

El canal estaba conectado mediante tubos y mangueras de 10 cm. de diámetro a una bomba de doble diafragma, operada eléctricamente. Los depósitos colocados a la salida y entrada del canal, amortiguaban suficientemente el oleaje producido por la bomba de doble diafragma. Se probó inicialmente con bomba de un solo diafragma, pero provocaba un oleaje demasiado fuerte que interfería con el experimento.

La velocidad superficial, se midió por medio de pequeños flotadores de madera, a los cuales se les determinaba el tiempo de recorrido entre dos puntos fijos del canal por medio de un cronómetro. Fue necesario emplear equipo normal de laboratorio de suelos para determinar porcentaje de humedad del material usado, mallas No. 4 para cernir el material a usar, balanzas y recipientes adecuados para pesar y medir el agua y el sedimento que se agregaban al sistema, etc.

4.3 Método Empleado

1) Una muestra grande del material depositado por la avenida del 9 de diciembre de 1963 en Cartago, se secaba al sol o al horno y se pasaba por la malla No. 4, a fin de eliminar la fracción más gruesa, que podía dañar el equipo. El material empleado se describe como similar a arena del río, de color gris cuando está seco, pero conteniendo menos finos como arcilla y ceniza volcánica, esta última en proporción relativamente baja.

Para dar una idea de los volúmenes de material empleado, puede decirse que al final del experimento habían dentro del sis

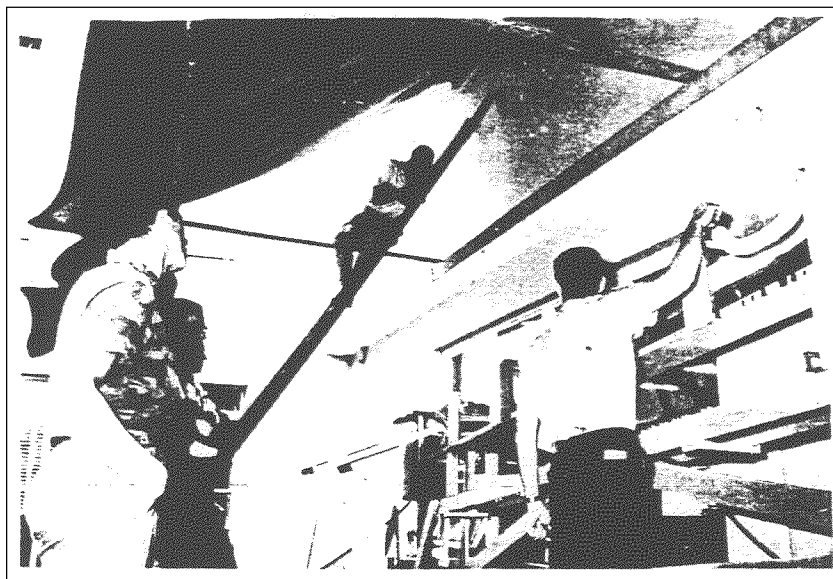


Foto No. E-7

Experimentos para estudiar el comportamiento de fluidos con alta concentración de partículas. Medición de la velocidad superficial por medio de flotadores. (Foto I.C.E. del 14 de mayo de 1964.)

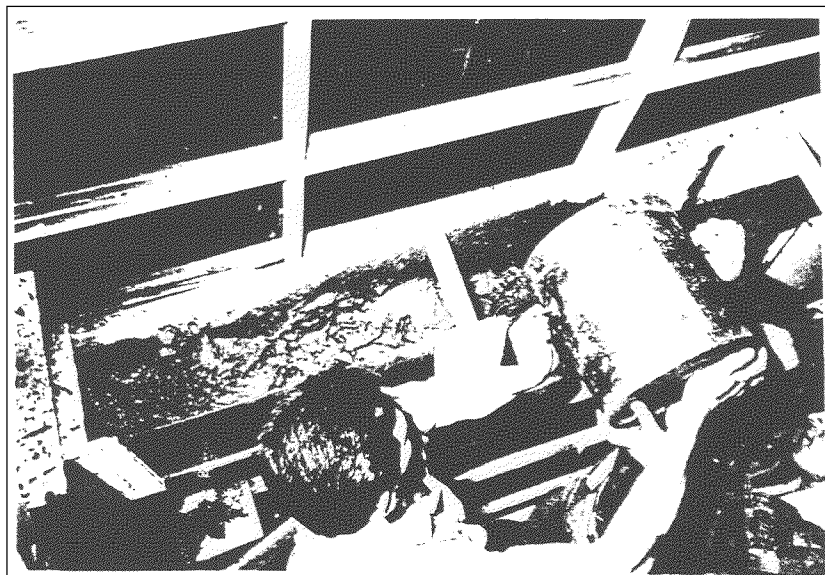


Foto No. E-8

Experimentos para estudiar el comportamiento de fluidos con alta concentración de partículas. Aumentando la concentración de sedimentos en el circuito. Obsérvese la consistencia del lodo. (Foto I.C.E. del 14 de mayo de 1964.)

tema cerca de 400 kg. de material (peso seco).

- 2) Del material pasando la malla 4, se obtenían muestras para determinar el contenido de humedad, el cual permitía hacer las correcciones necesarias en el peso seco del material y agua dentro del sistema.
- 3) A una muestra de 1 Kg. del mismo material, se le agregaba agua en cantidades medidas, que se iban incrementando, a fin de observar la consistencia de la mezcla, y poder estimar así, las proporciones y cantidades que sería necesario introducir al circuito cerrado para realizar el experimento. La mezcla se hacía a mano. La primera observación interesante que con sólo agregar al material 475 gramos de agua, se obtenía un fluido homogéneo con un ángulo de reposo prácticamente nulo. Agregando 500 gramos la mezcla era todavía homogénea, pero más fluida. A los 600 gramos se comenzó a notar la separación del agua y el sólido.
- 4) Estando el circuito cerrado (canal - manguera - bomba) seco, se agregaba agua cuidadosamente medida en recipientes calibrados, hasta tener apenas suficiente para que el sistema trabajara en forma normal, es decir, sin interrupciones ni oleaje.
- 5) Se agregaba un determinado peso de material, del cual ya se conocía su contenido de humedad. Para facilitar el trabajo de laboratorio, se trabajó con relaciones entre el peso del material (húmedo) y el peso del agua que fueran fáciles de manejar, se usaron las siguientes relaciones: 0.5,

1.0, 1.5, 2.0 etc.

Para comenzar, como se conocía que en el sistema (bomba, manguera, y canal), había un total de 200 Kg. de agua, se agregaron 100 Kg. de material (con el 11 por ciento de humedad). El peso del agua contenido en el material, deberá ser sus - traído del peso del material y agregado al agua, de suerte - que la verdadera relación entre el peso del sedimento seco y el agua es:

$$\frac{100 - 11 \text{ Kg.}}{200 + 11 \text{ Kg.}} = 0.42$$

- 6) Una vez que la mezcla de sólidos y agua se hacía homogénea, gracias a la circulación del fluido, y el flujo se estabilizaba, se procedía a medir las velocidades superficiales por medio de flotadores de madera de 1 cm. de ancho, 2 cm. de largo y 0.2 cm. de espesor. El tiempo de recorrido del flotador entre dos marcas fijas, se medía por medio de un cronómetro de una vuelta completa en 30 segundos, al décimo de segundo más próximo. Los recorridos usados variaron entre - 1.68 metros y 3.23 metros. Manteniendo la misma concentración, la velocidad superficial se medían en la forma explicada, para cada una de las pendientes investigadas (5, 10 y 15 por ciento) (Ver foto E-7).
- 7) En igual forma se procedía con las siguientes concentraciones aumentando la cantidad de material en el canal, de manera que $\frac{W_S}{W_W}$ fuera 1, 1.5, etc. y determinando las velocidades superficiales para cada una de las pendientes del canal (5,

10 y 15 por ciento) tal como se explica en el punto 6.

- 8) Las velocidades superficiales se representaron gráficamente contra las respectivas pendientes. Los puntos así representados definen curvas, cuyos parámetros son la concentración de sólidos en la mezcla $\frac{W_s}{W_w}$
- 9) Para fines prácticos se obtuvo la relación entre las velocidades superficiales de la mezcla y la velocidad media de agua limpia, fluyendo a igual profundidad, en el mismo canal, con igual pendiente de fondo. Estas razones se representaron gráficamente contra la pendiente del canal, manteniéndose como parámetro la concentración, tal como aparece en la lámina 23 del informe.

4.4 Discusión

El primer problema encontrado en este experimento, fue la determinación de las velocidades de la mezcla. El alto contenido de partículas hacían imposible el uso de molinetes, tubos de "Pitot" o vertederos. Finalmente se emplearon los flotadores de madera los cuales dieron mediciones de velocidad que se consideran adecuadas. Como no se conoce la relación entre la velocidad superficial y la promedio en este tipo de mezclas, se trató de encontrarla por medio de un análisis teórico, partiendo de las ecuaciones para la distribución universal de la velocidad. Este análisis es válido para los fluidos viscosos homogéneos. Se trató de determinar la viscosidad dinámica del lodo, usando un viscosímetro tipo "Furoil" del "American Petroleum Institute." igual al empleado para medir la viscosidad de los asfaltos, pero los resultados no mostraban consistencia ni valores lógicos.

Por la forma en que se desarrolló el experimento, las cantidades de la mezcla en el sistema se iban incrementando, conforme se agregaba más material para aumentar la concentración; en consecuencia la profundidad del flujo aumentaba al incrementarse la concentración de los sólidos. Es decir, que las velocidades superficiales corresponden no sólo a diferentes concentraciones y pendientes, sino también a diferentes profundidades de flujo.

Con la idea de eliminar el factor profundidad, y a la vez hacer los resultados del experimento de uso práctico, se obtuvieron en forma teórica, las velocidades promedio de flujos de agua limpia para las pendientes y profundidades observadas en el experimento. El resultado del experimento se muestra en lámina 23, como la relación entre la velocidad superficial de la mezcla y la velocidad promedio del agua limpia, contra la pendiente, teniendo como parámetro la concentración de partículas en la mezcla.

Se considera que estos experimentos, disponiéndose de más tiempo y recursos, pueden mejorarse en su técnica. Por ejemplo, preparando iguales volúmenes las mezclas de diferentes concentraciones por aparte, una vez que se haya trabajado con una concentración se elimina del sistema, y se agrega la próxima concentración, siendo de esta manera el volumen de mezcla igual para todas las concentraciones. Esto desde luego es lento y engorroso pues obliga estar manejando continuamente volúmenes altos de lodo.

La medida de velocidades podría talvez mejorarse disponiendo en el canal, cerca de la pared transparente, de un juego de boquillas, colocadas verticalmente las cuales pueden inyectar algún colorante al flujo; por métodos fotográficos podría encontrar la distancia que se ha movido al colorante inyectado por cada una de las boquillas, en un intervalo determinado de tiempo, pudiéndose calcular la velocidad de cada una de las láminas señaladas por el colorante.

De esta forma podría obtenerse la variación vertical de la velocidad y por consiguiente, la relación entre la velocidad superficial y la promedio.

4.5 Conclusiones

- 1). De acuerdo con el experimento realizado, un kilogramo de agua, es capaz de convertir 2.18 Kg. de material seco proveniente del Río Reventado, en una masa capaz de fluir en pendientes superiores al 5 por ciento. Un lodo con una concentración 2.53 (peso sólido/peso de agua) no fue capaz ya de fluir en pendientes hasta del 15 por ciento. Sin embargo, estos valores límites pueden ser excedidos en el Río Reventado debido a la energía cinética de la masa. En efecto, en la tabla D-6, se observa que hay muestras de sedimentos con concentraciones superiores a 3.0 obtenidas en el puesto 2. En promedio las mismas alcanzaron 1.35 (aproximadamente 574,000 p.p.m.).
- 2) Hay una tendencia del flujo a acelerarse comparado con el agua limpia conforme aumenta la pendiente, corroborando en esta forma la teoría de Bagnol, la cual indica que de cierta

pendiente en adelante la inercia de las partículas tiende a acelerar el flujo de la dispersión. Esta pendiente debe ser mayor que la razón entre la velocidad de asentamiento de las partículas y la velocidad de la dispersión (24).

- 3) El principio de autosuspensión de Bagnol (24), confirmado en estos experimentos, viene a explicar las altas velocidades superficiales observadas en los flujos de lodo del Río Reventado (se han medido velocidades superficiales de hasta 10 - 10 m/Seg., en el puesto 2).