

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRAULICA

**MODELACIÓN CFD DEL FLUJO DE RELAVE EN UN CANAL RECTANGULAR Y
SU RELACIÓN CON LA EROSIÓN DEL PISO**

**ALEJANDRO STEINER T.¹
LEONARDO ALCAYAGA R.²
DARREN LEDERMANN M.³**

RESUMEN

El presente trabajo trata el análisis del efecto que tienen las curvas sobre la erosión en canaletas de hormigón para el transporte gravitatorio de relaves. Para este análisis se desarrolló una modelación a través de CFD en una canaleta que presenta una curva de 90°, la cual transporta un flujo bifásico de agua más relave fino en suspensión homogénea y material particulado grueso en suspensión heterogénea en la fase mencionada anteriormente. El modelo considera el flujo en superficie libre en la canaleta debido a fuerzas gravitatorias en régimen supercrítico y el transporte de partículas esféricas cuyo diámetro es desigual y viene dado por una distribución particular. Ésta última fase provoca la erosión, la cual es simulada a través del modelo de Finnie y cuyos parámetros serán objeto de una posterior etapa de estudio, la cual es estimada en forma cualitativa y comparada con una imágenes de la erosión en una curva de una canaleta real. Los resultados muestran una excelente correlación cualitativa entre el fenómeno real registrado en fotografías con los resultados obtenidos en la simulación. Las trayectorias de las líneas de flujo y de las partículas inyectadas indican las zonas que presentan mayor erosión, así como los vectores de velocidad en un plano perpendicular al flujo muestran condiciones que favorecen el choque de partículas con el suelo en estas zonas. Este trabajo es el punto de partida para determinar parámetros que permitan prever con precisión la tasa de erosión en este tipo de canales y así optimizar las condiciones de diseño de canales y mejorar las capacidades de mantenimiento de los mismos.

¹ Dr. Ing., Director de Desarrollo, Cade-Idepe Consultores en Ingeniería - mail: asteiner@cadeidepe.cl

² Ingeniero Mecánico, Cade-Idepe Consultores en Ingeniería - mail: lalcayaga@cadeidepe.cl

³ Ingeniero Mecánico, Cade-Idepe Consultores en Ingeniería - mail: dledermann@cadeidepe.cl

1. INTRODUCCIÓN

La conducción de material sólido suspendido en medio acuoso es una práctica usual en el dominio de la minería en todo el mundo y en Chile en particular. Esto es especialmente apropiado cuando la elaboración del mineral requiere suspenderlo en agua. En lugar de procurar desembarazarse del agua, resulta razonable utilizarla como medio para la transferencia ulterior. De este modo se transportan minerales, concentrado y relaves.

Para el transporte de relaves, es decir para deshacerse del material inútil que acompaña al mineral, el modo usual es aprovechar la diferencia de cota entre la faena y el depósito final y usar la gravedad para proporcionar la energía requerida por el transporte. El transporte gravitacional se hace tanto a cañería llena, es decir en presión, como a superficie libre, en cañerías o en canales abiertos.

En este trabajo se estudiará el transporte gravitacional de relave en canales abiertos con especial atención en el desgaste particular que sufre el material del canal por la fricción del material granular transportado. El mayor desgaste se produce en las curvas porque en ellas la trayectoria de las líneas de corriente toma una forma especial, que se muestra más adelante.

Este trabajo constituye el primero de dos dedicados al tema de la erosión del piso del canal. En esta presentación se abordará la determinación de las líneas de corriente del material particulado y se mostrará como dan cuenta del patrón de desgaste que se observa en los canales. En una posterior etapa de estudio se analizará la manera en que se correlacionan estos patrones con la tasa de desgaste.

La herramienta a utilizar es la modelación de Dinámica de Fluidos Computacional. En efecto, la presencia de curvas o codos en canales abiertos es un problema insuficientemente abordado con los métodos de análisis de flujo de superficie libre clásicos. Las líneas de corriente en el flujo no solo son curvilíneas, sino que se presentan entrelazadas formando un flujo espiroidal y ondas cruzadas, lo cual hace necesario un análisis tridimensional de la situación mediante el uso de CFD.

Lo descrito anteriormente es la causa de velocidades no uniformes en la sección del canal, desigualdades que generan distintos esfuerzos de corte en las paredes del conducto y la depositación de material sólido que generan desgaste acelerado del canal de relave. Estas razones hacen de importancia conocer el fenómeno fluidodinámico presente en curvas y su influencia en el desplazamiento de sólidos, para estimar a priori los efectos sobre el conducto y su vida útil.

2. FLUJOS HOMOGÉNEOS Y FLUJO HETEROGÉNEO

El material granular que forma el relave está lejos de tener un tamaño uniforme (ver gráfico N° 1). Por ello es usual encontrar que parte del material que lo forma fluye formando un flujo homogéneo, mientras el resto del material lo hace en flujo heterogéneo o incluso en saltación. La fracción del material granular que fluye en flujo homogéneo no presenta diferencia de concentración según la vertical y su presencia se manifiesta como una variación aparente tanto de la masa específica como de la viscosidad aparente del líquido de transporte. De esta manera en el relave, la fracción de mayor tamaño, que presenta una mayor concentración

junto al piso del canal, fluye en suspensión heterogénea en un medio bifásico, pero que se comporta como uno monofásico más denso y viscoso que el agua.

El método utilizado para determinar la trayectoria de las líneas de corriente del particulado más grueso ha consistido, entonces, en determinar el campo de velocidades de la corriente que fluye en régimen homogéneo y en ese medio calcular la trayectoria de las partículas que se mueven en régimen heterogéneo.

Para distinguir la fracción del particulado que se mueve en régimen homogéneo se ha utilizado el criterio propuesto por Wasp et al. (1977) y observaciones en terreno, que consisten en aceptar que las partículas cuyo tamaño, peso y forma hace que en agua quieta sedimenten en régimen de Stokes, en el rango normal de velocidades comerciales en cañerías, usualmente son transportadas en flujo homogéneo. Las velocidades comerciales y el nivel de turbulencia son semejantes en cañerías y canales, lo que permite estimar el diámetro máximo que en este caso limita superiormente el tamaño del particulado que fluye en régimen homogéneo.

Esto se ha hecho empleando la expresión del coeficiente de resistencia $C_d = 24 / Re$ para el régimen de Stokes, caracterizado por un N° de Reynolds menor o igual a 1.

$$d < \left(\frac{18 \cdot Re \cdot m^2}{r \cdot g \cdot (r_s - r)} \right)^{1/3} \quad (1)$$

g : aceleración de gravedad
 r_s : masa específica del sólido
 r : masa específica del agua
 μ : viscosidad del agua

De acuerdo a la fórmula anterior, la fracción de sólidos de tamaño inferior a 90 [μm], fluiría como una fase líquida homogénea continua, con propiedades de densidad y viscosidad modificadas. Sin embargo, se acepta que el diámetro crítico es mayor, de 146 [μm] y un valor $Re = 4$, que se encuentra en la zona de transición del régimen de Stokes al régimen de Newton. Este mayor valor del diámetro crítico se considera tras contrastar algunos resultados de la modelación con el fenómeno efectivamente observado en la canaleta. Los valores asociados a la densidad y viscosidad de la fase homogénea se obtienen como:

$$r_m = \frac{1}{\frac{C_w}{r_s} + \frac{(1-C_w)}{r_L}} \quad (2)$$

$$C_v = C_w \cdot \frac{r_m}{r_s} \quad (3)$$

$$\frac{m_m}{m_L} = 1 + K_1 \cdot f + K_2 \cdot f^2 + A \cdot \exp(B \cdot f) \quad (4)$$

Donde r_m es la densidad de la mezcla resultante, $r_L = 998 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ la densidad de la fase líquida base, $r_s = 2750 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ la densidad de la fase sólida, m_m es la viscosidad de la mezcla, $m_L = 0.0008568 \text{ [Pa s]}$ es la viscosidad del líquido base (agua), $K_1 = 2.5$, $K_2 = 10.05$,

$A = 0.0273$, $B = 16.6$ y $f = 0.2017$ constantes dependientes de los elementos considerados y de la concentración en volumen de los mismos.

Las trayectorias del material particulado en suspensión heterogénea se han comparado con las registradas en fotografías obtenidas en una canaleta que transporta relave. La concordancia entre las trazas de desgaste en el piso de concreto del canal y la trayectoria calculada es cualitativamente muy buena.

En una posterior etapa de estudio se buscará estimar los parámetros del modelo de erosión de Finnie y correlacionarlos de esta manera con datos reales.

3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Aunque el transporte de material granular en suspensión acuosa tiene especial relevancia para la industria minera, hay pocos trabajos sobre el desgaste de canales.

La descripción del problema de transporte de líquidos en canales abiertos y su resolución matemática son aspectos cubiertos por autores como Chow (1959), Wasp et al. (1977) y Abulnaga (2002) desde hace ya largo tiempo. Gracias a estos textos es posible conocer las condiciones de borde apropiadas para modelar la presión hidrostática en la salida, el perfil de velocidad de entrada logarítmico en el fluido, las condiciones de rugosidad de la canaleta, entre otras.

Estos trabajos esenciales se ven complementados por la aparición de diversos artículos publicados en revistas especializadas que tratan el problema de la erosión, particularmente en secciones curvas de cañerías y canales. Wang y Shirazi (2003) intentan aproximarse al problema observado experimentalmente desde el ángulo de las simulaciones CFD, obteniendo resultados con buena correlación cuantitativa con las observaciones experimentales, pero utilizando geometrías bidimensionales para reducir tiempos de cálculo de la simulación y simplificar el problema.

En otro intento por modelar la erosión, esta vez en una geometría tridimensional, Keating y Nesic (1999) consideran una cañería de sección cuadrada a presión sobre el plano vertical, lo cual presenta diferencias inmediatas con la simulación de un canal abierto horizontal. Pese a que logran modificar los parámetros del modelo de Finnie para no sobreestimar la erosión calculada respecto de la real, proponen continuar los estudios en esta línea para obtener resultados más precisos.

Por otra parte, Cheng (2007) analiza las diferentes opciones ofrecidas por la literatura respecto del perfil de velocidad de entrada en canales abiertos. Si bien propone la utilización de un perfil de ley de potencias en lugar de uno logarítmico, él indica que no hay diferencias significativas respecto del perfil en geometrías como la utilizada en este trabajo. Esto avala la decisión de usar un perfil logarítmico como el sugerido por Chow (1959).

4. METODOLOGÍA

De acuerdo a lo señalado en la introducción, este trabajo se separa en dos partes. En la primera se ha evaluado el campo de velocidades del flujo homogéneo del particulado fino

para régimen supercrítico. En una segunda condición, se ha modelado la trayectoria del particulado que se mueve en régimen homogéneo.

4.1 Flujo homogéneo

La geometría y el caudal del canal rectangular estudiado son las siguientes:

Tabla N° 1

Régimen	Supercrítico
Radio de curvatura	6,5 m
Sección	0,8 x 1,0 m ²
Angulo de desviación	90°
Caudal	1,4 m ³ /s
Pendiente de fondo	1,2%

La granulometría del relave que se ha empleado para la modelación es la siguiente:

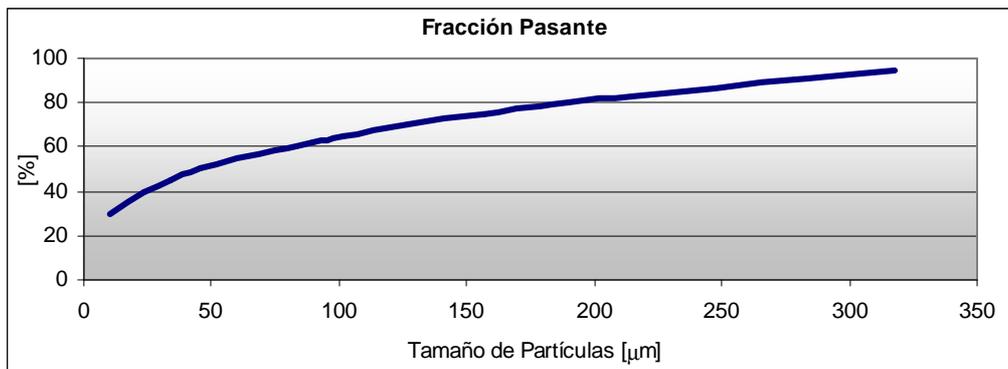


Gráfico N° 1

Otras características relevantes del relave son

Tabla N° 2

C_w (masa de sólido pasante dividida por masa total pasante)	0,56
Masa específica del sólido	2,75 ton/m ³

Según se señaló, el diámetro crítico bajo el cual las partículas forman la mezcla homogénea con el agua es de 146 [µm], que corresponde a una fracción pasante del 73.3%. Al multiplicar este valor con la concentración en peso total C_w se obtiene la concentración en peso equivalente de la fase líquida, con lo que es posible estimar las propiedades de densidad y viscosidad dinámica del líquido para esa nueva concentración. En este caso, se tiene que $r_m = 1351.42$ [kg/m³] y $m_m = 0.001706$ [Pa s].

4.2. Flujo heterogéneo

Con el fin de completar el flujo másico equivalente a la fase particulada, se considera la diferencia entre el caudal másico esperado para la concentración definida y el caudal másico efectivo de la fase líquida obtenida.

Al tener esta información, basta definir la distribución de diámetros a considerar en la fase particulada (que forma el flujo heterogéneo), así como la distribución de masas asociadas a esos diámetros considerados. Estos datos pueden ser obtenidos directamente del Gráfico N° 1, considerando el diámetro crítico de 146 [µm] asociado a un nuevo valor cero de referencia en la fracción pasante, puesto que para fines prácticos, los únicos sólidos particulados presentes son aquellos que superan este diámetro de referencia.

Al tener esta información, se completa la información requerida para efectuar la modelación del sistema, tanto en su fase líquida homogénea como en su fase particulada. No se considera, eso sí, la incorporación de un factor de forma asociado a la fase particulada.

5. MODELACIÓN

La modelación fluidodinámica del relave en el canal se realizó con ayuda del software CFX de Ansys, que discretiza y resuelve las ecuaciones de conservación de masa, de movimiento de Navier - Stokes, de energía cinética turbulenta, de tasa de disipación de energía cinética turbulenta y la de transporte de la fracción del fluido de mayor densidad presente en cada punto. Esta última ecuación es la que permite representar la condición de flujo a superficie libre y esta variable escalar toma una naturaleza binaria, la cual la hace muy susceptible al nivel de refinamiento de la malla. El modelo utilizó elementos de malla normales a las superficies, que permiten discretizar la capa límite, zona en la que los modelos de turbulencia no son aplicables.

5.1 Modelación de la fase homogénea

El tramo que se ha modelado corresponde a una extensión recta del canal, seguida por una curva de 90° que se continúa en otro tramo recto. La modelación de un flujo a superficie libre exige considerar un medio bifásico formado por una fase pesada (agua) y otra liviana (aire). El paso de una celda con una fracción cercana a 1 de agua a otra con una fracción cercana a 1 de aire, marca la posición de la superficie libre.

Algunos de los supuestos relevantes de la modelación han sido: (a) régimen permanente; (b) coordenadas cartesianas; (c) modelo k-ε para la difusión turbulenta; (d) función de pared logarítmica; (e) condición de frontera a la salida del relave correspondiente a presión hidrostática en la zona de fluido más denso y presión media fija en el resto de la salida (f) altura normal a la entrada y a la salida del tramo modelado

5.2 Modelación de la fase heterogénea

Con el fin de simular el efecto de la erosión sobre el piso de la canaleta, es necesario incluir dentro del modelo una fase heterogénea compuesta por material sólido particulado. Para ello, se han considerado 200 puntos de inyección de partículas en la zona de entrada de líquido homogéneo a la canaleta. Se impuso a las partículas una distribución de tamaños discreta de 5 grupos de 340, 329, 254, 180 y 150 micrones. La cantidad de partículas correspondiente a cada tamaño se calculó según la fracción de masa indicada por el gráfico N° 1, con el ajuste porcentual indicado en la sección 4.2. Estas partículas se supusieron esféricas y se admitió que los choques contra las paredes de la canaleta son perfectamente elásticos, lo que equivale

a un coeficiente de restitución de 1 tanto en el plano normal como el plano tangente. El modelo de rastreo de partículas es de tipo Lagrangeano y el modelo de erosión corresponde al de Finnie. Existe interacción bidireccional entre el fluido homogéneo y las partículas, pero no se considera la interacción (choque) entre las mismas partículas.

6. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN

Para la comprensión de los resultados de la modelación resulta ventajoso considerar primero el registro fotográfico que se muestra a continuación. El registro muestra una secuencia fotográfica del canal sin relave, tomada en el sentido de avance del relave a través de una curva a la izquierda seguida por una curva a la derecha.

La figura N° 1, que muestra en la parte baja el tramo recto que antecede las curvas, muestra una erosión pareja en el fondo. La erosión toma la forma de estrías longitudinales.

La figura N° 2 ha sido tomada en el sector de la curva a la izquierda y muestra que la erosión es mucho mayor que en el sector recto y se ha concentrado en la zona próxima a la pared del lado del centro de curvatura.

La figura N° 3 muestra la profundidad de las estrías en las curvas. La regla indica 25 [mm], pero si estuviera apoyada con la arista larga en el sentido del flujo, indicaría varios [mm] más.

La figura N° 4 muestra en la parte baja la zona de transición en la que el centro de curvatura pasa desde la izquierda a la derecha del canal. La zona de mayor erosión se desplaza consecuentemente desde la izquierda, en la parte baja de la foto, hacia la derecha en la parte alta. La franja de erosión está concentrada en una zona relativamente estrecha del piso del canal y cruza desde la izquierda hacia la derecha, según el centro de curvatura cambia de lado.

La figura N° 5 muestra ahora la mayor erosión en el sector del fondo del canal contiguo a la pared a cuyo lado está el centro de curvatura.



Figura N° 1



Figura N° 2



Figura N° 3



Figura N° 4



Figura N° 5

En las figuras 6, 7 y 8 se entregan resultados de la simulación para el flujo homogéneo en régimen supercrítico.

En la figura N° 6 se muestra la superficie libre del relave. En la figura N° 7 el relave se mueve en la parte superior de izquierda a derecha y en la inferior de derecha a izquierda. Como se puede esperar, la superficie libre sufre una distorsión en la zona de la curva, con una profundidad en la pared interior menor que en la pared exterior del canal. La superficie en esta zona presenta variaciones de nivel que dan cuenta de la existencia de ondas cruzadas que

chocan en forma sucesiva con las paredes del canal, generando máximos y mínimos locales de profundidad.

La particularidad más notable que es necesario destacar aparece en la sección transversal que se ha hecho aparecer en la figura N° 7, ubicada a dos tercios del giro de 90° del canal. En esa sección hemos hecho figurar la componente de la velocidad en ese plano. Al considerar estas componentes de velocidad mirando contra el sentido del flujo, se advierte la presencia de un giro en el sentido horario, ubicado junto a la pared interior del cambio de dirección del canal, es decir del lado del centro de curvatura. Este giro es el causante de la erosión localizada en el piso de las curvas. La descripción cualitativa es que el particulado de mayor tamaño no sigue las líneas de corriente de la suspensión homogénea y golpea el piso, causando la erosión. Este punto se discutirá más adelante.

La figura N° 8 muestra las líneas de corriente de la suspensión homogénea. El sentido del flujo es el mismo que el de la figura N° 7. Mirando contra el sentido del flujo, se reconocen líneas que estando a la derecha, es decir junto a la pared exterior, cruzan hacia la izquierda, subiendo primero y luego bajando, es decir girando en tirabuzón en sentido horario. Estas líneas de corriente que cruzan de un lado a otro mientras giran, son las que dejan la traza que reconocemos en la foto de la figura N° 4.

En la figura N° 9 se muestran algunas trayectorias seguidas por el particulado de la suspensión heterogénea. En esta figura, el flujo se mueve de derecha a izquierda. Se puede advertir que el particulado de mayor diámetro no sigue completamente el movimiento de la suspensión homogénea, pues tiende a girar en sentido horario en un comienzo de la curva, según se mira contra la corriente y en desplazarse hacia la pared del lado del centro de curvatura, pero al momento de llegar a este punto las partículas continúan una trayectoria rectilínea en saltación pegadas a la pared.

La figura N° 10 muestra un detalle ampliado del camino seguido por seis partículas, seleccionadas dentro del conjunto de trayectorias calculadas. Nótese que las partículas golpean el piso y rebotan. Esta es la acción que produce el desgaste mayor que se advierte en las estrías de las curvas del canal.

Si bien esta acción está incluida en la modelación, su comportamiento está descrito con un coeficiente de restitución de valor 1, pero sobre el cual no se dispone de información real. La adecuada consideración de este factor en una futura presentación permitirá calcular una tasa de desgaste prevista por el modelo y su comparación con el desgaste real observado.

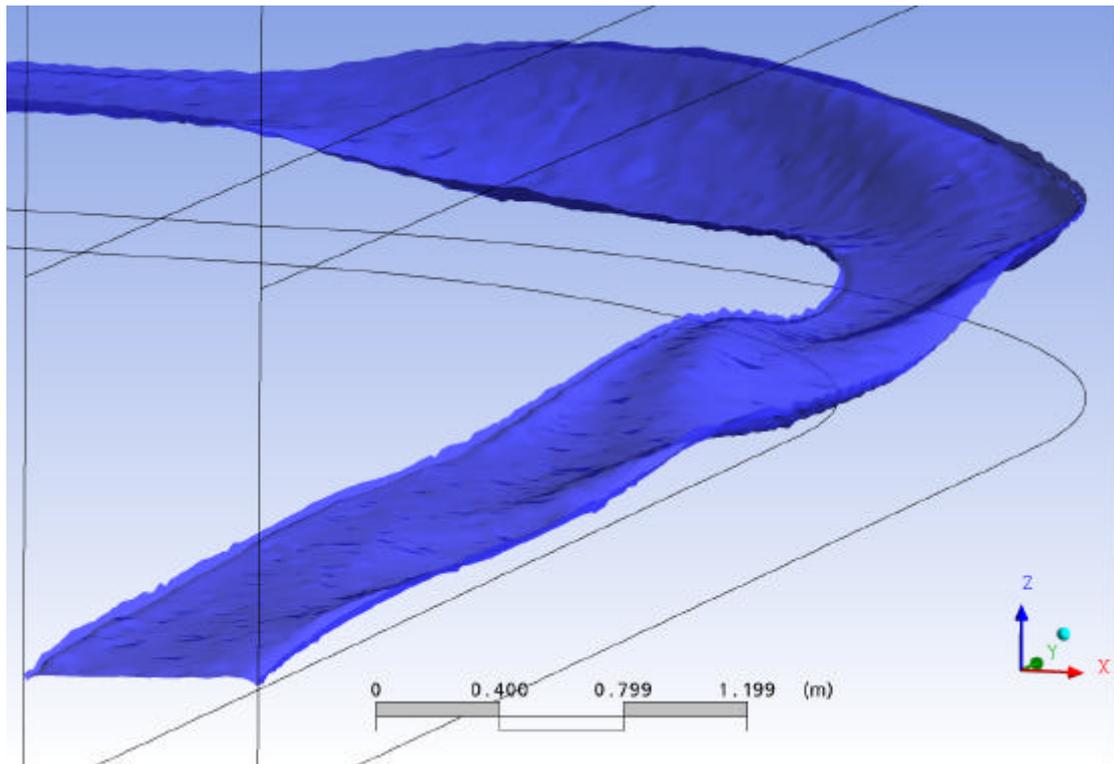


Figura N° 6

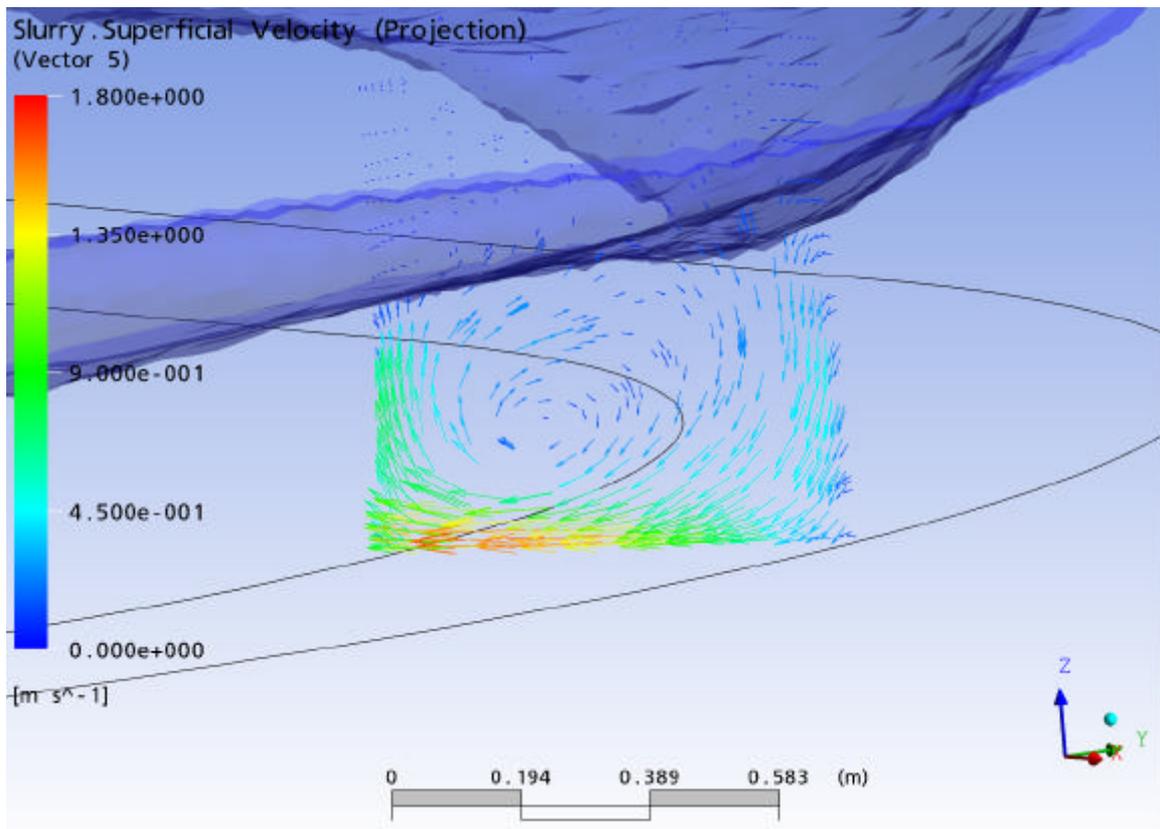


Figura N° 7

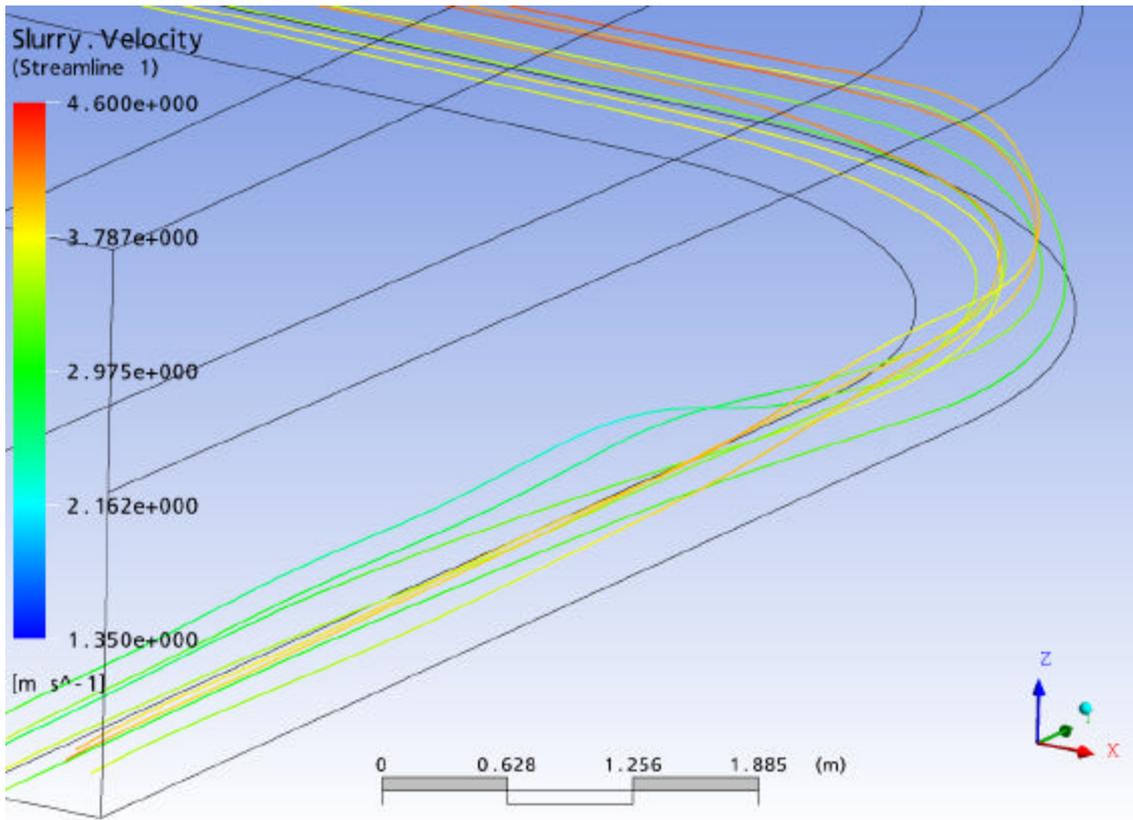


Figura N° 8

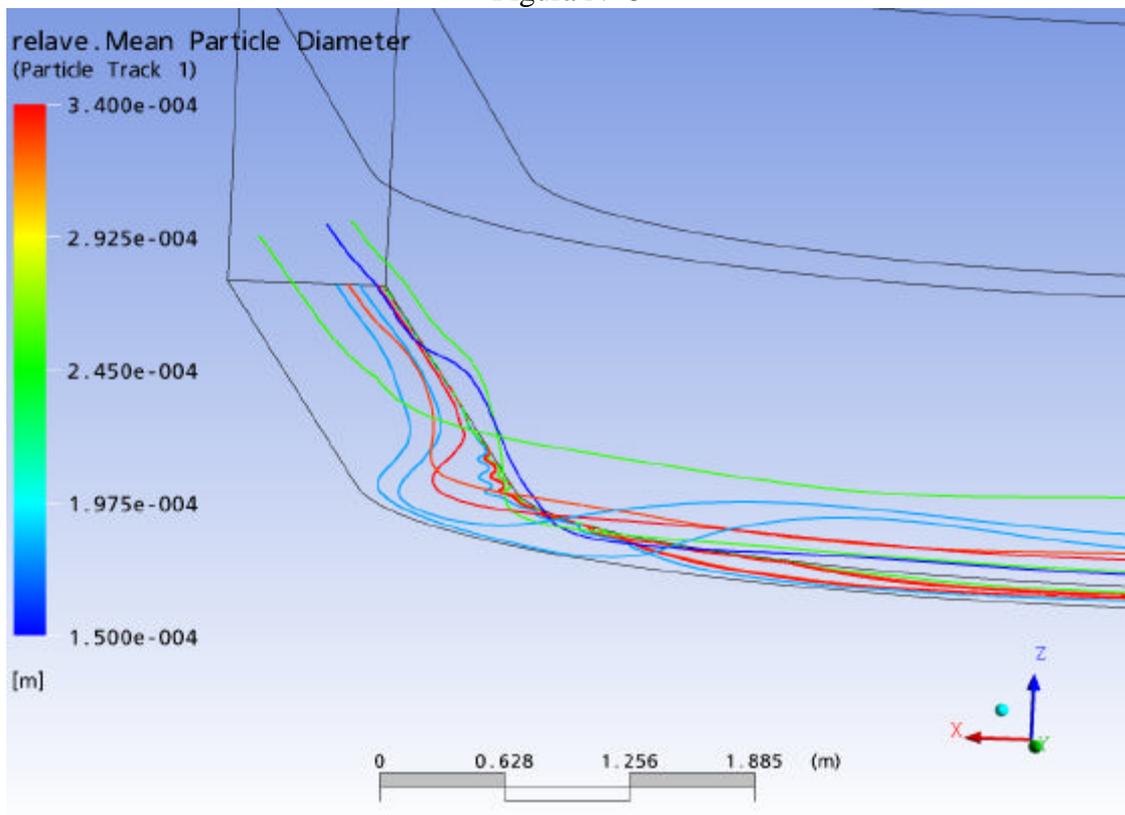


Figura N° 9

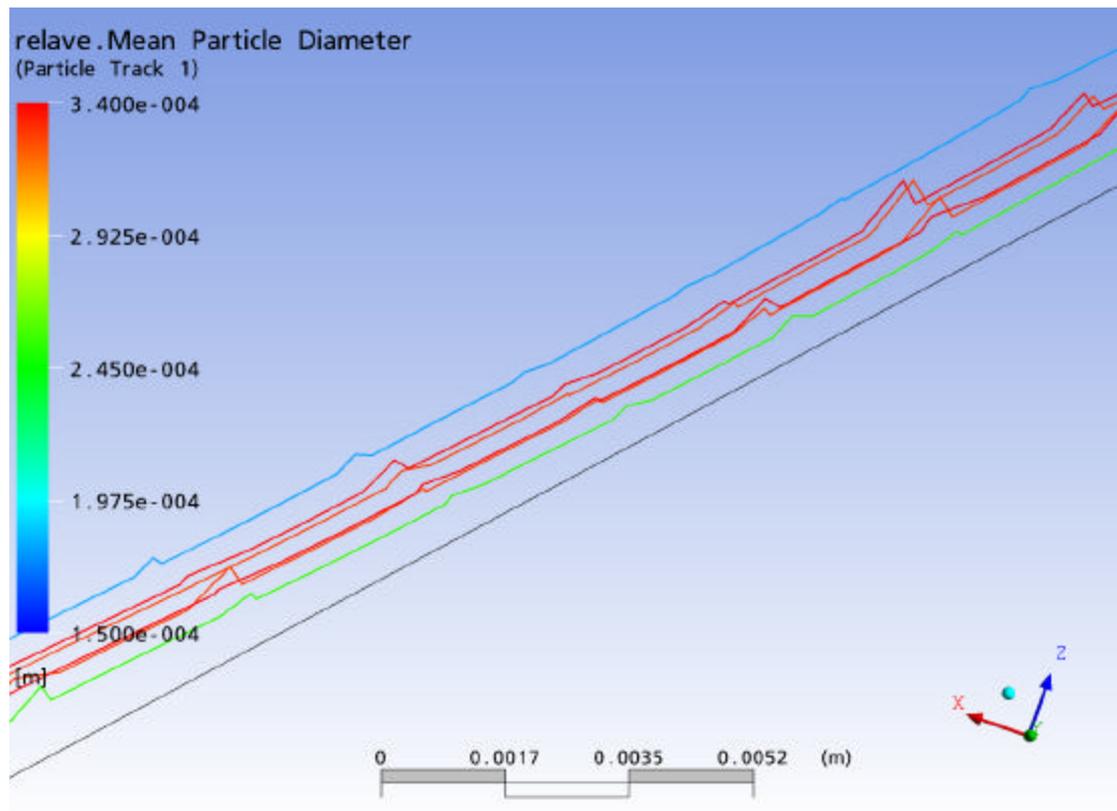


Figura N° 10

7. CONCLUSIONES

La conclusión que surge con fuerza es la concordancia cualitativa entre la modelación del flujo y la erosión del piso del canal en la zona de la curva. En efecto, el registro fotográfico muestra una zanja de erosión que se forma junto al muro del lado del centro de curvatura y a mitad de recorrido de la curva. Cuando el centro de curvatura cambio de lado, también lo hace la zanja de erosión.

La modelación de la fase homogénea muestra que el inicio de la curva genera un giro del fluido en el sentido horario según se mira hacia aguas arriba, junto a la pared de cuyo lado está el centro de curvatura. Por otra parte, la modelación de la trayectoria de las partículas en suspensión heterogénea muestra que siguen en un primer momento el giro del flujo homogéneo pero que las de mayor tamaño, cuando adquieren el giro, terminan por chocar contra el piso, abandonando así el giro de la fase homogénea. Estas partículas siguen luego una trayectoria paralela al canal golpeando contra el piso y rebotando, constituyéndose así en el agente causante de la erosión del piso del canal. Además, la inspección de la trayectoria del particulado en suspensión heterogénea en su detalle más fino muestra los golpes de estas partículas de mayor tamaño contra el piso y sus rebotes.

El modelo del que se dispone permite calcular estos golpes y la erosión que producirían, pero mientras no se cuente con un método experimental para calibrar y con ello validar esta parte del modelo, no se adelantarán resultados o conclusiones.

Aunque no se muestra en el texto, es necesario mencionar que la modelación es sensible al cambio de masa específica y de viscosidad que se ha asociado a la fase homogénea. Un cam-

bio en la fracción del sólido contenido en la fase homogénea que lo aparte del valor del diámetro para el cual la partícula desciende en régimen de Stokes en agua quieta, cambia las propiedades de la suspensión homogénea y también la trayectoria de las partículas en suspensión heterogénea. En este sentido la utilización del modelo ha permitido comparar su comportamiento con las zanjas de erosión de las fotografías y se ha concluido que para que el particulado de mayor tamaño tenga la trayectoria capaz de provocar la erosión, es necesario aceptar en suspensión homogénea hasta las partículas cuyo Re en sedimentación en régimen de Stokes en agua quieta alcanza el valor $Re = 4$, es decir, las partículas que se encontraran en la fase heterogénea serán las que tienen un diámetro superior a 146 [μm] para el relave que produjo las zanjas.

Además se concluye que el modelo tiene la sensibilidad suficiente para responder a los cambios en sus parámetros constitutivos.

REFERENCIAS

- Wang, J., y S.A Shirazi. 2003. A CFD Based Correlation for Erosion Factor for Long-Radius Elbows and Bends. *Journal of Energy Resources*, 125, 26-34.
- Chow, V.T. 1959. *Open Channel Hydraulics*. McGraw Hill, Nueva York.
- Cheng, N.S. 2007. Power-law index for velocity profiles in open channel flows. *Advances in Water Resources*, 30, 1775-1784.
- Abulnaga, B. 2002. *Slurry Systems Handbook*. McGraw Hill, Nueva York.
- Wasp, E.J. et al. 1977. *Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation*. Trans Tech Publications, Clausthal, Alemania.
- Keating, A. y S. Nestic. 1999. Prediction of Two-Phase Erosion-Corrosion in Bends. *Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, CSIRO, 229-236.
- Ansys CFX-Solver, Release 10.0. 2005. *Theory: Particle Transport Theory*. 173-202.