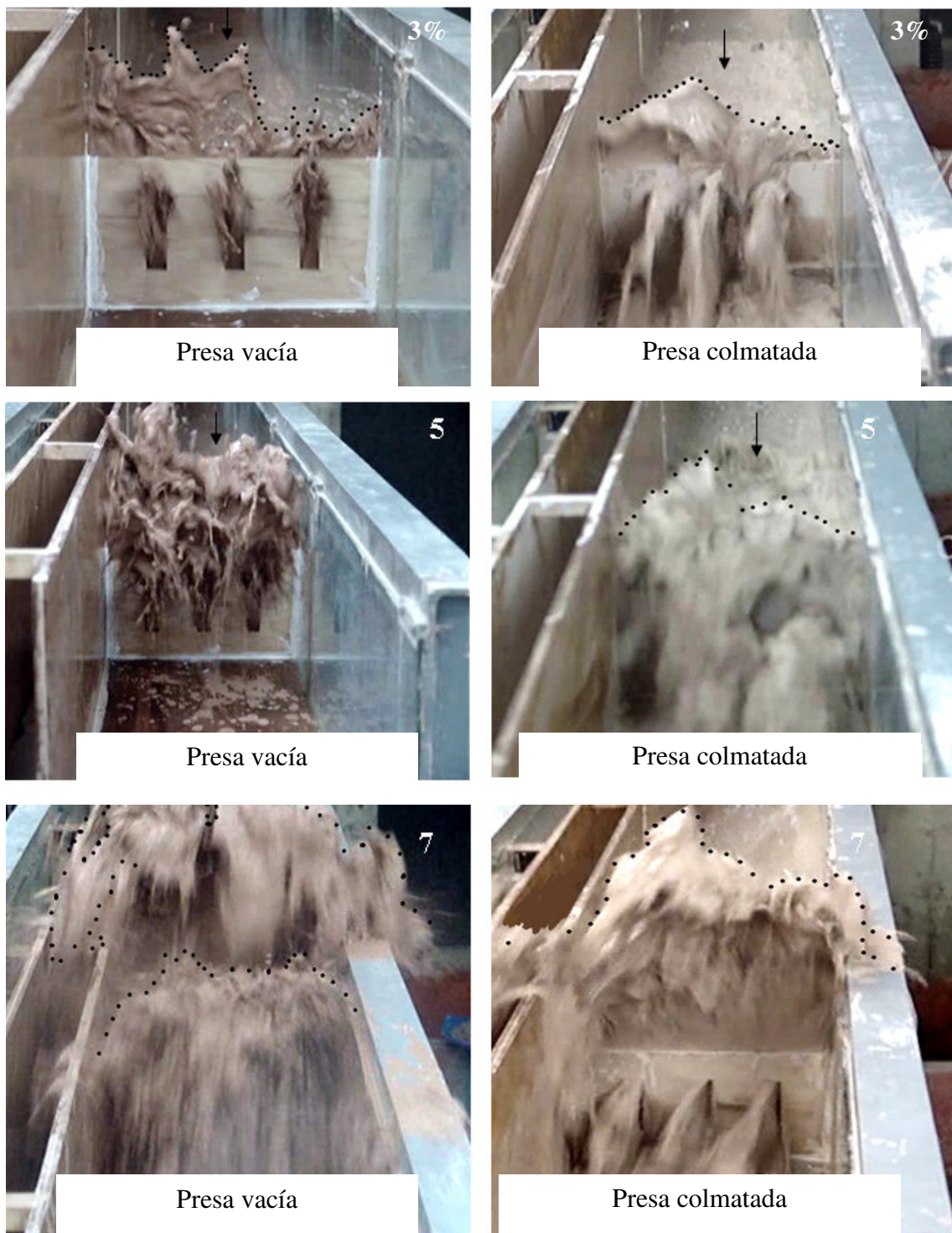


Foto 73. Tamaño del resalto en presa de ventana vacía y colmatada. Densidad del lodo $1,25\text{gr/cm}^3$ De arriba hacia abajo pendiente 3, 5 y 7%.



Foto 74. Tamaño del resalto en presa ranurada vacía y colmatada. Densidad de lodo $1,42\text{gr/cm}^3$. Pendiente del canal 5% .

5.2.2.3. Proceso de escorrentía normal (flujo de agua y arena)

A continuación se muestra los resultados obtenidos del proceso de escorrentía de los dos tipos de presas abiertas bajo las mismas condiciones de caudal líquido y sólido, posteriores al lanzamiento de las dos mezclas de lodo de diferente densidad.

Tabla 10. Resultados obtenidos del proceso de escorrentía normal sobre presas colmatadas.

| Volumen de arena agregado, $V_a = 50$ lts | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|-----|-----|------|-----|----|---------|----|-----|------|-----|-----|
| Tipo de presa | RANURADA | | | | | | VENTANA | | | | | |
| Densidad del Lodo, ρ (gr./cm ³) | 1,25 | | | 1,42 | | | 1,25 | | | 1,42 | | |
| Pendiente del canal, S (%) | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 | 3 | 5 | 7 |
| Volumen de arena pasante, Vap (lts) | 30 | 54 | 62 | 29 | 73 | 63 | 38 | 55 | 64 | 39 | 56 | 66 |
| Longitud de la cuña de arena inicial, L2 (cm.) | 134 | 107 | 122 | 150 | 168 | 97 | 150 | 92 | 130 | 176 | 126 | 120 |
| Longitud de la cuña de arena final, L3 (cm.) | 320 | 131 | 48 | 335 | 80 | 57 | 330 | 88 | 49 | 292 | 94 | 47 |

En la tabla 10 se observa que, sin importar la densidad del lodo y el tipo de presa, a mayor pendiente, mayor volumen de arena pasante y que esta cantidad es mayor en presa de ventana; esta diferencia es más visible en 3% de pendiente (ver gráfico 14). A partir de 7 % no parece influir el tipo de presa.

De los valores de volumen de arena pasante y variación de longitud final de la cuña de arena se infiere que, sin importar el tipo de presa y la densidad del lodo, en 3% pendiente la tendencia es a

la sedimentación, en 5 y 7% de pendiente la tendencia es a la erosión (ver fotos 75 y 76 y figura 9). Por ejemplo, en 3% de pendiente, en ambas presas y ambas densidades de lodo, el volumen de arena pasante es menor al agregado y la longitud final es mayor a la inicial.

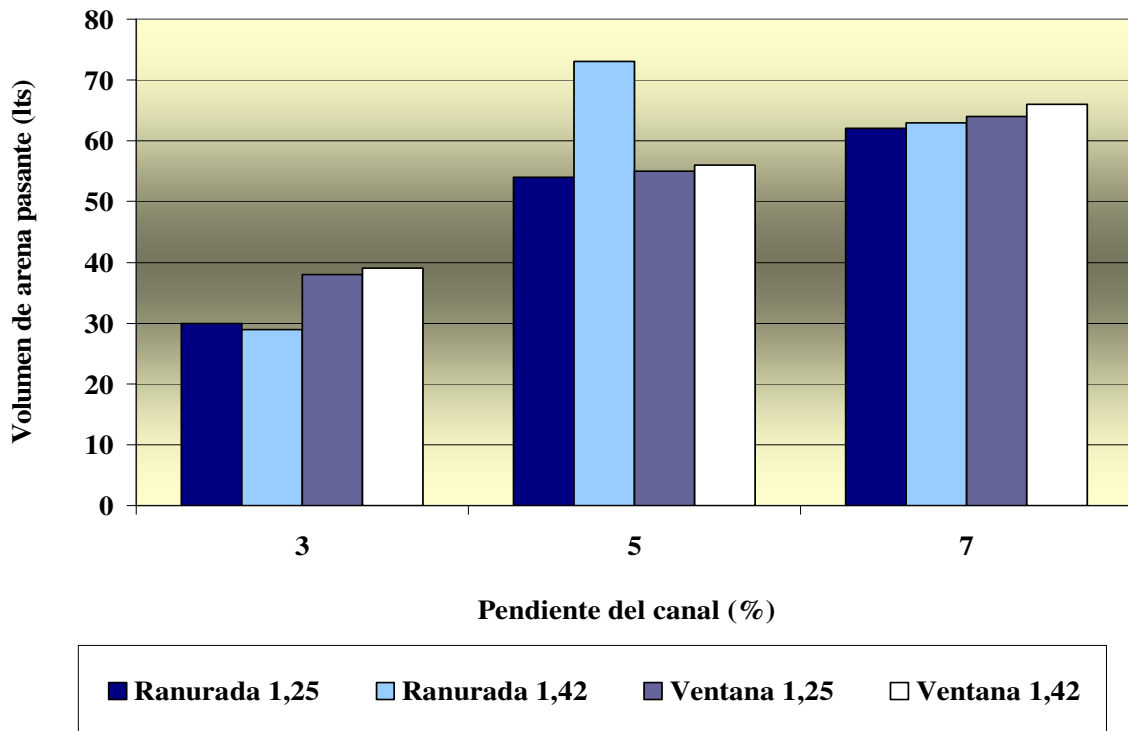


Gráfico 14. Relación entre volumen pasante de arena y pendiente del canal en el proceso de escorrentía normal sobre presas colmatadas.



Foto 75. Escorrentía sobre presa de ventana después del paso de un lodo de densidad $1,42\text{gr/cm}^3$. De izquierda a derecha pendiente 3 y 7%



Foto 76. Escorrentía sobre presa Ranurada lodo de 1,42. Pendiente 3 y 7%.

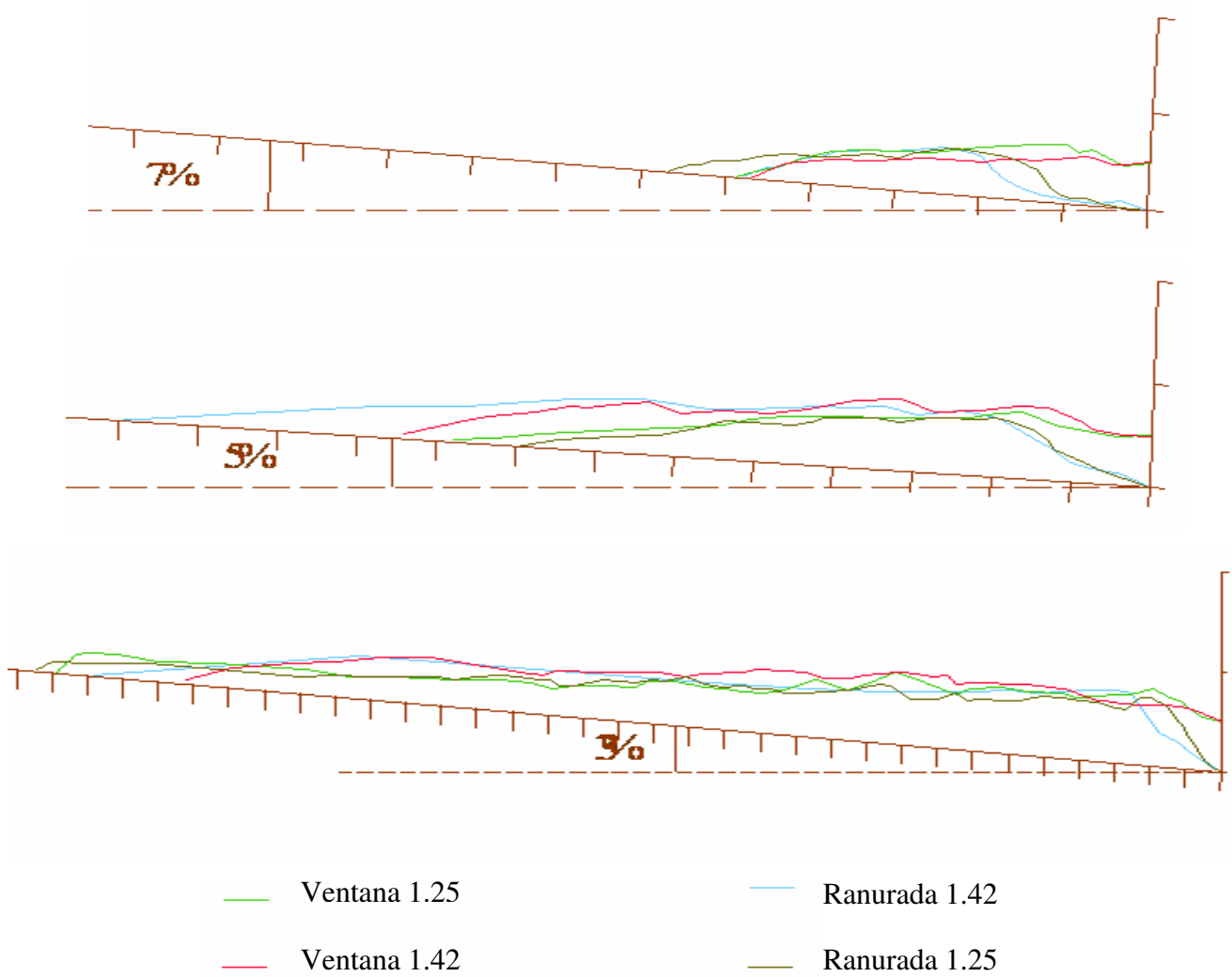


Figura 9. Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de las presas después de la escorrentía.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6. 1. CONCLUSIONES

A través de los resultados obtenidos y el análisis de los mismos se ha llegado a las siguientes conclusiones aplicables al caso estudiado:

Presas Vacías:

- En la presa cerrada, para ambas densidades de lodo, a mayor pendiente menor volumen retenido. Pero, para una misma pendiente, a mayor densidad de lodo menor volumen retenido, esta diferencia disminuye al aumentar la pendiente. A partir de 7%, el comportamiento es similar sin importar la densidad del lodo.
- En la presa de ventana, para ambas densidades de lodo, a mayor pendiente menor volumen de lodo retenido. Para una misma pendiente, el comportamiento es el mismo sin importar la densidad del lodo.
- En las presas ranuradas, para todas las pendientes y sin importar la densidad del lodo el volumen retenido es nulo.
- En todas las presas se forma un resalto hidráulico producto del choque del lodo con la misma, que disipa una parte de la energía del flujo. Como consecuencia del almacenamiento temporal, producido por la presa, se reduce el caudal pico de la creciente, se propicia detrás de la presa la sedimentación y queda así reducida la concentración del flujo hacia aguas abajo.
- En todas las pendientes (3, 5 y 7%) pasa parte del lodo por encima de la presa por efecto del choque. La cantidad de lodo que pasa por encima de la presa aumenta con la pendiente, al igual que la altura del resalto.
- En todos los tipos de presa, para una misma pendiente del canal, se cumple que a mayor densidad de lodo menor la altura del resalto.

- Para pendiente del canal de 7% la situación se hace crítica pues la cantidad que pasa por encima de la presa parece ser excesiva. Este comportamiento ocurre con ambas densidades de lodo. La densidad del lodo parece dejar de ser una variable importante para esta pendiente.
- A igual pendiente y densidad de lodo, la altura del resalto es similar en todos los tipos de presa.
- Las presas abiertas, de ventanas y ranurada, retienen el lodo por un tiempo limitado y lo liberan de forma continua y constante, en la medida que continua el escurrimiento, posterior a la creciente, actuando como disipadores de energía.

Presas Colmatadas:

- Sin importar el tipo de presa, se produce acumulación de sedimentos a pesar de que el grano de arena es menor al tamaño de las aberturas. La sola presencia de un obstáculo propicia la sedimentación.
- En las presas abiertas, a mayor densidad de lodo y menor pendiente del canal es menor el volumen de lodo pasante. Esta diferencia disminuye, en el caso de la presa ranurada para 7% de pendiente y en presa de ventanas para 5%.
- A igual pendiente y densidad de lodo, el volumen de lodo pasante es mayor en la presa de ventana que en la ranurada.
- No es posible determinar si existe un patrón que relacione la variación de la longitud de la cuña de arena luego del paso del lodo con el tipo de presa, pendiente del canal y tipo de lodo.
- En todas las presas se forma un resalto hidráulico producto del choque del lodo con la misma, que disipa una parte de la energía del flujo. Como consecuencia del

almacenamiento temporal, producido por la presa, se reduce el caudal pico de la creciente, se propicia detrás de la presa la sedimentación y queda así reducida la concentración del flujo hacia aguas abajo.

- Las presas abiertas, de ventanas y ranurada, retienen el lodo por un tiempo limitado y lo liberan de forma continua y constante, en la medida que continua el escurrimiento, posterior a la creciente, actuando como disipadores de energía.
- En todas las pendientes (3, 5 y 7%) pasa parte del lodo por encima de la presa por efecto del choque. La cantidad de lodo que pasa por encima de la presa aumenta con la pendiente, al igual que la altura del resalto.
- Para una misma pendiente del canal y tipo de presa, el tamaño del resalto es similar sin importar la densidad del lodo. La densidad del lodo parece dejar de ser una variable importante cuando están colmatadas.
- El tamaño del resalto es ligeramente menor en la presa de ventana que en la ranurada.
- Para pendiente del canal de 7% la situación se hace crítica pues la cantidad que pasa por encima de la presa parece ser excesiva. Este comportamiento ocurre con ambos tipos de presa.
- El tamaño del resalto es menor cuando la presa está colmatada que cuando está vacía.
- Por efecto de la escorrentía normal, sin importar la densidad de lodo y el tipo de presa, la erosión de la cuña de arena aumenta a mayor pendiente.

En general se tienen las siguientes conclusiones:

- El modelaje utilizado resultó satisfactorio para el alcance de los objetivos.
- Las presas abiertas son igualmente efectivas en la detención de aludes torrenciales que las presas cerradas, con la diferencia de que desalojan la mayor cantidad del flujo y no se colmatan tan rápidamente como éstas últimas. Si consideramos que en el Estado Vargas actualmente predomina el arrastre de sedimentos (material removido por el deslave de 1999) a la formación de aludes torrenciales, resulta más eficiente el uso de presas abiertas en lugar de cerradas, pues amerita menores costos de mantenimiento o limpieza (remoción de sedimentos). Con esto no se concluye que las presas cerradas no sean eficientes, sino que se deben colocar en sitios específicos, como por ejemplo, donde se necesite reducir la pendiente del cauce. Si se utilizan para detener aludes torrenciales se debe estar consciente de que es necesario hacerle mantenimiento o dragado periódico para que resulten realmente efectivas.
- Entre las presas abiertas, es más efectiva la presa de ventanas que la ranurada, pues si bien ambas propician acumulación de sedimentos que reduce la pendiente y disminuye la velocidad del alud torrencial, antes de llegar a la misma, el hecho de que tenga mayor número de aberturas propicia el desalojo más rápido de la matriz fina. Esta matriz es la que transporta los grandes peñones responsables de los mayores daños. Si esta matriz es removida del alud, se inmovilizan los grandes peñones antes de que lleguen a las poblaciones asentadas aguas abajo.
- Sin importar la densidad del lodo y el tipo de presa, para pendientes mayores a 7% no se aplica el uso eficiente de una sola presa de retención de sedimentos. Será necesario el uso de más presas u otro dispositivo adicional para la detención efectiva de un alud torrencial.

6.2. RECOMENDACIONES

Para la óptima realización de futuros Trabajos Especiales de Grado relacionados a este tema se recomienda:

- Realizar más ensayos para caracterizar mejor este tipo de fluidos.

- Utilizar otro método y otros equipos en la medición de las propiedades de los lodos y tomar en cuenta la variación en la humedad, temperatura y presión atmosférica. Esto con el fin de verificar si los resultados mostrados no dependen de los mismos.

- En la realización de los ensayos tomar en cuenta:
 - Mantener en sitios fijos los equipos de video.
 - Utilizar sensores para mediciones de velocidad.
 - Canal automatizado para recirculación, mezclado de lodo y levantamiento súbito de presa.
 - Aumentar la granulometría de los lodos de manera sistemática, así como incluir rugosidad en el fondo del canal.
 - Ampliar el rango de densidades de lodo, preferiblemente a partir de $1,25 \text{ gr. /cm}^3$.
 - Variar número y tamaño de las aberturas de las presas abiertas.

- Modelar cada cuenca por separado, debido a lo particular de sus características (pueden haber dos cuencas vecinas con diferentes características), y sobre ella colocar diferentes tipos de presas, variando su configuración, para así evaluar el comportamiento de las presas existentes y por construir.

Por último, se recomienda en el Estado Vargas el uso de presas abiertas con gran número de aberturas. Y por tener este Estado pendientes en sus cauces mayores a 7%, se recomienda la construcción de gran número de ellas. Una sola no es suficientemente efectiva.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguirre-Pe, Julián. ANÁLISIS DE PROPIEDADES DE LODOS. CHIDRA, Laboratorio de Hidráulica. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. Mérida. Venezuela. 2004.
2. Aguirre Pe, Julián y Moncada, Alix. REGÍMENES EN EL FLUJO DE BARROS Y ESCOMBROS. Universidad de los Andes. Venezuela. 1999.
3. Banesco Seguros, C.A. INGENIERÍA FORENSE Y ESTUDIOS DE SITIO. Guía para la prevención de Gestión de Riesgos. Primera Edición. Caracas. 2006.
4. Blanco Álvarez, Armando. MODELOS REOLÓGICOS PARA ALUVIONES TORRENCIALES. Instituto de Mecánica de Fluidos. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. 2003.
5. Blanco Álvarez, Armando. PROTOCOLO PARA LA PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE BARROS. Versión 1.0. Instituto de Mecánica de Fluidos. Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela. 2003.
6. Brea, José Daniel y Spalletti, Pablo Daniel. FLUJOS DENSOS E HIDRÁULICA DE RÍOS. Instituto Nacional de Agua (INA). Argentina. 2003.
7. <http://www.insivumeh.gob.gt/geofisica/laderas> (consulta 09-11-06).
8. <http://www.geocities.com/gsilvam>. (Consulta 10-10-2006).
9. Instituto de Mecánica de Fluidos. EVALUACIÓN Y DIAGNOSTICO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PRESAS DE CONTROL DE SEDIMENTOS DE LAS PRESAS DE CONTROL DE SEDIMENTOS Y CANALIZACIONES EN EL ESTADO

VARGAS CON MOTIVO DE LAS LLUVIAS DE FEBRERO DEL 2005. Informe técnico. 2005.

10. Suárez Díaz, Jaime. CONTROL DE EROSIÓN EN ZONAS TROPICALES. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Bucaramanga. Colombia. 2001.

11. Suárez Villar, Luís Miguel. PRESAS DE CORRECCIÓN DE TORRENTES Y RETENCIÓN DE SEDIMENTOS. 1era Edición. Ministerio del Ambiente y de los recursos naturales renovables. Venezuela. 1993.

8. APÉNDICES

APÉNDICE 1: Granulometría de la arena utilizada en los ensayos experimentales:

PLANILLA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

GRANULOMETRÍA DE MUESTRAS DE SEDIMENTOS DEL LECHO

UBICACIÓN DE LA MUESTRA: IMF. Ensayo

FECHA DE RECOLECCIÓN:

FECHA DE LABORATORIO: 27/04/05

PESO DE LA MUESTRA (g): **360,61**

| TAMIZ | DIÁMETRO (mm) | PESO RETENIDO (g) | PESO ACUMULADO (g) | % MAS GRUESO | % MÁS FINO |
|-------|------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|---------------|
| 1 | 25 | 0 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 1/4 | 6,3 | 0 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 5 | 4 | 0 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 6 | 3,35 | 0 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 10 | 2 | 0 | 0 | 0,00 | 100,00 |
| 18 | 1 | 271,84 | 271,84 | 75,38 | 24,62 |
| 45 | 0,355 | 87,08 | 358,92 | 99,53 | 0,47 |
| 60 | 0,25 | 0,86 | 359,78 | 99,77 | 0,23 |
| 80 | 0,18 | 0,39 | 360,17 | 99,88 | 0,12 |
| 120 | 0,125 | 0,18 | 360,35 | 99,93 | 0,07 |
| 200 | 0,075 | 0,12 | 360,47 | 99,96 | 0,04 |
| PAN | | 0,14 | 360,61 | 100,00 | 0,00 |

APÉNDICE 2: Propiedades de las arcillas utilizadas en los ensayos experimentales:



VENECAOLIN C.A.
Compañía Venezolana de Caolin

INDUSTRIAL VENECAOLIN, C.A.

HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

CAOLIN tipo “CR-1”- (Rojo)

| <u>ANÁLISIS QUÍMICO: (*)</u> | % |
|--|----------|
| SiO ₂ : | 60,88 |
| CaO: | 2,58 |
| MgO: | 0,16 |
| Al ₂ O ₃ : | 25,79 |
| Fe ₂ O ₃ : | 1,36 |

| <u>ANÁLISIS FÍSICO: (**)</u> | % |
|---------------------------------|----------|
| HUMEDAD: | 7,50 |
| PERDIDA A LA CALCINACIÓN: | 9,15 |

| <u>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO: (***)</u> | % |
|---------------------------------------|----------|
| PASANTE sobre la MALLA 200: | 100 |
| RETENIDO sobre la MALLA 200: | |

(*) Los valores aquí descritos fueron obtenidos directamente a través de proveedor en la mina, y son primordialmente referenciales.

(**) Los valores de humedad del producto terminado fluctúan según la humedad presente en la materia prima al momento del proceso y aquella presente en su entorno en almacén.

(***) Damos fe que los valores granulométricos aquí suministrados son reales y fidedignos.

APÉNDICE 2: Continuación.



V E N E C A O L I N C. A.
Compañía Venezolana de Caolin

INDUSTRIAL VENECAOLIN, C.A.

HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

CAOLIN tipo "CR-1"- (Blanco)

| <u>ANÁLISIS QUÍMICO: (*)</u> | % |
|--|----------|
| SiO ₂ : | 65,08 |
| CaO: | 0,55 |
| MgO: | 0,20 |
| Al ₂ O ₃ : | 24,15 |
| Fe ₂ O ₃ : | 0,50 |

| <u>ANÁLISIS FÍSICO: (**)</u> | % |
|-------------------------------------|----------|
| HUMEDAD: | 7,50 |
| PERDIDA A LA CALCINACIÓN: | 4,82 |


| <u>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO: (***)</u> | % |
|--|----------|
| PASANTE sobre la MALLA 200: | 100 |
| RETENIDO sobre la MALLA 200: | |

(*) Los valores aquí descritos fueron obtenidos directamente a través de proveedor en la mina, y son primordialmente referenciales.

(**) Los valores de humedad del producto terminado fluctúan según la humedad presente en la materia prima al momento del proceso y aquella presente en su entorno en almacén.

(***) Damos fe que los valores granulométricos aquí suministrados son reales y fidedignos.


APÉNDICE 3: Tablas utilizadas para recolección de datos en los ensayos experimentales:

| | | | |
|---|--|---|--|
|  | EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE PRESAS DE CONTROL O RETENCIÓN DE SEDIMENTOS, ABIERTAS Y CERRADAS, A TRAVÉS DE LA REALIZACIÓN DE MODELAJE FÍSICO. | | |
| | Alud Torrencial sobre Presa Vacía | | |
| Fecha: | | | |
| Datos | | | |
| Tipo de Presa: | | Densidad del flujo, final ρ (gr./cm ³): | |
| Volumen de control: | | Volumen Retenido(m ³): | |
| Concentración del lodo (%): | | | |
| Densidad del flujo inicial, ρ (gr./cm ³): | | Volumen Pasante(m ³): | |
| Pendiente del canal (%): | | | |
| Nº de Ensayo: | | | |
| | | | |
| OBSERVACIONES: | | | |
| | | | |

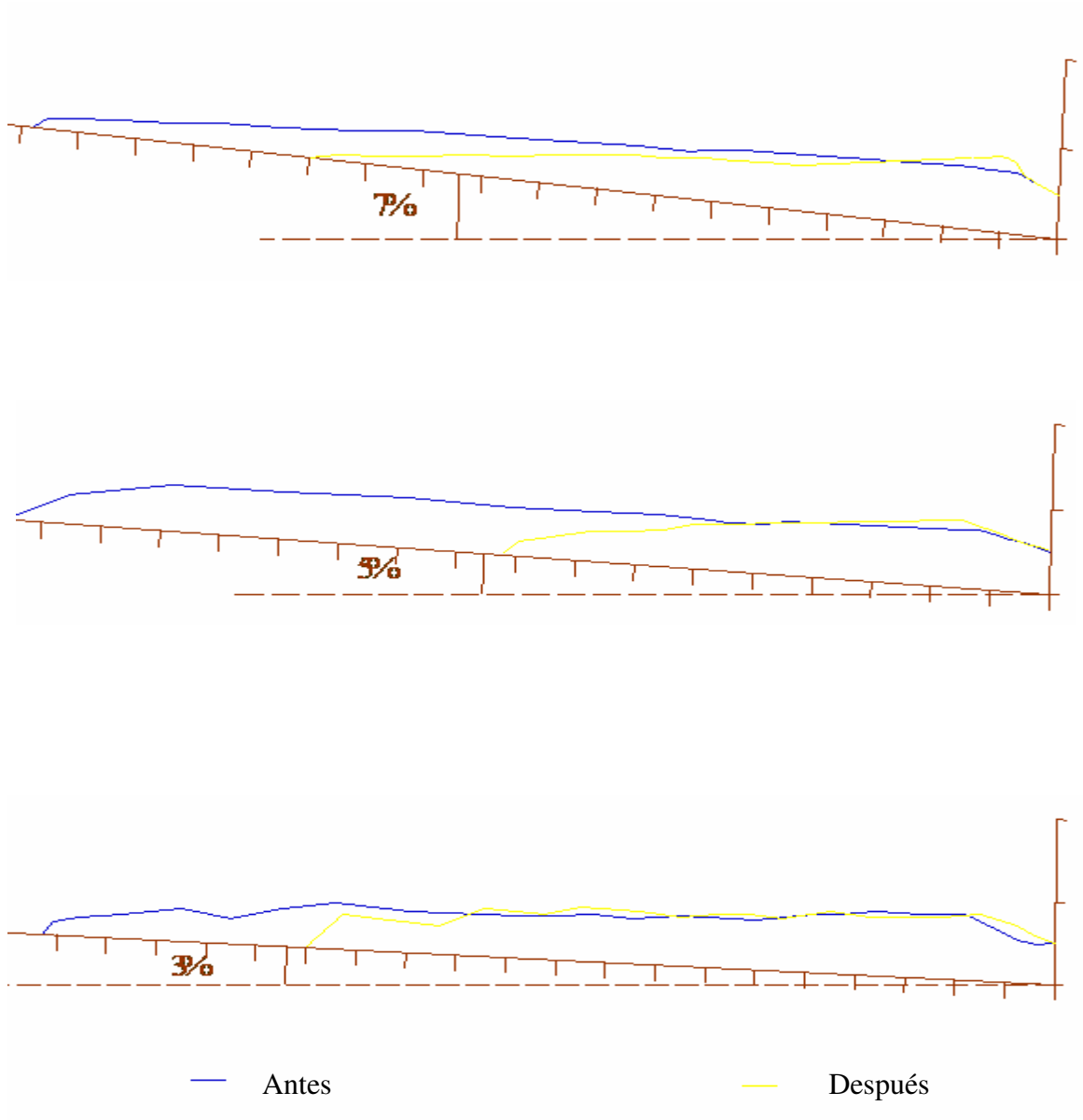
APÉNDICE 3: Continuación:

| | | | |
|---|--|--|--|
|  | EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE PRESAS DE CONTROL O RETENCIÓN DE SEDIMENTOS, ABIERTAS Y CERRADAS, A TRAVÉS DE LA REALIZACIÓN DE MODELAJE FÍSICO. | | |
| | Alud Torrencial sobre Presa Colmatada | | |
| Fecha: | | | |
| Datos | | | |
| Tipo de Presa: | | Densidad del flujo final, ρ (gr./cm ³): | |
| Concentración del lodo (%): | | Densidad del flujo inicial, ρ (gr./cm ³): | |
| Pendiente del canal (%): | | Volumen de lodo agregado (m ³): | |
| Ensayo N°: | | Volumen de lodo Pasante(m ³): | |
| | | | |
| OBSERVACIONES: | | | |
| | | | |

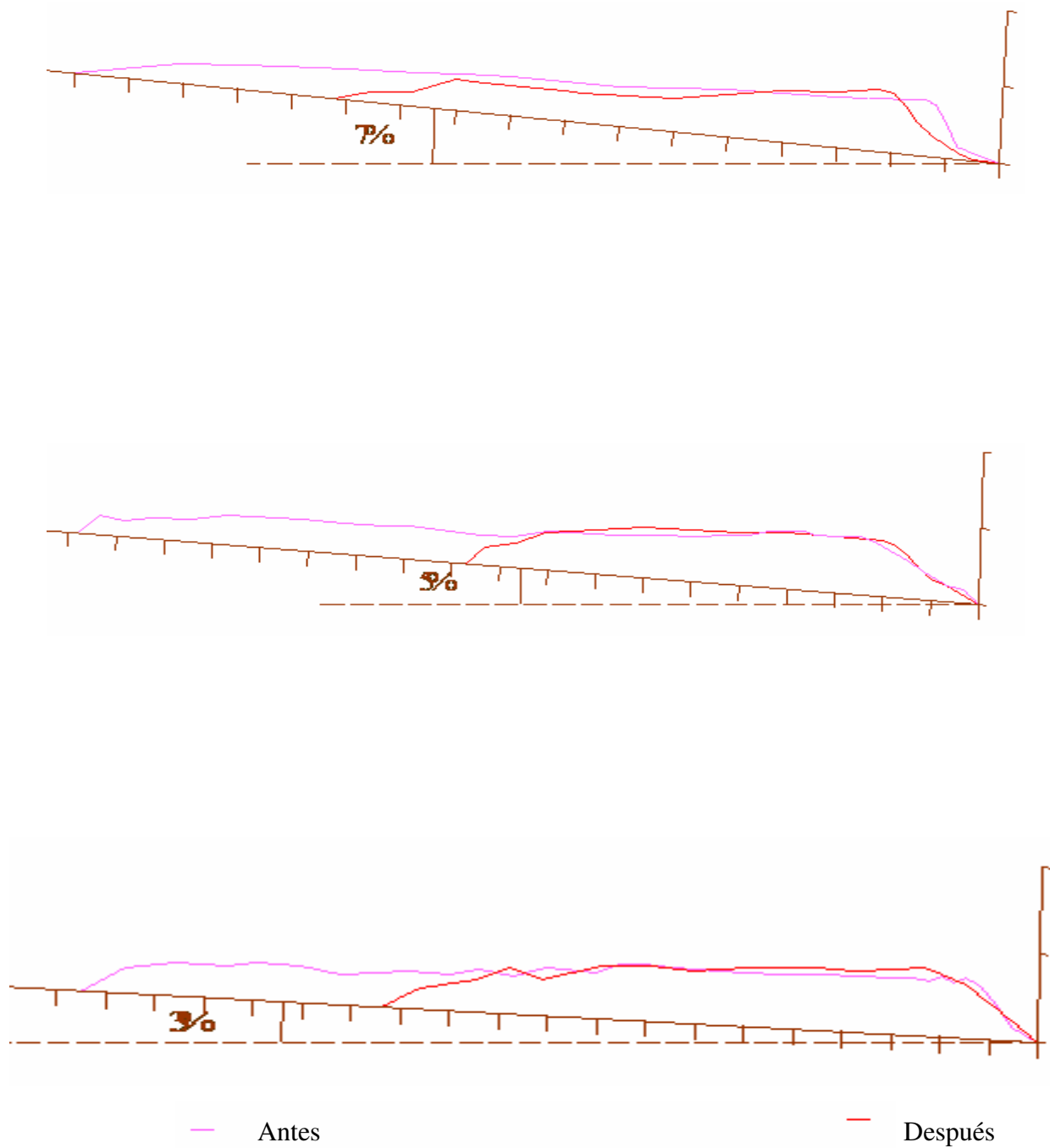
APÉNDICE 3: Continuación:

| | | | |
|---|--|--|--|
|  | EVALUACIÓN CUALITATIVA DEL COMPORTAMIENTO HIDRAULICO DE PRESAS DE CONTROL O RETENCIÓN DE SEDIMENTOS, ABIERTAS Y CERRADAS, A TRAVÉS DE LA REALIZACIÓN DE MODELAJE FÍSICO. | | |
| | Escorrentía Normal sobre Presa Colmatada | | |
| Fecha: | | | |
| Datos | | | |
| Tipo de Presa: | | Volumen del sedimento agregado durante la escorrentía (m3): | |
| Caudal de la escorrentía(lts/s): | | Volumen de sedimento pasante durante la escorrentía (m3): | |
| Pendiente del canal (%): | | Tiempo de duración de la escorrentía (min.): | |
| Ensayo N°: | | | |
| OBSERVACIONES: | | | |
| | | | |

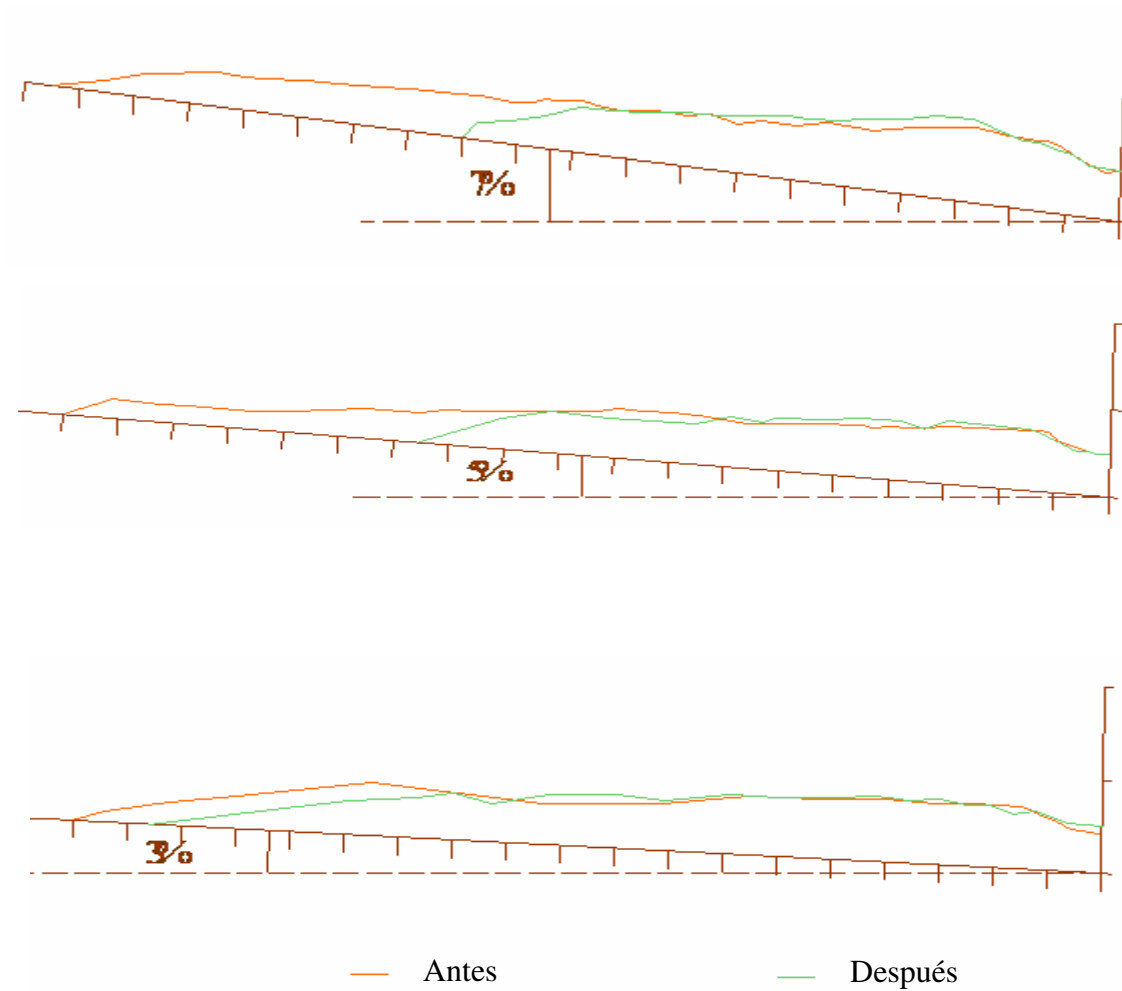
APÉNDICE 4: Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de la presa de ventanas, antes y después de lanzamiento de lodo de densidad 1.25 gr/cm^3 .



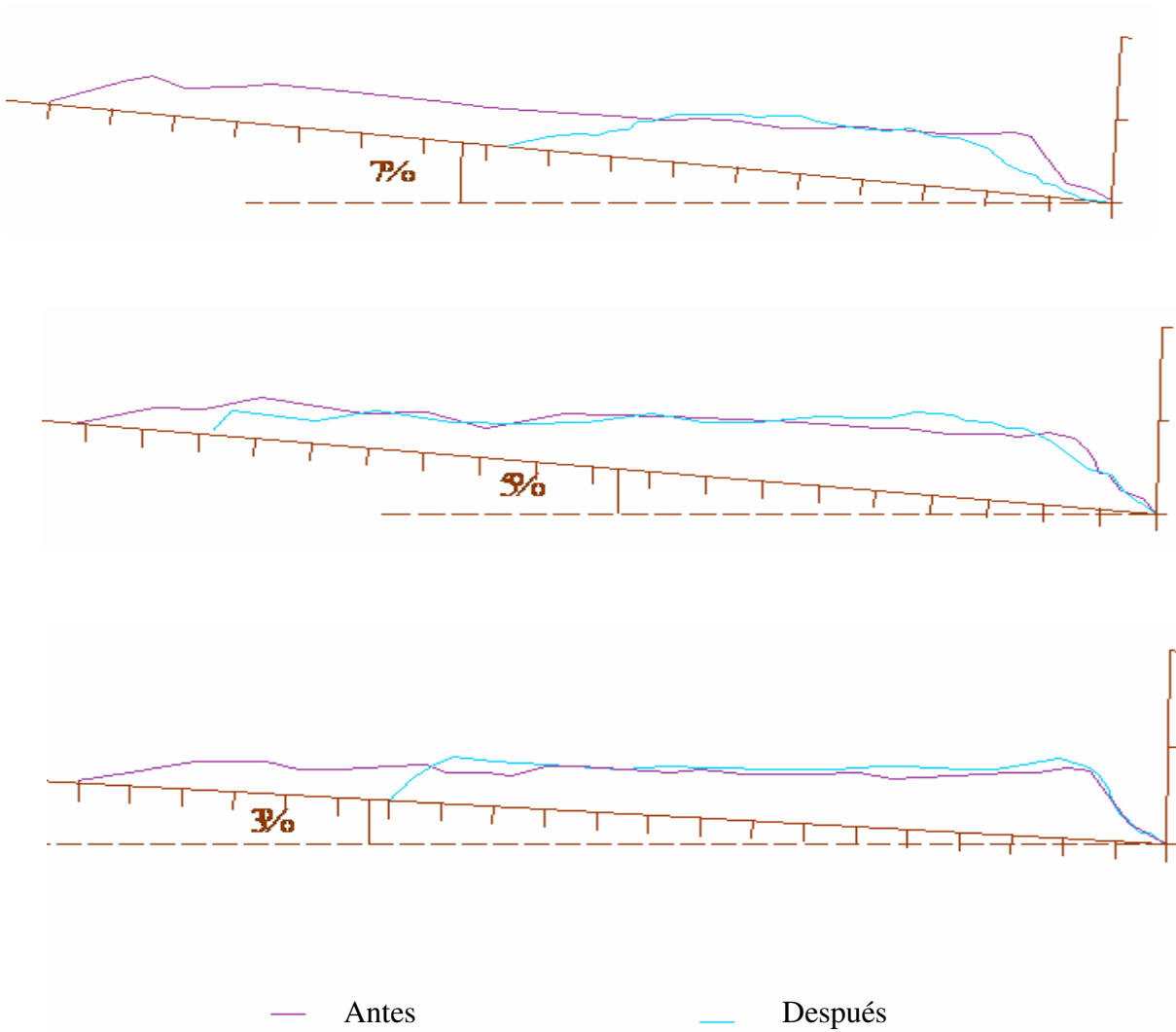
APÉNDICE 5: Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de la presa ranurada, antes y después de lanzamiento de lodo de densidad 1.25 gr/cm^3



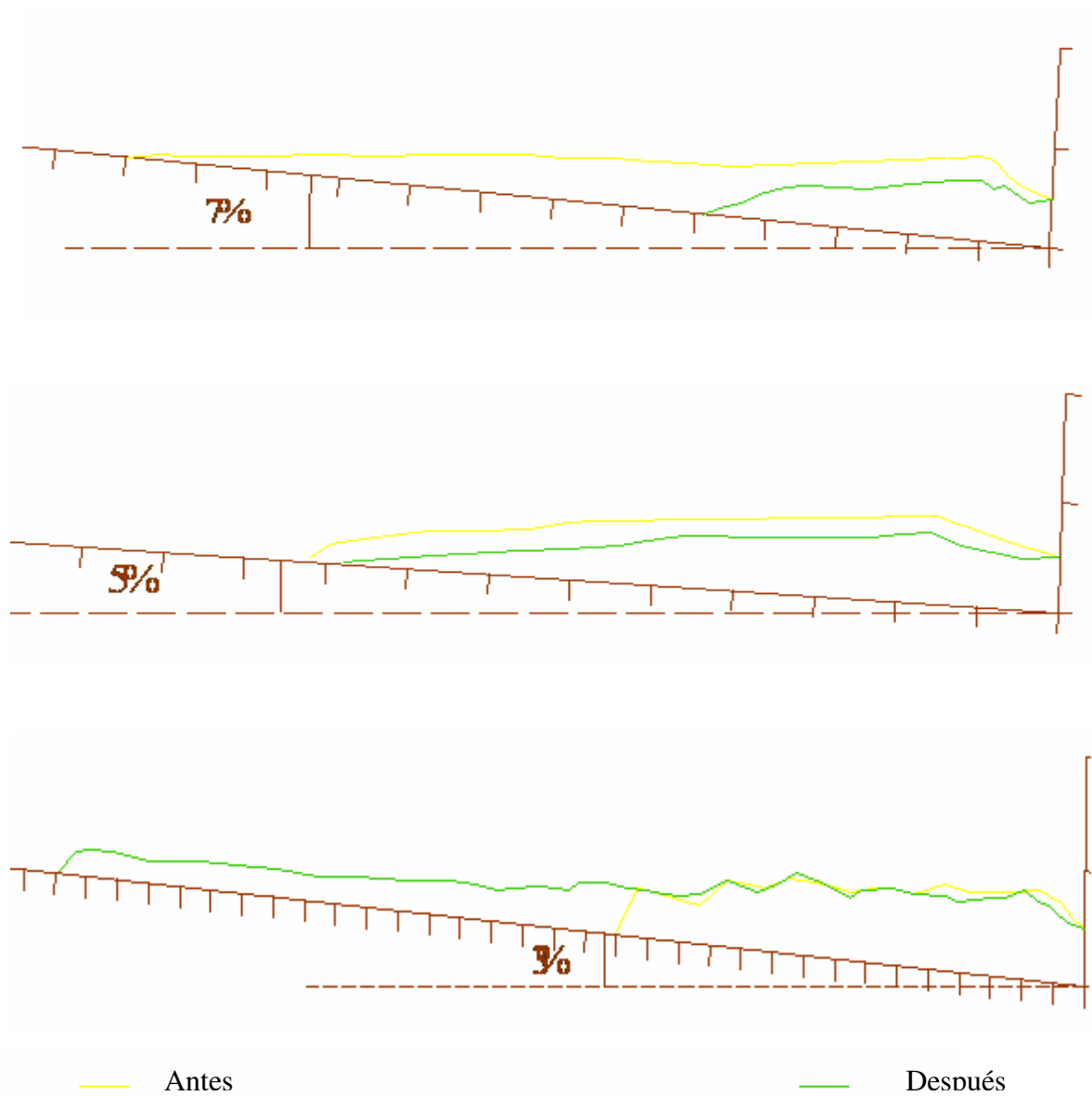
APÉNDICE 6: Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de la presa de ventanas, antes y después de lanzamiento de lodo de densidad 1.42 gr/cm^3



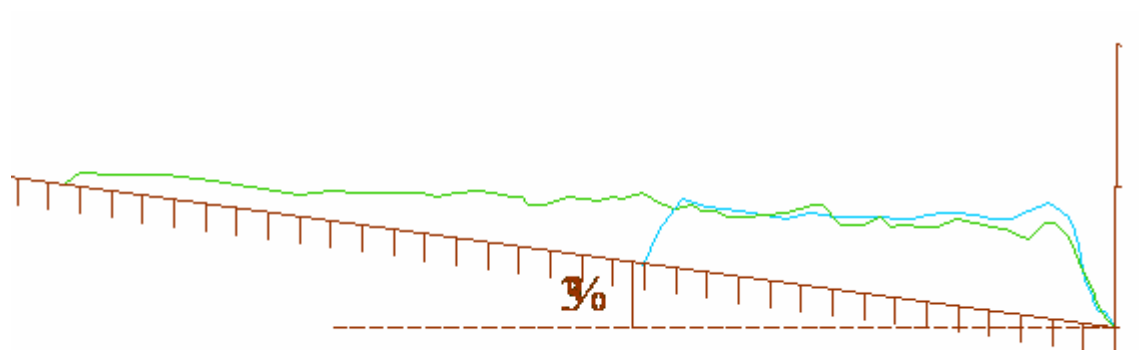
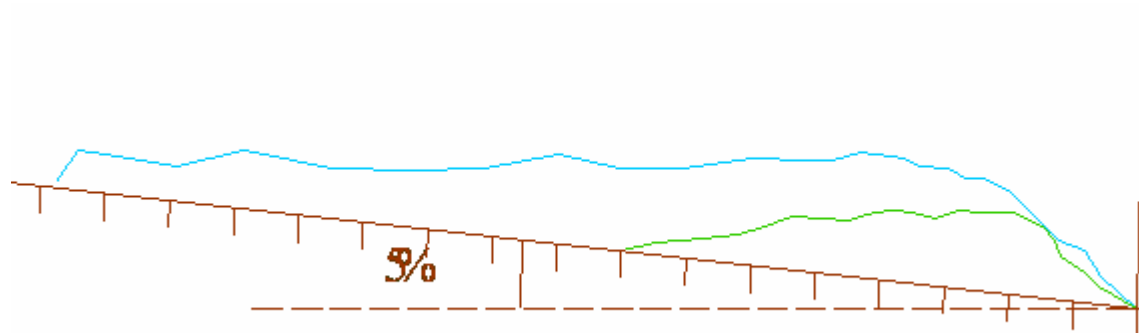
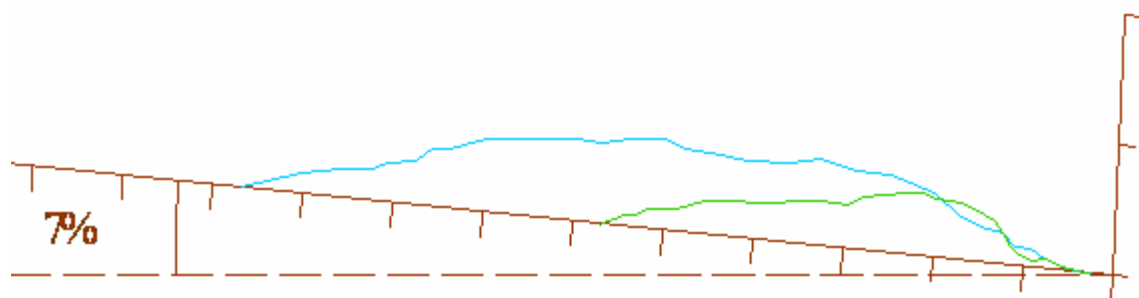
APÉNDICE 7: Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de la presa ranurada, antes y después de lanzamiento de lodo de densidad 1.42 gr/cm^3



APÉNDICE 9: Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de la presa de ventanas, antes y después de la escorrentía. Densidad de lodo 1.25 gr/cm^3



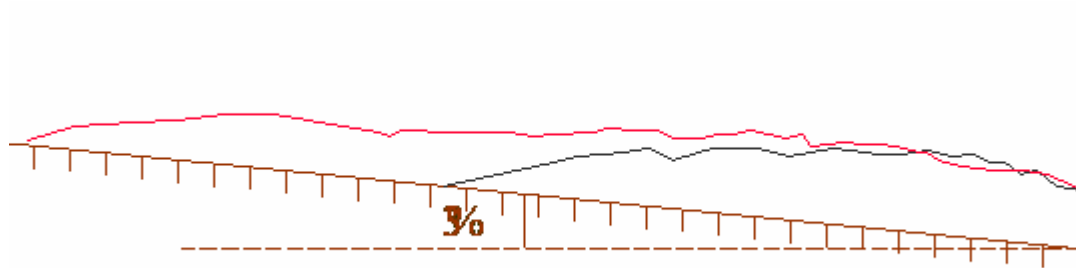
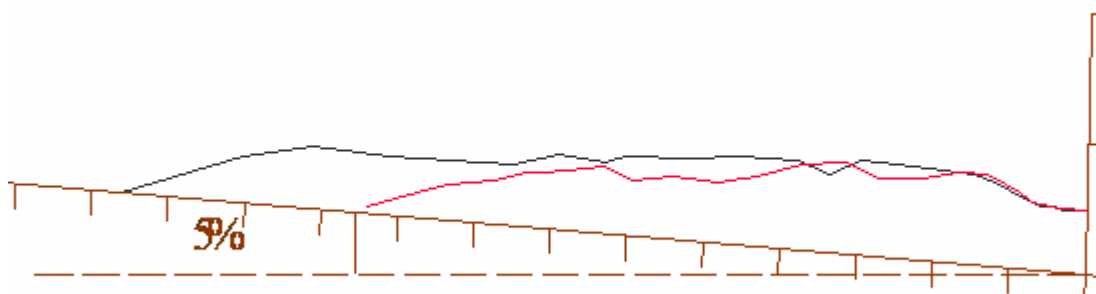
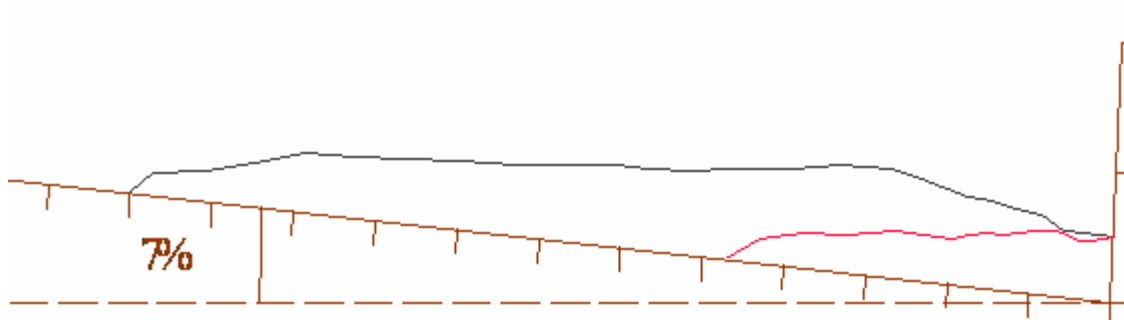
APÉNDICE 10: Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de la presa ranurada, antes y después de la escorrentía. Densidad de lodo 1.42 gr/cm^3



— Antes

— Después

APÉNDICE 11: Perfiles de la cuña de arena sedimentada aguas arriba de la presa de ventanas, antes y después de la escorrentía. Densidad de lodo 1.42 gr/cm³.



Antes



Después

