



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MODELAMIENTO Y ESTUDIO DEL EFECTO DE LA REOLOGÍA DEL
RELAVE EN CANALETAS Y CAJONES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

MARCELA LEONOR MARTÍNEZ CANDIA

PROFESOR GUÍA:

ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

CHRISTIAN IHLE BASCUÑAN

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico
POR: Marcela Leonor Martínez Candia
FECHA: 05/12/2014
PROFESOR GUÍA: Álvaro Valencia Musalem

MODELAMIENTO Y ESTUDIO DEL EFECTO DE LA REOLOGÍA DEL RELAVE EN CANALETAS Y CAJONES

En esta memoria se estudia el comportamiento del relave de cobre chileno con diferentes concentraciones, específicamente con concentraciones en peso de 35% 45%, 50% y 55%. Es importante realizar este estudio debido a la necesidad del país de recuperar las aguas de tratamiento de los relaves, por la escasez de agua en el norte de Chile, aumentando la concentración de la pulpa.

El principal objetivo de esta memoria es modelar el relave asumiendo un comportamiento como fluido no- newtoniano, estudiando la reología de éste y ver los efectos que tiene en cajones de transición Para esto se realizarán simulaciones en el software ANSYS Fluent 14.5, donde primero se hace una recopilación de los antecedentes más importantes para poder caracterizar el relave y el fluir de este en canaletas y cajones, tanto para fluidos newtonianos, como no-newtonianos. También se estudia la reología del relave para las diferentes concentraciones, utilizando correlaciones obtenidas de antecedentes.

Luego se crea un diseño hidráulico del cajón de transición para luego generar un mallado, y a través de condiciones de borde adecuadas, lograr simular el fluir del relave con las concentraciones antes mencionadas. El análisis es transiente de 30 seg. de simulación. Se realizan dos simulaciones del relave con concentración en peso 35% una con un modelo de flujo turbulento k- ϵ y otro con un modelo viscoso laminar. Luego se procede a realizar las simulaciones del relave de alta concentración en peso como plástico de Bingham.

Dentro de los resultados más importantes se logra validar los resultados obtenidos, comparando las velocidades numéricas con las teóricas. Además, haciendo una comparación entre el modelo laminar y turbulento, se justifica el uso del modelo viscoso laminar para la simulación del fluir del relave. Por último, dado los resultados obtenidos de sedimentación y desgaste del cajón, se puede seleccionar la geometría diseñada como la adecuada, dadas las condiciones de operación planteadas en la memoria.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a las personas que me han acompañado en estos seis años de carrera, dándome su apoyo, teniendo siempre fe en mí y estando presentes tanto en las buenas como en las malas.

En primer lugar quiero agradecerle a mi familia su apoyo incondicional, a mis padres Ricardo y Patricia, y mi hermana Macarena, a los cuales amo mucho. También agradecer a mis abuelos, tata Mario y mamita Gladys, por su constante cariño; y a mis abuelos tata Miguel y abuelita Yolanda, que aunque están en el cielo, estoy segura que están orgullosos de mí.

Además les doy las gracias a mis amigas de colegio Andrea, Mafe, y Naty, que a pesar de los años, nunca hemos perdido contacto y siempre he podido contar con ellas. También agradecer a mis amigas de universidad Dani, Erika y Xime, juntas sobrevivimos los primeros años de universidad y a mis amigos mecánicos, especialmente Seba, juntos terminamos la carrera.

Por último quisiera agradecer a los docentes y funcionarios del departamento de mecánica, por su constante ayuda y por crear un ambiente cercano y ameno. Igualmente agradecer a los miembros de mi comisión Williams Calderón y Christian Ihle, y a mi profesor guía Álvaro Valencia, por su constante apoyo desde el principio del trabajo de título.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----------|
| 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1. Motivación..... | 1 |
| 1.2. Objetivos..... | 2 |
| 1.2.1. Objetivo general | 2 |
| 1.2.2. Objetivos específicos..... | 2 |
| 1.3. Alcances..... | 2 |
| 2. Antecedentes generales | 3 |
| 2.1. Clasificación de los fluidos..... | 3 |
| 2.1.1. Fluido Newtoniano | 3 |
| 2.1.2. Fluido No-Newtoniano..... | 3 |
| 2.2. Características del relave | 7 |
| 2.2.1. Concentración de sólidos..... | 7 |
| 2.2.2. Densidad..... | 8 |
| 2.2.3. Viscosidad | 8 |
| 2.3. Velocidad mínima..... | 8 |
| 2.3.1. Velocidad de Transición..... | 9 |
| 2.3.2. Velocidad Límite de Depósito..... | 10 |
| 2.4. Velocidad de Sedimentación | 12 |
| 2.4.1. Partícula aislada en un fluido | 12 |
| 2.4.2. Corrección de la velocidad de sedimentación | 14 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 2.5. | Flujo de relave en canales abiertos | 15 |
| 2.5.1. | Flujo laminar y turbulento | 15 |
| 2.5.2. | Número de Froude | 16 |
| 2.5.3. | Flujo de fluidos Newtonianos en canales abiertos | 17 |
| 2.5.4. | Flujo de fluidos No-Newtonianos en canales abiertos | 19 |
| 2.6. | Diseño de cajones de relave | 21 |
| 2.6.1. | Cajones de transición | 21 |
| 2.6.2. | Descarga del relave | 22 |
| 2.6.3. | Cajones de distribución | 23 |
| 3. | Antecedentes de modelación computacional | 25 |
| 3.1. | Modelo multifásico-volumen de fluido | 25 |
| 3.2. | Modelo de turbulencia k-ε estándar | 27 |
| 3.2.1. | Modelamiento cercano a la pared | 28 |
| 3.3. | Modelo de fase discreta | 32 |
| 3.3.1. | Ecuación de movimiento para las partículas | 32 |
| 3.3.2. | Método de distribución de diámetro de Rosin-Rammler | 33 |
| 3.3.3. | Modelo de erosión de partículas | 34 |
| 4. | Metodología | 35 |
| 5. | Diseño del cajón | 36 |
| 5.1. | Condiciones de operación | 37 |
| 5.2. | Altura de cajón | 37 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 5.2.1. | Chorro en caída libre | 37 |
| 5.2.2. | Esclusa | 39 |
| 5.2.3. | Vertedero | 40 |
| 5.3. | Dimensiones del cajón | 42 |
| 6. | Simulación en ANSYS Fluent | 43 |
| 6.1. | Estudio reológico de casos a simular | 43 |
| 6.2. | Mallado | 45 |
| 6.2.1. | Validación de malla | 47 |
| 6.3. | Condiciones de borde..... | 48 |
| 6.4. | Método de solución..... | 49 |
| 6.5. | Iniciación de la solución | 50 |
| 6.6. | Parámetros para realizar el cálculo | 51 |
| 6.7. | Programación de los diferentes casos a simular | 52 |
| 6.7.1. | Flujo turbulento de relave newtoniano | 52 |
| 6.7.2. | Flujo laminar de relave newtoniano | 52 |
| 6.7.3. | Flujo laminar de relave No-newtoniano | 53 |
| 7. | Resultados | 55 |
| 7.1. | Resultados teóricos | 55 |
| 7.2. | Flujo turbulento, Cp 35%..... | 56 |
| 7.3. | Flujo laminar, Cp 35% | 59 |
| 7.4. | Fluido no-newtoniano, Cp 45% | 62 |

| | |
|---|------------|
| 7.5. Fluido no-newtoniano, Cp 50% | 65 |
| 7.6. Fluido no-newtoniano, Cp 55% | 68 |
| 8. Análisis de resultados..... | 72 |
| 8.1. Flujo laminar v/s turbulento..... | 72 |
| 8.2. Validación de los resultados | 73 |
| 8.3. Comparación de los casos..... | 75 |
| 8.3.1. Depósito de relave | 77 |
| 8.3.2. Sedimentación | 79 |
| 9. Simulación, fase discreta..... | 81 |
| 9.1. Inyección de partículas | 81 |
| 9.1.1. Resultado y análisis | 82 |
| 9.2. Erosión..... | 84 |
| 9.2.1. Resultado y análisis | 85 |
| 10. Conclusiones | 99 |
| 11. Bibliografía | 101 |
| Anexo A: plano de cajón de transición..... | 103 |

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los principales sectores económicos de Chile es la minería, donde el país se ha convertido en uno de los mayores productores mundiales de cobre, litio y yodo. Por otra parte, toda planta minera cuyo proceso de concentración es Flotación, produce residuos sólidos que se denominan relaves, estos corresponden a una “Suspensión fina de sólidos en líquido”, constituidos fundamentalmente por el mismo material presente en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso, conformando una pulpa [1].

Las características y el comportamiento del relave dependerá de la razón agua/sólidos y también de las características de las partículas sólidas. Un relave con suficiente agua se comportará como una suspensión acuosa, cuya viscosidad aumenta si disminuye el agua, hasta que, para contenidos de agua suficientemente bajos, se comportará como un lodo espeso y eventualmente, como un suelo húmedo.

Los relaves mineros se transportan a través de tuberías de acero y canaletas abiertas, usualmente de hormigón, debido a su bajo costo y fácil mantención. Además se utilizan dispositivos como cajones de transición, para realizar cambios de dirección del fluido, y cajones de distribución, los cuales distribuyen el relave a distintos sectores según el requerimiento.

1.1. MOTIVACIÓN

Debido a la escasez de agua en el norte de Chile, es de suma importancia recuperar las aguas de tratamiento desde los relaves, aumentando la aceptación ambiental de la comunidad y disminuyendo los costos de producción, por parte de las mineras, debido al ahorro de agua. Esto implica aumentar la razón de sólido/agua a valores mayores del 50% concentración en peso, donde la pulpa de relaves comienza a tener comportamiento de un lodo viscoso; disminuye fuertemente la segregación de partículas y necesitará pendientes mayores al 2% para escurrir [1], teniendo un comportamiento como fluido no-newtoniano.

Es muy importante investigar y estudiar la reología del relave, ver cómo afecta a las canaletas y cajones con los cuales se transporta este fluido mediante flujo gravitacional, las cuales están limitadas en pendiente y curvatura para evitar desgaste acelerado. Se requiere un modelo que se aproxime de mejor manera al comportamiento de la pulpa de baja concentración de agua, y así poder ajustar el diseño de los cajones y canaletas, asegurando su capacidad de resistir las condiciones a las que operan sin sufrir daños por desgaste prematuros o acelerados, evitando la sedimentación o segregación del relave.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. *OBJETIVO GENERAL*

El objetivo general del presente trabajo de título es modelar el relave minero con una concentración elevada de partículas, asumiendo un comportamiento como fluido no-newtoniano, estudiando la reología del fluido y ver los efectos que tiene en canaletas y cajones.

1.2.2. *OBJETIVOS ESPECÍFICOS*

Se definen los siguientes objetivos específicos:

- Definir la geometría del cajón de relave a través de un diseño hidráulico para un caudal y concentración dados.
- Ver el comportamiento del relave al aumentar su concentración, estudiando la sedimentación, erosión, desgaste del cajón, homogeneidad de caudales, etc.
- Seleccionar una geometría de cajón de relave que evite la sedimentación del relave y desgaste prematuro del cajón.

1.3. ALCANCES

- Las condiciones de operación del relave minero se obtienen de la memoria de la alumna Ilonka Olivares Álvares “Estudio de la fluidodinámica de relaves de diferentes concentraciones en cajones de distribución” [2].
- El análisis es principalmente numérico, sin la realización de experimentos.

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se ve sometido a un esfuerzo de corte (tangencial), independiente de que tan pequeño sea el esfuerzo [3]. De acuerdo a su comportamiento viscoso, los fluidos se pueden clasificar en dos grupos: Newtoniano y No-Newtoniano.

2.1.1. FLUIDO NEWTONINANO

La Ley de la viscosidad de Newton establece que en movimientos fluidos laminares existe una relación lineal entre las tensiones tangenciales y los gradientes de velocidad, siendo la constante de proporcionalidad una propiedad física del fluido llamada viscosidad dinámica o absoluta μ :

$$\tau = \mu\dot{\gamma} \quad (2.1)$$

Donde:

τ = Esfuerzo de corte [Pa].

μ = Viscosidad dinámica [Pa·s].

$\dot{\gamma}$ = Velocidad o tasa de deformación [s^{-1}].

Aquellos fluidos que verifican la relación antes mencionada, se denominan fluidos newtonianos, muchos fluidos comunes tanto líquidos como gaseosos se comportan siguiendo esta relación.

2.1.2. FLUIDO NO-NEWTONINANO

Algunos fluidos tales como pulpas de frutas, puré de tomate, los lodos de depuradora, pasta de papel, etc. fluyen como fluidos no-newtonianos, perdiendo la relación de proporcionalidad entre tensiones tangenciales y velocidades de deformación y se los clasifica en 3 grupos [4]:

- Fluidos no-newtonianos independientes del tiempo para los cuales se verifica:

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \quad (2.2)$$

- Fluidos no-newtonianos dependientes del tiempo en los que la relación anterior es más compleja, y que puede expresarse como:

$$\tau = f(\dot{\gamma}, t, \text{historia}) \quad (2.3)$$

- Fluidos visco-elásticos, fluidos en los que a diferencia de los viscosos, donde la energía de deformación es disipada totalmente, esa energía puede recuperarse, como sucede en los sólidos elásticos.

2.1.2.1. Fluidos no-newtonianos independientes del tiempo

Los fluidos no-newtonianos independientes del tiempo se caracterizan porque las tensiones tangenciales dependen únicamente de la velocidad de deformación; ciertos lodos requieren un nivel mínimo de tensión antes de que puedan fluir. Un ejemplo es hormigón fresco que no fluye a menos que el ángulo de la rampa excede de un cierto mínimo. Tales mezclas poseen una magnitud límite de elasticidad que se tiene que superar antes de que fluyan. Algunos flujos no newtonianos independientes del tiempo son los plásticos de Bingham, pseudoplásticos y fluido dilatante. En la Figura 2.1 se puede ver la relación entre el esfuerzo de corte frente a la velocidad de deformación para los diferentes tipos de fluidos no-newtonianos independientes del tiempo junto con la curva típica de un fluido newtoniano.

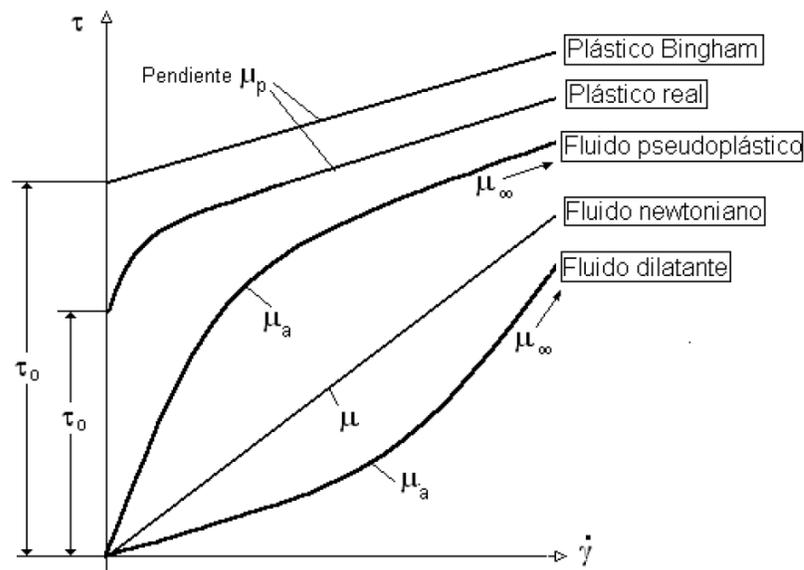


FIGURA 2.1 GRÁFICO ESFUERZO DE CORTE V/S VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN [4].

La viscosidad aparente se define como [5]:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.4)$$

Donde:

μ_a = Viscosidad dinámica aparente [Pa·s].

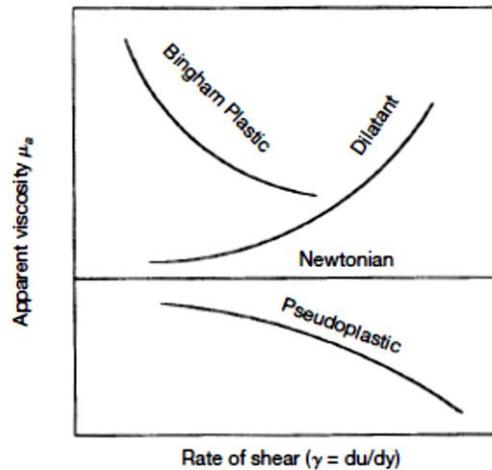


FIGURA 2.2 GRÁFICO VISCOSIDAD APARENTE V/S VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN [5].

Plástico ideal o de Bingham [4]

Se denomina plástico ideal o de Bingham a las sustancias que, para tensiones tangenciales inferiores a un valor característico τ_o se comportan elásticamente, y superado ese valor muestran un comportamiento similar al de un fluido newtoniano. La relación que siguen los plásticos de Bingham es:

$$\tau = \tau_o + \mu_p \dot{\gamma} \quad (2.5)$$

Donde:

μ_p = Viscosidad plástica [Pa·s].

τ_o = Tensión tangencial inicial [Pa].

Se puede modelar la viscosidad plástica de un fluido a través de la concentración volumétrica con el modelo de Maron-Pierce [6]:

$$\frac{\mu_p}{\mu_{H_2O}} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-2} \quad (2.6)$$

Donde:

μ_{H_2O} = Viscosidad del líquido [Pa·s].

ϕ = Concentración volumétrica del fluido.

ϕ_m = Fracción máxima de empaquetamiento de sólidos.

La tensión tangencial inicial se puede obtener a través de la ecuación [7]:

$$\tau_o = \left(k_a \frac{1}{L_c} \frac{1}{\phi_m - \phi}\right)^{\frac{1}{m^*}} \quad (2.7)$$

Donde:

k_a = Constante de proporcionalidad.

L_c = Longitud característica de las partículas [μm].

m^* = Parámetro de interacción.

La longitud característica se puede obtener del modelo de Rosin-Rammler. Los tres parámetros restantes k_a , ϕ_m y m^* , se obtienen por ajuste no lineal de datos experimentales.

Plástico real [4]

Son sustancias que no fluyen hasta llegar a la tensión de fluencia τ_o , y luego presentan una zona de viscosidad variable que disminuye con el incremento de la velocidad de deformación, hasta alcanzar un valor asintótico constante μ_∞ .

Fluido pseudoplástico [5]

Son fluidos no newtonianos independientes del tiempo que necesitan un esfuerzo de corte infinitesimal para iniciar el movimiento, donde la tasa de aumento del esfuerzo de corte con respecto a la gradiente de velocidad disminuye a medida que el gradiente de velocidad aumenta.

La relación más simple que describe el comportamiento de los fluidos pseudoplásticos es la denominada ley potencial o de Ostwald que puede escribirse como:

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (2.8)$$

Donde:

K = Factor de consistencia [Pa·sⁿ].

n = Índice de comportamiento, menor a uno.

Fluidos Dilatantes [4]

Los fluidos dilatantes se caracterizan por necesitar un esfuerzo de corte infinitesimal para empezar a fluir, donde el esfuerzo de corte aumenta a medida que crece la tasa de deformación. Estos fluidos se pueden modelar con la ley potencial con exponente $n > 1$. Los fluidos dilatantes son mucho menos comunes que los pseudoplásticos, donde algunos fluidos que exhiben este comportamiento son la manteca, las arenas movedizas y las suspensiones de almidón.

2.2. CARACTERÍSTICAS DEL RELAVE

2.2.1. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS

En la ecuación (2.9) se muestra como calcular la concentración en volumen de sólidos del relave [5].

$$C_V = \frac{C_w \rho_m}{\rho_s} = \frac{100 \frac{C_w}{\rho_s}}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{(100 - C_w)}{\rho_L}} \quad (2.9)$$

Donde:

C_w = Concentración en peso [%].

C_V = Concentración en volumen [%].

ρ_m = Densidad de la mezcla (pulpa)[kg/m³].

ρ_L = Densidad de la fase líquida [kg/m³].

ρ_s = Densidad de la fase sólida [kg/m³].

Además, la concentración en peso de sólidos en el relave se expresa como:

$$C_w = \frac{C_v \rho_s}{\rho_m} = \frac{C_v \rho_s}{C_v \rho_s + (100 - C_v)} \quad (2.10)$$

2.2.2. DENSIDAD

La densidad del relave se puede calcular a través de la ecuación (2.11), que relaciona la densidad del flujo que transporta las partículas sólidas, la densidad de las partículas sólidas y la concentración en peso de la fase sólida. [5]:

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{(100 - C_w)}{\rho_L}} \quad (2.11)$$

2.2.3. VISCOSIDAD

Es la propiedad de un fluido mediante la cual se ofrece resistencia al esfuerzo tangencial. En el caso del relave modelado como fluido newtoniano, se utilizará la ecuación de Wellman para calcular la viscosidad dinámica en base al parámetro de concentración volumétrica del sólido [8]:

$$\frac{\mu_{pulpa}}{\mu_{H_2O}} = \frac{\exp(-10,4 * C_v)}{\left(1 - \frac{C_v}{0,62}\right)^8} \quad (2.12)$$

Donde:

μ_{pulpa} = Viscosidad dinámica de la pulpa [Pa·s].

μ_{H_2O} = Viscosidad dinámica del líquido [Pa·s].

2.3. VELOCIDAD MÍNIMA

Para evitar la deposición de partículas, es necesario calcular la velocidad mínima para que las partículas se muevan como una suspensión asimétrica, evitando que los sólidos se comiencen a asentar formando un lecho móvil. Esta velocidad corresponde a la mayor entre la velocidad límite de depósito y la velocidad crítica turbulenta, dado un diámetro interno de la tubería y la concentración en volumen de sólidos. Según las indicaciones de [6], se puede calcular la velocidad mínima como sigue:

$$U_{min} = \max|U_D, U_t| \quad (2.13)$$

Donde:

U_D = Velocidad de sedimentación [m/s].

U_t = Velocidad de transición [m/s].

Para adaptar las fórmulas dependientes del diámetro de tubería a canaletas abiertas, se utiliza el radio hidráulico, donde para una canaleta de ancho b y altura de flujo h , esta se define como:

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{b * h}{b + 2h} \quad (2.14)$$

Donde:

A = Sección de escurrimiento [m²].

P = Perímetro mojado [m].

Además se considera que:

$$D_{cañería} = 4 R_h \quad (2.15)$$

2.3.1. VELOCIDAD DE TRANSICIÓN

Se puede estimar la transición laminar-turbulenta a través del criterio empírico híbrido de Slatter y Wasp (2000) [6]. Para números de Hedström menores a $1,5 \times 10^5$ (ver (2.16)), se utiliza el criterio de Hanks, basado en la definición de la relación entre la tasa de cambio de momento angular de un paquete de fluido y su tasa de pérdida de momentum debido a la fricción.

$$He = \frac{\rho_m \tau_y D^2}{\eta^2} \quad (2.16)$$

Donde:

ρ_m = Densidad de la mezcla [kg/m³].

D = Diámetro interno de cañería [m].

τ_y = Tensión tangencial inicial [Pa].

η = Viscosidad plástica [Pa s].

Números de Hedström superiores a $1,5 \times 10^5$, por lo general corresponden a medianas y grandes tuberías de concentrado de mineral, para estos casos se propone el siguiente criterio para el cálculo del Reynolds crítico:

$$Re_c = 26 He^{1/2} \quad (2.17)$$

Donde el cálculo de la velocidad de transición corresponde a:

$$U_t = \frac{Re_c \eta}{\rho_m D} \quad (2.18)$$

2.3.2. VELOCIDAD LÍMITE DE DEPÓSITO

La velocidad de depósito se puede modelar usando una correlación adimensional propuesta por Poloski (2010) en términos del número de Archimedes (Ar) como:

$$Ar = \frac{4 g L^3 \rho_l (\rho_s - \rho_l)}{3 \eta^2} \quad (2.19)$$

$$U_D = 0,59 \sqrt{g D (S - 1)} Ar^{0,15} \quad (2.20)$$

Donde:

S = Gravedad específica de los sólidos.

L= Tamaño de partícula característico [m].

g = Gravedad [m/s²].

ρ_l = Densidad de la fase líquida [kg/m³].

ρ_s = Densidad de la fase sólida [kg/m³].

Esta correlación es válida para $Ar < 80$, que corresponde a relaves concentrados, como los que se estudian en esta memoria.

Para el estudio de velocidad de depósito de fluidos con concentraciones en volumen menores al 30%, se puede usar el modelo de Durand, con el gráfico alternativo presentado por McElvain y Cave, mostrado en la Figura 2.3, que se utiliza para determinar el factor de Durand, llamado en este caso F_L . La ecuación que se utiliza para calcular la velocidad de sedimentación es: [8].

$$U_D = F_L \sqrt{2 g D (S - 1)} \quad (2.21)$$

La ecuación anterior no representa de buena manera relaves de densidad alta, por lo que existen correcciones para la ecuación dadas por [9]:

- Para sólidos de granulometría fina y espectro granulométrico angosto (ductos de pequeño diámetro (< 6'')):

$$U_D = 1,1 F_L \sqrt{2 g D (S - 1)^{0,6}} \quad (2.22)$$

- Para sólidos de granulometría gruesa y espectro granulométrico ancho (ductos de pequeño diámetro (< 6'')):

$$U_D = F_L \sqrt{2 g D (S - 1)} \left(\frac{d_{50}}{d_{80}} \right)^{0,1} \quad (2.23)$$

- Para sólidos de granulometría fina y espectro granulométrico angosto (ductos de diámetro del orden de 8'' a 24''):

$$U_D = 1,25 F_L \sqrt[4]{2 g D (S - 1)} \quad (2.24)$$

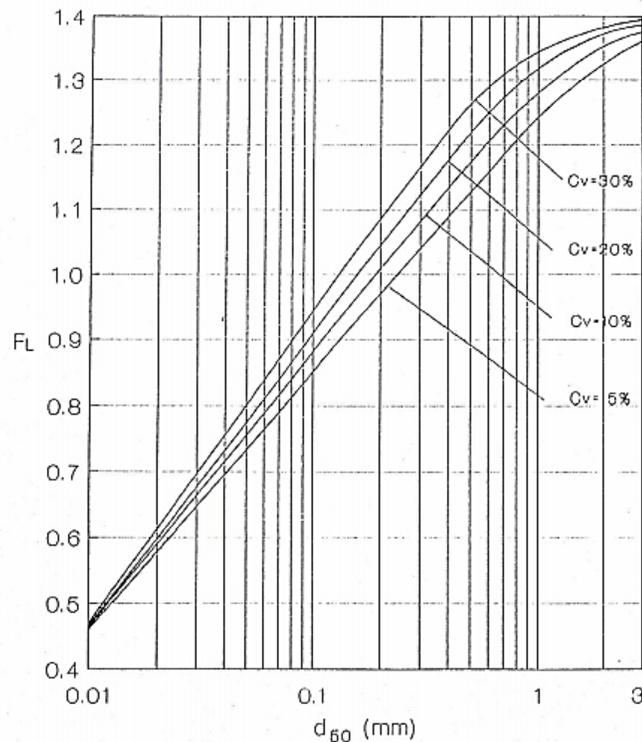


FIGURA 2.3 GRÁFICO DE MCELVAIN Y CAVE, PARA DETERMINAR EL FACTOR F_L [8].

2.4. VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

La velocidad de sedimentación permite encontrar la mínima velocidad de flujo para que no exista riesgo de deposición y obstrucción de la tubería. Corresponde a la velocidad a la cual los sólidos gruesos permanecen detenidos por períodos importantes en el fondo de la tubería (formación de dunas móviles y/o lecho fijo en el fondo). Para el cálculo de la velocidad de sedimentación, se siguen las indicaciones de [8].

2.4.1. PARTÍCULA AISLADA EN UN FLUIDO

La granulometría de la partícula, cuando se mueve en un fluido en reposo, afecta a la velocidad de sedimentación de la siguiente manera, en régimen de Stokes:

$$V_s = \frac{1}{18} \frac{g d^2 (\rho_s - \rho_l)}{\mu_l} \quad (2.25)$$

Donde:

d = Diámetro característico de la partícula [m].

ρ_s, ρ_l = Densidad del sólido y líquido respectivamente [kg/m^3].

μ_l = Viscosidad dinámica del líquido [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

En este caso el Reynolds de la partícula (Re_p) es menor a 0,2, o sea, régimen laminar, donde Re_p es igual a:

$$Re_p = \frac{d V_r}{\nu} \quad (2.26)$$

Donde:

V_r = Velocidad relativa entre la partícula y el fluido [m/s].

ν = Viscosidad cinemática del líquido [$\text{m}^2\cdot\text{s}$].

En régimen turbulento se tiene la siguiente relación:

$$V_s = \frac{1}{\sqrt{C_d}} \sqrt{\frac{4}{3} g d \frac{(\rho_s - \rho_l)}{\rho_l}} \quad (2.27)$$

Donde C_d corresponde al coeficiente de arrastre de las partículas. Este valor depende del régimen de transporte:

- Régimen laminar:

$$Re_p < 0,2 \quad C_d = \frac{24}{Re_p} \quad (2.28)$$

- Régimen de transición:

$$0,2 < Re_p < 10^3 \quad C_d = \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15 Re_p^{0,687}) \quad (2.29)$$

- Régimen turbulento:

$$10^3 < Re_p < 3 \cdot 10^5 \quad C_d = 0,44 \quad (2.30)$$

En general las partículas no son esféricas, por lo que se debe considerar el factor de forma k . Se utiliza el gráfico de Heywood para determinar la velocidad de sedimentación, mostrado en la Figura 2.4.

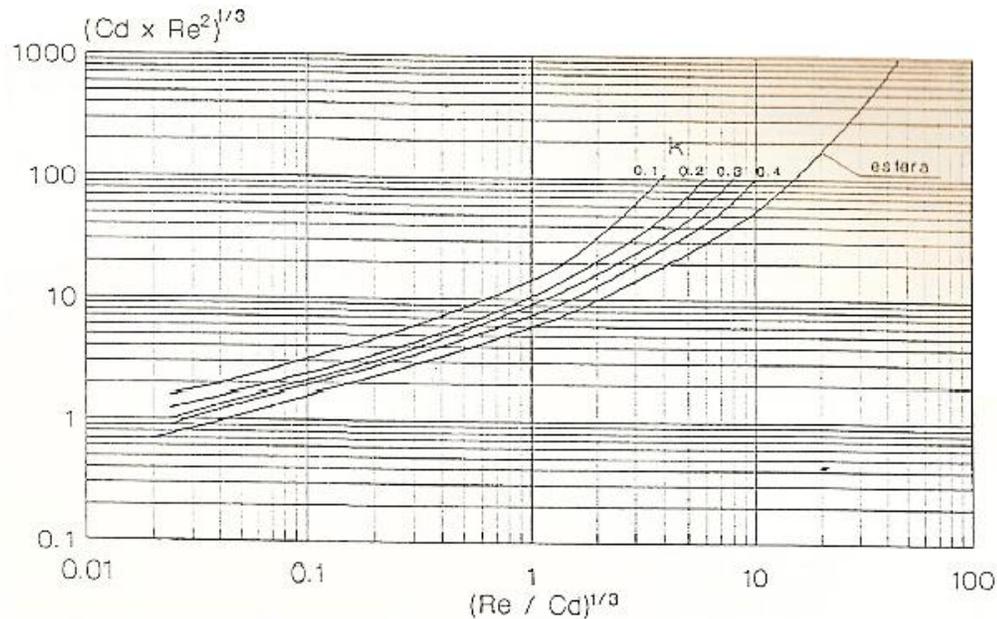


FIGURA 2.4 GRÁFICO DE HEYWOOD [8]

Para utilizar el gráfico de Heywood, se deben considerar las siguientes expresiones:

$$(C_d Re_p^2)^{1/3} = \left[\frac{4 g (\rho_s - \rho_l) \rho_l}{3 \mu^2} \right]^{1/3} d = \alpha d \quad (2.31)$$

$$\left(\frac{Re_p}{C_d} \right)^{1/3} = \left[\frac{3 \rho_l^2}{4 g (\rho_s - \rho_l) \mu} \right]^{1/3} v_s = \beta v_s \quad (2.32)$$

Se calculan α y β , luego utilizando el gráfico y dependiendo de la forma de la partícula se determina el valor $(Re_p / Cd)^{1/3}$, después se despeja la velocidad de sedimentación v_s .

2.4.2. CORRECCIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN

Las velocidades de sedimentación, presentadas en el capítulo anterior, corresponden a las de una partícula aislada que cae en un medio infinito. Para el caso real de relave donde la velocidad de sedimentación es afectada por la concentración de sólidos (sedimentación obstruida), debe corregirse vs. A continuación se muestra la ecuación empírica Richardson y Kaki, donde v_{si} corresponde a la velocidad de sedimentación obstruida cuando la concentración volumétrica es C_v :

$$\frac{v_{si}}{v_s} = (1 - C_v)^n \quad (2.33)$$

Los valores del índice n dependen del número de Reynolds Re_p , del diámetro de partícula d y el diámetro del ducto D . Si $D \gg d$, entonces d/D es despreciable.

$$n = 4,65 + 19,5 \frac{d}{D} \quad Re_p < 0,2 \quad (2.34)$$

$$n = \left(4,35 + 17,5 \frac{d}{D} \right) Re_p^{-0,03} \quad 0,2 < Re_p < 1 \quad (2.35)$$

$$n = \left(4,45 + 18 \frac{d}{D} \right) Re_p^{-0,1} \quad 1 < Re_p < 200 \quad (2.36)$$

$$n = 4,45 Re_p^{-0,1} \quad 200 < Re_p < 500 \quad (2.37)$$

$$n = 2,39 \qquad Re_p > 500 \qquad (2.38)$$

2.5. FLUJO DE RELAVE EN CANALES ABIERTOS

Un canal abierto es un conducto para transportar líquidos con una superficie libre abierta a la atmósfera, un canal puede ser artificial o natural [10].

Los fluidos que circulan en canales abiertos se pueden clasificar en tres categorías:

- Suspensiones homogéneas donde las partículas son relativamente pequeñas y se mantienen en suspensión en el fluido portador, que es generalmente agua. Si no se produce flujo, estas partículas eventualmente decantan, al menos parcialmente. Estos lodos dependiendo de su viscosidad son clasificados como no-newtoniano y se pueden caracterizar reológicamente.
- Suspensiones de partículas gruesas en agua que forman lodos estables. Para estos lodos, la velocidad del fluido portador es crítica, ya que las partículas tienen que estar en suspensión para ser transportados.
- La tercera categoría es la suspensión régimen mixto que es una mezcla de la lenta sedimentación y fluidos de una sedimentación rápida.

2.5.1. FLUJO LAMINAR Y TURBULENTO

El flujo de un fluido puede ser clasificado como laminar o turbulento. Si el flujo es laminar, una capa del fluido se desliza sobre la otra de forma ordenada y aerodinámica. En esta región, las fuerzas viscosas dominan y obedecen la ley de Newton de la viscosidad en el que el esfuerzo de corte es proporcional al gradiente de velocidad y el coeficiente de proporcionalidad es la viscosidad dinámica.

En un flujo turbulento, las partículas del fluido fluyen de manera errática, causando que los componentes de velocidad fluctúen. Estas fluctuaciones crean cambios de momento, que se traducen en un gran aumento en los esfuerzos de corte. Osborne Reynolds fue el primero en estudiar estas regiones de flujo y desarrolló la siguiente relación, que ahora se llama el número de Reynolds [10]. El número de Reynolds es proporcional a la relación entre las fuerzas inerciales y viscosas y se define de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho * V * L}{\mu} \quad (2.39)$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido [kg/m³].

μ = Viscosidad dinámica [Pa·s].

V = Velocidad característica del fluido [m/s].

L = Largo característico [m].

Para las cañerías, la longitud característica L se convierte en el diámetro de cañería D , para un canal abierto L se convierte en el radio hidráulico R_h , donde el radio hidráulico es la relación entre el área sobre el perímetro mojado de la sección transversal del flujo.

A través de experimentos se determinó que el flujo laminar se produce cuando el número de Reynolds es menor que 2 000, y que el flujo turbulento se produce con números de Reynolds por encima de 4 000. La región entre flujo laminar y turbulento es una región inestable llamada zona de transición.

2.5.2. NÚMERO DE FROUDE

El número de Froude es proporcional a la relación entre las fuerzas de inercia y la gravedad. Si el número de Froude es mayor a uno, significa que las ondas no pueden propagarse aguas arriba [10].

El número de Froude se define como un número adimensional proporcional a la raíz cuadrada de la relación de la fuerza de inercia sobre el peso del fluido:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * D_{charac}}} = \frac{\rho * V^2 * A}{\rho * g * A * L} \quad (2.40)$$

Donde:

A = Área de sección transversal [m²].

g = Aceleración de gravedad [m/s²].

D_{charac} = Dimensión geométrica característica[m].

Para un canal rectangular abierto el número de Froude Fr es:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * h}} \quad (2.41)$$

Donde:

h = Altura del flujo[m].

Si el número de Froude es menor que la unidad, el flujo se denomina sub-crítico. En este estado de flujo, las fuerzas de gravedad son más prominentes. Si el número de Froude es mayor que la unidad, el flujo se clasifica como super-crítico. Las fuerzas de inercia juegan un papel más importante en este estado de flujo y la velocidad es generalmente alta. Cuando el número de Froude es 1, el flujo es crítico y esta se considera generalmente como una región inestable.

Para relaves se recomienda que $Fr > 1,5$ para evitar inestabilidad, esto debido a que flujos subcríticos producen problemas de sedimentación y los flujos críticos o cercanos a este valor pueden provocar problemas de operación [11].

2.5.3. *FLUJO DE FLUIDOS NEWTONIANOS EN CANALES ABIERTOS*

Un flujo uniforme puede ocurrir cuando se tiene un flujir recto y largo con una pendiente constante y sección transversal de canal constante. La profundidad y la velocidad del fluido se mantienen constantes.

En la Figura 2.5 se muestra el flujir de un fluido newtoniano por un plano inclinado con una pendiente α .

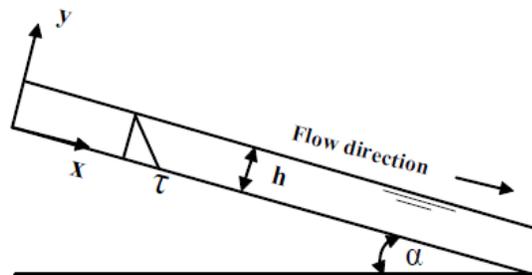


FIGURA 2.5 FLUJO EN UN PLANO INCLINADO [10].

El ingeniero francés Antoine Chézy desarrolló una fórmula para caracterizar la velocidad media de un flujo uniforme como [12]:

$$V_o = C_{chézy} \sqrt{R_h \text{ sen}\alpha} \quad (2.42)$$

Donde:

V_o = Velocidad media del fluido [m/s].

$C_{chézy}$ = Coeficiente de Chézy, que varía de 30 [m^{1/2}/s] a 90 [m^{1/2}/s] dependiendo de la rugosidad de la canaleta [12].

Para simplificar la ecuación, en vez de usar el coeficiente de Chézy que se obtiene a través del factor de fricción, se utiliza la correlación de Robert Manning donde n es un parámetro de rugosidad que se obtiene experimentalmente. Finalmente se obtiene que la fórmula de Manning para la velocidad en flujo uniforme es:

$$V_o = \frac{1}{n} (R_h)^{2/3} \sqrt{\text{sen}\alpha} \quad (2.43)$$

TABLA 2.1 VALORES EXPERIMENTALES DEL FACTOR DE MANNING [12].

| | n | Altura media rugosidad ϵ | |
|------------------------------------|-------------------|---|-----------|
| | | ft | mm |
| Canales artificiales | | | |
| Vidrio | 0.010 \pm 0.002 | 0.0011 | 0.3 |
| Latón | 0.011 \pm 0.002 | 0.0019 | 0.6 |
| Acero, liso | 0.012 \pm 0.002 | 0.0032 | 1.0 |
| Pintado | 0.014 \pm 0.003 | 0.0080 | 2.4 |
| Remachado | 0.015 \pm 0.002 | 0.012 | 3.7 |
| Hierro fundido | 0.013 \pm 0.003 | 0.0051 | 1.6 |
| Cemento, acabado | 0.012 \pm 0.002 | 0.0032 | 1.0 |
| No terminado | 0.014 \pm 0.002 | 0.0080 | 2.4 |
| Madera cepillada | 0.012 \pm 0.002 | 0.0032 | 1.0 |
| Teja de barro | 0.014 \pm 0.003 | 0.0080 | 2.4 |
| Ladrillo | 0.015 \pm 0.002 | 0.012 | 3.7 |
| Asfalto | 0.016 \pm 0.003 | 0.018 | 5.4 |
| Metal corrugado | 0.022 \pm 0.005 | 0.12 | 37 |
| Mampostería | 0.025 \pm 0.005 | 0.26 | 80 |
| Canales de tierra excavada: | | | |
| Limpia | 0.022 \pm 0.004 | 0.12 | 37 |
| Lleno de grava | 0.025 \pm 0.005 | 0.26 | 80 |
| Con maleza | 0.030 \pm 0.005 | 0.8 | 240 |
| Adoquines | 0.035 \pm 0.010 | 1.5 | 500 |
| Canales naturales: | | | |
| Limpio y recto | 0.030 \pm 0.005 | 0.8 | 240 |

TABLA 2.1 (CONTINUACIÓN)

| | Altura media rugosidad ϵ | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|-----|------|--|
| | n | ft | mm | |
| Piscinas profundas, lentas | 0.040 \pm 0.010 | 3 | 900 | |
| Ríos principales | 0.035 \pm 0.010 | 1.5 | 500 | |
| Terreno inundable: | | | | |
| Pasto, campos agrícolas | 0.035 \pm 0.010 | 1.5 | 500 | |
| Maleza ligera | 0.05 \pm 0.02 | 6 | 2000 | |
| Maleza pesada | 0.075 \pm 0.025 | 15 | 5000 | |
| Árboles | 0.15 \pm 0.05 | ? | ? | |

2.5.4. FLUJO DE FLUIDOS NO-NEWTONIANOS EN CANALES ABIERTOS

A continuación se muestra un nuevo procedimiento de diseño, para determinar la altura y la velocidad de un fluido no-newtoniano transportándose en una canaleta de sección rectangular, propuesto por [10]. La ventaja que presenta este modelo, con respecto a la fórmula de Chezy-Manning para canales abiertos, es que describe de mejor forma el comportamiento de un fluido No-Newtoniano, debido a que ocupa la fórmula de Re_2 , el cual se adapta tanto a fluidos pseudoplásticos, plásticos de Brigham como fluidos newtonianos, además es sencillo de usar debido a que no contiene cálculos del efecto de forma.

2.5.4.1. Flujo laminar

El número de Reynolds que se utiliza para plástico de Bingham es el propuesto por Zhang y Ren (1982):

$$Re_2 = \frac{8V^2 * \rho}{K \left(\frac{2V}{R_h}\right)^n + \tau_y} \quad (2.44)$$

Donde:

K = Viscosidad plástica [Pa·s].

τ_y = Tensión tangencial inicial [Pa].

n = índice de comportamiento.

El factor de fricción de Fanning se define como:

$$f = \frac{2 * g * R_h * \text{sen}\alpha}{V^2} \quad (2.45)$$

O también,

$$V = \sqrt{\frac{2 * g * R_h * \text{sen}\alpha}{f}} \quad (2.46)$$

En flujo laminar: $f = 16/Re$ (2.47)

2.5.4.2. Comienzo de transición

Para saber cuándo comienza la transición de flujo laminar a turbulento y termina la relación de $f=16/Re$, se necesita determinar la siguiente fórmula [10]:

$$Re_c = \frac{200}{(\mu_{app(100s^{-1})})^{0,21}} * Fr + \frac{71}{(\mu_{app(100s^{-1})})^{0,75}} \quad (2.48)$$

Donde:

Re_c = Número de Reynolds crítico.

$\mu_{app(100s^{-1})}$ = Viscosidad aparente a una tasa de deformación de 100 s^{-1} [Pa·s].

2.5.4.3. Flujo turbulento

Primero se deben establecer los parámetros de la región de flujo turbulento antes de poder obtener el comienzo de “flujo turbulento desarrollado”.

La fórmula para obtener la velocidad en flujo turbulento es la siguiente [10]:

$$V = V_* \left| 2,5 \ln \left(\frac{2R_h}{K} \right) - 76,86 * \mu_{app(500s^{-1})} - 9,45 \right| \quad (2.49)$$

$$V_* = \sqrt{g * h * \text{sen}\alpha} \quad (2.50)$$

$$R_h = \frac{2 * b * h}{b + 2h} \quad (2.51)$$

El número de Reynolds es el mismo que en flujo laminar, mostrado en la ecuación (2.44). El factor de fricción de Fanning, en este caso, es el siguiente:

$$f_{turb} = 0,66 * \left(\frac{2 * g * h * \text{sena} \alpha}{V^2} \right) \quad (2.52)$$

2.6. DISEÑO DE CAJONES DE RELAVE

Se siguen las indicaciones de [13].

2.6.1. CAJONES DE TRANSICIÓN

Cuando se necesita hacer cambios de direcciones en las líneas de pulpa, se sitúa un cajón de transición en el ángulo de la curva. Este cajón debe tener las dimensiones adecuadas de longitud, ancho, alto y profundidad.

En la Figura 2.6 se observa las dimensiones de un cajón de transición, donde d corresponde a la profundidad del flujo entrante, h es la diferencia del nivel de la pulpa, y debe ser considerada mayor a la profundidad del fluido d , L es el largo de los cajones de transición y D es la profundidad de los cajones de transición, esta debe ser suficiente para proveer un cojín amplio para la pulpa entrante, previniendo así el desgaste en el suelo del cajón, y realizar la disipación de energía.

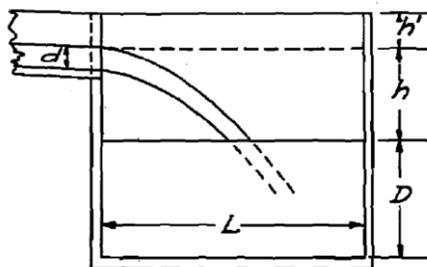


FIGURA 2.6 CAJÓN DE TRANSICIÓN CON FLUJO ENTRANTE [13].

El alto superior en el cajón de transición (h'), se diseña a ras con el borde superior del flujo entrante. Si el nivel de pulpa en el cajón es relativamente alto y la velocidad del flujo entrante es elevada, podría ser necesario añadir una placa en la parte superior de la caja, para evitar salpicaduras del relave.

2.6.2. *DESCARGA DEL RELAVE*

Cuando se analiza la descarga del relave desde el cajón de transición a la canaleta, es muy importante prestar atención al extremo de la canaleta en la cual se descarga la pulpa, ya que cuando la pulpa sale del cajón este no lleva velocidad inicial, entonces el área de la abertura de salida del cajón de transición debe ser mucho mayor la apertura de alimentación.

La Tabla 2.2 permite obtener el volumen de relave que fluye desde el cajón de transición a una canaleta construidos como se muestra en la Figura 2.7.

El tamaño de la canaleta de descarga es el mismo que el de la canaleta de alimentación. Es posible que debido a falta de presión en el cajón sea necesario ensanchar la apertura de descarga, lo que aumentará el tamaño requerido del extremo de la canaleta en el cual se descarga la pulpa desde el cajón. Si esto se lleva a cabo, el ancho interno de la canaleta se hace 6 pulgadas mayor a la apertura de descarga del cajón. Cada lado se estrecha a una tasa de 3:12 hasta alcanzar el tamaño de la sección de la canaleta estándar.

TABLA 2.2 VOLUMEN DE RELAVE QUE CAE DEL CAJÓN DE TRANSICIÓN A LA CANALETA [13].

| Caída d' [pulgadas] | Largo de apertura en cajón de transición [pulgadas] | | | | | |
|------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 6 | 12 | 18 | 24 | 36 | 60 |
| Q [galones/min] | | | | | | |
| 1/2 | 5,4 | 10,8 | 16,1 | 21,8 | 32,7 | 54,6 |
| 1 | 14,9 | 30,4 | 45,9 | 61,3 | 92,3 | 154,1 |
| 1 1/2 | 23,8 | 51,9 | 80 | 108,1 | 164,2 | 277 |
| 2 | 40,3 | 83,6 | 126,8 | 170 | 256 | 429 |
| 2 1/2 | 55,2 | 115,5 | 175,8 | 236 | 356 | 598 |
| 3 | 71,5 | 150,9 | 230 | 310 | 468 | 786 |
| 3 1/2 | 88,5 | 188,7 | 289 | 289 | 589 | 990 |
| 4 | 105,9 | 228 | 350 | 473 | 717 | 1206 |
| 4 1/2 | 124 | 270 | 416 | 562 | 853 | 1437 |
| 5 | 142,5 | 314 | 485 | 656 | 998 | 1682 |
| 5 1/2 | 160,8 | 358 | 555 | 751 | 1145 | 1933 |
| 6 | 179,7 | 404 | 629 | 853 | 1303 | 2201 |
| 6 1/2 | 198,5 | 452 | 705 | 959 | 1466 | 2480 |
| 7 | 217 | 500 | 782 | 1065 | 1631 | 2762 |
| 7 1/2 | 235 | 549 | 863 | 1177 | 1805 | 3060 |
| 8 | 254 | 600 | 944 | 1292 | 1984 | 3368 |

TABLA 2.2 (CONTINUACIÓN)

| Caída d' [pulgadas] | Largo de apertura en cajón de transición [pulgadas] | | | | | |
|------------------------|---|-----|------|------|------|------|
| | 6 | 12 | 18 | 24 | 36 | 60 |
| Q [galones/min] | | | | | | |
| 8 1/2 | 271 | 650 | 1028 | 1406 | 2164 | 3677 |
| 9 | 289 | 701 | 1114 | 1526 | 2352 | 4002 |
| 9 1/2 | 306 | 754 | 1201 | 1649 | 2544 | 4335 |
| 10 | 322 | 805 | 1289 | 1772 | 2738 | 4671 |

La Tabla 2.2 se obtuvo con la fórmula de Francis [13], la cual fue adaptada considerando que el caudal de relave en un cajón de transición si se nivela la parte inferior de la canaleta con la parte inferior de la apertura de descarga, es aproximadamente el 85% del flujo de la descarga de un vertedero del mismo ancho y profundidad de flujo.

2.6.3. CAJONES DE DISTRIBUCIÓN

Un cajón de distribución de relave permite distribuir un flujo principal en diferentes flujos secundarios. El cajón cuenta con una entrada y múltiples salidas de relave. En la distribución de pulpa hay dos cosas esenciales que considerar:

- A medida que el volumen de pulpa fluctúa, deben haber fluctuaciones proporcionales en los diferentes canales por los cuales el relave es distribuido.
- La distribución de la pulpa se debe efectuar de manera de eliminar el manejo humano.

La distribución del relave se puede lograr de muchas formas, una de ellas es la que se expone a continuación:

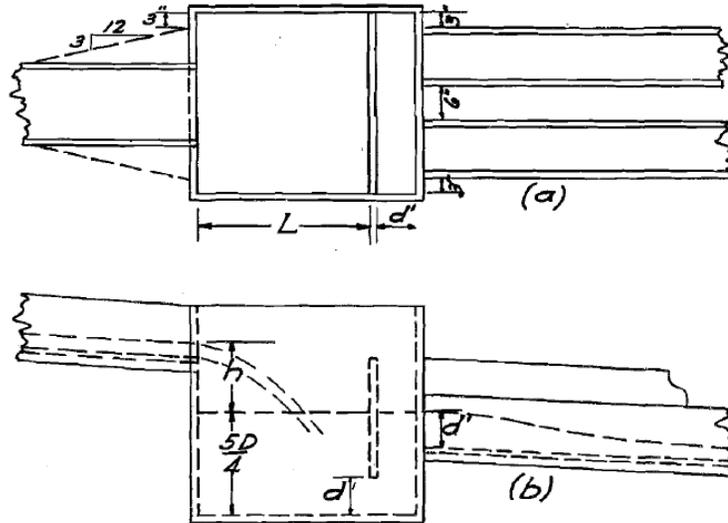


FIGURA 2.7 VERTEDERO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE LA PULPA [13].

Como se observa en la Figura 2.7, el flujo entra al cajón cerca de su parte superior, pasa debajo del baffle y descarga a dos canaletas. Si se desea dividir el flujo en tres partes en lugar de dos, se debe ensanchar la canaleta de entrada hasta 6 pulgadas del ancho total del cajón, como muestran las líneas punteadas de la Figura 2.7.

La profundidad de la pulpa en el cajón de distribución debe ser $1 \frac{1}{4}$ veces el valor de D dado en el cajón de transición. El largo adicional del cajón es igual a d' , pero no menor a 5 pulgadas. Además, la apertura bajo el baffle es igual a d' , pero no menor a 6 pulgadas. El ancho del cajón depende del espacio requerido para dos o más canaletas de salida.

La altura del baffle debe ser suficientemente grande para prevenir el derrame del flujo en la entrada a las canaletas de descarga, pero suficientemente pequeña para permitir que la pulpa fluya por sobre él en caso de obstrucción debajo del baffle.

3. ANTECEDENTES DE MODELACIÓN COMPUTACIONAL

3.1. MODELO MULTIFÁSICO-VOLUMEN DE FLUIDO

Los flujos multifásicos tienen una interfaz clara y un nivel macro de distinción entre las diferentes fases. Los flujos se pueden clasificar según su morfología en [14]:

- Fase dispersa: ocupa regiones desconectadas de espacio.
- Fase continua: conectados en el espacio.

Según tipos de sistemas:

- Sistema Disperso: flujos disperso-continuo
- Sistema Separado: flujos continuo-continuo

El modelo multifásico-volumen de fluido (VOF) está diseñado para 2 o más fases. En este modelo un único conjunto de ecuaciones de momentum es compartido por las fases, y la fracción de volumen es seguida en todo el dominio computacional. Este modelo es usado en flujos de superficie libre, estratificados y con burbujas, entre otros [2].

La fracción de volumen de la fase q , denotado por α_q , representa la fracción de región ocupada por la fase q , donde $0 \leq \alpha_q \leq 1$. La suma de las fracciones de volumen de las diferentes fases es unitaria (ecuación de conservación de volumen).

$$\sum \alpha_q = 1 \tag{3.1}$$

El modelo multifásico de volumen de fluido resuelve las ecuaciones de continuidad y momentum. La ecuación de continuidad es la que se presenta a continuación:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \tag{3.2}$$

Donde:

ρ_q = Densidad de la fase q [kg/m³].

\vec{v}_q = Velocidad de la fase q [m/s].

$S_{\alpha q}$ = Término fuente de la ecuación.

\dot{m}_{pq} = Transferencia de masa de la fase p a la fase q [kg/s].

\dot{m}_{qp} = Transferencia de masa de la fase q a la fase p [kg/s].

La ecuación de momentum es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + S_i \quad (3.3)$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido [kg/m³].

\vec{v} = Velocidad [m/s].

S_i = Término fuente.

p = Presión [Pa].

\vec{g} = Gravedad [m/s²]

μ = Viscosidad dinámica [Pa s].

El modelo VOF tiene dos opciones para resolver las ecuaciones antes mostradas, el primer método es el Implícito, donde las ecuaciones de continuidad y momentum se resuelven simultáneamente, el segundo es el Explicito, donde se resuelve primero la ecuación de continuidad y luego la ecuación de momentum.

El método Implícito permite usar un intervalo de tiempo elevado, mallas más gruesas y/o flujos más complejos, disminuyendo el tiempo de iteración, pero presenta difusión numérica en la interfaz, lo que no permite una predicción precisa del flujo.

El método Explicito, utiliza *Georeconstruct* que logra una interfaz clara y nítida, sin difusión numérica. Puede utilizarse sólo en simulaciones transientes y entre sus desventajas se tiene la dependencia del número de Courant, el cual debe estar por debajo de un valor máximo ingresado por el usuario, por default este valor es de 0,25. Si se ve la ecuación (3.4), el número de Courant es directamente proporcional al time step, por lo que es necesario usar bajos time steps para que no se supere el valor máximo de Courant, lo que aumenta el tiempo de cálculo.

$$N^{\circ} \text{ de Courant} = \frac{\Delta t}{\frac{\Delta x_{\text{celda}}}{V_{\text{fluido}}}} \quad (3.4)$$

Donde:

Δt = Time step [s].

Δx_{celda} = Longitud de la celda cerca de la interfaz [m].

V_{fluido} = Velocidad del fluido [m/s].

3.2. MODELO DE TURBULENCIA k-ε ESTÁNDAR

El modelo de turbulencia k-ε resuelve dos ecuaciones de transporte, dando dos escalas independientes para calcular la viscosidad turbulenta μ_t . Se utiliza la ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta k, y la variable de transporte propuesta por Chou, ε (disipación de energía) [15].

Ecuación de transporte k:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \underbrace{\mu_t S^2}_{\substack{\text{Producción} \\ \text{por corte}}} - \underbrace{\rho \varepsilon}_{\substack{\text{Disipación} \\ \text{viscosa}}}; \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3.5)$$

Ecuación de transporte ε:

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \underbrace{\frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} \mu_t S^2 - \rho C_{2\varepsilon} \varepsilon)}_{\substack{\text{Escala de} \\ \text{tiempo inverso}}} \quad (3.6)$$

Los coeficientes σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ y $C_{2\varepsilon}$, son constantes empíricas determinadas por experimentos de referencia de flujos simples usando aire o agua.

Por último se tiene la turbulencia viscosa:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.7)$$

El término estándar se refiere a la elección de los coeficientes que rigen el modelo. A veces se incluyen términos adicionales a las ecuaciones como producción por flotabilidad, donde la estratificación inestable ($g \cdot \nabla T > 0$) apoya la producción de k ; o disipación de dilatación por compresibilidad que añade términos de disipación, previniendo sobreestimación del rendimiento en flujos compresibles:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \underbrace{\mu_t S^2}_{\text{Producción por flotación}} - \rho \varepsilon - \underbrace{g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i}}_{\text{Disipación de dilatación}} - 2\rho \varepsilon \frac{k}{\gamma R T} \quad (3.8)$$

Las ventajas que presenta el modelo de turbulencia k - ε estándar, es su robustez, su economía en costos computacionales por iteración y precisión razonable para un amplio rango de flujos. Una de sus principales desventajas radica en que es excesivamente difusivo para muchas situaciones, como flujos con una fuerte línea de corriente curvada, remolinos, flujos rotacionales y flujos con bajos Reynolds, entre otros; además este modelo no puede predecir el flujo teórico de un chorro curvo.

3.2.1. MODELAMIENTO CERCANO A LA PARED

La presencia de paredes aumenta el momento de turbulencia y las capas de borde térmico, generando vorticidades. Además las variaciones más pronunciadas son en la región cercana a la pared. El éxito en la predicción de la resistencia friccional de flujos externos, o la caída de presión para flujos internos, depende de la fidelidad de las predicciones de esfuerzos de corte en la pared. El uso de malla muy fina para resolver los perfiles abruptos es todavía muy caro para muchas simulaciones en CFD industriales, por esto es muy importante lograr un modelamiento cercano a la pared preciso para la mayoría de aplicaciones CFD industriales.

Los perfiles de velocidad presentan capas estructurales identificadas a través de análisis dimensionales, en la Figura 3.1 se pueden distinguir tres capas [16]:

- Capa interna: Aquí rigen las fuerzas viscosas

$$U = f(\rho, \tau_w, \mu, y) \quad (3.9)$$

Donde:

τ_w = Esfuerzo de corte en la pared [Pa].

y = Distancia de la pared al centro de la celda.

- Capa externa: Depende del flujo medio.
- Superposición de capas: Aplica la ley logarítmica.

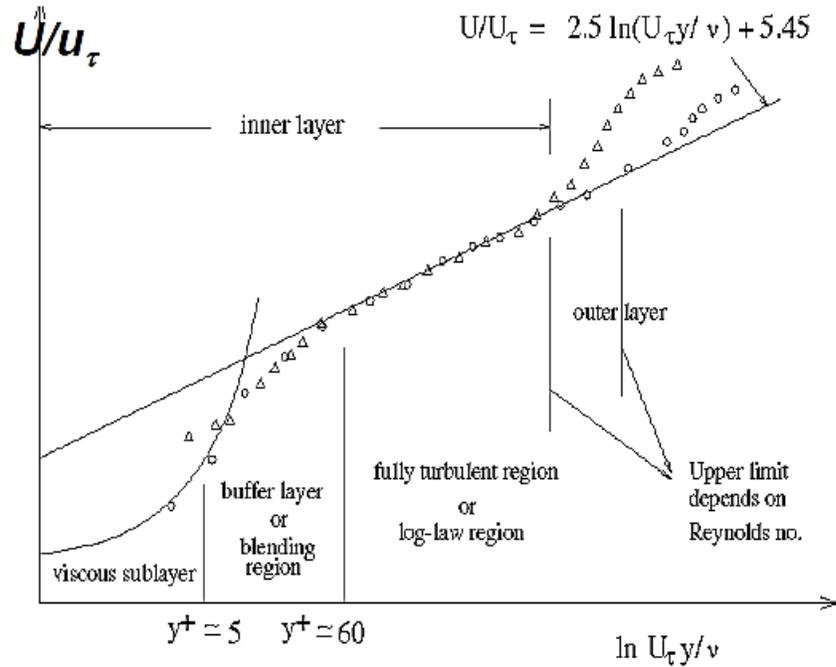


FIGURA 3.1 GRÁFICO SEMI-LOG DE PERFIL DE VELOCIDADES CERCANO A UN MURO [16].

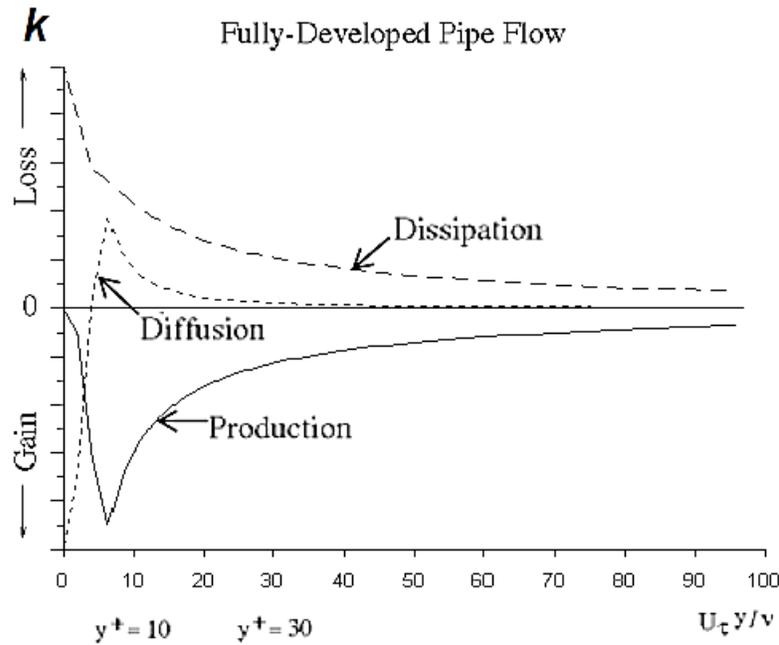


FIGURA 3.2 GRÁFICO DE ENERGÍA CINÉTICA TURBULENTO CERCANA A LA MURALLA [16].

En la zona de ley logarítmica, la velocidad cercana a la pared, u^+ , se define como:

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} = \frac{1}{K} \ln(E y^+) + C \quad (3.10)$$

Donde:

u = Velocidad del fluido paralela a la pared [m/s].

u_τ = Velocidad de corte [m/s].

K = Constante de Von Kármán, cuyo valor es 0,4187.

E = Constante empírica, cuyo valor es 9,793.

C = Constante que depende del material.

El parámetro adimensional y^+ es usado para determinar una distancia específica de una pared, a través de la capa límite, al centro del elemento en el límite de la pared [17].

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu}; \quad u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.11)$$

En la subcapa viscosa se tiene que: $u^+ = y^+$

El modelo de turbulencia k-ε es válido en la región del centro turbulento y a través de la capa logarítmica. Esto se debe a que, como se muestra en la Figura 3.2, la producción y disipación de energía cinética turbulenta son casi iguales en la superposición de capas, esto produce un equilibrio turbulento. Esto ocurre en los valores de y^+ cercanos a 10.

En general, "las funciones de pared" son un conjunto de leyes que sirven como condiciones de borde para el impulso y la energía, así como para los valores de turbulencia. La función de pared estándar se refiere a un 'set' específico diseñado para altos números de Reynolds. En la Figura 3.3 se muestra un esquema del enfoque de la función de pared estándar, donde la zona viscosa afectada, cerca de la pared, no es resuelta; el mallado cercano a la pared es relativamente grueso y los datos que se tienen del primer nodo a simular se obtienen a través de funciones de pared de base empírica.

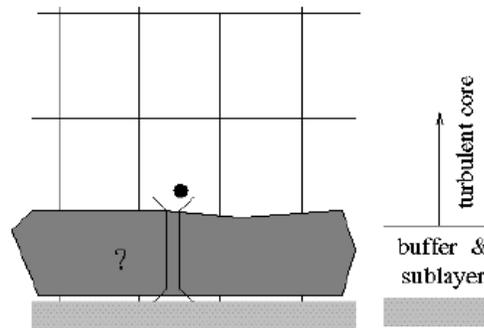


FIGURA 3.3 ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE FUNCIÓN DE PARED ESTÁNDAR [16].

Para definir la función de pared estándar, Fluent utiliza las ecuaciones de Launder-Spalding, donde $U = U(\rho, \tau, \mu, y, K)$.

Se introducen escalas de velocidad adicionales para aplicaciones generales.

$$U^* = y^* \quad \text{para } y^* < y_v^* \quad (3.12)$$

$$U^* = \frac{1}{K} \ln(E y^*) \quad \text{para } y^* > y_v^*$$

“Leyes de muralla” similares se aplican para energía. Generalmente, k se obtiene de la solución de la ecuación de transporte de k, el primer nodo se encuentra en la subcapa logarítmica, donde prevalece un equilibrio local (producción=disipación) y $\nabla k \cdot n = 0$ en la superficie. ε se calcula en las celdas adyacentes a la muralla usando supuestos de equilibrio local:

$$\varepsilon = \frac{C_{\mu}^{3/4} k^{3/2}}{K y} \quad (3.13)$$

Funciones de pared se hacen menos fiables cuando el flujo se aparta de las condiciones asumidas en su derivación.

3.3. MODELO DE FASE DISCRETA

El modelo Lagrangiano de fase discreta utilizado en ANSYS Fluent, sigue un enfoque euleriano-langrangiano [18]. La fase fluida es tratada como un continuo resolviendo las ecuaciones de Navier-Stokes, mientras que la fase dispersa se resuelve rastreando un gran número de partículas, burbujas o gotitas a través del campo de flujo calculado. La fase dispersa puede intercambiar momentum, masa y energía con la fase fluida.

Este enfoque se hace mucho más simple cuando la interacción partícula-partícula se desprecian, para esto se requiere que la fase dispersa secundaria ocupe una fracción volumétrica baja, incluso se aceptan cargas de alta masa ($\dot{m}_{partículas} \geq \dot{m}_{fluido}$). La trayectoria de la partícula se calcula individualmente en intervalos específicos durante el cálculo de la fase fluida. Esto hace que el modelo sea apropiado para modelar aerosoles, carbón, y combustión con combustible líquido, pero es inapropiado para calcular mezclas de líquido-líquido, lechos fluidizados, o cualquier otra aplicación donde la fracción volumétrica no pueda ser despreciada.

3.3.1. ECUACIÓN DE MOVIMIENTO PARA LAS PARTÍCULAS

La trayectoria de la fase discreta se puede predecir integrando el balance de fuerzas en la partícula. Se iguala el balance de fuerzas con la inercia de la partícula debido a las fuerzas actuando en ella y puede escribirse para una dirección del sistema de coordenadas cartesiano como:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad (3.14)$$

Donde:

\vec{u}_p = Velocidad de la partícula [m/s].

\vec{u} = Velocidad de la fase continua [m/s].

ρ_p = Densidad de la partícula [kg/m³].

ρ = Densidad de la fase continua [kg/m³].

\vec{F} = aceleración adicional [m/s²]

$F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$ = Fuerza de arrastre por unidad de masa de la partícula [m/s²].

El cálculo de F_D es:

$$F_D = \frac{18 \mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (3.15)$$

Donde d_p es el tamaño de las partículas en metros y el número de Reynolds se calcula como:

$$Re \equiv \frac{\rho d_p |\vec{u}_p - \vec{u}|}{\mu} \quad (3.16)$$

C_D , que es el coeficiente de arrastre, indica la resistencia de la partícula en el fluido. Para partículas esféricas se define como:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (3.17)$$

a_1 , a_2 y a_3 son constantes que aplican para varios rangos de Re .

3.3.2. MÉTODO DE DISTRIBUCIÓN DE DIÁMETRO DE ROSIN-RAMMLER

El método de distribución de diámetros de Rosin-Rammler consiste en dividir la gama completa de tamaños de partículas en un número adecuado de intervalos discretos; cada uno representado por un diámetro medio, a los cuales le realizan los cálculos de trayectoria. La fracción de masa de las partículas de diámetro mayor que d vienen dadas por

$$Y_d = e^{-(d/\bar{d})^n} \quad (3.18)$$

Donde:

d = Diámetro de partículas [μm].

\bar{d} = Constante de tamaño [μm].

n = Parámetro de distribución de tamaño

ANSYS Fluent se refiere a la cantidad \bar{d} como el diámetro medio y n como el parámetro de separación (Spread Parameter).

3.3.3. MODELO DE EROSIÓN DE PARTÍCULAS

La erosión de partículas y las tasas de almacenamiento de estas pueden ser monitoreadas en los límites de la pared por ANSYS Fluent. La tasa de erosión se define como:

$$R_{erosión} = \sum_{p=1}^{N_{partículas}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{cara}} \quad (3.19)$$

Donde:

α = Ángulo de impacto de la trayectoria de la partícula con la cara del muro [rad].

V = Velocidad relativa de la partícula [m/s].

\dot{m}_p = Caudal másico de la partícula [kg/s].

A_{cara} = Área de la cara de la celda en el muro [m²]

(d_p) = Función del diámetro de la partícula, valor por defecto $1,8 \times 10^{-9}$.

(α) = Función del ángulo de impacto, valor default 1.

$b(v)$ = Función de velocidad relativa de la partícula, valor default 0.

Los parámetros C, f, b se definen como condiciones de borde en la pared, en lugar de las propiedades de un material, por lo que los valores por default no reflejan los materiales reales que se utilizan. Por lo tanto, debe especificar los valores adecuados al problema en todas las paredes, acudiendo a bibliografía adecuada.

La tasa de erosión calculada en la ecuación (3.19) tiene unidades de [material removido/ (área-tiempo)], es decir, flujo de masa. Las funciones C y f tienen que especificarse en unidades consistentes para construir un grupo adimensional con la velocidad relativa de la partícula y su exponente. Para calcular una tasa de erosión en términos de longitud / hora, por ejemplo (mm / año) se puede definir una función de campo personalizado para dividir la tasa de erosión por la densidad del material de la pared o incluir esta división en las unidades de C y/o f.

La tasa de erosión está basada en las propiedades de las partículas, por lo que es necesario realizar previamente la inyección de partículas, para luego obtener los resultados de la tasa de erosión.

4. METODOLOGÍA

La metodología que se utiliza para realizar el trabajo de título consta de las siguientes etapas:

- Se realiza una revisión bibliográfica que consta de una recopilación de antecedentes generales de sistemas de transporte y caracterización de relaves, y de antecedentes de modelamiento de fluidos no newtonianos, especialmente fluidos modelados como plástico de Bingham.
- Se determinan las ecuaciones matemáticas que modelen el sistema en estudio, y se procede a definir la geometría a utilizar para caracterizar el cajón con sus respectivas canaleta de entrada y cañerías de salida, basándose en un diseño hidráulico con las condiciones de funcionamiento de un relave de baja concentración en peso (de un 35%), que se modela como fluido newtoniano con flujo turbulento.
- Se genera el mallado eligiendo las funciones y tamaños que permitan tener un buen elemento de malla, se especifican las condiciones de borde que definan el problema a estudiar, para luego proceder a realizar simulaciones con el software ANSYS Fluent 14.5, el análisis será transiente de 30 seg. de simulación. Se realizan dos simulaciones del relave con concentración en peso de 35% una con un modelo de flujo turbulento $k-\epsilon$ y otro con un modelo laminar viscoso. Se comprueba que la diferencia de resultados no sea significativa y se procede a realizar las simulaciones del relave como plástico de Bingham.
- Se realizan las simulaciones del relave con concentración en peso de 45%, 50% y 55%, con el modelo viscoso laminar, representando las propiedades del relave como un fluido no-newtoniano con características de plástico de Bingham, a través del modelo de Hershey Buckley, para esto es necesario conocer los parámetros empíricos del relave y su comportamiento reológico, para verificar que los resultados no sean inconsistentes o insatisfactorios, validando el modelo.
- Para evaluar la erosión del cajón y la trayectoria de partículas, se realizan simulaciones con inyección de partículas con el modelo de fase discreta, para los casos antes obtenidos y poder adquirir mayores resultados.
- Se resumen las conclusiones más importantes sobre el comportamiento reológico del relave en canaletas y cajones. De forma transversal a las etapas antes mencionadas se redactará el informe para luego preparar la presentación final.

5. DISEÑO DEL CAJÓN

Para realizar el diseño del cajón de transición, se utilizó una geometría simple semicuada, como se muestra en la Figura 5.1 y Figura 5.2, donde se tiene una canaleta de sección cuadrada en la entrada y dos cañerías en la salida, con una separación de 60° entre ellas para desviar la dirección del flujo, además de distribuir el relave.

El cajón es de acero con 20 mm de espesor.

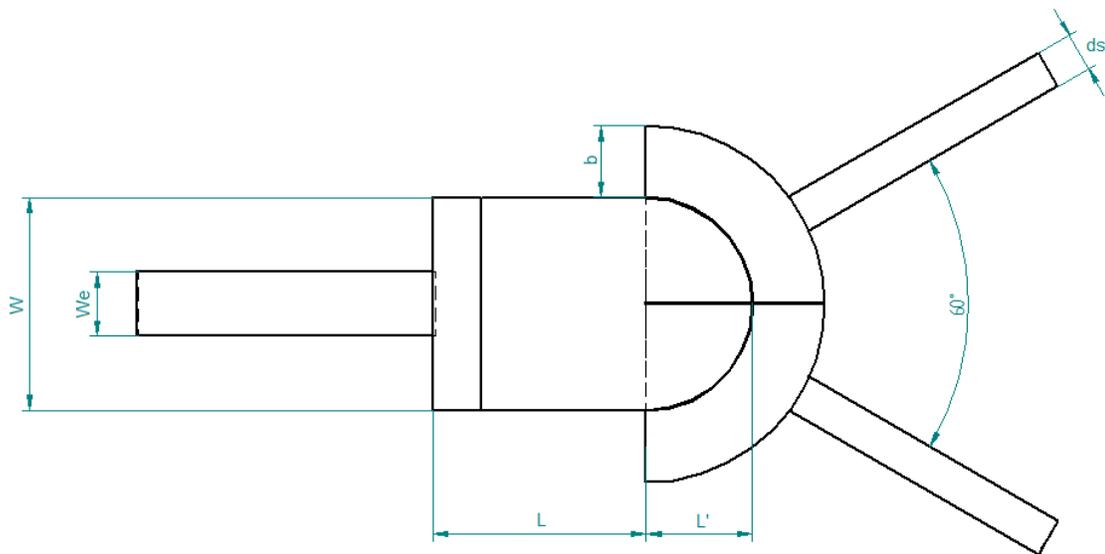


FIGURA 5.1 ESQUEMA DE CAJÓN, VISTA SUPERIOR.

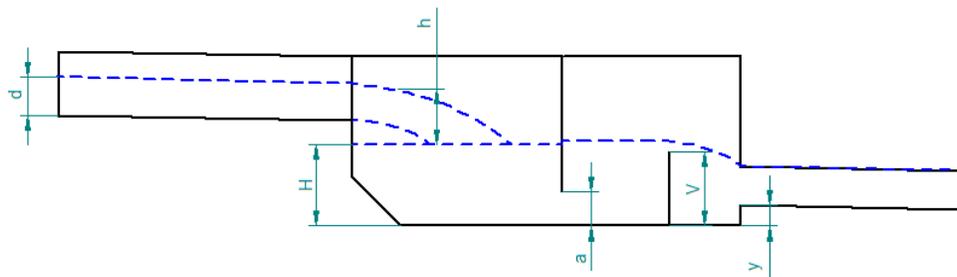


FIGURA 5.2 ESQUEMA DE CAJÓN, VISTA LATERAL.

5.1. CONDICIONES DE OPERACIÓN

El cajón se diseña basándose en las siguientes condiciones de operación:

- Concentración de sólidos en peso: 35%
- Caudal volumétrico de sólidos: 3.000 m³/hr
- Densidad de partículas: 2.700 kg/m³
- Densidad de líquido: 1040 kg/m³
- Pendiente de canaleta: 1° ¹

5.2. ALTURA DE CAJÓN

La altura total del cajón se obtiene calculando las alturas mostradas en la Figura 5.2, donde la altura de entrada del fluido en la canaleta se determina a través de la fórmula de Chézy Manning mostrada en la ecuación (2.43), imponiendo que la velocidad no supere los 4,8 m/s, para evitar desgaste acelerado del cajón [19], dando una altura d de 681 mm.

Las demás alturas se obtienen como se menciona a continuación:

5.2.1. CHORRO EN CAÍDA LIBRE

Según [11], la trayectoria y velocidades del chorro que va desde la canaleta de alimentación al cajón, pueden aproximarse a un chorro libre que descarga a la atmósfera, sin considerar la disipación de energía y/o arrastre de aire adicional, esto debido a que la longitud de trayectoria es relativamente pequeña.

¹ Una pendiente de 1° corresponde a 1,746% de pendiente.

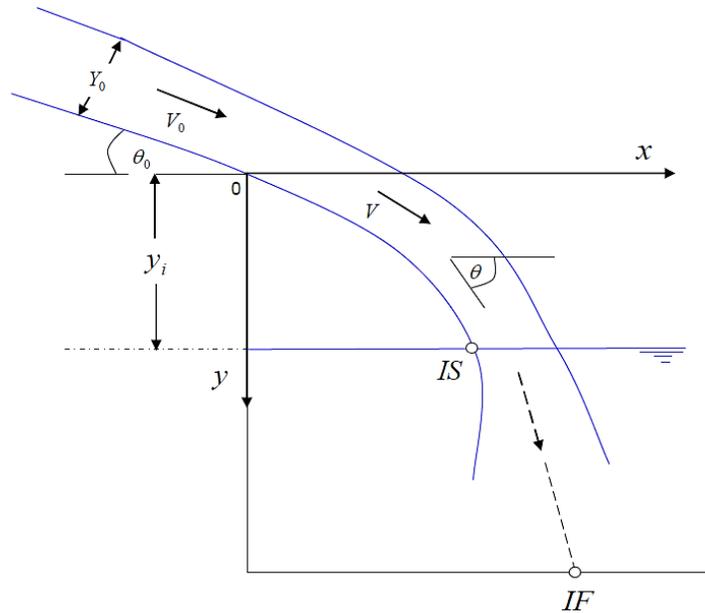


FIGURA 5.3 DIAGRAMA DE CHORRO EN CAÍDA LIBRE AL CAJÓN [11].

En la Figura 5.3 se observa un diagrama de caída de chorro, donde se tiene el relave cayendo de la canaleta con una velocidad inicial V_0 . El punto IS de la figura, muestra el lugar donde el chorro impacta en el relave que se tiene en el cajón. Para obtener la velocidad del chorro en el punto IS se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_{IS} = \sqrt{V_0^2 + 2 g h} \quad (5.1)$$

Donde:

h = Altura de caída de chorro [m^3/s] (ver Figura 5.2).

Dentro de la napa de relave, el chorro se mueve recorriendo una línea recta. La velocidad de impacto en el fondo del cajón V_{if} puede estimarse como [11]:

$$\frac{V_{IF}}{V_{IS}} = C \frac{D_e}{L'} \quad (5.2)$$

Donde:

D_e = Diámetro equivalente [m].

C = Constante cercana a 6, pero [20] recomienda que este valor sea cercano a dos, valor a usar.

L' = Distancia entre IS e IF [m].

El diámetro equivalente se calcula como:

$$D_e = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi V_{IS}}} \quad (5.3)$$

Donde:

Q = Caudal de pulpa [m³/s].

Se impone que la velocidad V_{IF} , que corresponde a la velocidad del fondo del cajón, sea menor a 6 m/s. Además, para calcular el largo L que se muestra en la Figura 5.1, se utilizan las fórmulas de movimiento parabólico, donde el tiempo de caída del chorro es:

$$t_{caida} = \sqrt{\frac{2 h}{g}} \quad (5.4)$$

El largo L debe ser, al menos, el doble de la distancia de avance del chorro en x que se calcula como:

$$X = V_0 \cdot t_{caida} \quad (5.5)$$

5.2.2. *ESCLUSA*

Una esclusa es una apertura en el fondo de una muralla, usualmente se utiliza para controlar rios y canales abiertos. Como se muestra en la Figura 5.4, el flujo acelera suavemente de subcrítico (aguas arriba) a crítico (cerca de a esclusa) a supercrítico (aguas abajo) [12].

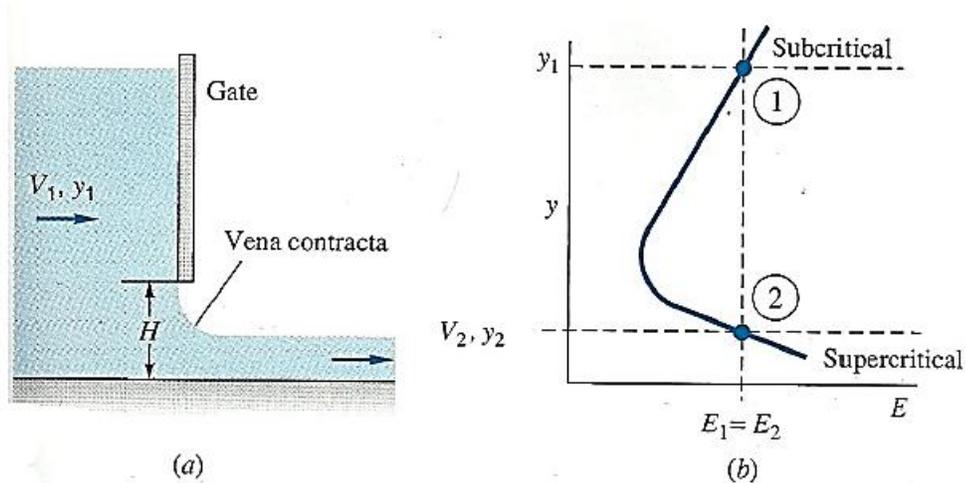


FIGURA 5.4 FLUJO BAJO UNA ESCLUSA; (A) DESCARGA LIBRE CON CONTRACCIÓN DE VENA; (B) ENERGÍA ESPECÍFICA POR LA DESCARGA LIBRE [12].

La descarga libre produce una contracción y_2 , que es aproximadamente un 40% menos que la apertura de la esclusa, como se muestra en la Figura 5.4a. Si H es la altura de la apertura de la esclusa y b es el ancho de la esclusa hacia el papel, se puede aproximar el caudal por la teoría de orificio, en el rango donde $H/y_1 < 0,5$.

$$Q = C_d H b \sqrt{2 g y_1} \quad (5.6)$$

Donde

$$C_d = \frac{0,61}{\sqrt{1+0,61 \frac{H}{y_1}}} \quad (5.7)$$

5.2.3. VERTEDERO

La altura que se forma desde el cajón a la canaleta de descarga se puede aproximar como un vertedero, que corresponde a una obstrucción de un canal abierto, que el flujo debe desviar. La Figura 5.5 muestra un vertedero de cresta afilada, que se asume muy ancho. El flujo aguas arriba es subcrítico, acelera a crítico cerca de la punta superior del vertedero y cae a una napa supercrítica. Si el ancho del vertedero es muy amplio, se puede aproximar el alto del flujo en el vertedero y_c como $2/3$ de H [12].

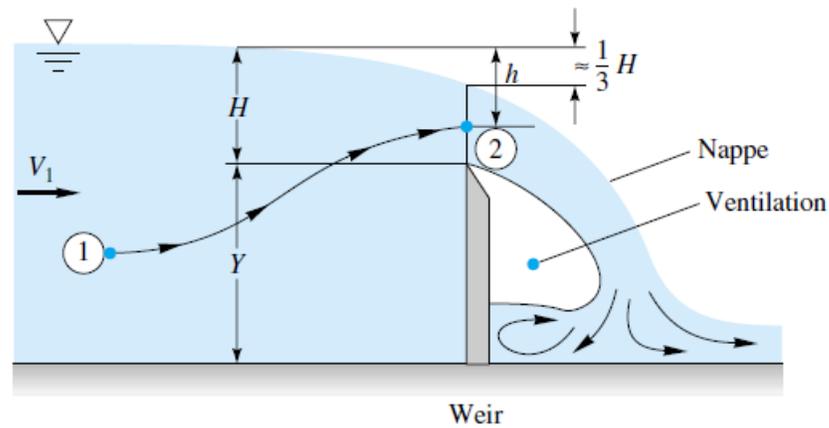


FIGURA 5.5 FLUJO SOBRE VERTEDERO DE CRESTA AFILADA [12].

Se puede calcular aproximadamente el caudal descargado en el vertedero a través de la siguiente fórmula:

$$Q_{\text{vertedero}} \approx C_d b \sqrt{g} H^{3/2} \quad (5.8)$$

Donde:

b = Ancho de vertedero [m].

H = Altura de flujo aguas arriba [m] (ver Figura 5.5)

g = gravedad [m/s^2]

C_d es el coeficiente de descarga de vertedero, es un número adimensional que varía según la geometría del vertedero. En este caso, C_d se puede obtener por la correlación mostrada a continuación:

$$C_d \approx 0,564 + 0,0846 \frac{H}{Y} \quad \text{para} \quad \frac{H}{Y} \leq 2 \quad (5.9)$$

Donde:

Y = Alto de vertedero [m] (ver Figura 5.5)

Según [19], la canaleta de descarga debe tener una altura desde el fondo del cajón que permita generar un colchón amortiguador del flujo. Siguiendo la nomenclatura de la Figura 5.2, se debe cumplir que $y \geq \sqrt{H/3}$.

5.3. DIMENSIONES DEL CAJÓN

Para obtener las dimensiones finales del cajón a simular se tomaron las siguientes consideraciones:

- Q entrada: 4,85 [m³/s].
- N° de descargas: 2
- Q salida: 2,425 [m³/s] por descarga.
- Se utilizaron las fórmulas y restricciones de altura mencionadas en las secciones anteriores para el diseño del cajón.
- Como se menciona en el capítulo 2.5.2, el número de Froude debe ser mayor a 1,5.
- El ancho del cajón debe más del doble del ancho de canaleta de entrada [19].
- El diámetro de cañería de salida se calcula a través de la fórmula de Chézy Manning (ecuación (2.9)), considerando el radio hidráulico de la cañería como $R_h=D/4$.

Una vez definidas las restricciones del problema, se utilizó solver de Excel para obtener las dimensiones finales del cajón que se muestran en la Tabla 5.1. La nomenclatura de las dimensiones son las expuestas en la Figura 5.1 y Figura 5.2. Para ver mayores detalles del cajón revisar el Anexo A: plano de cajón de transición.

TABLA 5.1 DIMENSIONES DEL CAJÓN DE TRANSICIÓN A UTILIZAR.

| | Dimensión | Valor [m] |
|---------------|------------------|------------------|
| Altura | d | 0,68 |
| | h | 0,85 |
| | H | 2,3 |
| | a | 0,8 |
| | V | 1,75 |
| | y | 0,49 |
| Ancho | W | 5 |
| | We | 1,5 |
| | ds | 0,92 |
| Largo | L | 4,96 |
| | L' | 2,5 |
| | b | 1,68 |

6. SIMULACIÓN EN ANSYS FLUENT

Como se menciona en el capítulo 4 Metodología, se realizan 5 simulaciones en análisis transiente de 30 segundos de duración.

6.1. ESTUDIO REOLÓGICO DE CASOS A SIMULAR

Como se menciona en metodología, se realizarán simulaciones con cuatro concentraciones diferentes, como se muestra en la Tabla 6.1, donde los valores de concentración volumétrica y densidad de mezcla se obtuvieron con las ecuaciones (2.9) y (2.11) respectivamente.

TABLA 6.1 RESUMEN DE CASOS A SIMULAR

| Concentración peso | 35% | 45% | 50% | 55% |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Concentración volumen | 17% | 24% | 28% | 32% |
| Densidad mezcla [kg/m ³] | 1.325,15 | 1.437,79 | 1.501,60 | 1.571,35 |
| Caudal pulpa [m ³ /h] | 17.464,29 | 12.519,23 | 10.788,46 | 9.372,38 |

El relave con concentración en peso de 35% se simula como fluido Newtoniano, y a través de la ecuación de Wellman (2.12), se obtiene una viscosidad dinámica constante de 0,002257 [Pa·s]. En la Figura 6.1 se puede ver la curva de esfuerzo de corte v/s tasa de deformación para el relave antes mencionado.

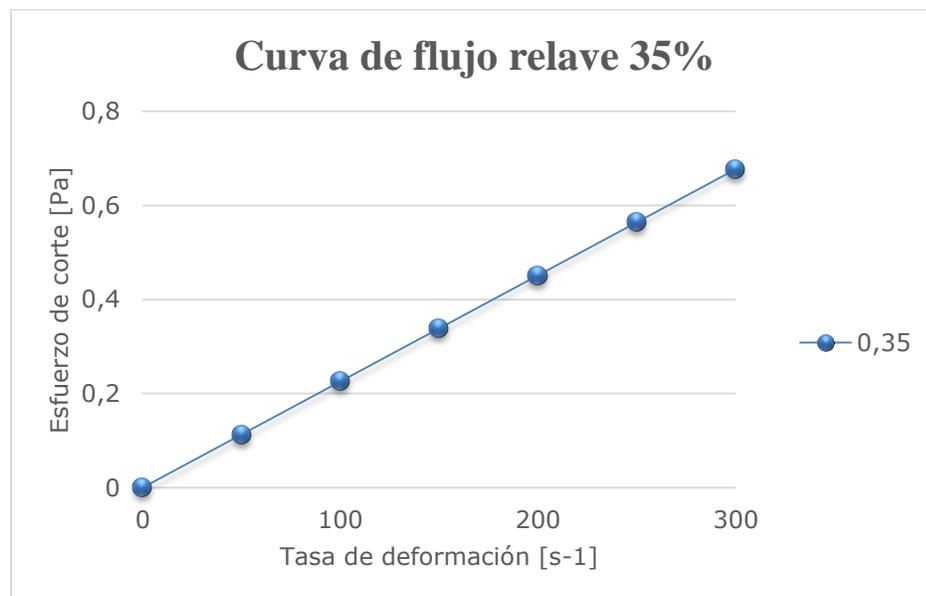


FIGURA 6.1 GRÁFICO DE ESFUERZO DE CORTE V/S TASA DE DEFORMACIÓN DEL RELAVE COMO FLUIDO NEWTONIANO CON UNA CONCENTRACIÓN EN PESO DE 35%.

Para las concentraciones restantes, el relave se modela como plástico de Bingham, utilizando las fórmulas (2.6) y (2.7), para calcular la viscosidad plástica y la tensión tangencial inicial respectivamente. Los parámetros experimentales como la longitud característica de las partículas, la fracción máxima de empaquetamiento de sólidos, etc. del relave se obtuvieron de [7]. En especial interesan los datos experimentales que aquí se presentan del relave chileno, los cuales se encuentran resumidos en la Tabla 6.2.

TABLA 6.2 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DE RELAVE CHILENO

| Parámetro | Símbolo | Valor |
|----------------------------------|-------------------------|-------|
| Longitud característica | L_c [μm] | 9,00 |
| Cte. de proporcionalidad | k_a | 1,70 |
| Fracción máx. de empaquetamiento | ϕ_m | 0,35 |
| Parámetro de interacción | m^* | 0,40 |
| Módulo de tamaño de distribución | m | 1,20 |
| ph | | 7,22 |

Se eligieron concentraciones volumétricas que no superen el 35% de concentración, ya que como se muestra en la Figura 6.2, a medida que la concentración volumétrica se acerca a la fracción máxima de empaquetamiento de sólidos ϕ_m , el esfuerzo de corte tiende a infinito.

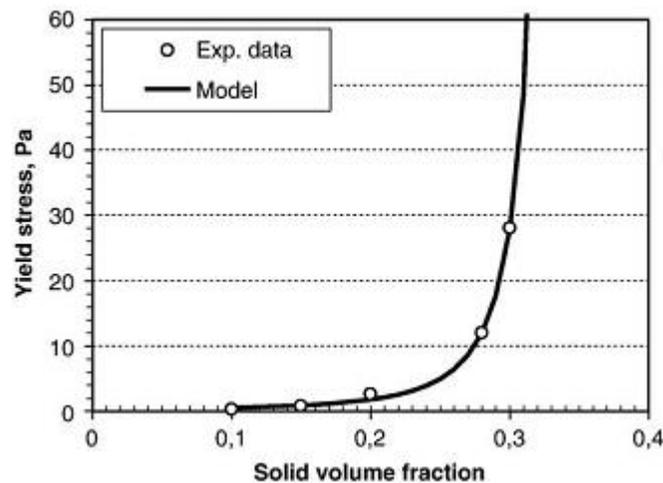


FIGURA 6.2 EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS DE RELAVES DE COBRE DE CODELCO NORTE EN EL ESFUERZO TANGENCIAL INICIAL [7].

En la Tabla 6.3 se muestran los esfuerzos de corte iniciales y la viscosidad dinámica para las diferentes concentraciones en peso que se van a simular. En la Figura 6.3, se muestra la curva característica de las diferentes pulpas modeladas como fluido no-newtoniano. El eje de las ordenadas se encuentra en escala logarítmica, para poder apreciar el aumento del esfuerzo de corte inicial al aumentar la concentración del relave.

TABLA 6.3 ESFUERZO DE CORTE INICIAL Y VISCOSIDAD PLÁSTICA PARA LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES.

| Concentración en peso | t_y [Pa] | μ_p [Pa s] |
|-----------------------|------------|----------------|
| 45% | 3,83 | 0,0101 |
| 50% | 11,18 | 0,0238 |
| 55% | 100,22 | 0,1376 |

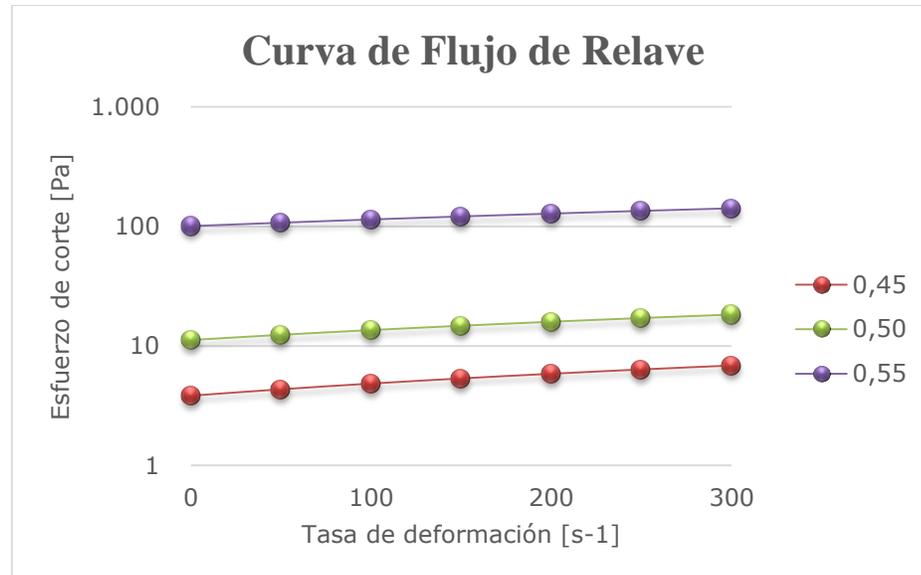


FIGURA 6.3 GRÁFICO DE ESFUERZO DE CORTE V/S TASA DE DEFORMACIÓN DEL RELAVE COMO FLUIDO NO-NEWTONIANO CON DIFERENTES CONCENTRACIONES EN PESO, EL EJE DE LAS ORDENADAS SE ENCUESTRA EN ESCALA LOGARÍTMICA.

6.2. MALLADO

Se crea un mallado con elementos tetraédricos. La malla se mejora utilizando *Advanced Size Function* en curvatura, *relevance center* fino y *smoothing* alta. Además se usa un *Body Sizing* para definir el tamaño de los elementos, que en este caso es de 190 mm, obteniéndose un mallado como se muestran en la Figura 6.4 y Figura 6.5.

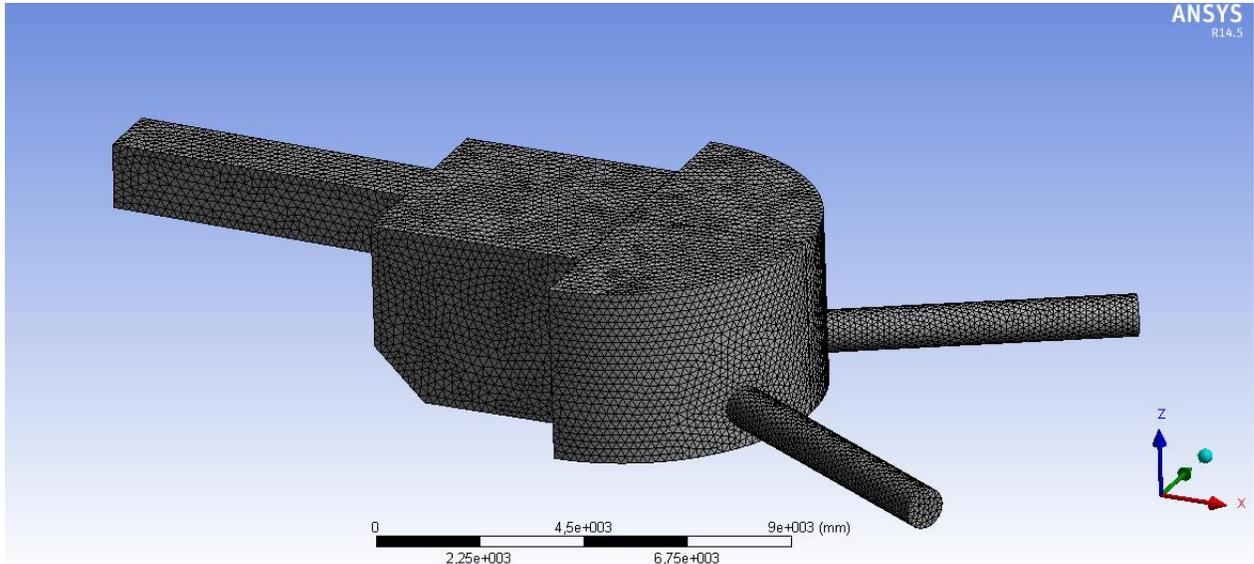


FIGURA 6.4 MALLADO, VISTA ISOMÉTRICA.

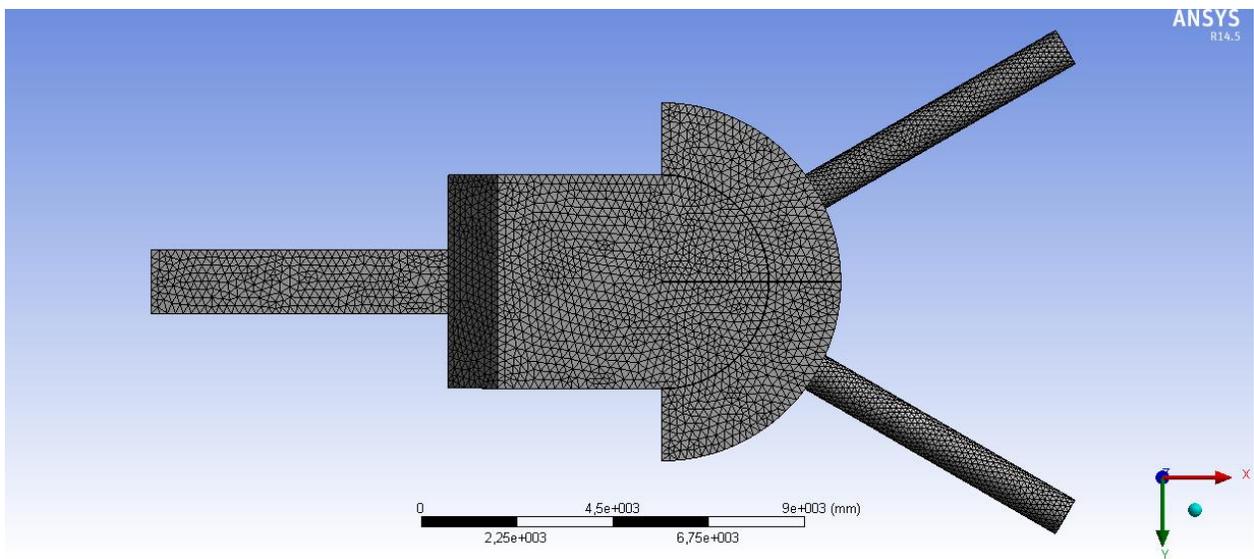


FIGURA 6.5 MALLADO, VISTA INFERIOR.

La calidad de la malla es muy importante para poder realizar buenas simulaciones en ANSYS Fluent, si se tiene una pobre calidad de mallado, puede generar errores en el cálculo o divergencia de los resultados. En [21] se menciona que:

- Los arreglos ortogonales son herramientas que permiten al ingeniero evaluar qué tan robustos son los diseños del proceso y del producto con respecto a los factores de ruido [22]. Las peores mallas tendrán una calidad ortogonal (*Orthogonal quality*) cercana a 0, mientras que mejores mallas serán cercanas a 1. La calidad ortogonal mínima para todos los tipos de mallado debe ser más de 0,01, con un valor promedio significativamente más alto.

- La relación de aspecto (*Aspect ratio*) es una medida del estiramiento de la malla. En general, lo mejor es evitar los cambios repentinos y grandes en las relaciones de aspecto de malla en las zonas donde el campo de flujo exhibe grandes cambios o fuertes gradientes.
- En el caso de la asimetría (*Skewness*), una regla general es que su valor máximo para una malla triangular / tetraédrica en la mayoría de los flujos debe mantenerse por debajo de 0,95, con un valor promedio que es significativamente inferior. Un valor máximo por encima de 0.95 puede dar lugar a dificultades de convergencia y puede requerir cambiar los controles del solver, como la reducción de los factores de relajación y/o cambiar el solucionador que viene por default en *pressure-based*.

En la Tabla 6.4 se detallan las características de la malla, y en la Tabla 6.5 se muestra la calidad de la malla generada, cumpliéndose con los criterios necesarios para una buena simulación en ANSYS Fluent.

TABLA 6.4 CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA

| | |
|------------------------------|----------|
| N° de elementos | 312.660 |
| N° de nodos | 58.977 |
| largo de borde mínimo | 0,504 mm |

TABLA 6.5 CALIDAD DE LA MALLA

| | Orthogonal quality | Aspect ratio | Skewness |
|-----------------|---------------------------|---------------------|-----------------|
| Mínimo | 0,16704 | 1,15920 | 0,00002 |
| Promedio | 0,85496 | 1,86169 | 0,22688 |
| Máximo | 0,99476 | 12,98700 | 0,94356 |

6.2.1. VALIDACIÓN DE MALLA

Para poder validar el uso de esta malla, es importante comprobar que los resultados obtenidos no se vean afectados por la resolución del mallado, por lo que se aumentarán los elementos de la malla de 312.660 a 375.301 elementos (un aumento del 20% aprox.). El error máximo tolerado es de un 10%, donde se considera que los errores propios del mallado no influyen en el resultado de las simulaciones.

Se utiliza el caso de simulación de relave en régimen laminar como fluido newtoniano con un porcentaje en peso del 35%. Las condiciones de borde y métodos de solución se describen en los próximos capítulos.

En la Tabla 6.6 se puede observar que la mayor diferencia es de 8,1% y corresponde al caudal de salida. La diferencia en los resultados disminuye para la velocidad máxima y el esfuerzo de corte en la base del cajón. De todos modos, las diferencias en los resultados no superan el 10% de error aceptado, por lo que los valores obtenidos de la simulación no se ven afectados en gran medida por la resolución del mallado y se valida la malla para su uso en las simulaciones.

TABLA 6.6 COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LA MALLA 1 Y MALLA 2.

| | Malla 1 | Malla 2 | Diferencia [%] |
|------------------------------------|---------|---------|----------------|
| Caudal salida [Kg/s] | 6148,24 | 5687,57 | 8,10 |
| Velocidad máx. [m/s] | 6,94 | 7,19 | 3,48 |
| Esfuerzo de corte máx. [Pa] | 0,60 | 0,56 | 7,34 |

6.3. CONDICIONES DE BORDE

En la Figura 6.6 se muestran las paredes del volumen de control donde se tienen condiciones de borde, las cuales son:

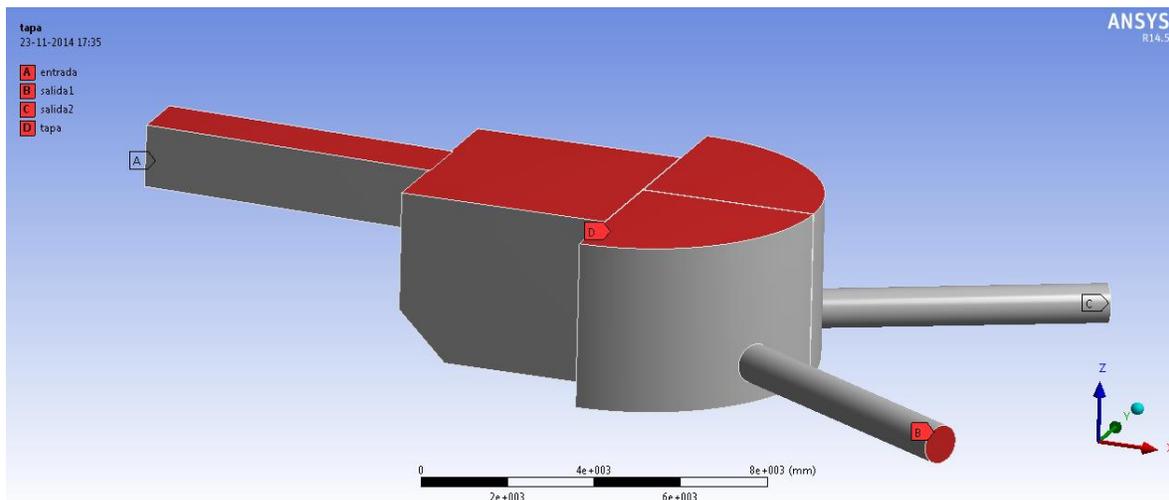


FIGURA 6.6 CONDICIONES DE BORDE EN CAJÓN DE TRANSICIÓN.

- Entrada: Mass-flow-inlet, mixture, Flujo de aire: 0 Kg/s, flujo de pulpa: 6428.57 Kg/s, este último parámetro cambia en función de la concentración en peso y la densidad de la mezcla que se puede obtener de la Tabla 6.1, este corresponde al flujo de Cp 35%.

En la Figura 6.7 se pueden ver las componentes de entrada para la canaleta, donde se debe especificar la superficie libre y el fondo de la canaleta:

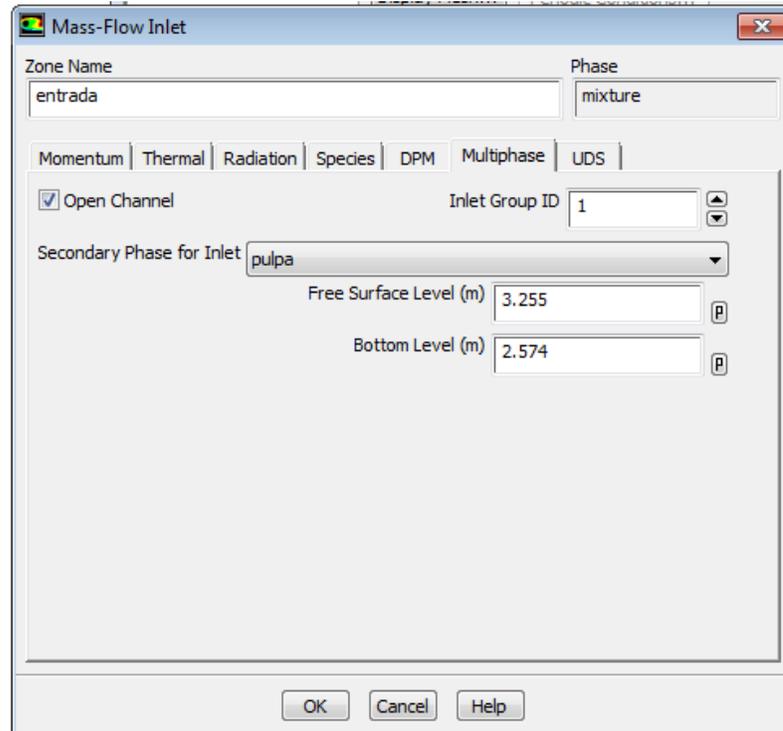


FIGURA 6.7 CONDICIÓN DE ENTRADA DEL RELAVE EN LA CANAleta.

- Salida 1 y 2: Los primeros 10 segundos de simulación se tiene condición de borde Outflow, luego los 20 segundos restantes Pressure-outlet, presión manométrica 0 Pa.
- Tapa: Pressure-outlet, presión manométrica 0 Pa.
- Interior-fluid y Wall-fluid se dejan por default.

6.4. MÉTODO DE SOLUCIÓN

- Esquema de acoplamiento Presión-Velocidad: SIMPLEC.
- Gradiente: Least Squares Cell Based.
- Presión: PRESTO!.
- Momentum: Second Order Upwind.
- Fracción Volumétrica: Geo-Reconstruct.

6.5. INICIACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Para inicializar la simulación, se indica que no hay pulpa en el cajón, para luego crear un patch con *Adapt Region* donde se marcan los sectores donde se cree habrá pulpa de relave, como se indica en la Figura 6.8 y Figura 6.9:

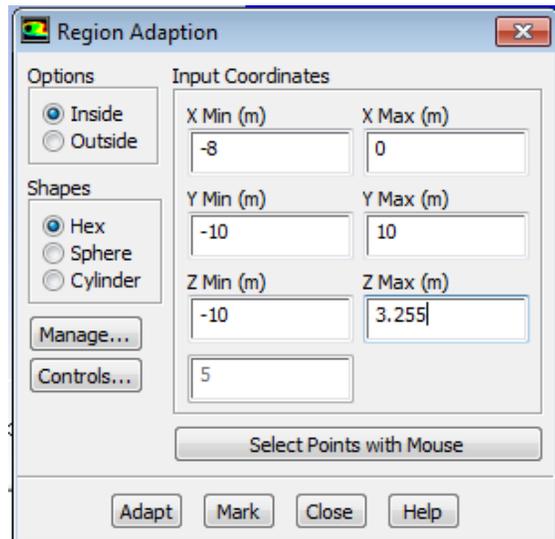


FIGURA 6.8 REGIÓN MARCADA PARA CREAR EL PATCH EN CANALETA ENTRADA.

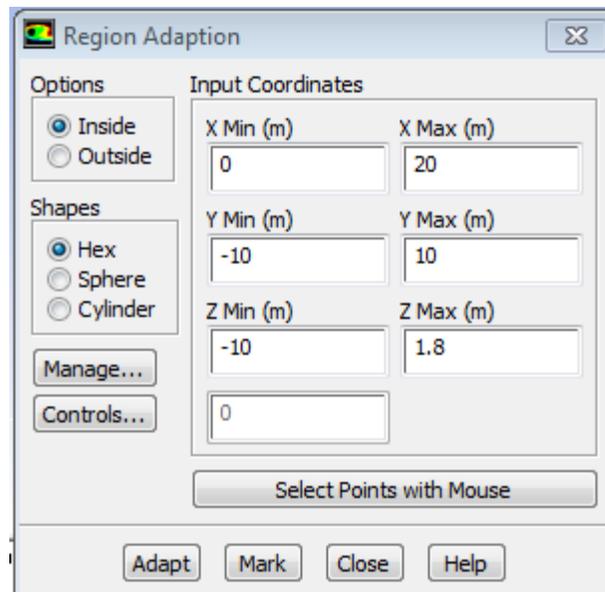


FIGURA 6.9 REGIÓN MARCADA PARA CREAR EL PATCH EN EL RESTO DE CAJÓN.

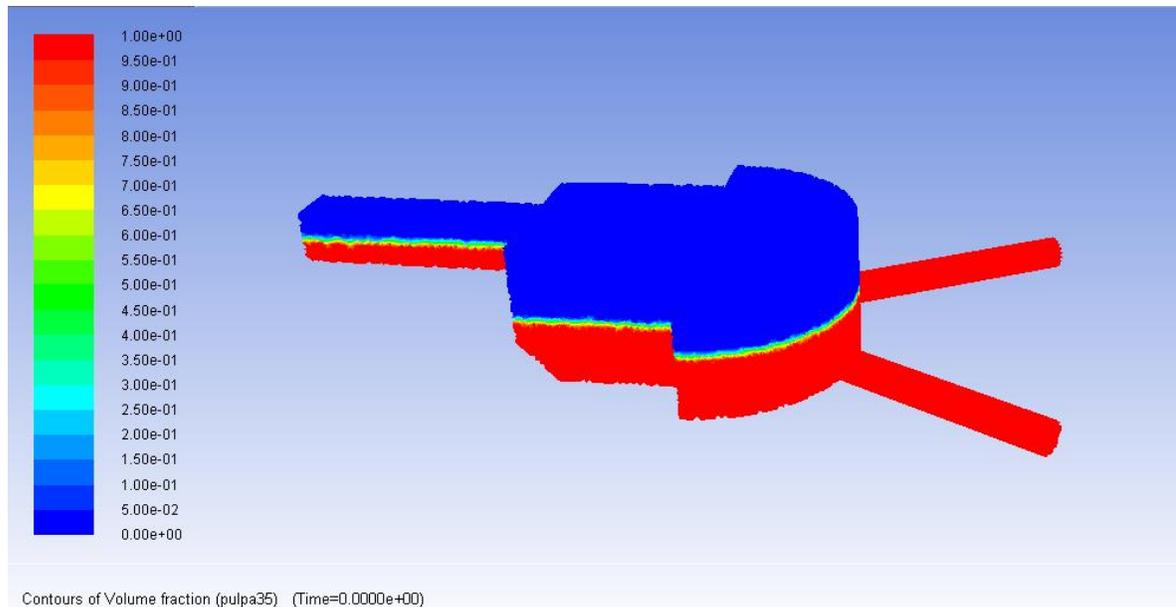


FIGURA 6.10 IMAGEN DE LAS CONDICIONES INICIALES DEL PROBLEMA.

Cuando cambia la concentración en peso del relave, cambia el caudal de entrada y la altura del flujo en la caleta de entrada, además, dependiendo si el fluido entra como fluido newtoniano o no-newtoniano, la velocidad cambia y por ende su altura. En la Tabla 6.7 se pueden ver las diferentes alturas que tiene el patch dependiendo del relave simulado. Esta altura depende del punto de referencia en donde se encuentre el cajón, donde en este caso, la base de la canaleta se encuentra en la posición 2,57 [m] en z.

TABLA 6.7 ALTURA DE PATCH EN LA CANAleta DE ENTRADA DEPENDIENDO DE LA CONCENTRACIÓN EN PESO Y LA CONDICIÓN DE FLUIDO NEWTONIANO O NO-NEWTONIANO.

| | Newtoniano | | No-Newtoniano | |
|--|------------|-------|---------------|-------|
| Concentración peso | 35% | 45% | 50% | 55% |
| Altura de Patch en canaleta [m] | 3,255 | 3,322 | 3,845 | 3,561 |

6.6. PARÁMETROS PARA REALIZAR EL CÁLCULO

Se deben fijar los valores del time step, cuantos time steps se realizarán y cuantas iteraciones se realizarán por time step. En este caso se tiene un tamaño de paso de 0.001 seg., con 30.000 pasos, lo que da un tiempo de simulación de 30 seg. Cada paso tiene un máximo de 15 iteraciones. Es importante elegir un tiempo de paso que evite la divergencia del resultado, ya que no se permite números de Courant mayores a 0,25. Este número depende del mallado, el time step y la velocidad del resultado.

6.7. PROGRAMACIÓN DE LOS DIFERENTES CASOS A SIMULAR

6.7.1. *FLUJO TURBULENTO DE RELAVE NEWTONIANO*

Se realiza una simulación del relave con concentración en peso de 35%, como fluido newtoniano turbulento, para lo cual se considera:

6.7.1.1. Modelos a utilizar

Los dos modelos que se utilizan son los que se mencionan a continuación (para mayor detalle ver capítulo 3 Antecedentes de modelación computacional):

- Multiphase- Volume of fluid, explícito, con open channel flow.
- Modelo k-ε, estándar, con las constantes que vienen por default.

6.7.1.2. Materiales

En la Tabla 6.8 se pueden ver las propiedades físicas de los fluidos que se utilizarán en la simulación, que corresponden a fase primaria aire y fase secundaria el relave a 35% concentración en peso, el cual al ser fluido newtoniano tiene propiedades constantes.

TABLA 6.8 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

| | Densidad [Kg/s] | Viscosidad [Pa s] |
|------------------|-----------------|-------------------|
| Aire | 1,225 | 0,000018 |
| Pulpa 35% | 1.325,153 | 0,00226 |

6.7.2. *FLUJO LAMINAR DE RELAVE NEWTONIANO*

Se realiza una simulación del relave con concentración en peso de 35%, como fluido newtoniano laminar, a modo de comparación con la simulación anterior, para lo cual se considera:

6.7.2.1. Modelos a utilizar

- Multiphase- Volume of fluid, explícito, con open channel flow.
- Modelo viscoso laminar.

6.7.2.2. Materiales

Los fluidos utilizados en esta simulación son los mismos mencionados en la sección 6.7.1.2 Materiales, del capítulo anterior.

6.7.3. FLUJO LAMINAR DE RELAVE NO-NEWTONIANO

Para simular el relave de alta concentración en peso, se utiliza un modelo de plástico de Bingham, que sólo se encuentra disponible para flujo laminar. Además cabe destacar que para concentraciones en peso mayores al 40%, la pendiente de la canaleta debe ser mayor a 2° para evitar la sedimentación del relave [1], por lo que las simulaciones se hicieron en el mismo cajón, pero con la canaleta de entrada y cañerías de salida con una pendiente de 2°

6.7.3.1. Modelos a utilizar

- Multiphase- Volume of fluid, explícito, con open channel flow.
- Modelo viscoso laminar.

6.7.3.2. Materiales

La fase primaria que se utiliza es el aire, cuyas propiedades físicas se describen en la Tabla 6.8, para la fase secundaria se tiene el relave en concentraciones de 45%, 50% y 55%. Se utiliza el modelo de Herschel-Bulkley para plástico de Bingham, el cual combina los efectos de Bingham y el comportamiento de la ley de potencia en un fluido.

Para valores bajos de velocidad de deformación ($\dot{\gamma} < \tau_o/\mu_o$), el material "rígido" actúa como un fluido muy viscoso con viscosidad μ_o . A medida que aumenta la velocidad de deformación y el límite de elasticidad τ_o , se supera, el comportamiento de los fluidos es descrito por una ley de potencia [18].

$$\eta = \frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} + k \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right)^{n-1} \quad \text{para } \dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c \quad (6.1)$$

$$\eta = \tau_o \frac{(2 - \dot{\gamma}/\dot{\gamma}_c)}{\dot{\gamma}_c} + k \left[(2 - n) + (n - 1) \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right] \quad \text{para } \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c$$

Donde:

η = Viscosidad dinámica del fluido [Pa·s].

τ_o = Tensión tangencial inicial [Pa].

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de deformación [s^{-1}].

$\dot{\gamma}_c$ = Velocidad de deformación crítico [s^{-1}].

k = Factor de consistencia [$Pa \cdot s^n$].

n = índice de ley de potencia.

En la Figura 6.11, se puede ver el gráfico de esfuerzo de corte v/s velocidad de deformación según el modelo de Herschel-Bulkley. Para plástico de Bingham el índice de ley de potencia es 1 y la velocidad de deformación crítica es un valor cercano a 0, que para Ansys es de 0,001. Los valores de tensión tangencial inicial τ_o y el índice de consistencia k (viscosidad plástica en el caso de Bingham), se pueden obtener de la Tabla 6.3, para las diferentes concentraciones en peso simuladas.

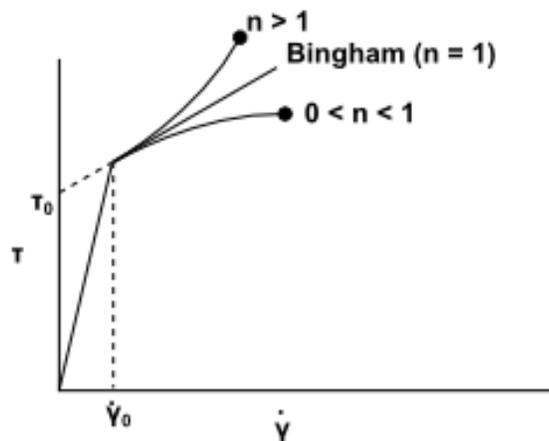


FIGURA 6.11 GRÁFICO DE ESFUERZO DE CORTE V/S VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN DE ACUERDO CON EL MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY [18].

7. RESULTADOS

7.1. RESULTADOS TEÓRICOS

El cálculo teórico del fluido newtoniano, con concentración en peso de 35%, se realiza utilizando la fórmula de Chézy Manning (ecuación (2.43)), tanto para la canaleta de entrada como las cañerías de salida, recordando que $D=4 \cdot R_h$.

Para el cálculo de la velocidad media teórica en la canaleta de entrada para fluido no-newtoniano, primero se procede a definir el caudal que entra, para luego calcular la velocidad con la fórmula:

$$V = \frac{Q}{b * h} \quad (7.1)$$

Donde:

Q = Caudal de fluido [m^3/s].

h = Altura de fluido en canaleta [m].

b = Ancho de canaleta [m].

Se obtiene el Reynolds con la ecuación (2.39), considerando que como no se tiene una viscosidad constante para fluidos no newtonianos, se utiliza la viscosidad aparente (ecuación (2.4)) a una tasa de deformación de $100 [s^{-1}]$, que es el representativo del comienzo de transición según [10]. Se calcula el Reynolds² para fluidos no-newtonianos (ecuación (2.44)) y por último se modifica la altura h hasta que el Re sea igual al Re².

En la Tabla 7.1 se puede ver los valores obtenidos a través de Chézy Manning para el relave con concentración en peso del 35%, modelado como fluido newtoniano en la canaleta de entrada y las cañerías de salida.

En la Tabla 7.2 se muestran los valores que se obtuvieron del fluido con concentración en peso de 45%, 50% y 55%, modelado como fluido no-newtoniano, en la canaleta de entrada.

TABLA 7.1 VALORES TEÓRICOS OBTENIDOS PARA EL RELAVE CON Cp 35%.

| | h [m] | R _h [m] | V [m/s] | Re | Fr | Q [m ³ /s] |
|-------------------------|-------|--------------------|---------|-----------|-------|-----------------------|
| canaleta entrada | 0,681 | 0,357 | 4,749 | 995.239 | 1,838 | 4,851 |
| cañería salida | 0,929 | 0,233 | 3,569 | 1.917.636 | 1,183 | 2,426 |

TABLA 7.2 VALORES TEÓRICOS DEL RELAVE EN LA CANALETA CON Cp 45%, 50% Y 55%.

| | h [m] | R _h [m] | Q [m ³ /s] | V [m/s] | Re | Re ₂ | Fr |
|---------------|-------|--------------------|-----------------------|---------|--------|-----------------|-------|
| Cp 45% | 0,696 | 0,361 | 3,478 | 3,329 | 35.694 | 35.694 | 1,274 |
| Cp 50% | 0,571 | 0,324 | 2,997 | 3,496 | 12.559 | 12.559 | 1,477 |
| Cp 55% | 0,507 | 0,302 | 2,603 | 3,426 | 1.428 | 1.428 | 1,538 |

7.2. FLUJO TURBULENTO, Cp 35%

En la Figura 7.1 se puede ver el contorno de velocidades en canaleta de entrada y cajón, donde las velocidades más altas se tienen en la caída del relave alcanzando los 6,984 [m/s]. En la canaleta de entrada se tiene una velocidad promedio de 4,889 [m/s].

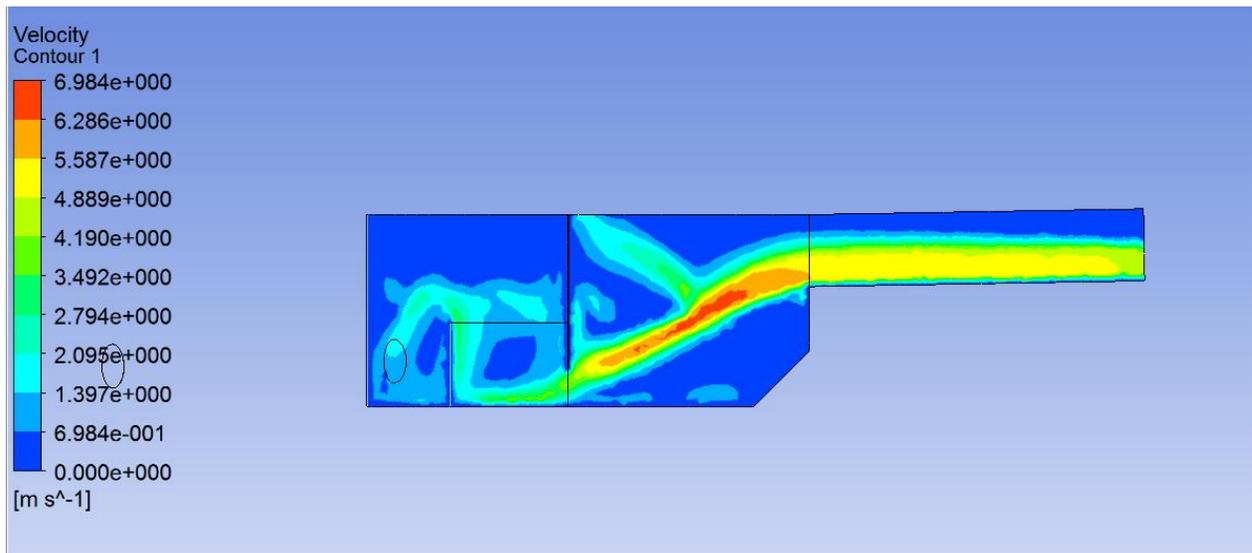


FIGURA 7.1 CONTORNO DE VELOCIDADES EN EL PLANO XZ.

En la Figura 7.2 se muestra un vista del plano de corte de una de las cañerías de salida, acá se puede apreciar que la velocidad media de salida del relave es de 3,492 [m/s].

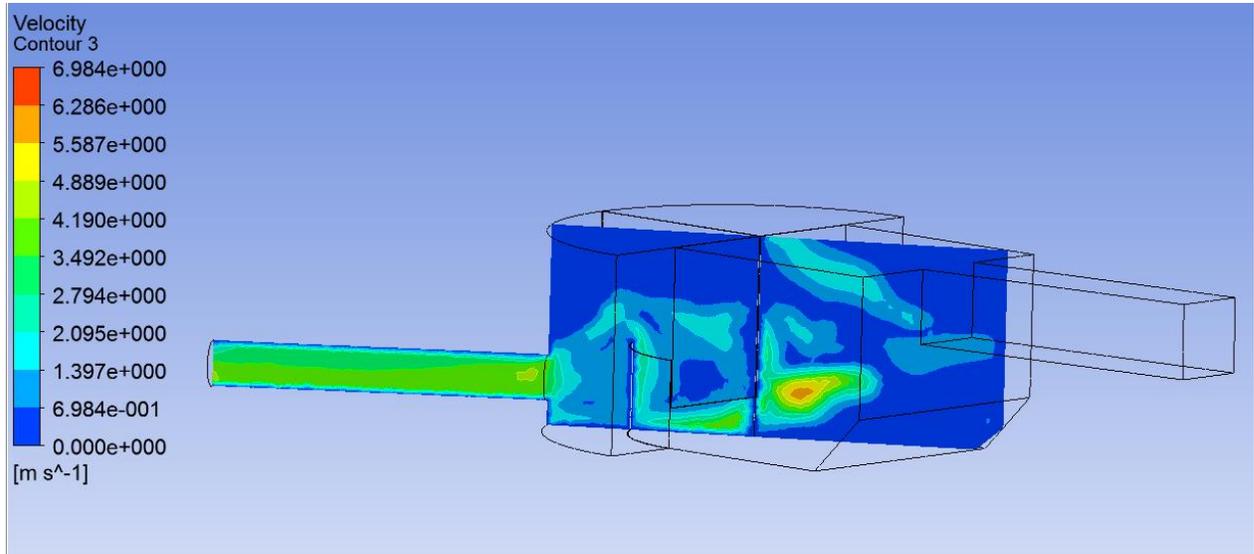


FIGURA 7.2 CONTORNO DE VELOCIDADES EN EL PLANO DE CORTE DE LA CAÑERÍA DE SALIDA.

En la Figura 7.3 se puede ver la altura que alcanza la pulpa en el vertedero, que corresponde a 2,72 [m], además la altura que alcanza en la canaleta de entrada y la altura total de cajón.

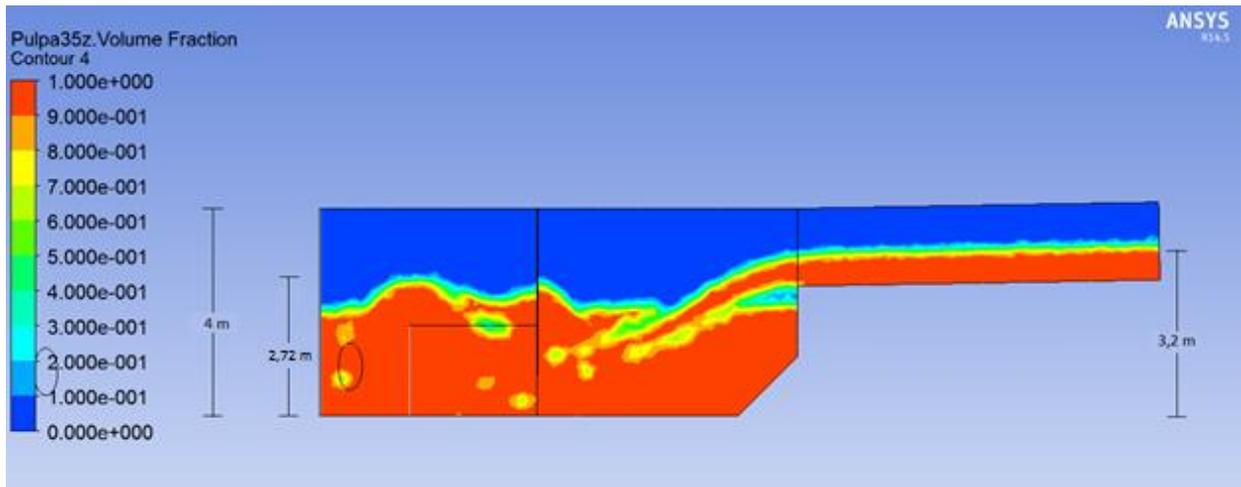


FIGURA 7.3 ALTURAS ALCANZADAS POR LA PULPA DE RELAVE EN CAJÓN.

Como se muestra en la Figura 7.4 y Figura 7.5, se tienen los mayores esfuerzos de corte en el fondo del cajón, en la zona después de la esclusa, el inicio de la cañería de salida y en la muralla superior de la esclusa.

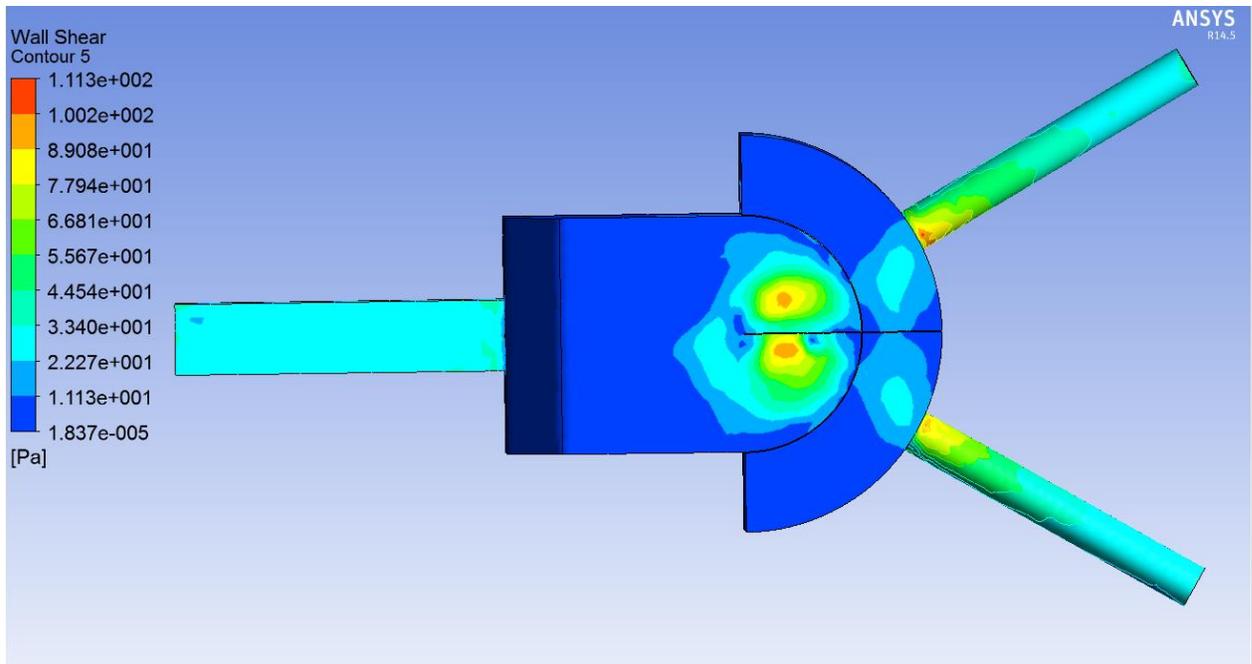


FIGURA 7.4 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED DEL CAJÓN, VISTA INFERIOR.

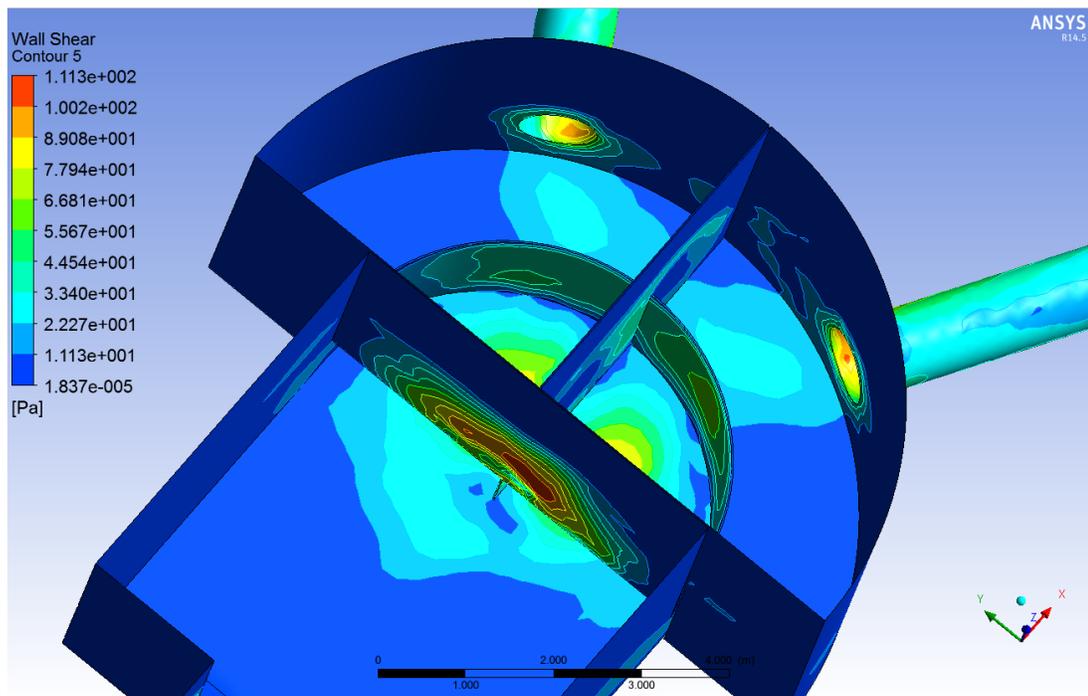


FIGURA 7.5 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED DEL CAJÓN, VISTA INFERIOR.

En la Figura 7.6 se ve un gráfico en barra del caudal que entra en la canaleta y los caudales a las salidas de las cañerías. Como se observa en los valores del gráfico, no sale el mismo caudal en las cañerías de salida, teniéndose más caudal en la salida2, aunque no es significativo (una diferencia de 14,5 [kg/s]). Además se tiene una pérdida de caudal de 721 [kg/s] de la diferencia de caudales a la entrada y salida del cajón.

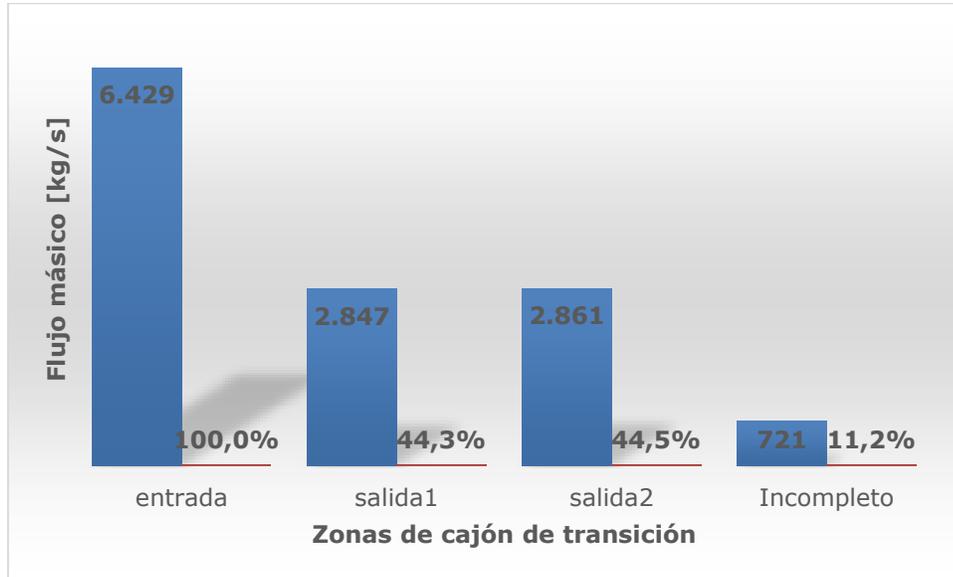


FIGURA 7.6 FLUJO MÁSIKO DE LA CANAleta DE ENTRADA Y LAS CAÑERÍAS DE SALIDA, JUNTO CON LA DIFERENCIA DE CAUDAL INCOMPLETO.

7.3. FLUJO LAMINAR, Cp 35%

En la Figura 7.7 se observa el contorno de velocidades en canaleta de entrada y cajón, donde las velocidades más altas se tienen, de nuevo, en la caída del relave alcanzando los 6,941 [m/s]. En la canaleta de entrada se tiene una velocidad promedio de 4,859 [m/s].

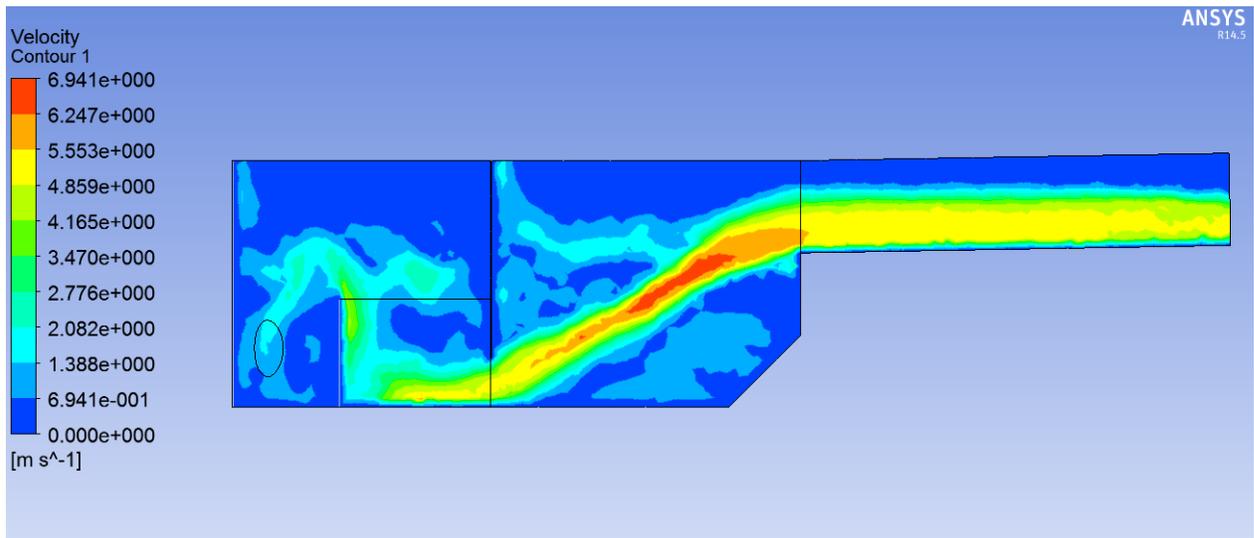


FIGURA 7.7 CONTORNO DE VELOCIDADES EN EL PLANO XZ.

En la Figura 7.8 se muestra un vista del plano de corte de una de las cañerías de salida, la velocidad media de salida del relave en la cañería es de 3,470 [m/s].

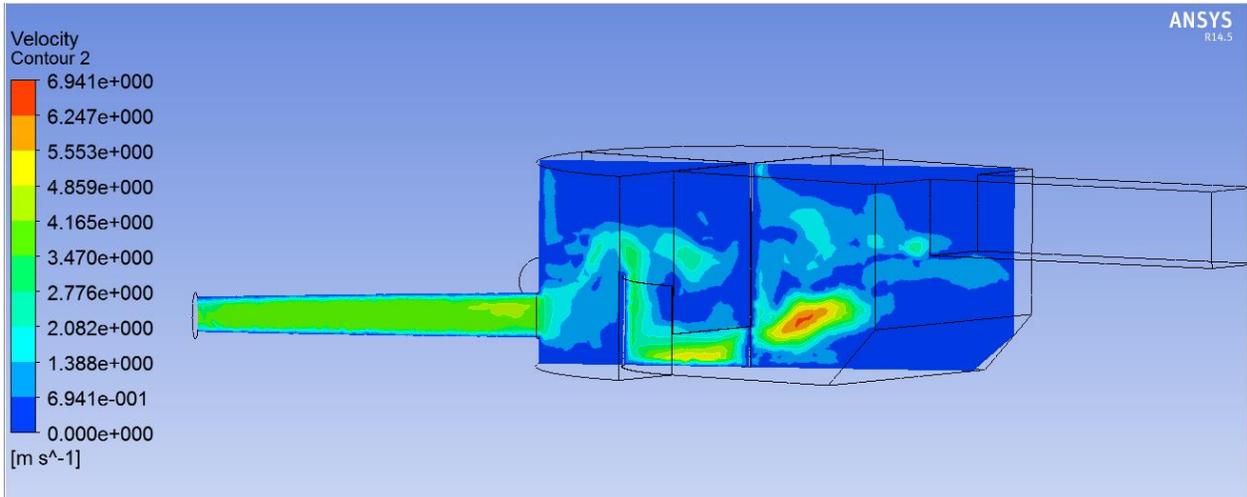


FIGURA 7.8 CONTORNO DE VELOCIDADES EN EL PLANO DE CORTE DE LA CAÑERÍA DE SALIDA.

En la Figura 7.9 se ven tres alturas, la altura total del cajón, la altura de pulpa alcanzada en el vertedero y la altura de pulpa en la canaleta. Como se observa, la altura alcanzada en la esclusa es de 2,95 [m]

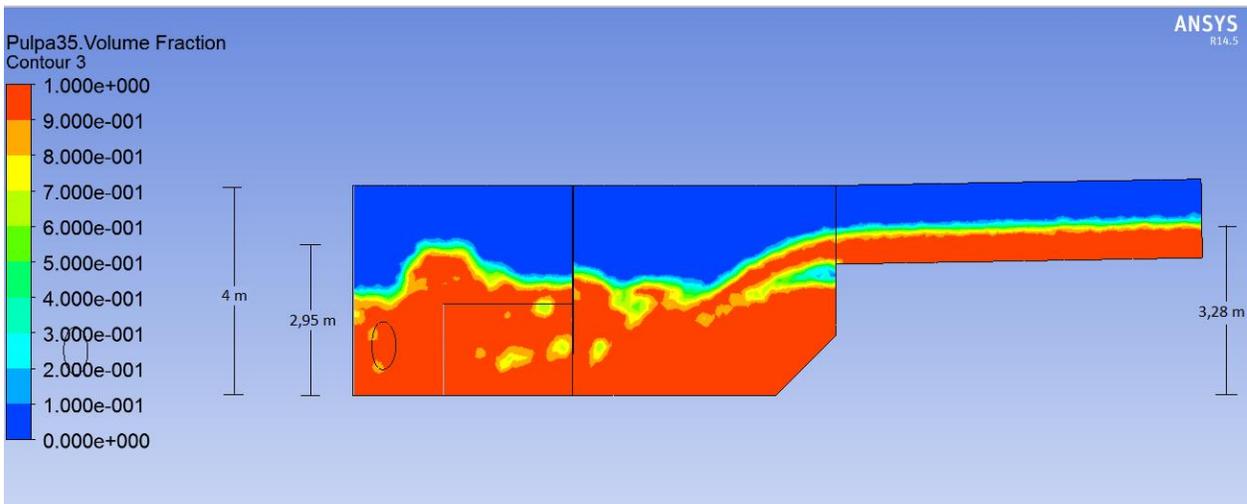


FIGURA 7.9 ALTURAS ALCANZADAS POR LA PULPA DE RELAVE EN CAJÓN.

Como se muestra en la Figura 7.10 y Figura 7.11, se observa que el mayor esfuerzo de corte se encuentra en el cruce entre la muralla de la esclusa con la pared de separación de la salida del cajón de transición.

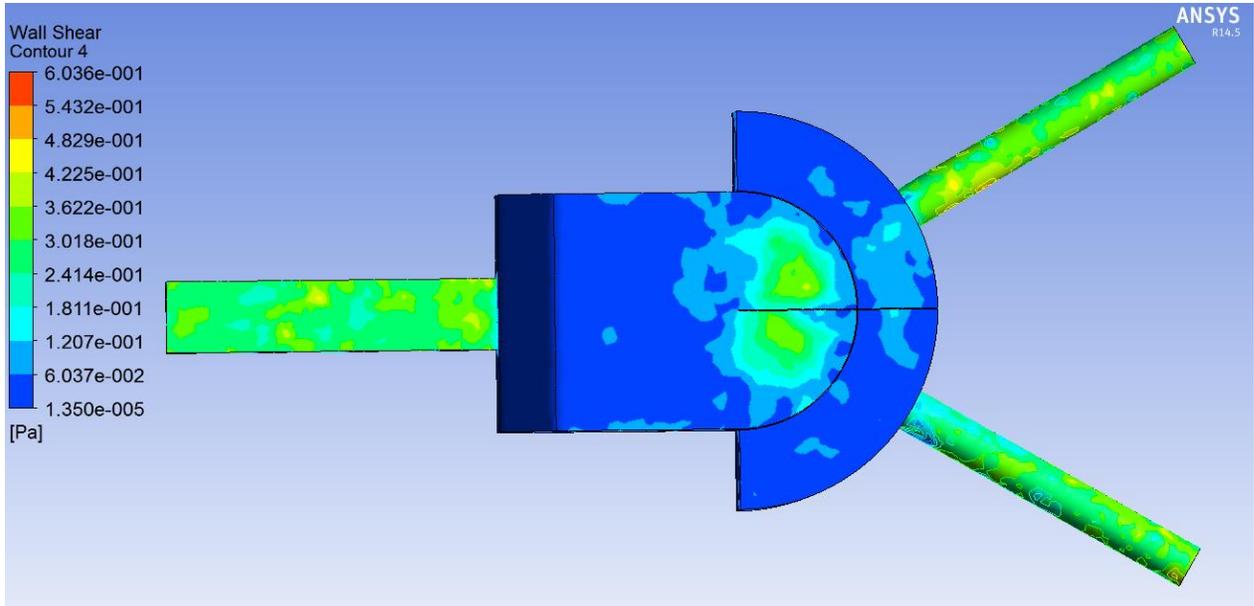


FIGURA 7.10 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED DEL CAJÓN, VISTA INFERIOR.

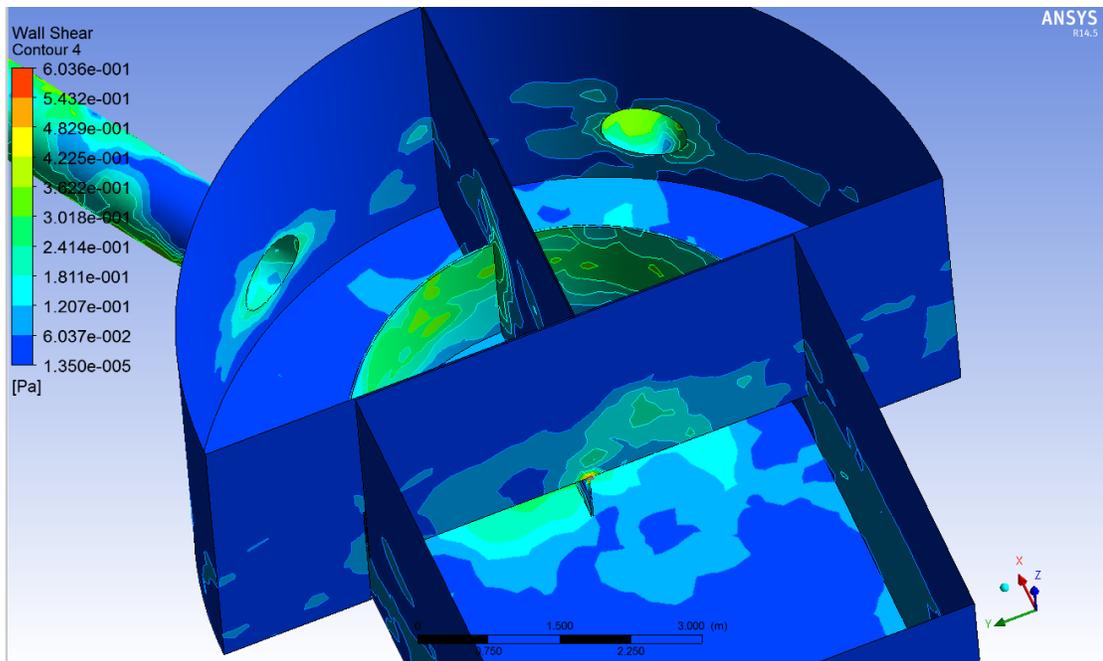


FIGURA 7.11 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED DEL CAJÓN, VISTA INTERIOR CAJÓN.

En la Figura 7.12 se muestra el gráfico en barra de caudal. Acá se puede ver que se tiene más salida de caudal en la salida1 (una diferencia de 63,5 [kg/s]). Además se tiene una pérdida de caudal de 280 [kg/s].



FIGURA 7.12 FLUJO MÁSSICO DE LA CANAleta DE ENTRADA Y LAS CAÑERÍAS DE SALIDA, JUNTO CON LA DIFERENCIA DE CAUDAL INCOMPLETO.

7.4. FLUIDO NO-NEWTONIANO, Cp 45%

En la Figura 7.13 se muestra el contorno de velocidades en canaleta de entrada y cajón, donde las velocidades más altas se tienen en la caída del relave alcanzando los 6,63 [m/s]. En la canaleta de entrada se tiene una velocidad promedio de 3,32 [m/s].

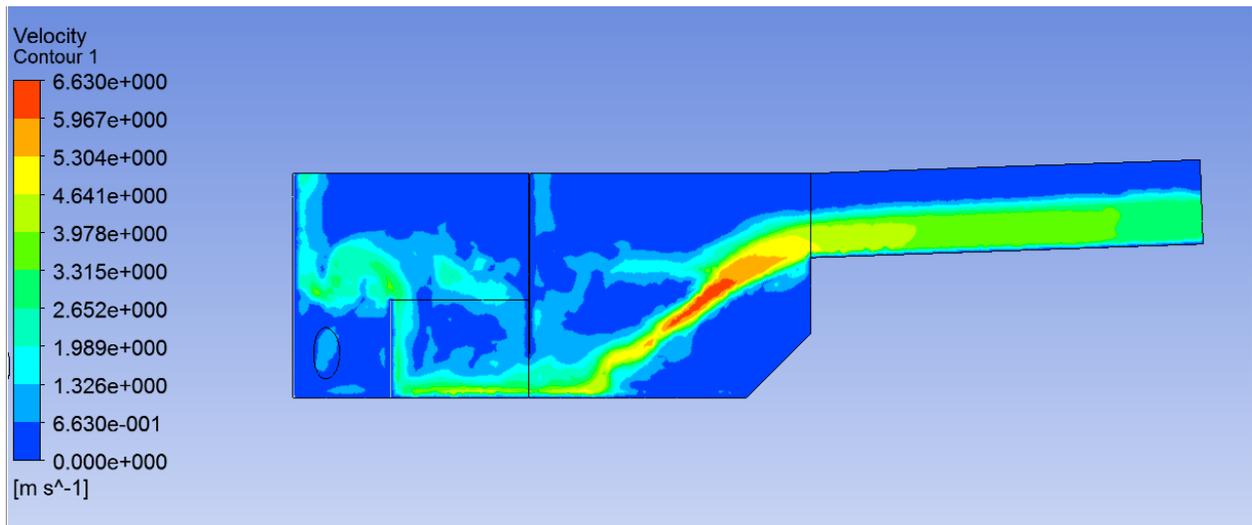


Figura 7.13 Contorno de velocidades en el plano XZ.

En la Figura 7.14 se muestra un vista del plano de corte de una de las cañerías de salida, la velocidad media de salida del relave es de 3,315 [m/s].

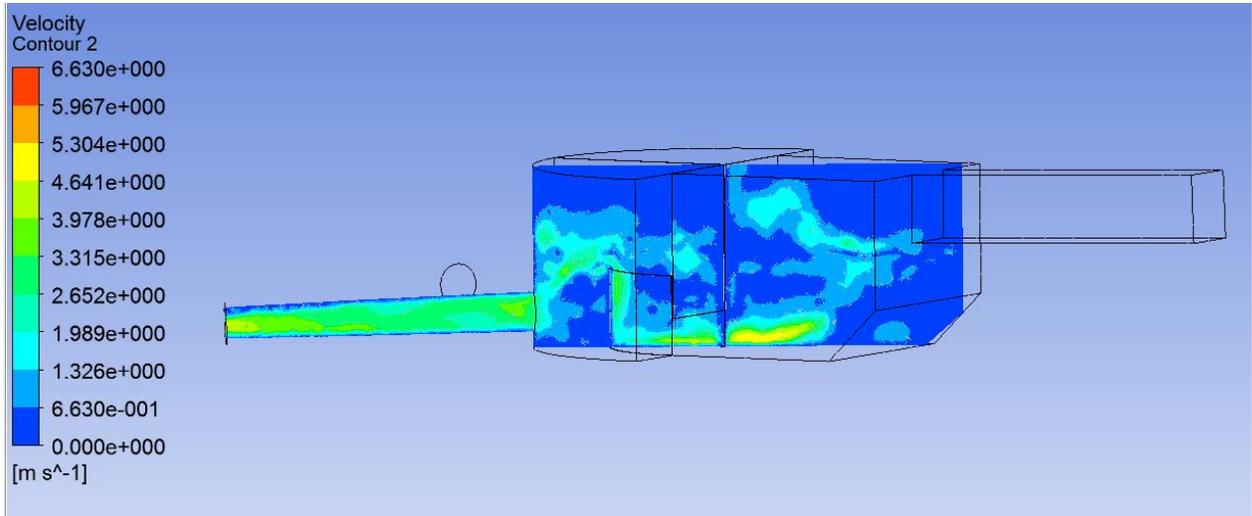


Figura 7.14 Contorno de velocidades en el plano de corte de la cañería de salida.

En la Figura 7.15 se puede ver la altura que alcanza la pulpa en el vertedero, que corresponde a 2,87 [m], la altura total del cajón y la altura de la pulpa en la canaleta de entrada.

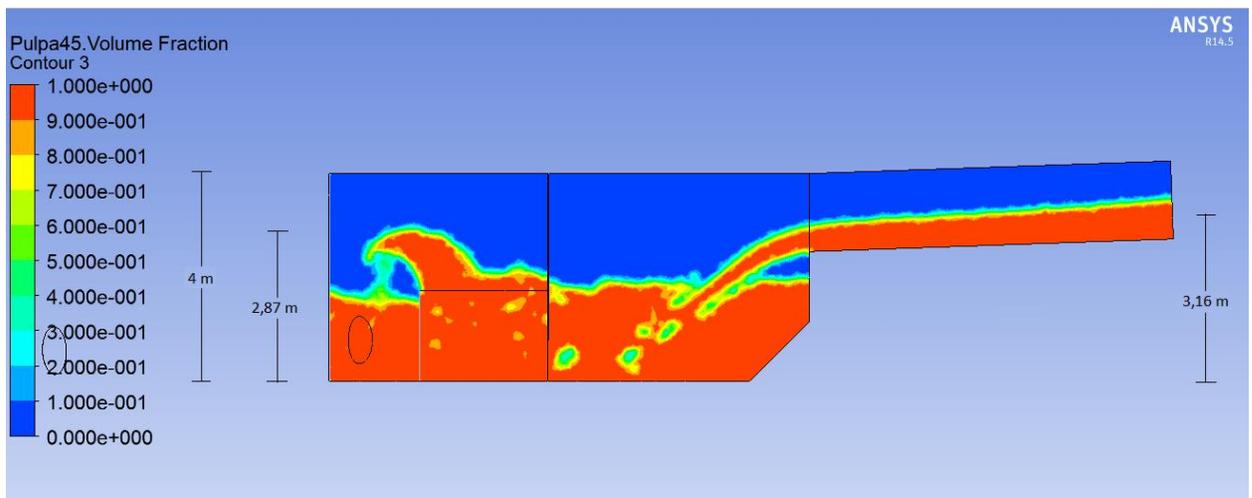


Figura 7.15 Alturas alcanzadas por la pulpa de relave en cajón.

En la Figura 7.16 y Figura 7.17 se ve el esfuerzo de corte en el cajón, donde los mayores esfuerzos se encuentran en la base del cajón, en el centro.

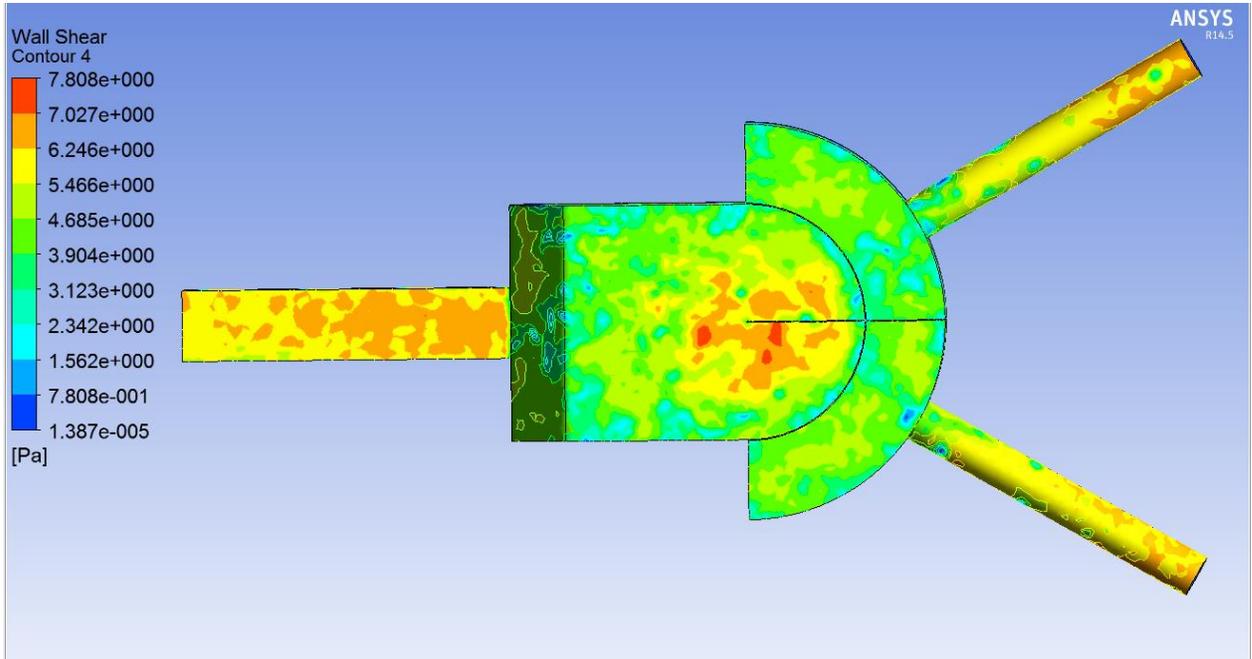


FIGURA 7.16 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED DEL CAJÓN, VISTA INFERIOR.

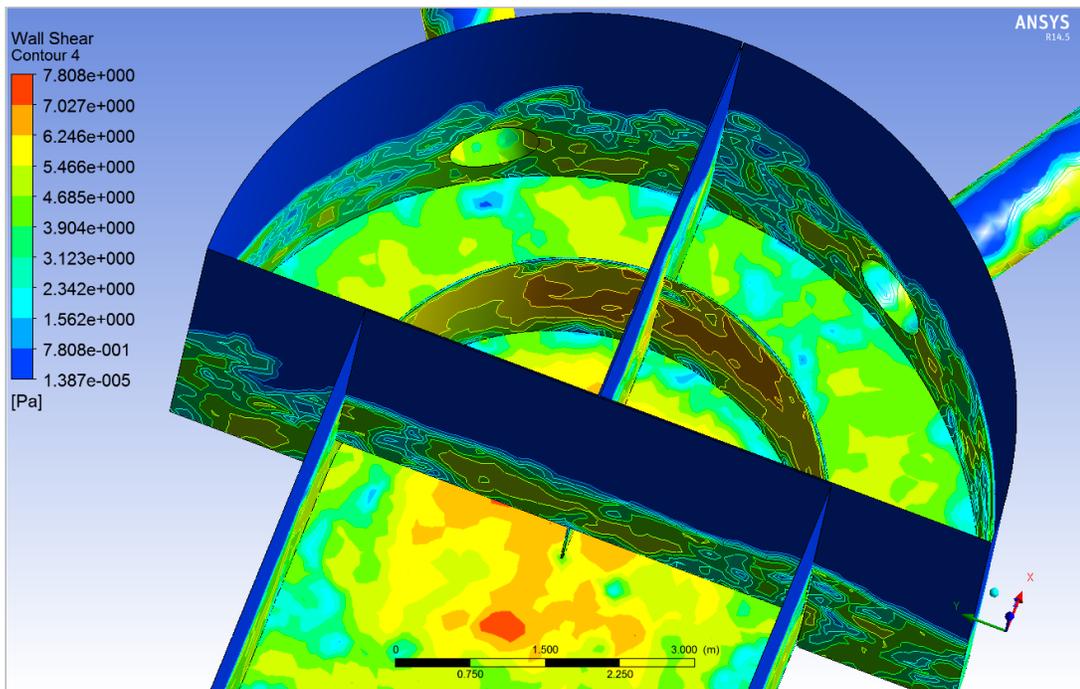


FIGURA 7.17 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED DEL CAJÓN, VISTA INTERIOR CAJÓN.

En la Figura 7.18 se muestra un gráfico en barra del caudal que entra y sale del cajón de transición. Se tiene más salida de caudal en la salida2 (una diferencia de 110,9 [kg/s]). Además se tiene una pérdida de caudal de 35 [kg/s] de la diferencia de caudales a la entrada y salida del cajón.

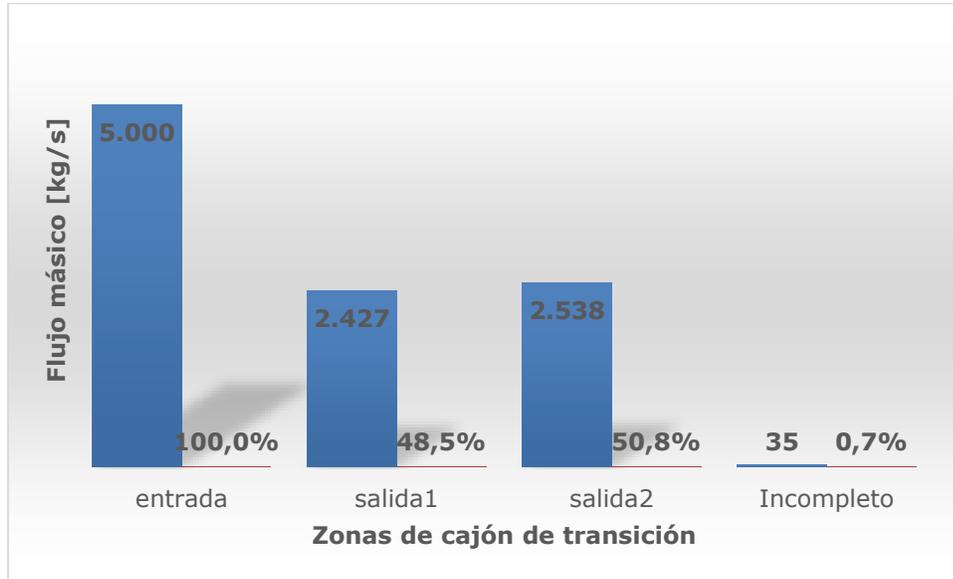


Figura 7.18 Flujo másico de la canaleta de entrada y las cañerías de salida, junto con la diferencia de caudal incompleto.

7.5. FLUIDO NO-NEWTONIANO, Cp 50%

Si se observa la Figura 7.19 se puede ver el contorno de velocidades en canaleta de entrada y cajón, donde la velocidad en la caída del relave es de 6,1 [m/s]. En la canaleta de entrada se tiene una velocidad promedio de 3 [m/s].

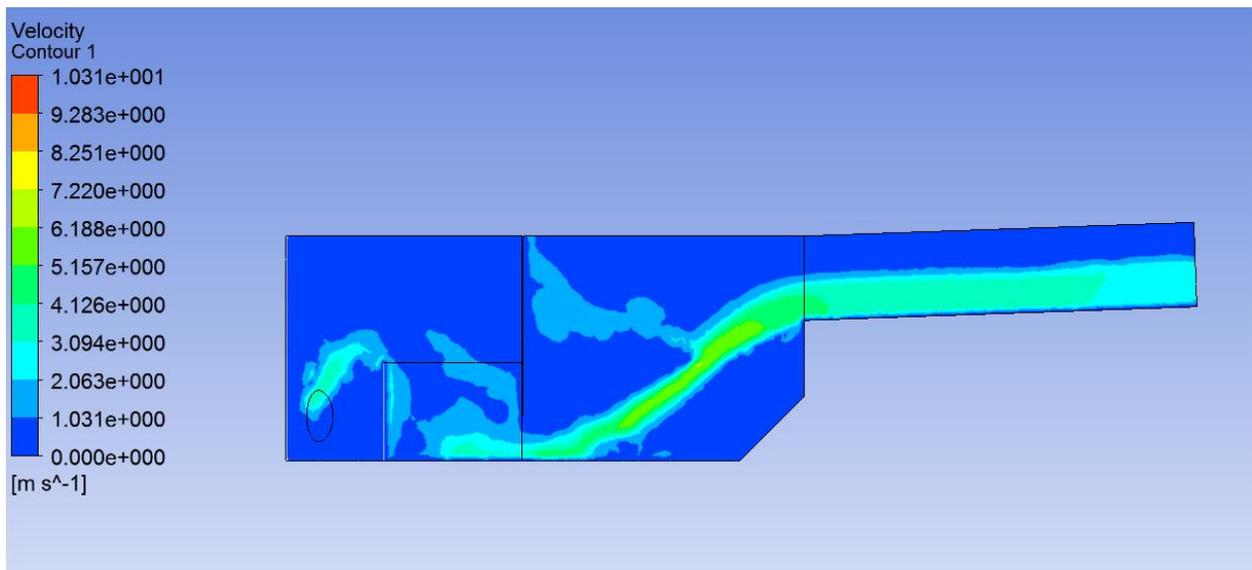


Figura 7.19 Contorno de velocidades en el plano XZ.

En la Figura 7.20 se muestra un vista del plano de corte de una de las cañerías de salida, la velocidad media de salida del relave es de 3,4 [m/s].

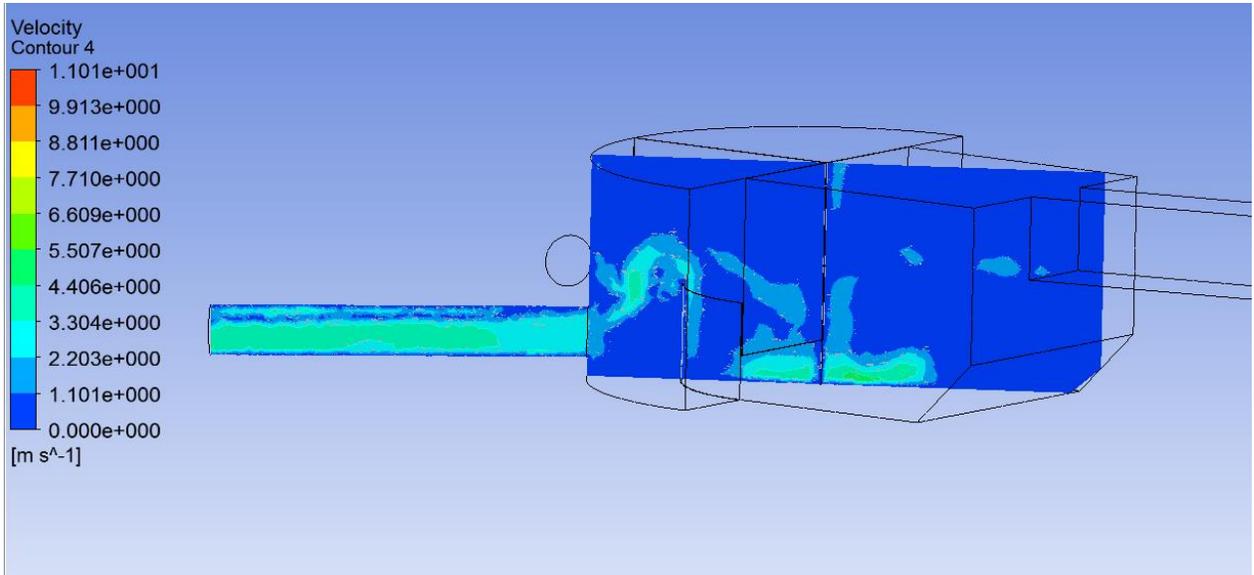


Figura 7.20 Contorno de velocidades en el plano de corte de la cañería de salida.

En la Figura 7.21 se puede ver la altura que alcanza la pulpa en el vertedero, que corresponde a 2,19 [m], la altura total del cajón y la altura de la pulpa en la canaleta de entrada.

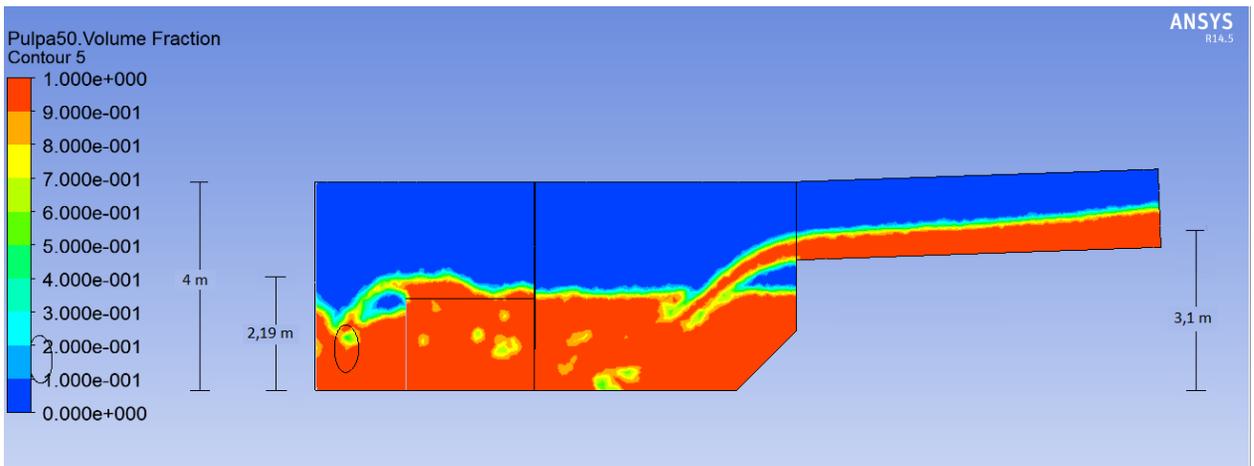


Figura 7.21 Alturas alcanzadas por la pulpa de relave en cajón.

En la Figura 7.22 y Figura 7.23, se tiene el esfuerzo de corte de pared en el cajón en pascales. Como se observa, los mayores esfuerzos se encuentran en el fondo del cajón, en el centro, y en la muralla interna del vertedero.

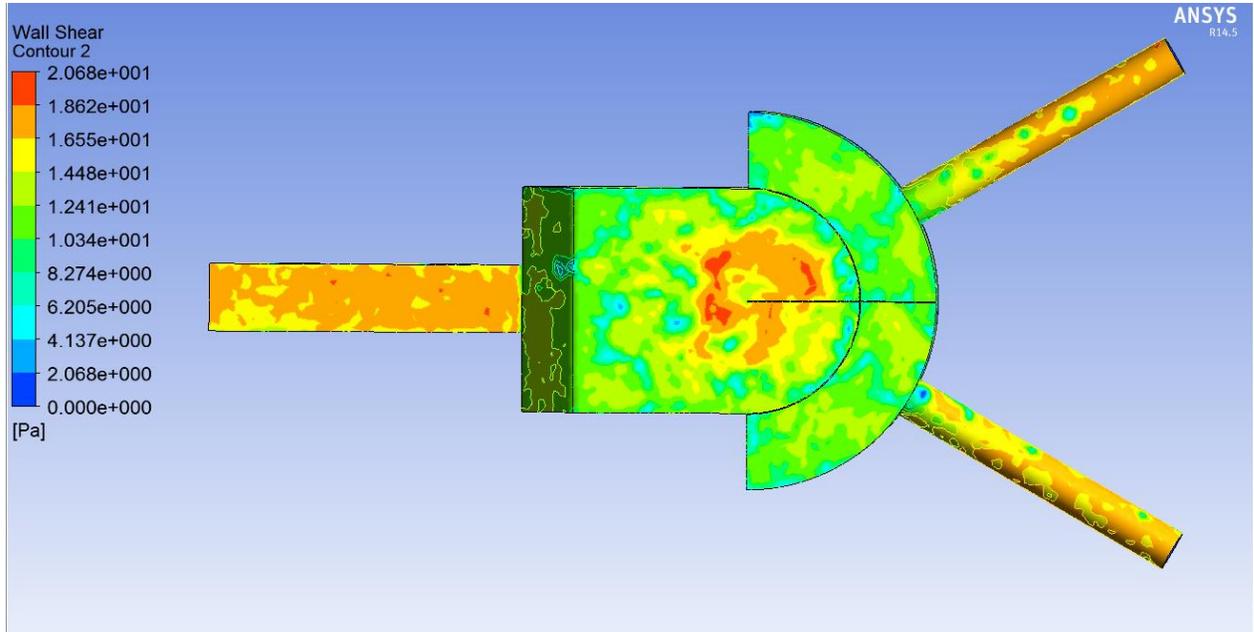


FIGURA 7.22 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED DEL CAJÓN, VISTA INFERIOR.

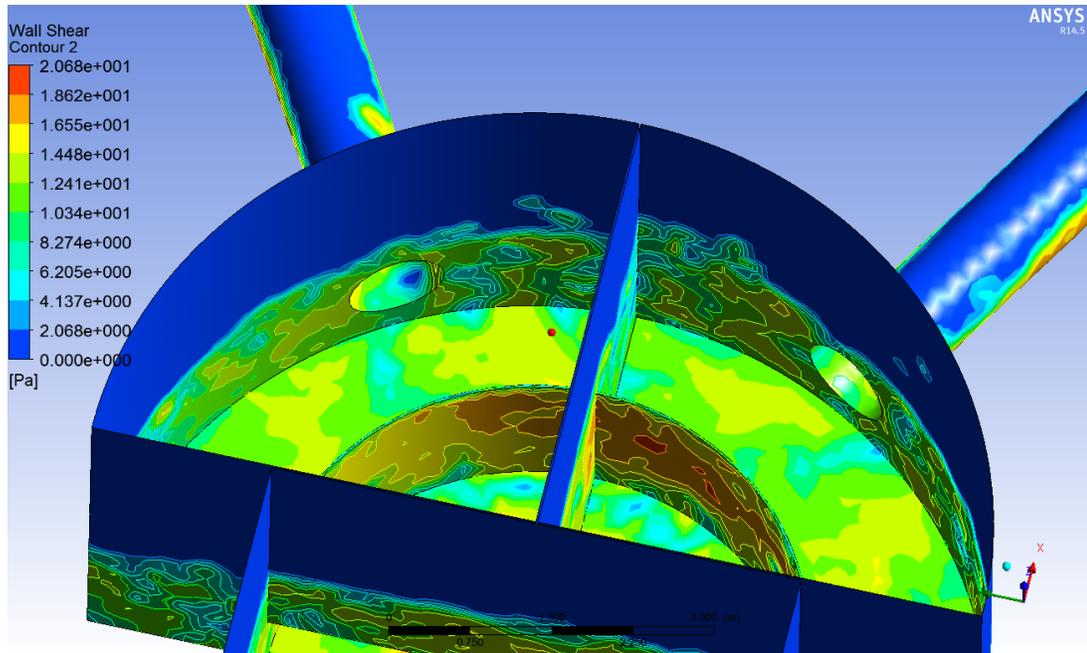


FIGURA 7.23 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED DEL CAJÓN, VISTA INTERIOR CAJÓN.

En la Figura 7.24 se muestra un gráfico en barra del caudal que entra y sale del cajón de transición. Se tiene más salida de caudal en la salida2 (una diferencia de 110,9 [kg/s]). Además se tiene una pérdida de caudal de 35 [kg/s] de la diferencia de caudales a la entrada y salida del cajón.



Figura 7.24 Flujo másico de la canaleta de entrada y las cañerías de salida, junto con la diferencia de caudal incompleto.

7.6. FLUIDO NO-NEWTONIANO, Cp 55%

En la Figura 7.25 se muestra el contorno de velocidades en canaleta de entrada y cajón, donde las velocidades más altas se tienen, de nuevo, en la caída del relave alcanzando los 5,8 [m/s]. En la canaleta de entrada se tiene una velocidad promedio de 2,94 [m/s].

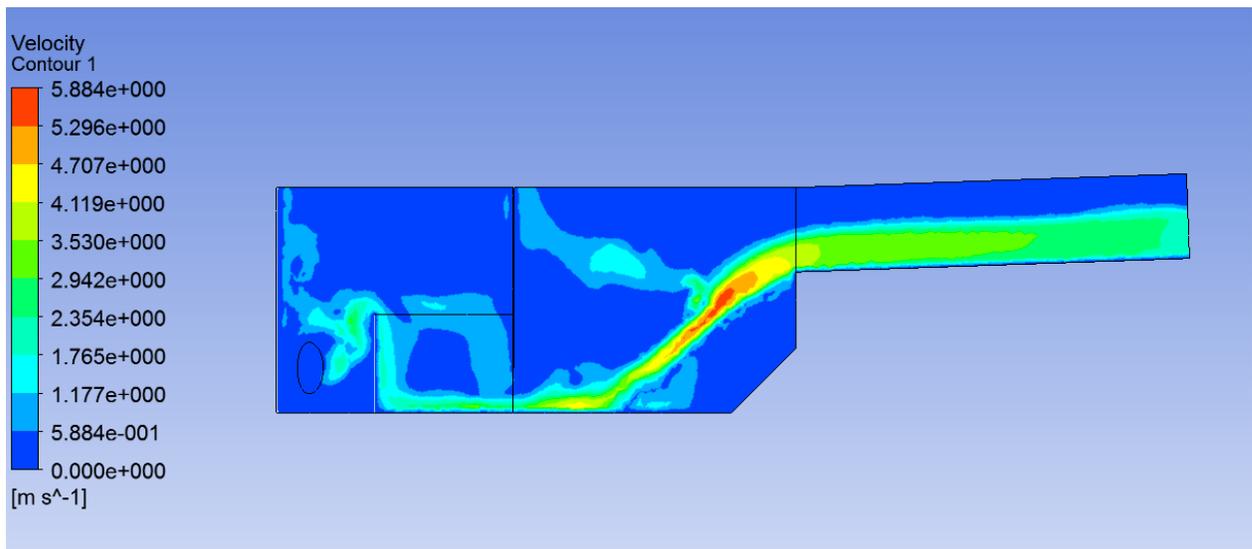


FIGURA 7.25 CONTORNO DE VELOCIDADES EN EL PLANO XZ.

En la Figura 7.26 se muestra una vista del plano de corte de una de las cañerías de salida, la velocidad media de salida del relave es de 2,6 [m/s].

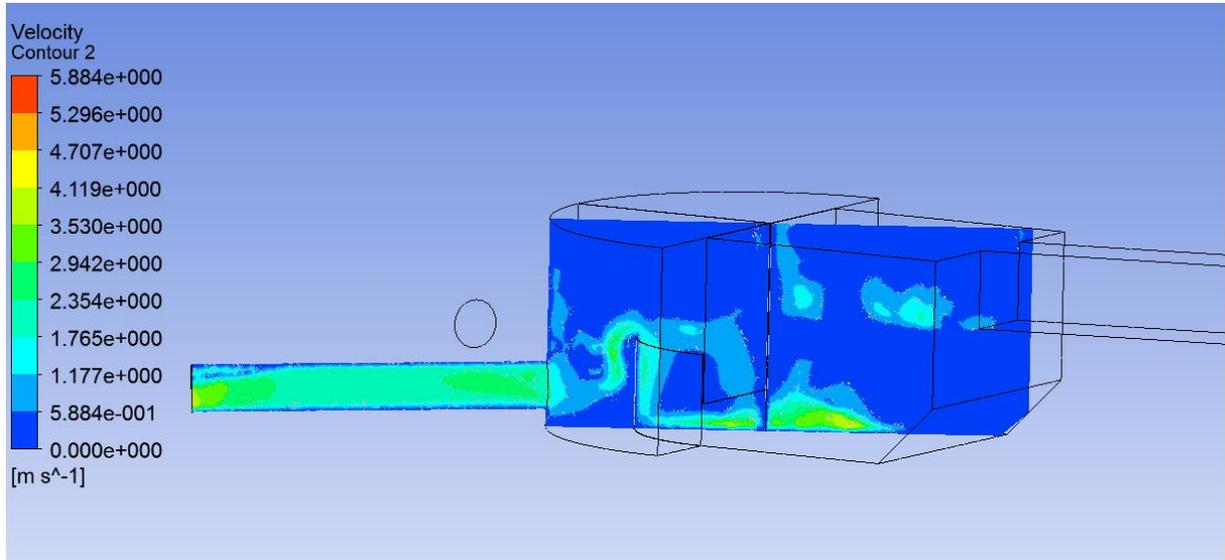


FIGURA 7.26 CONTORNO DE VELOCIDADES EN EL PLANO DE CORTE DE LA CAÑERÍA DE SALIDA.

En la Figura 7.27 se ven tres alturas, la altura total del cajón, la altura de pulpa alcanzada en el vertedero y la altura de pulpa en la canaleta. La altura alcanzada en la esclusa, en este caso, es de 2 [m]

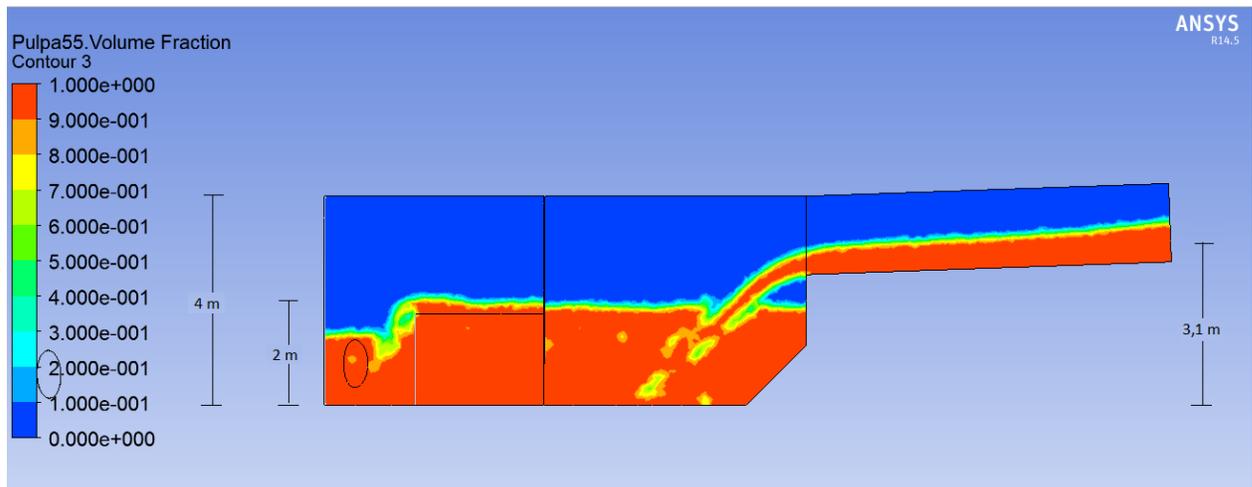


FIGURA 7.27 ALTURAS ALCANZADAS POR LA PULPA DE RELAVE EN CAJÓN.

En la Figura 7.28 y Figura 7.29, se observa que el mayor esfuerzo de corte se encuentra en el fondo del cajón y de la canaleta de entrada, además se tiene un alto esfuerzo de corte en la muralla interna del vertedero, alcanzando valores de 157,1 [Pa].

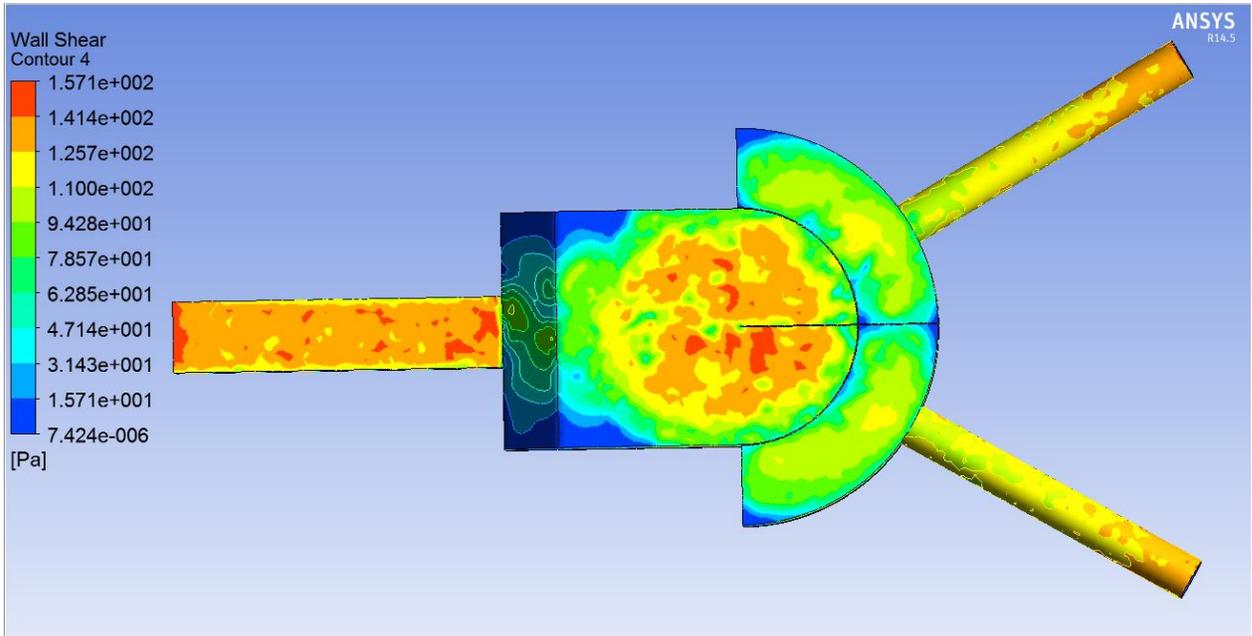


FIGURA 7.28 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED DEL CAJÓN, VISTA INFERIOR.

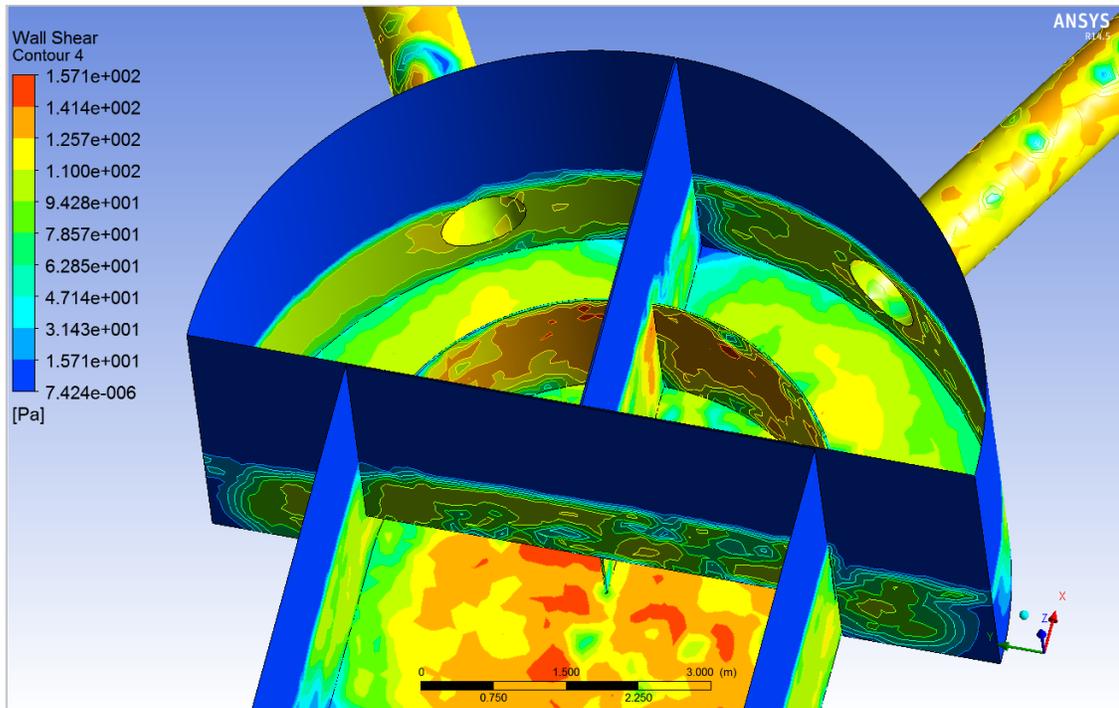


FIGURA 7.29 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED DEL CAJÓN, VISTA INTERIOR CAJÓN.

En la Figura 7.30 se muestra el gráfico en barra de caudal. Acá se puede ver que se tiene más salida de caudal en la salida1 (una diferencia de 196,5 [kg/s]). Como se puede apreciar en el gráfico, se tiene una pérdida de caudal de -136 [kg/s], esto significa que sale más caudal del que entra, o sea, que se crea caudal no existente, este error se asocia al desarrollo numérico de ANSYS Fluent.

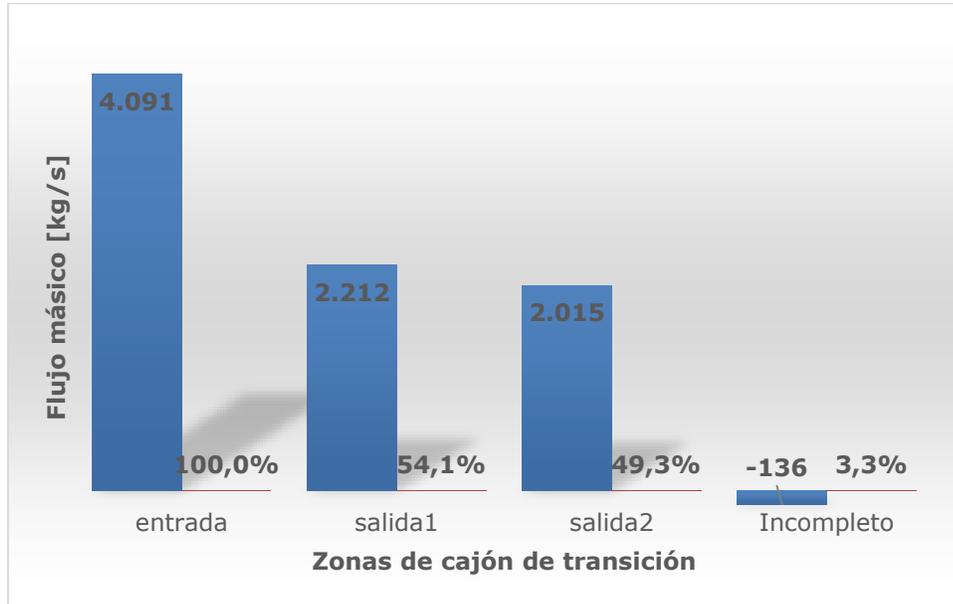


FIGURA 7.30 FLUJO MÁSSICO DE LA CANALETA DE ENTRADA Y LAS CAÑERÍAS DE SALIDA, JUNTO CON LA DIFERENCIA DE CAUDAL INCOMPLETO.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. FLUJO LAMINAR V/S TURBULENTO

La descarga de relave se realiza con flujo turbulento, pero dado que no se tienen parámetros para caracterizar un fluido no-newtoniano en el modelo turbulento, es necesario validar el uso de un modelo viscoso laminar para la simulación del flujo del relave, para lo cual se debe hacer una comparación entre el flujo laminar y turbulento para el mismo relave, en este caso un relave con concentración en peso de 35% y modelado como fluido newtoniano, o sea, con densidad y viscosidad dinámica constante.

Del capítulo anterior de resultados, se puede apreciar que las velocidades alcanzadas en el cajón de transición para los dos modelos, no difieren mucho uno del otro. La Tabla 8.1 muestra que la diferencia promedio de las velocidades para las distintas zonas del cajón de transición, canaleta y cañerías es de 0,031 [m/s] aprox., lo que corresponde a un 0,62% de error por parte del modelo viscoso laminar. Esto es bastante bajo y se cree que se debe a que ambos modelos usan un principio viscoso para caracterizar el flujo del relave, lo que permite obtener resultados similares para ambos fluidos.

Además, se comparan los caudales que se tienen a la entrada y salida del cajón, para ambos modelos. En la Tabla 8.2 se ve la diferencia de caudales, que corresponde a 220,32 [kg/s], o sea, un 6,85% de error con respecto al flujo turbulento, la diferencia es mayor con respecto a las velocidades, pero de todos modos es aceptable.

Finalmente se puede afirmar que la diferencia entre utilizar el modelo turbulento k-ε y el modelo viscoso laminar, es aceptable, dando resultados muy similares de comportamiento de fluido y que permite utilizar el modelo viscoso laminar para las próximas simulaciones.

TABLA 8.1 COMPARACIÓN DE LAS VELOCIDADES PARA LOS MODELOS VISCOSO LAMINAR Y VISCOSO TURBULENTO K-ε.

| | Turbulento | Laminar | Diferencia [m/s] |
|-----------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|
| | Velocidades [m/s] | | |
| Canaleta | 4,889 | 4,859 | 0,03 |
| Caída | 6,984 | 6,941 | 0,043 |
| Cañería salida | 3,492 | 3,47 | 0,022 |
| Promedio | 5,1217 | 5,0900 | 0,0317 |
| | | Diferencia | 0,62% |

TABLA 8.2 COMPARACIÓN DE CAUDALES PARA LOS MODELOS VISCOSO LAMINAR Y VISCOSO TURBULENTO K-ε.

| | Turbulento | Laminar | Diferencia [kg/s] |
|-------------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | Caudales [kg/s] | | |
| Entrada | 6.429 | 6.429 | 0 |
| Salida1 | 2.847 | 3.106 | 259 |
| Salida2 | 2.861 | 3.043 | 181 |
| Incompleto | 721 | 280 | 441 |
| Promedio | 3.214,28 | 3.214,28 | 220,32 |
| | | Diferencia | 6,85% |

8.2. VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS

Los próximos resultados a analizar, serán los que utilicen el modelo viscoso laminar para caracterizar el flujo del relave, esto para poder hacer una comparación de los resultados obtenidos del comportamiento del relave a diferentes concentraciones.

En la Tabla 8.3 se puede ver las velocidades medias teóricas para la canaleta de entrada y las cañerías de salida, para el relave con concentración en peso de 35%. Además se muestra la velocidad de depósito para la canaleta y cañería de salida calculada con la ecuación (2.24), para sólidos de granulometría fina y espectro granulométrico angosto y se comparan con la velocidad media obtenida en ANSYS.

Como se puede observar de la tabla antes mencionada, no se tiene obstrucción del relave con Cp de 35%. Los valores de velocidad obtenidos en ANSYS se acercan bastante a los teóricos, con un error promedio de 2,55%, lo que permite validar los resultados de la simulación.

TABLA 8.3 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS PARA EL RELAVE CON CONCENTRACIÓN EN PESO 35%.

| | $V_{media\ teórica}$ [m/s] | V_{ansys} [m/s] | Error | $V_{dep. teórica}$ [m/s] | $V_{depósito}/V_{ansys}$ | |
|-------------------------|-------------------------------|----------------------|--------------|-----------------------------|--------------------------|----------------|
| Canaleta entrada | 4,749 | 4,859 | 2,33% | 1,544 | 0,318 | Sin deposición |
| Cañería salida | 3,569 | 3,470 | 2,77% | 1,382 | 0,398 | Sin deposición |

En la Tabla 8.4 se muestra la velocidad media teórica que debería tener el fluido en la canaleta, además del error asociado en el cálculo numérico de ANSYS Fluent, y se analiza la obstrucción de relave en la canaleta cuya velocidad de depósito se obtuvo con las ecuaciones (2.19) y (2.20) para plástico de Bingham.

En ninguno de los casos se tiene obstrucción en la canaleta de entrada. La velocidad obtenida en ANSYS no difiere mucho de la velocidad media teórica calculada, el relave con concentración en peso 35% es el que más se asemeja al teórico, los relaves más concentrados tienen un error de 14%, pero de todos modos es bajo, por lo que se validan los resultados obtenidos en ANSYS Fluent.

TABLA 8.4 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS EN LA CANAleta DE ENTRADA PARA EL RELAVE MODELADO COMO PLÁSTICO DE BINGHAM.

| | V_{media} teórica [m/s] | V_{ansys} [m/s] | Error | $V_{depósito}$ teórica [m/s] | $V_{depósito}/V_{ansys}$ | |
|---------------|------------------------------|----------------------|--------|---------------------------------|--------------------------|----------------|
| Cp 45% | 3,329208 | 3,32 | 0,28% | 0,847484 | 0,255266 | Sin deposición |
| Cp 50% | 3,495948 | 3,00 | 14,19% | 0,621199 | 0,207066 | Sin deposición |
| Cp 55% | 3,426443 | 2,94 | 14,20% | 0,354296 | 0,120509 | Sin deposición |

En el gráfico de la Figura 8.1 se muestra el porcentaje de caudal incompleto que se tiene para los diferentes casos estudiados, obtenidos de las Figura 7.6, Figura 7.12, Figura 7.18, Figura 7.24 y Figura 7.30 del capítulo anterior. Es importante analizar la diferencia de caudal entre la entrada y las salidas, ya que denota el grado de error en la solución entregada por ANSYS Fluent, este error puede deberse a sensibilidad de malla o errores asociados al cálculo numérico de la simulación.

Aquí se muestra que el mayor porcentaje de caudal incompleto se tiene para el relave con concentración en peso de 35% con flujo turbulento, esto implica que el modelo de turbulencia k-ε es más sensible a la malla que el viscoso laminar, donde para obtener mejores resultados se debe refinar la malla, pero se debe tener en cuenta que a medida que se refina la malla, mayor es el gasto computacional, por lo que se debe optimizar entre ahorro computacional y la mejora del resultado. Para los casos simulados con el modelo viscoso laminar se tienen menores porcentajes de caudal incompleto, siendo el menor para el relave con concentración en peso de 45%. En general, para todos los relaves modelados como plástico de Bingham se tienen menores porcentajes de error, lo que implica mejores resultados de la simulación para estos casos. Cabe notar que para los 5 casos estudiados, se tiene menos de un 15% de error en el cálculo de caudal, lo que implica buenos resultados de simulación.

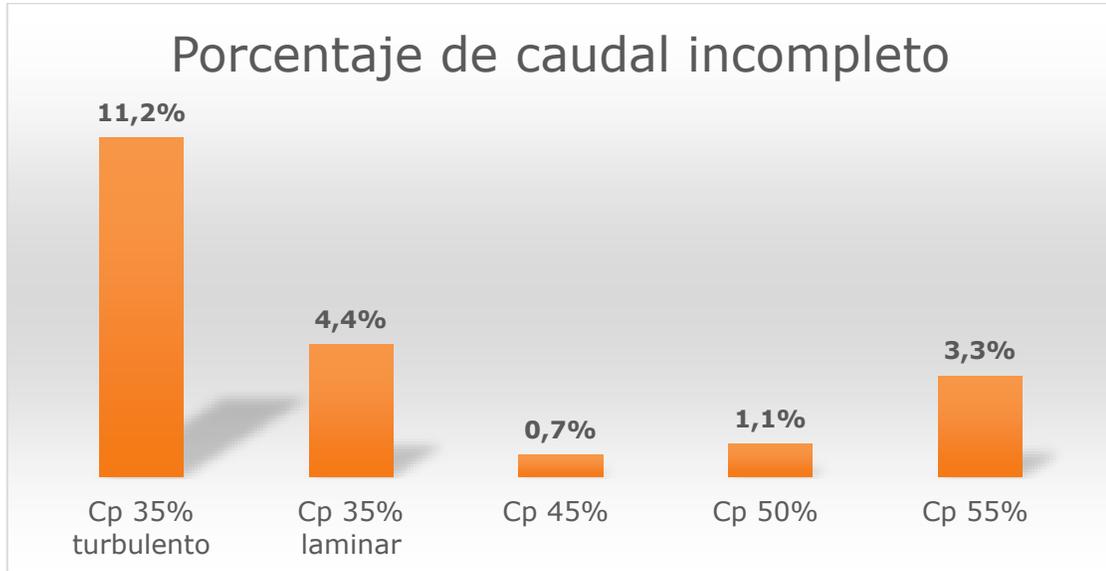


FIGURA 8.1 GRÁFICO DE COMPARACIÓN DE CAUDAL INCOMPLETO EN EL CÁLCULO DE ANSYS FLUENT PARA LOS DIFERENTES CASOS ESTUDIADOS.

8.3. COMPARACIÓN DE LOS CASOS

En esta sección se compara como el aumento de concentración en peso afecta el comportamiento del relave en el cajón de transición. Los datos a analizar son los numéricos obtenidos en ANSYS Fluent.

En la Figura 8.2 se muestra la velocidad de caída del relave al cajón de transición, que corresponde a la velocidad máxima del relave en todos los casos estudiados. Se puede observar que a medida que aumenta la concentración en peso, disminuye la velocidad del relave, esto debido al aumento de la viscosidad plástica y esfuerzo de corte inicial del relave en cada caso.

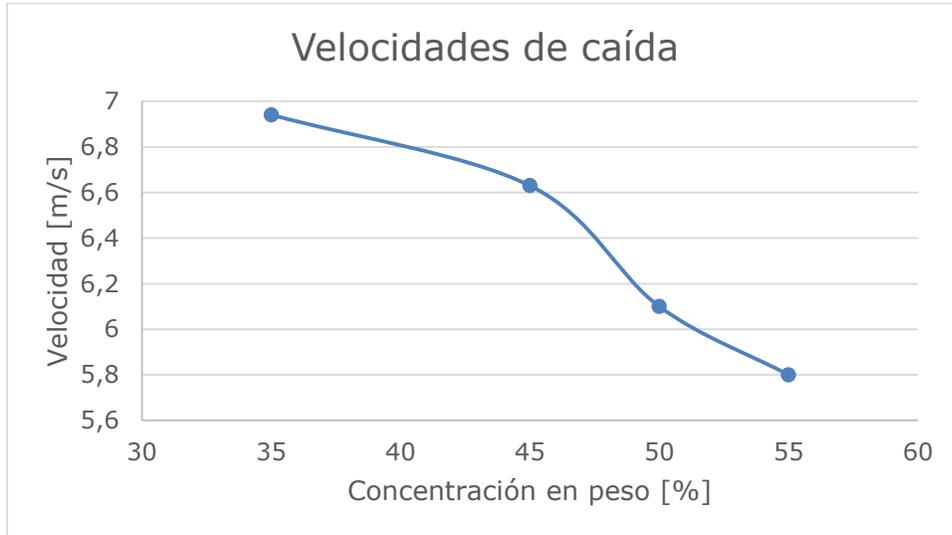


FIGURA 8.2 GRÁFICO DE VELOCIDAD DE CAÍDA DEL RELAVE AL CAJÓN (VELOCIDAD MÁXIMA) V/S LA CONCENTRACIÓN EN PESO DEL RELAVE.

En la Figura 8.3, se puede ver que el esfuerzo de corte en la pared, correspondiente a la base del cajón, aumenta a medida que aumenta la concentración en peso, dando un gran salto en el 55% de concentración. La curva tiene un comportamiento exponencial parecido al expuesto en la Figura 6.2, donde a medida que aumenta τ_0 , aumenta el esfuerzo de corte en las murallas del cajón de transición.

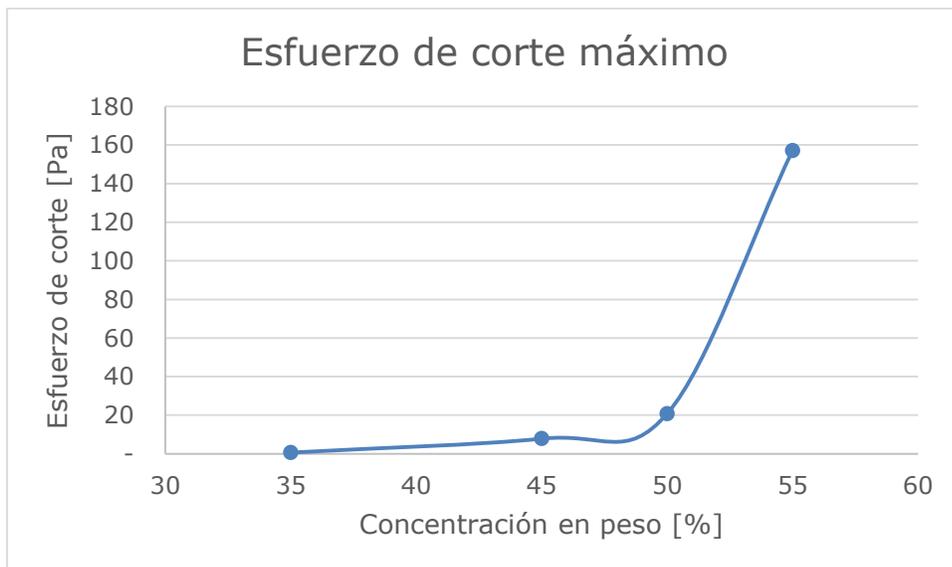


FIGURA 8.3 GRÁFICO DE ESFUERZO DE CORTE MÁXIMO EN LA PARED V/S LA CONCENTRACIÓN EN PESO DEL RELAVE.

8.3.1. DEPÓSITO DE RELAVE

En la Figura 8.4, Figura 8.5 y Figura 8.6 se pueden ver en rojo, las zonas donde la velocidad del relave es mayor a la velocidad de depósito y las velocidades menores a la de depósito en verde, para la canaleta de entrada, las cañerías de salida y el cajón de transición, respectivamente. La opción para delimitar las velocidades se logra cargando los resultados de la simulación a *CFD-post*, luego se grafica el contorno de velocidades en el plano deseado, seleccionando en el rango *Value List*, donde se digita la velocidad de depósito de cada caso, expuestos en la Tabla 8.3 y Tabla 8.4.

La Figura 8.4 muestra que no hay depósito de relave en la canaleta de entrada, ya que se tiene velocidades rojas en la base de la canaleta hasta la superficie libre para los cuatro casos de concentraciones. De la Figura 8.5, no se tiene obstrucción en la zona de la esclusa, esto implica que el fluido pasa de forma continua por la esclusa, sin formar estancamiento, demostrando el buen funcionamiento del cajón de transición, incluso para altas concentraciones. En la Figura 8.6 se muestra que tampoco hay depósito en las cañerías de salida (tanto derecha como izquierda), aunque se pueden notar zonas verdes en la parte superior de las cañerías correspondientes a burbujas de aire con velocidades cercanas a cero, que se forman dentro de la cañería.

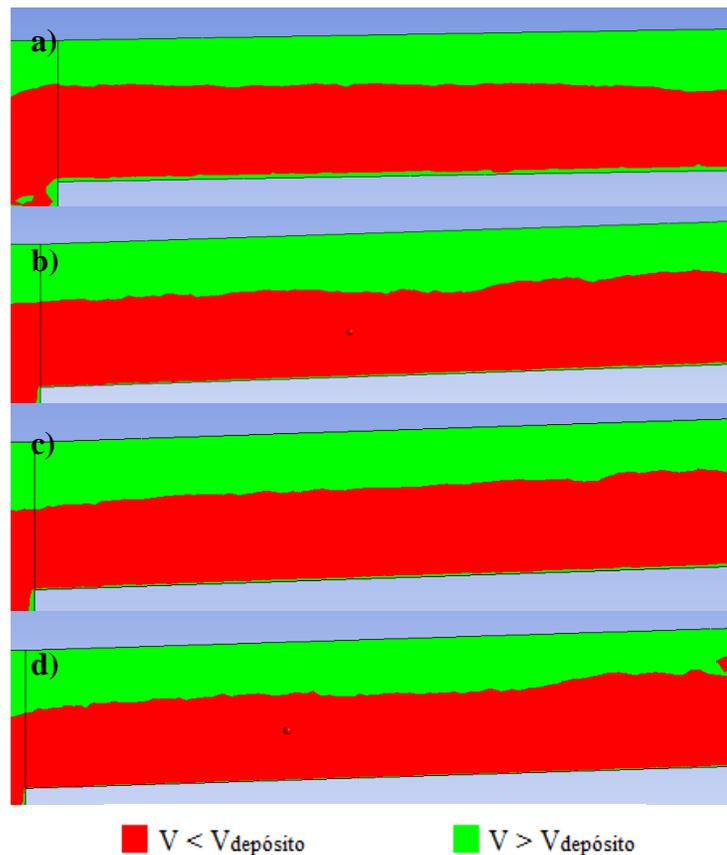


FIGURA 8.4 PLANO DE CORTE TRANSVERSAL DE CANAleta DE ENTRADA, A) CP 35%, B) CP45%, C) CP 50% Y D) CP 55%.

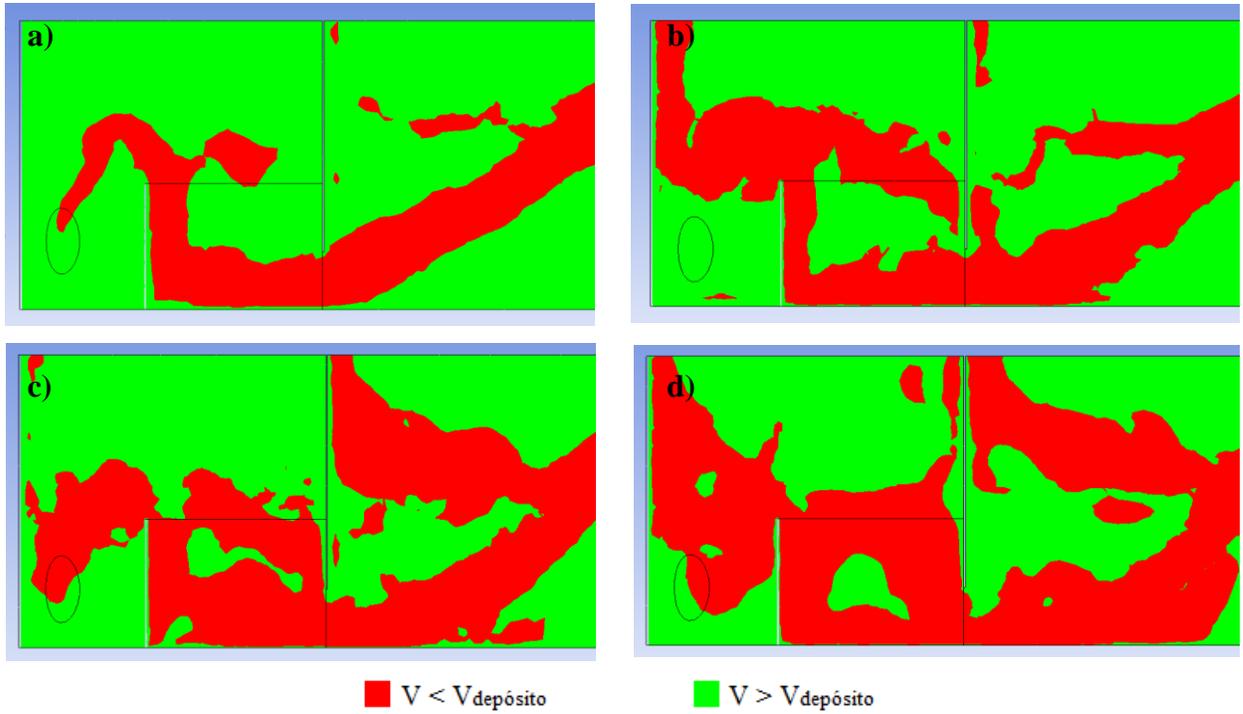


FIGURA 8.5 PLANO DE CORTE TRANSVERSAL DEL CAJÓN DE RELAVE, A)CP 35%, B) CP45%, C) CP 50% Y D)CP 55%.

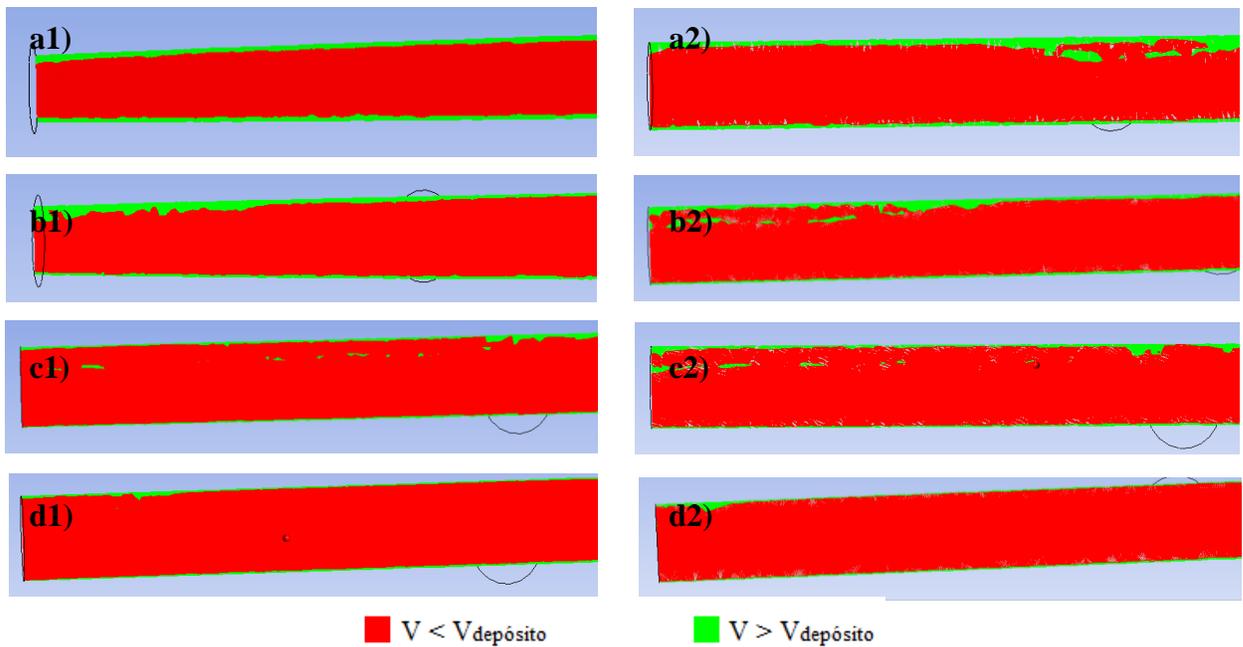


FIGURA 8.6 PLANO DE CORTE TRANSVERSAL LAS CAÑERÍAS DE SALIDA 1 Y 2, A)CP 35%, B) CP45%, C) CP 50% Y D)CP 55%.

8.3.2. *SEDIMENTACIÓN*

Es importante estudiar la sedimentación en las zonas de baja velocidad del cajón, donde hay menores turbulencias y por ende mayor riesgo a tener sedimentación. Se eligen los planos de cortes A-A y B-B para visualizar el contorno de velocidades, mostrados en la Figura 8.7, asumiendo que estas son las zonas de menor velocidad del relave. El análisis se hará para los cuatro casos en estudio.

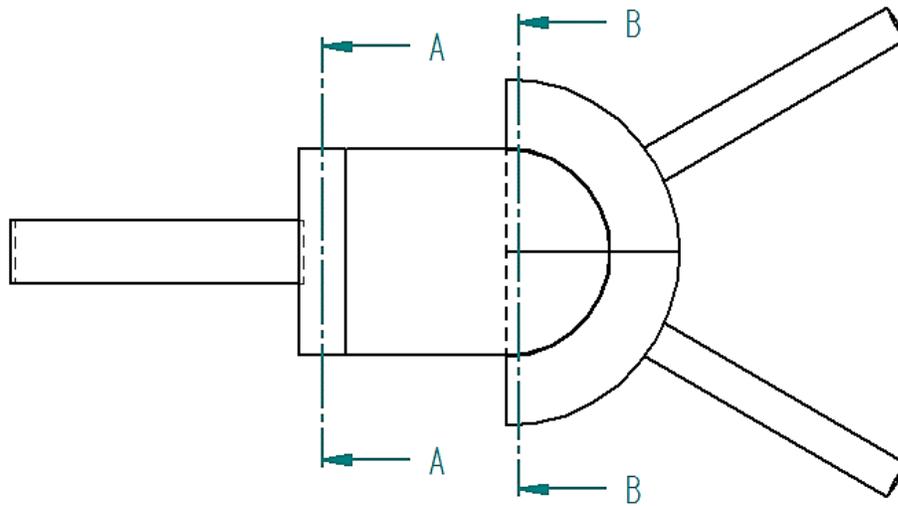


FIGURA 8.7 PLANOS DE CORTE A-A Y B-B.

En la Tabla 8.5 se muestran los valores teóricos obtenidos de velocidad de sedimentación obstruida v_{si} , para los diferentes casos en estudio, asumiendo una velocidad relativa de 0,1 [m/s], utilizando las fórmulas expuestas en el capítulo 2.4 “Velocidad de Sedimentación”. Para los casos de relave como plástico de Bingham, se usó la viscosidad plástica μ_p , para obtener el número de Reynolds de las partículas (Re_p). Como se puede apreciar del Re_p , en el caso del relave con concentración en peso de 35%, se tiene régimen turbulento, para los demás casos se tiene régimen laminar, siendo los valores de velocidad de sedimentación bajos, para estos casos, en el orden de 10^{-7} .

TABLA 8.5 VALORES TEÓRICOS DE VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN OBSTRUIDA v_{si} , PARA LOS CASOS ESTUDIADOS.

| c | Re_p | C_d | v_{si} [m/s] | Régimen |
|---------------|--------|----------|-----------------------|------------|
| Cp 35% | 0,415 | 62,609 | $7,47 \times 10^{-4}$ | Turbulento |
| Cp 45% | 0,093 | 259,147 | $2,03 \times 10^{-6}$ | Laminar |
| Cp 50% | 0,039 | 610,256 | $6,77 \times 10^{-7}$ | Laminar |
| Cp 55% | 0,007 | 3528,205 | $8,86 \times 10^{-8}$ | Laminar |

Se estudiaron el contorno de velocidades en los planos A-A y B-B, y mostraron que las velocidades superaban la velocidad de sedimentación en los cuatro casos de concentraciones vistos, por lo que el cajón no sedimenta partículas. La Figura 8.8 y Figura 8.9 muestran el contorno de velocidades de los planos A-A y B-B respectivamente, para un relave de concentración en peso de 35%. Como se puede ver, las velocidades son mayores a la de sedimentación, y esto ocurre en todos los casos analizados, lo que confirma el buen diseño del cajón.



FIGURA 8.8 CONTORNO DE VELOCIDADES DEL PLANO A-A, CON UN MÁXIMO DE 1×10^{-3} [M/S], PARA RELAVE CON Cp 35%.

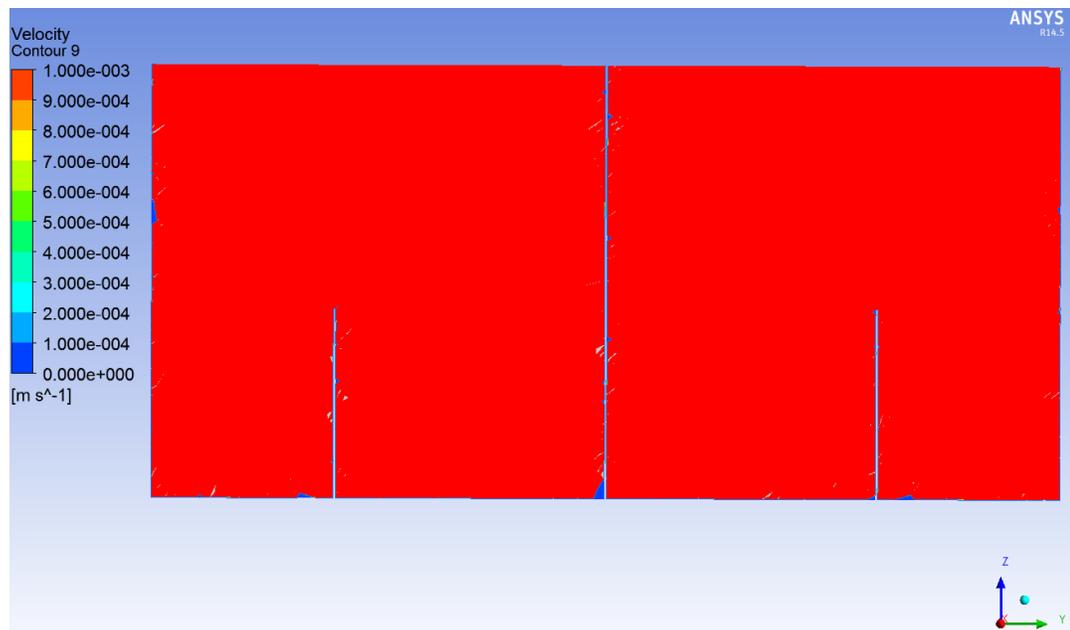


FIGURA 8.9 CONTORNO DE VELOCIDADES DEL PLANO B-B, CON UN MÁXIMO DE 1×10^{-3} [M/S], PARA RELAVE CON Cp 35%.

9. SIMULACIÓN, FASE DISCRETA

9.1. INYECCIÓN DE PARTÍCULAS

Para poder obtener mayores resultados sobre el funcionamiento del cajón, se realizará una inyección discreta de partículas. Para esto se debe cargar la solución de la simulación final en ANSYS Fluent, para este estudio se cargaron las soluciones con el modelo viscoso laminar. Luego se debe abrir el *Setup* de Fluent, desmarcar la opción de *Double Precision* y cambiar el procesamiento de Paralelo a En Serie, todo esto en el *Launcher* de Fluent.

Se necesita activar el modelo de fase discreta y desmarca la opción *Unsteady Particle Tracking*. Luego se caracteriza el material a inyectar, en este caso se utilizaron partículas inertes de Carbonato de Calcio, que tienen una densidad de 2.800 [kg/m³], cercana a la densidad de las partículas en el relave de 2.700 [kg/m³]. Se elige la distribución de diámetros de Rosin Rammler, donde se debe ingresar el diámetro máximo, diámetro mínimo, módulo de tamaño (*d* o Mean Diameter) y el módulo de distribución (*n* o Spread Parameter) de una distribución conocida.

En este caso, se tiene la distribución de Rosin Rammler para partículas de relave entregado por [7]. En la Figura 9.1 se puede ver la distribución de diámetros para cinco muestras de cuarzo con módulo de tamaño *k* de 11, 15, 22, 36 y 46 [μm] y tamaño de módulo de distribución *m* igual a uno, el caso que interesa es la distribución del relave con *k* = 9 [μm] y *m* = 1,2.

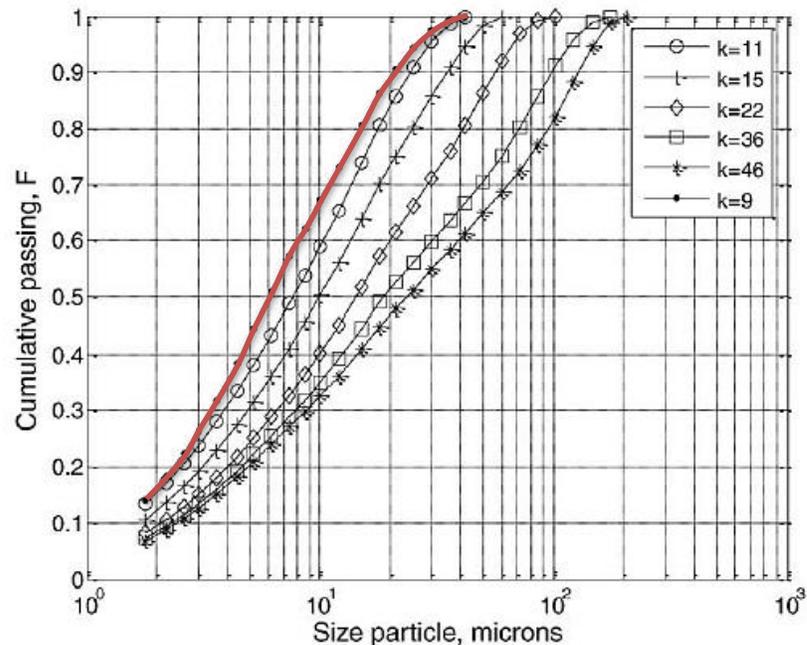


FIGURA 9.1 DISTRIBUCIÓN DE ROSIN RAMMLER PARA MUESTRAS DE CUARZO CON $k = 11, 15, 22, 36$ Y $46 \mu\text{m}$ Y $m = 1$. LA CURVA REMARCADA EN ROJO CORRESPONDE AL RELAVE CON $k = 9 \mu\text{m}$ Y $m = 1,2$ [7].

9.1.1. RESULTADO Y ANÁLISIS

A continuación se muestran las imágenes de la trayectoria de partículas inyectadas para las cuatro concentraciones en peso estudiadas, el color representa la velocidad alcanzada por las partículas. Como se puede ver en las imágenes, de las partículas inyectadas algunas siguen el recorrido hacia las cañerías de salida, pero la mayoría de las partículas se quedan dentro del cajón, tomando velocidades cercanas a 0 y dirigiéndose hacia el techo.

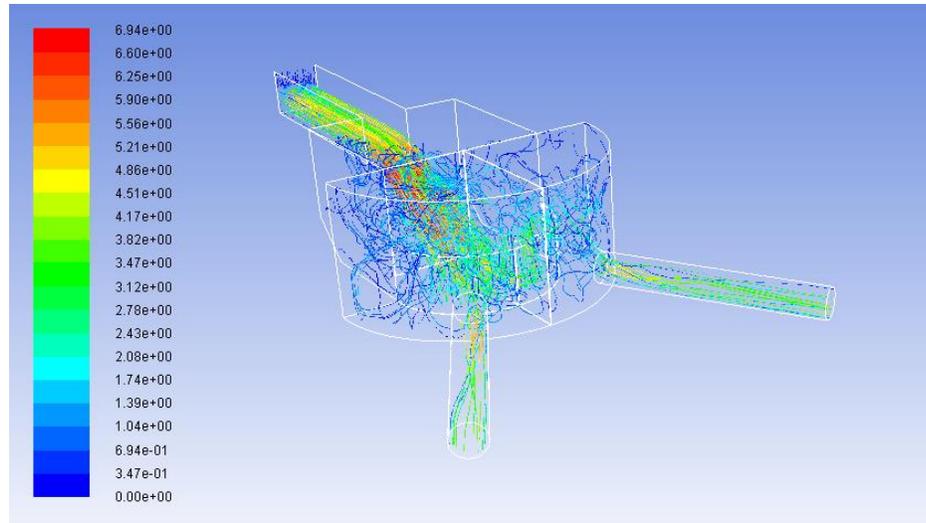


FIGURA 9.2 IMAGEN DE LA TRAYECTORIA DE PARTÍCULAS INYECTADAS PARA Cp 35%, EN COLORES SE VE LA VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS EN [M/S].

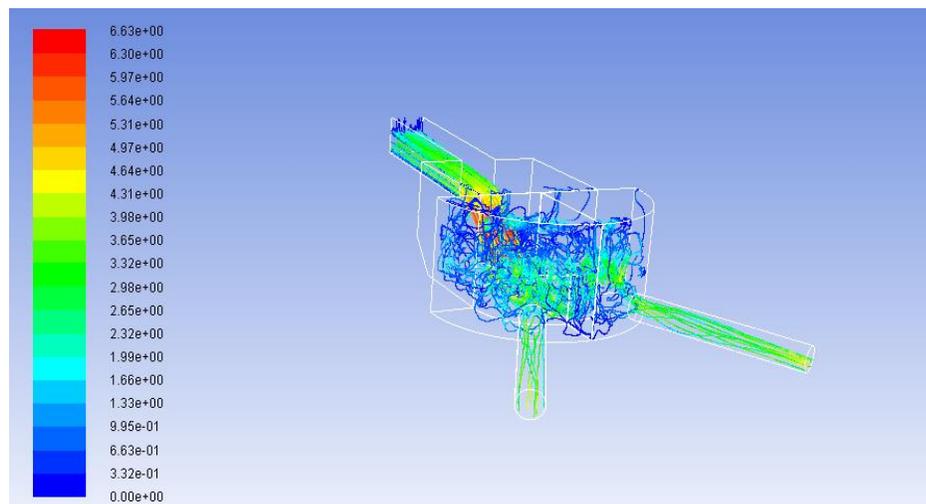


FIGURA 9.3 IMAGEN DE LA TRAYECTORIA DE PARTÍCULAS INYECTADAS PARA Cp 45%, EN COLORES SE VE LA VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS EN [M/S].

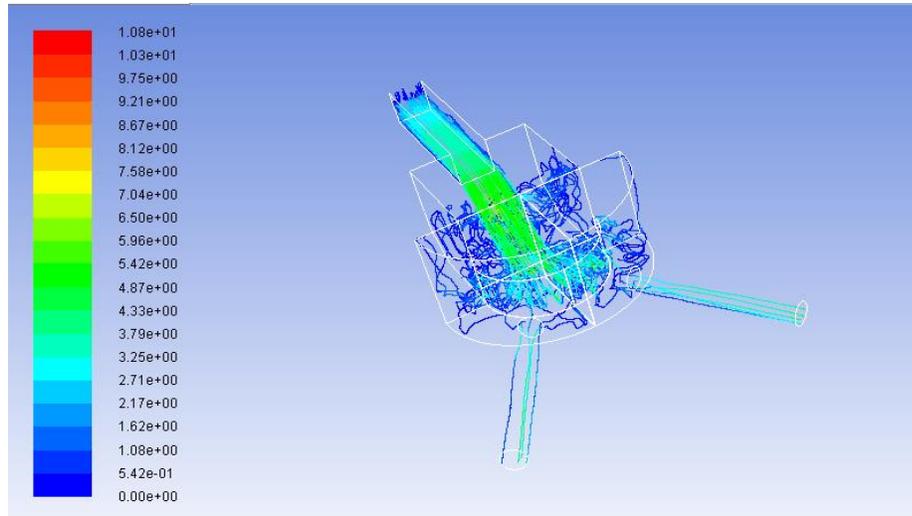


FIGURA 9.4 IMAGEN DE LA TRAYECTORIA DE PARTÍCULAS INYECTADAS PARA Cp 50%, EN COLORES SE VE LA VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS EN [M/S].

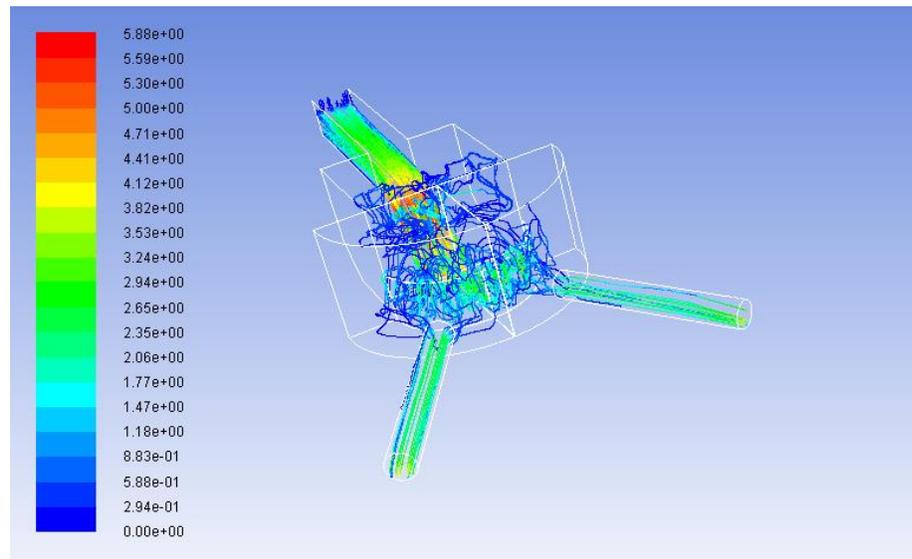


FIGURA 9.5 IMAGEN DE LA TRAYECTORIA DE PARTÍCULAS INYECTADAS PARA Cp 55%, EN COLORES SE VE LA VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS EN [M/S].

Como se ve en los gráficos expuestos en la Figura 9.6, en los cuatro casos se tiene mayor porcentaje de caudal con trayectoria incompleta, que partículas que lograron ser descargados, esto indica que el modelo de fase discreta con inyección de partículas no es representativo del comportamiento del relave en el cajón de transición debido a que el modelo de fase discreta responde a ecuación de $F=m \cdot a$, le es difícil encontrar la solución al problema planteado, este modelo funcionaría mejor para simular fluidos en canales abiertos o tuberías, pero no cajones. Además el fluido al que se le inyectan las partículas ya tiene una densidad y viscosidad calculada para el relave con particulado, tal vez se debería realizar la inyección para un fluido de viscosidad baja, como agua.

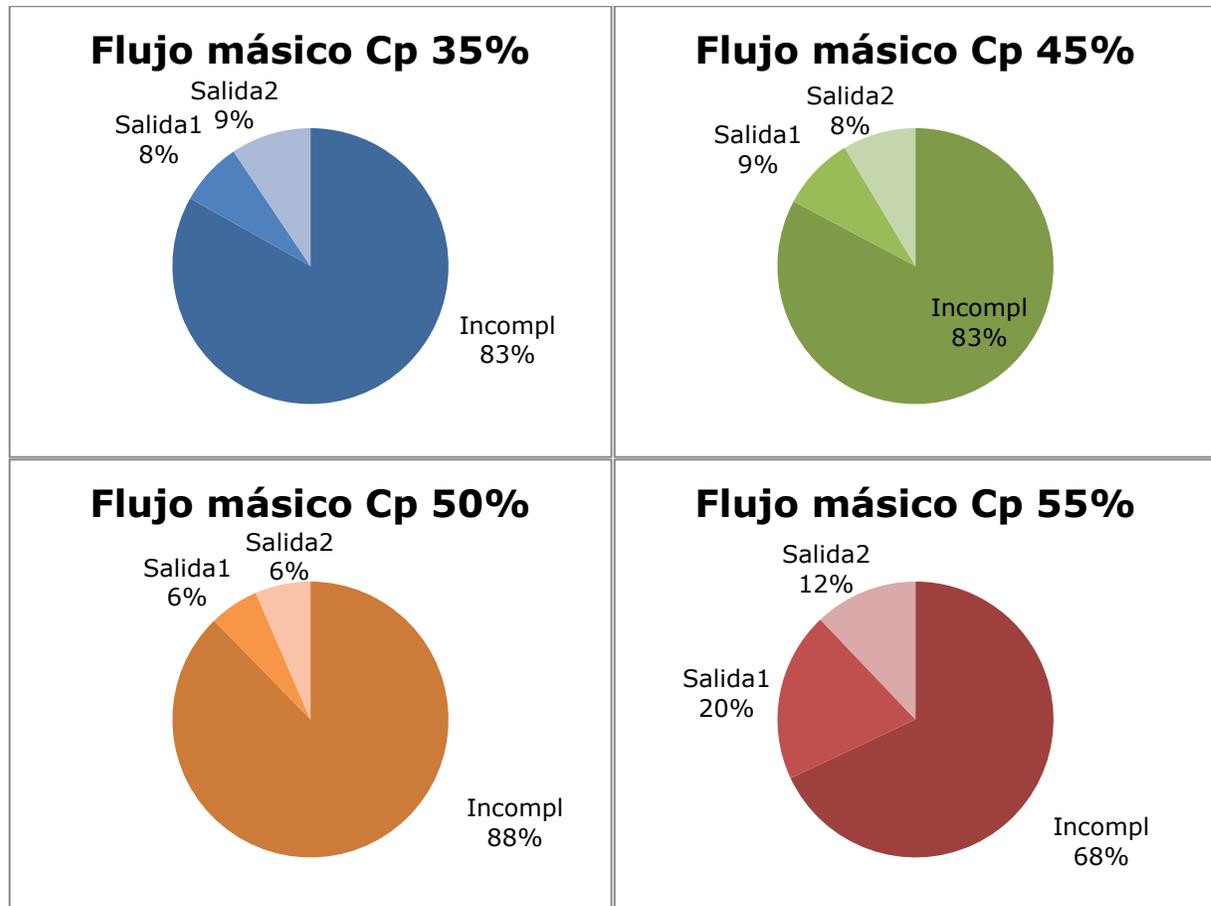


FIGURA 9.6 GRÁFICOS CIRCULARES DEL PORCENTAJE DE PARTÍCULAS DESCARGADAS EN SALIDA1, SALIDA2 Y CON TRAYECTORIA INCOMPLETA, PARA LAS CUATRO CONCENTRACIONES EN PESO,

9.2. EROSIÓN

Para poder analizar la erosión que se tiene en el cajón primero se debe realizar la inyección de partículas explicado en el capítulo anterior, luego en la pestaña del modelo de fase discreta se marca la opción de interacción con la fase continua, luego en *Physical Models* se marca la opción de *Erosion/Accretion*. Para poder caracterizar el cajón de relave cuyo material es acero, se utilizan los parámetros entregados por [23] para una tubería de acero con dos codos de 90 grados, que se definen en las condiciones de borde.

En la pestaña *DPM (Discrete Phase Model)* de cada zona de condición de borde se definen los parámetros en relación a la fase discreta. Para las salidas se asigna una condición tipo *escape* mientras que para el techo y entrada una condición tipo *reflect*. Para la zona Wall-Fluido, se debe señalar los valores de la función del diámetro de partícula (d_p), la función del ángulo de impacto (α) y la función de velocidad relativa de la partícula $b(v)$, que provienen de la ecuación (3.19). Para este caso se considera $(d_p)=1,8 \times 10^{-9}$ y $b(v)=2,6$. La función del ángulo de impacto se define como *piecewise-linear*, con las coordenadas que se muestran en Tabla 9.1.

TABLA 9.1 COORDENADAS DE LA FUNCIÓN LINEAL POR TRAMOS DEL ÁNGULO DE IMPACTO.

| Punto | Ángulo [°] | Valor |
|-------|------------|-------|
| 1 | 0 | 0 |
| 2 | 20 | 0.8 |
| 3 | 30 | 1 |
| 4 | 45 | 0.5 |
| 5 | 90 | 0.4 |

Luego se debe ingresar los coeficientes de restitución normal y tangencial. Estos coeficientes corresponden a la cantidad de momentum que es retenida por la partícula después del choque, en la dirección especificada. Se ingresan los coeficientes de restitución, en ambas direcciones, como un polinomio en función del ángulo de impacto ($\alpha = \theta_1$), con cuatro coeficientes que se muestran en la Tabla 9.2 y Tabla 9.3.

TABLA 9.2 COEFICIENTES DEL POLINOMIO DE RESTITUCIÓN NORMAL.

| Coefficiente | Valor |
|--------------|------------------------|
| 1 | 0.993 |
| 2 | -0.0307 |
| 3 | 4.75×10^{-4} |
| 4 | -2.61×10^{-6} |

TABLA 9.3 COEFICIENTES DEL POLINOMIO DE RESTITUCIÓN TANGENCIAL.

| Coefficiente | Valor |
|--------------|------------------------|
| 1 | 0.988 |
| 2 | -0.029 |
| 3 | 6.43×10^{-4} |
| 4 | -3.56×10^{-6} |

9.2.1. RESULTADO Y ANÁLISIS

9.2.1.1. Cp 35%

En las figuras mostradas a continuación, se observa la erosión máxima en cuatro diferentes zonas del cajón de transición, para el relave con concentración en peso de 35%. Viendo la Figura 9.11, el mayor desgaste lo tiene la canaleta de entrada, con una erosión de 210,24 [mm/año], el cual es un valor elevado, por lo que sería necesario considerar recubrir el cajón para prolongar la vida útil de este.

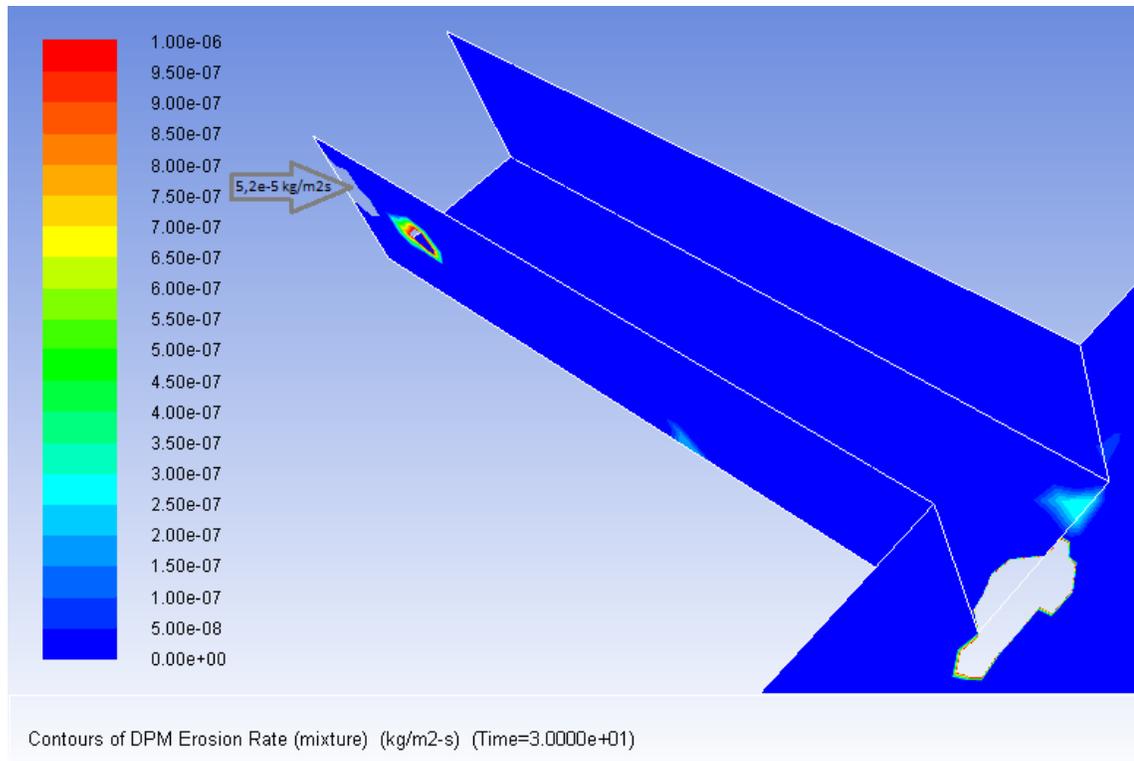


FIGURA 9.7 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M²S EN LA CANALETA DE ENTRADA

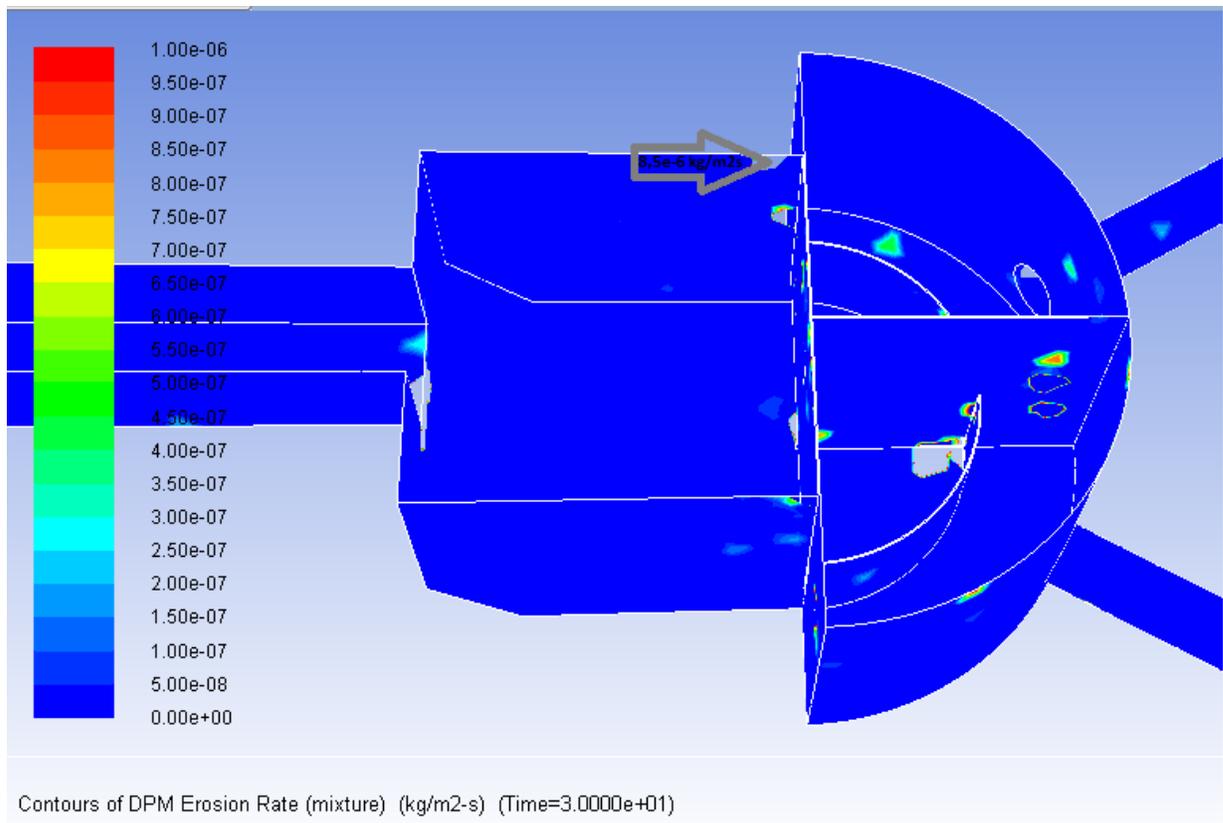


FIGURA 9.8 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M²S EN EL CAJÓN DE RELAVE.

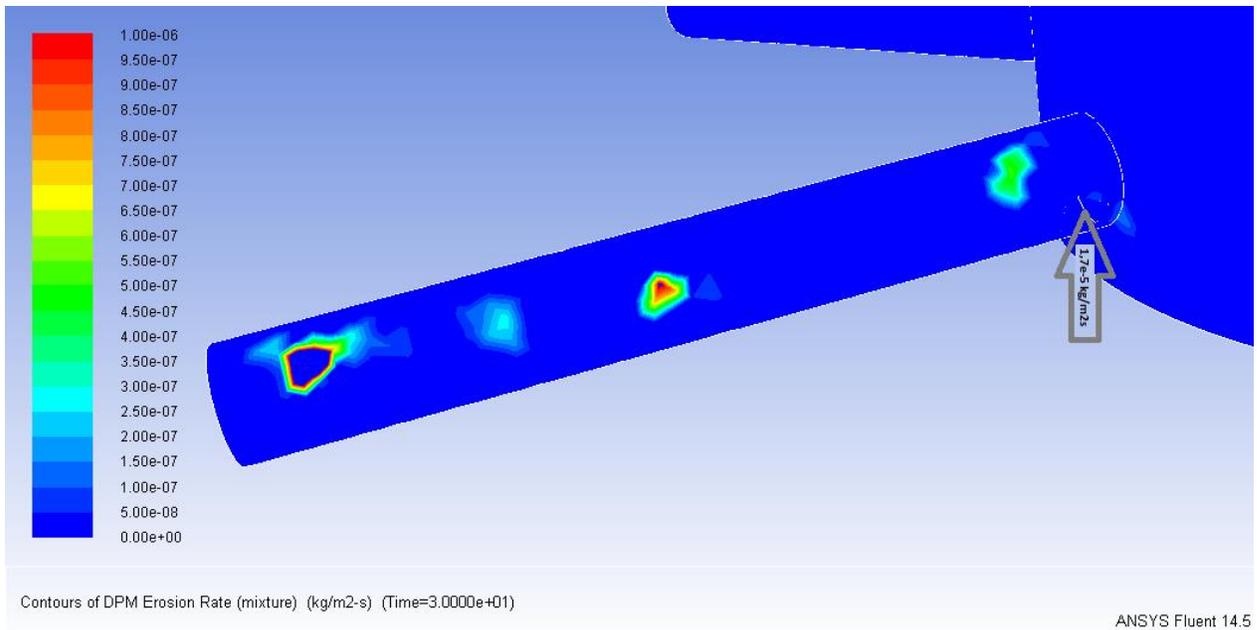


FIGURA 9.9 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M²S EN LA CAÑERÍA 1.

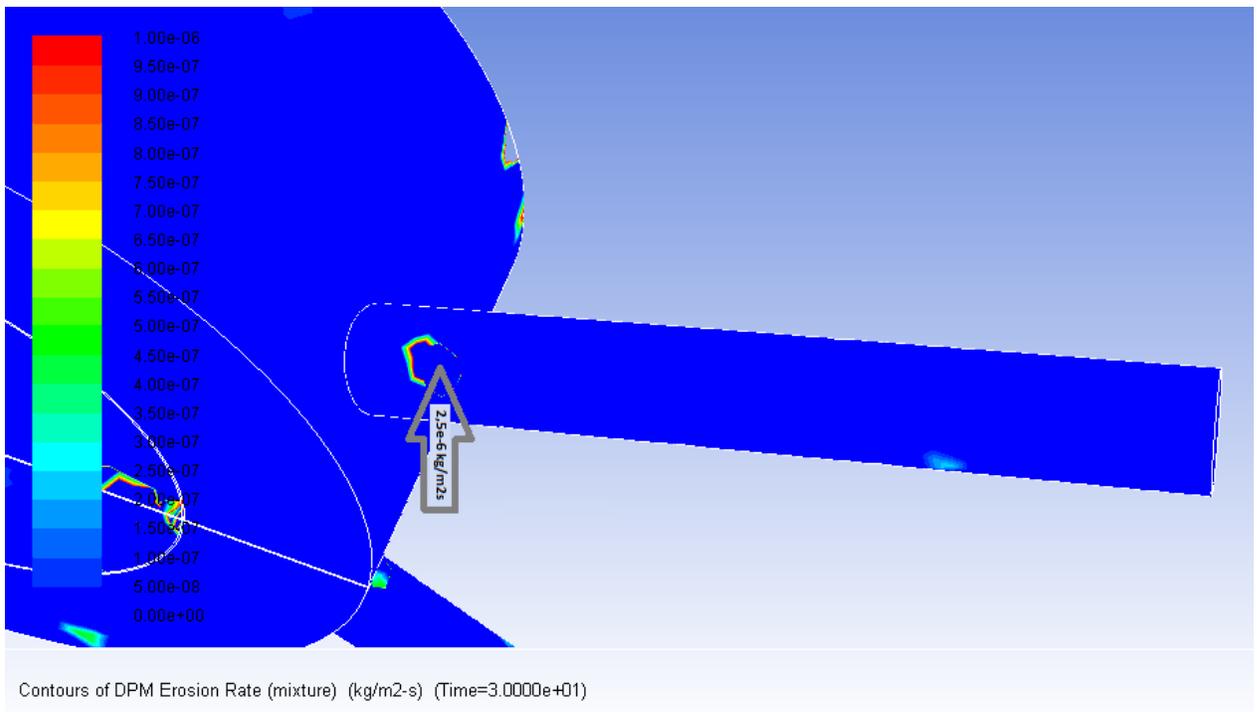


FIGURA 9.10 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M²S EN LA CAÑERÍA 2.

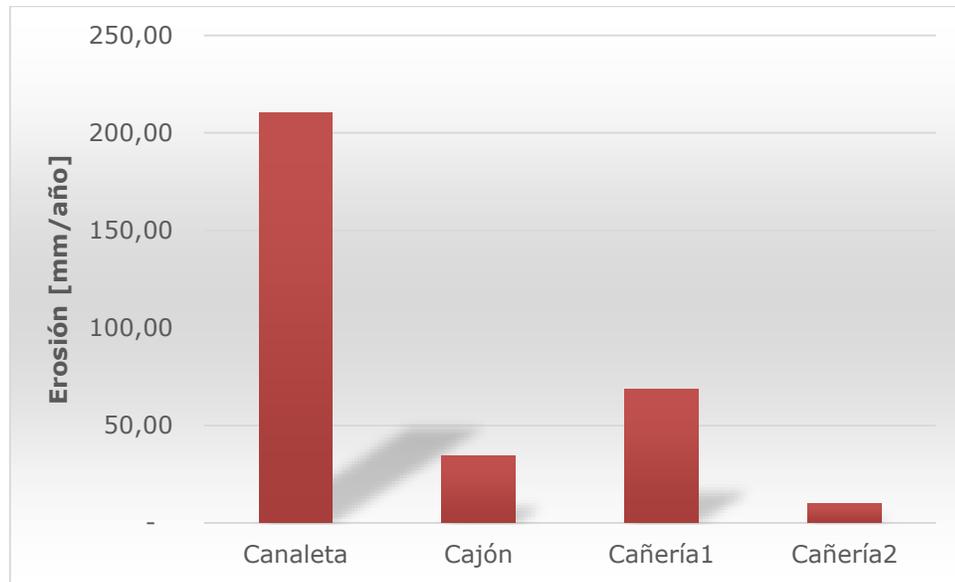


FIGURA 9.11 GRÁFICO DE EROSIÓN MÁXIMA EN LAS DIFERENTES ZONAS DEL CAJÓN DE TRANSICIÓN, PARA UN RELAVE CON Cp 35%.

9.2.1.2. Cp 45%

Como se puede apreciar en la Figura 9.12, Figura 9.13, Figura 9.14 y Figura 9.15 las mayores erosiones se encuentran en el cajón de relave, alcanzando erosiones de 1×10^{-5} [kg/(m² s)], la canaleta de entrada presentan mayores desgastes que la cañería, pero no es mucha la diferencia, como se aprecia en la Figura 9.16.

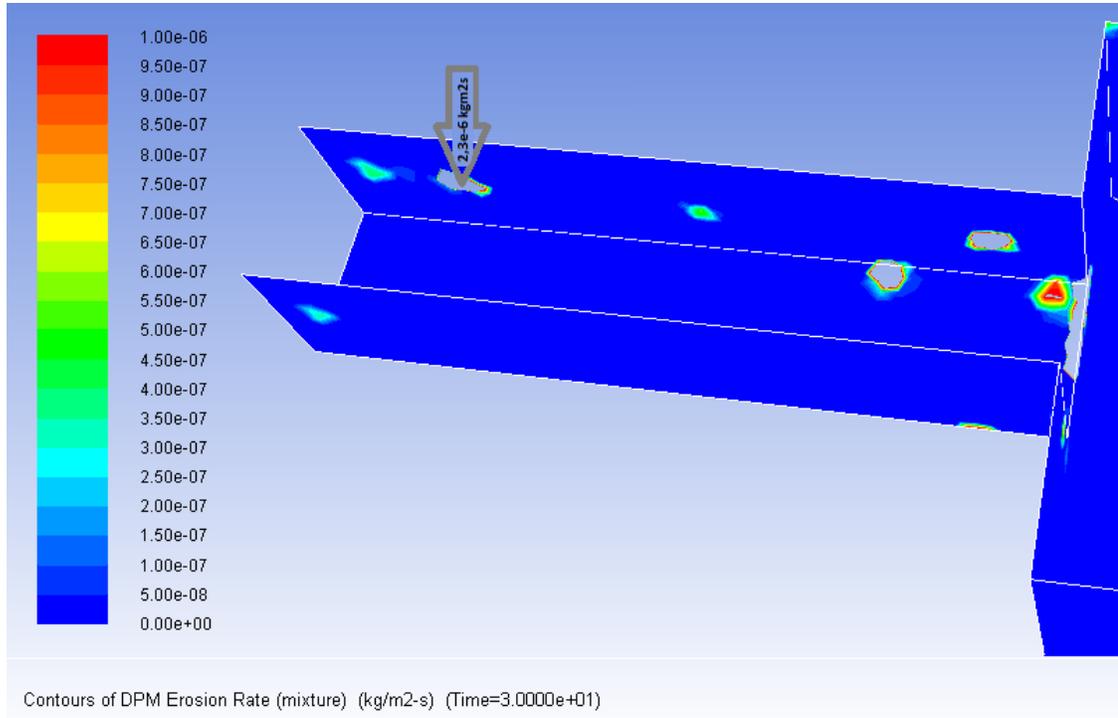


FIGURA 9.12 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M² S EN LA CANALETA DE ENTRADA

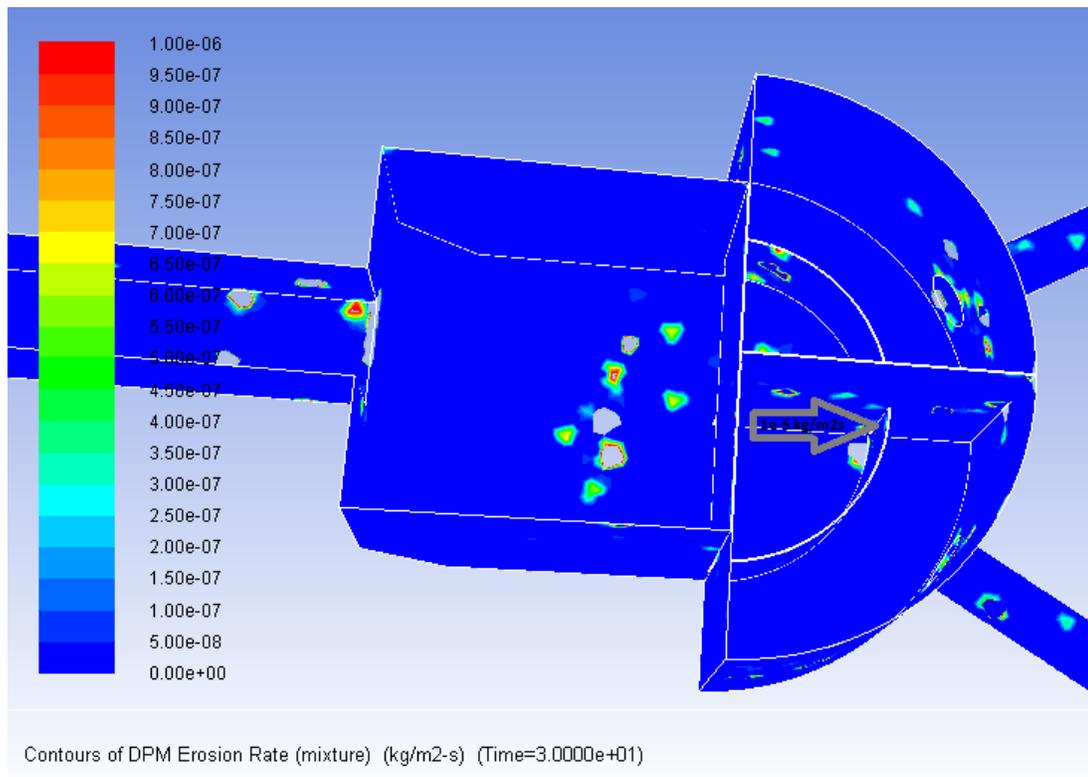
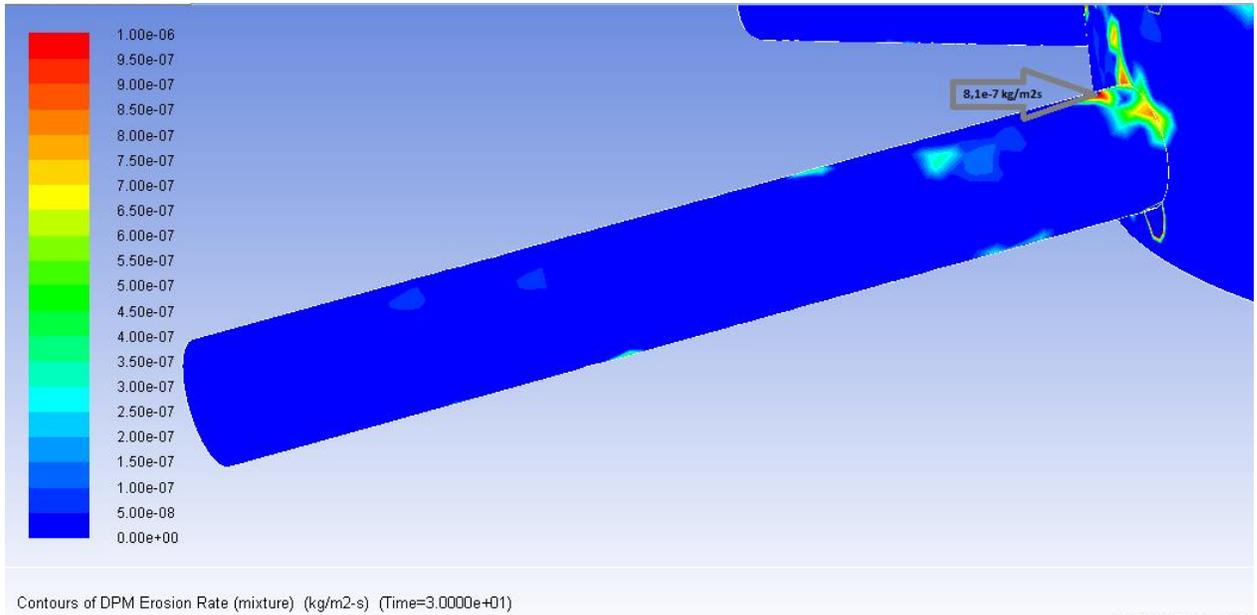


FIGURA 9.13 VISTA INTERIOR DE EROSIÓN EN KG/M² S EN EL CAJÓN DE RELAVE.



ANSYS Fluent 14.5

FIGURA 9.14 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M²S EN LA CAÑERÍA 1.

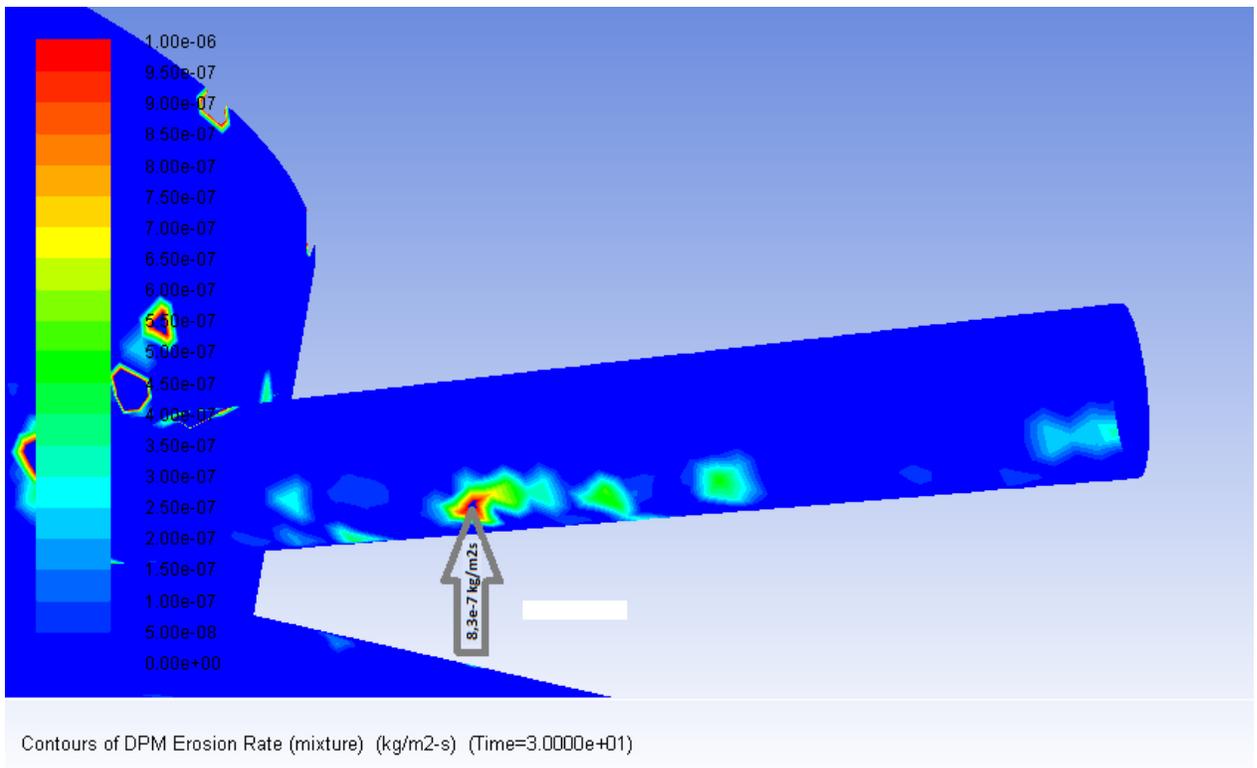


FIGURA 9.15 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M²S EN LA CAÑERÍA 2.

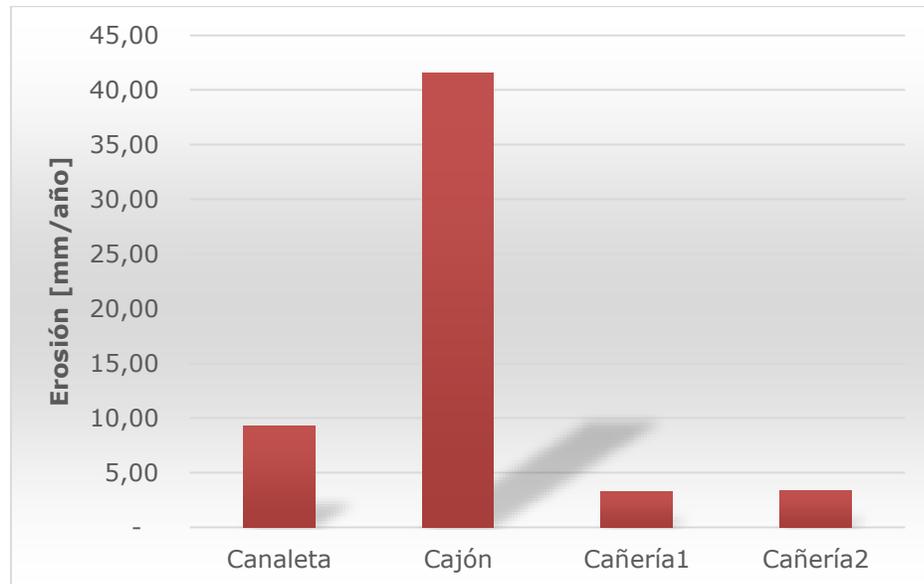


FIGURA 9.16 GRÁFICO DE EROSIÓN MÁXIMA EN LAS DIFERENTES ZONAS DEL CAJÓN DE TRANSICIÓN, PARA UN RELAVE CON CP 45%.

9.2.1.3. Cp 50%

Analizando las figuras mostradas a continuación, la zona del cajón es la que presenta mayor desgaste, con una erosión de 38,41 [mm/año]. Las zonas de canaleta de entrada y cañerías de salida no tienen mucho desgaste, con un máximo de 5 [mm/año] aprox.

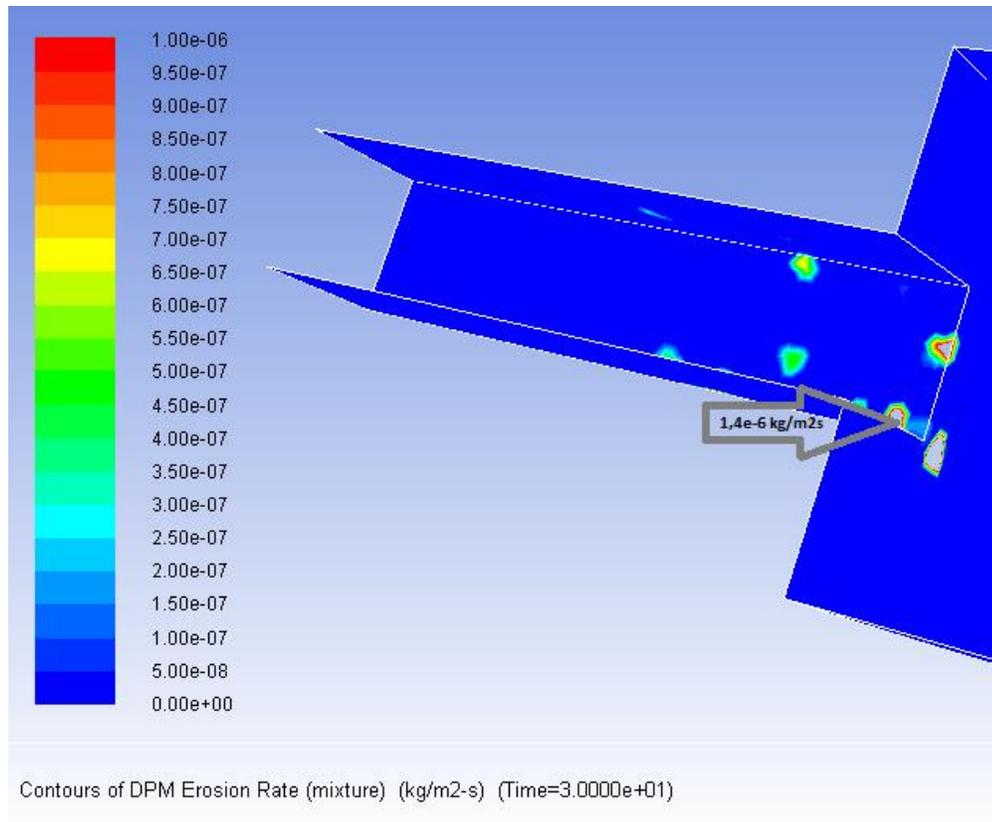


FIGURA 9.17 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M² S EN LA CANALETA DE ENTRADA

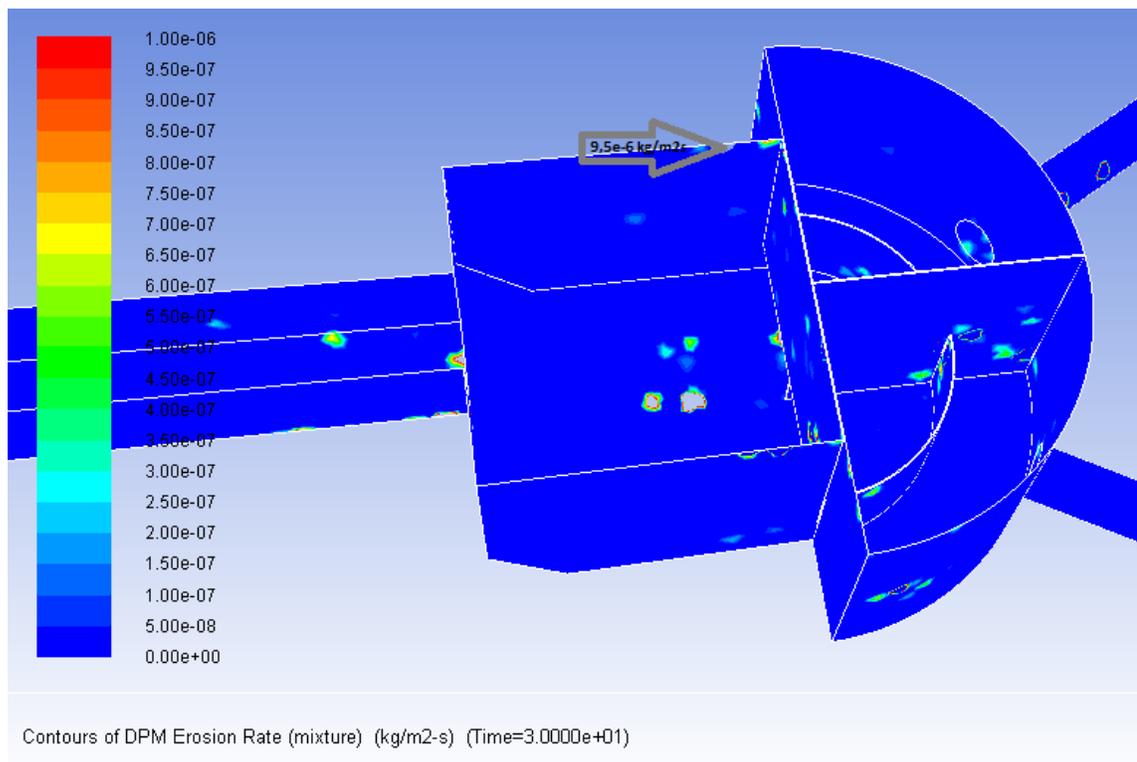


FIGURA 9.18 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M² S EN EL CAJÓN DE RELAVE.

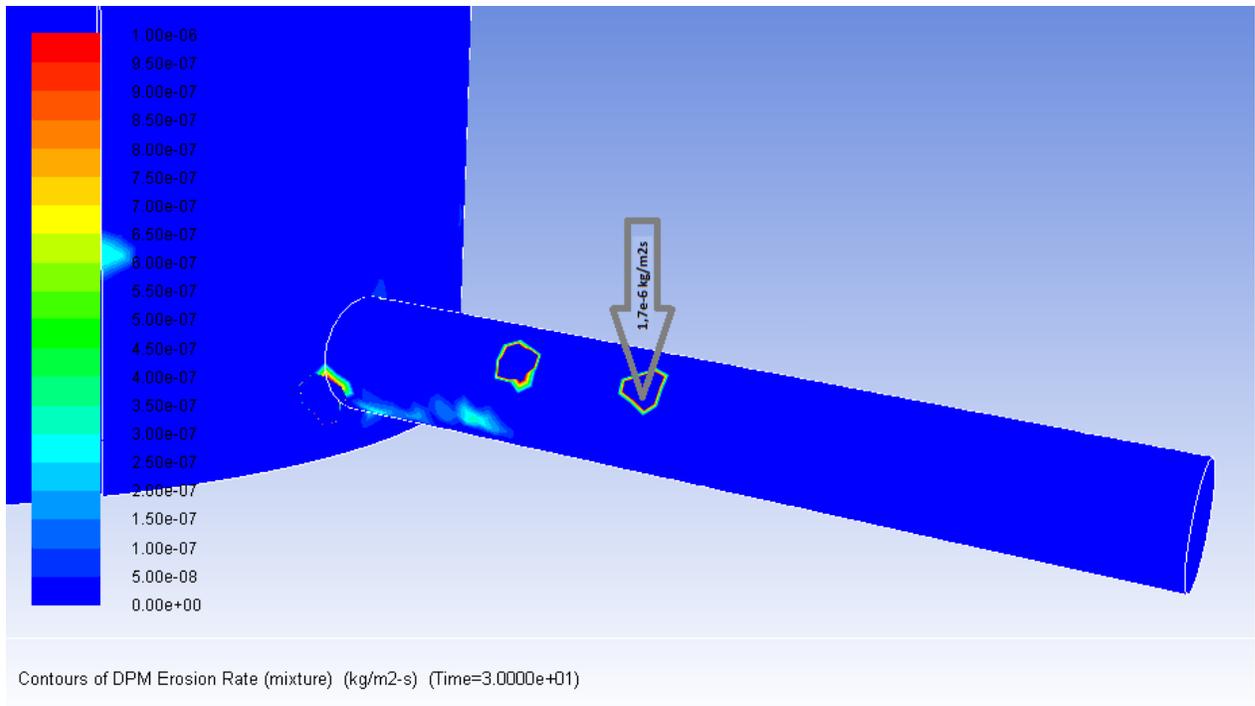


FIGURA 9.19 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M² S EN LA CAÑERÍA 1.

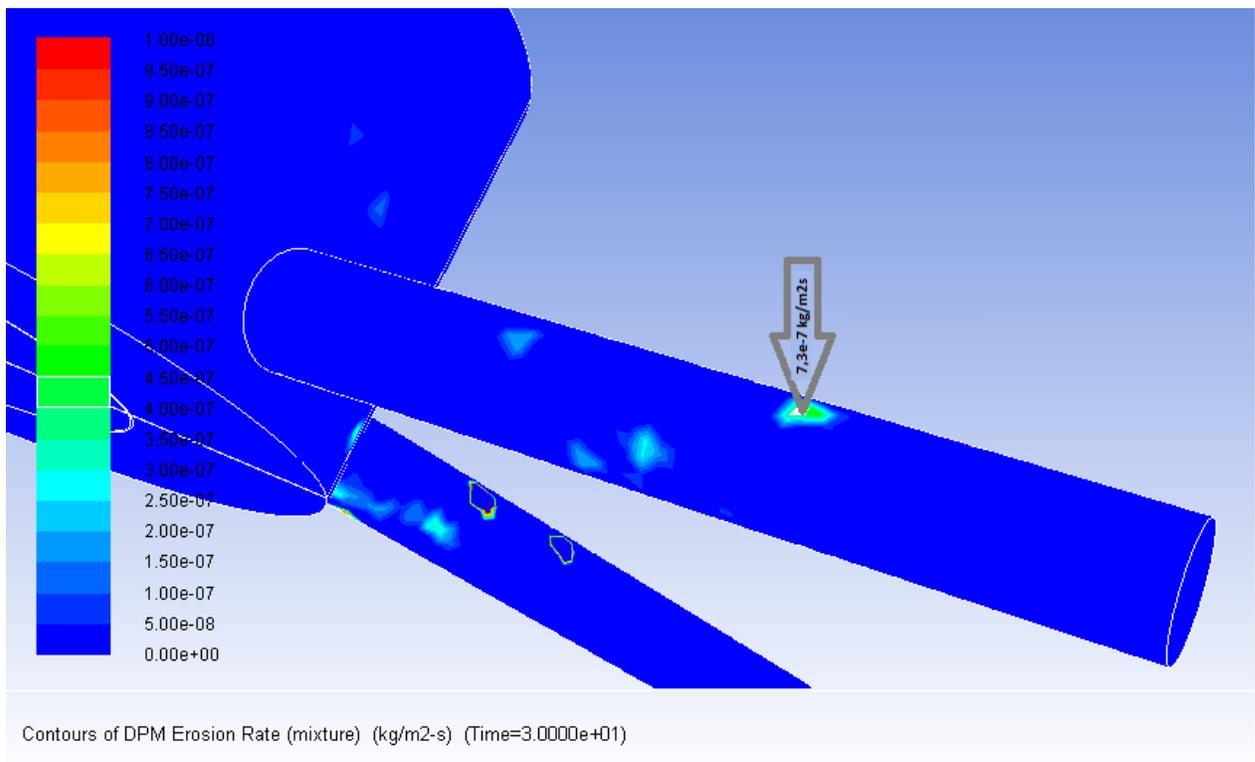


FIGURA 9.20 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M² S EN LA CAÑERÍA 1.

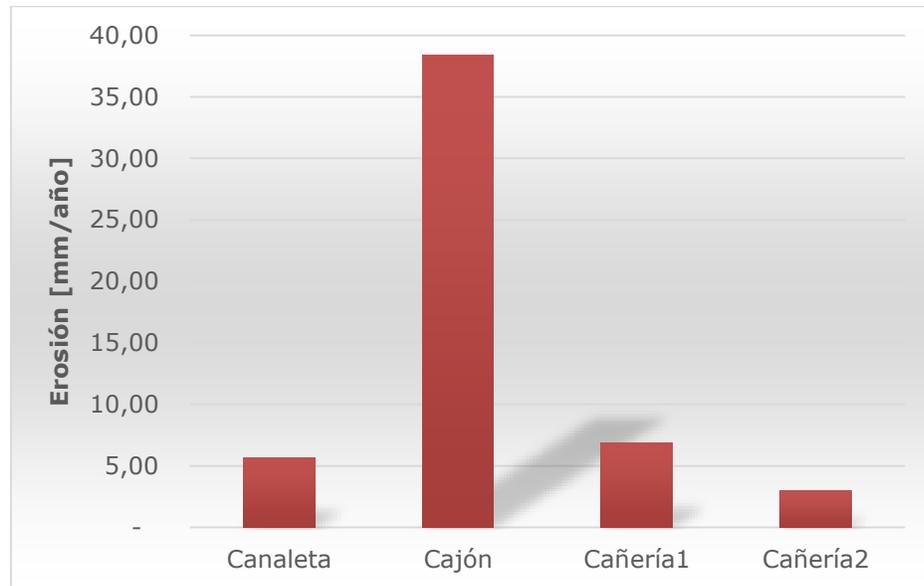


FIGURA 9.21 GRÁFICO DE EROSIÓN MÁXIMA EN LAS DIFERENTES ZONAS DEL CAJÓN DE TRANSICIÓN, PARA UN RELAVE CON Cp 50%.

9.2.1.4. Cp 55%

En la Figura 9.22, Figura 9.23, Figura 9.24 y Figura 9.25 se muestra la erosión en el cajón de transición. El mayor desgaste lo tiene el cajón, aunque en las cuatro zonas la erosión máxima es bastante cercana, alrededor de los 9 [mm/año].

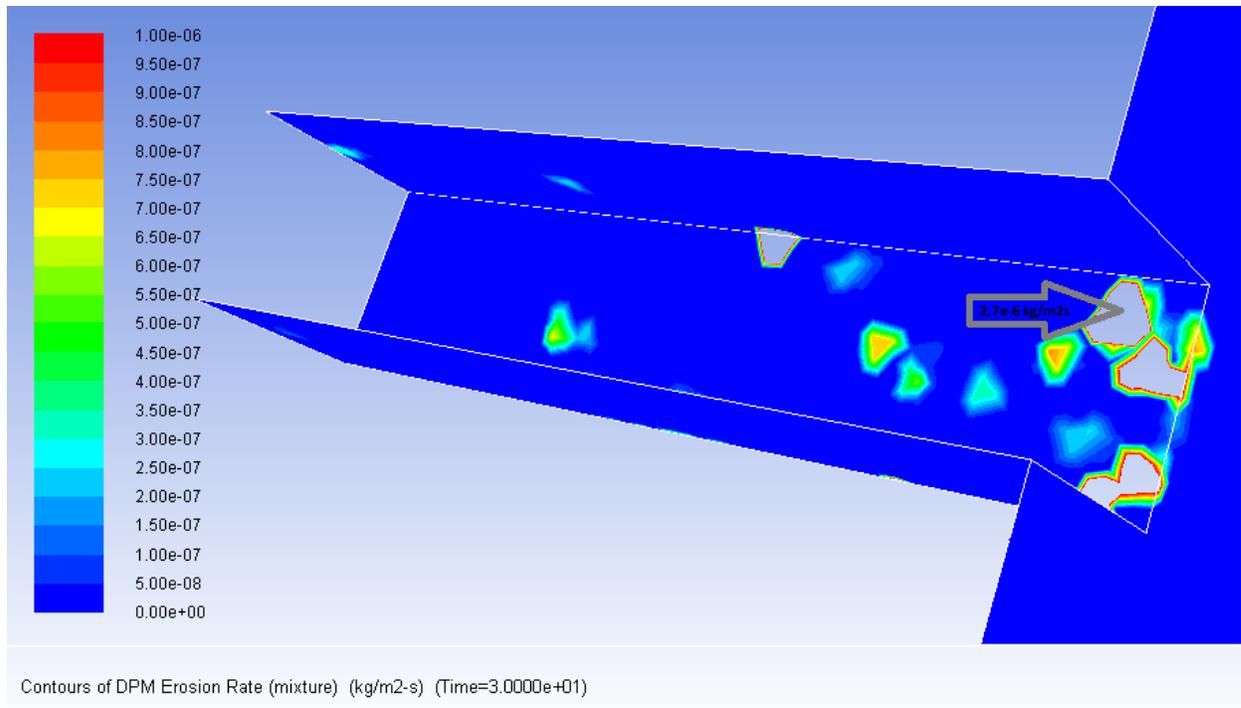


FIGURA 9.22 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M² S EN LA CANALETA DE ENTRADA

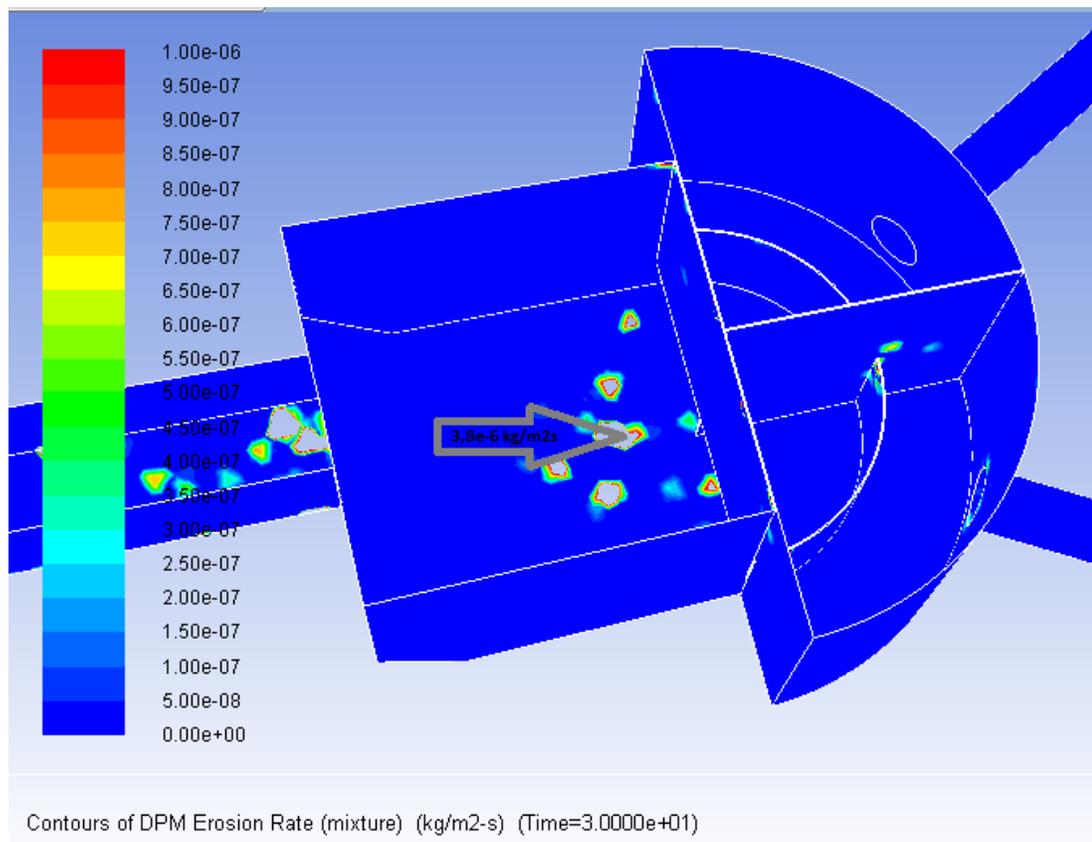


FIGURA 9.23 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M² S EN EL CAJÓN DE RELAVE.

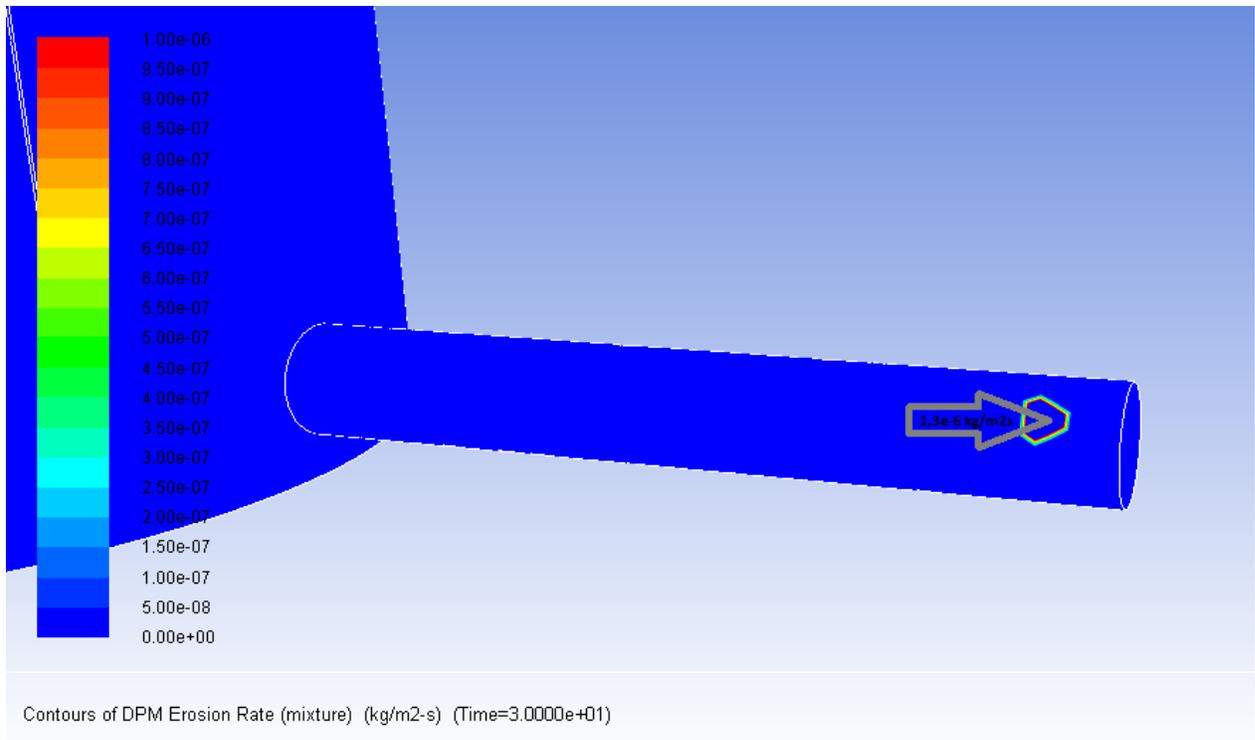


FIGURA 9.24 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M² S EN LA CAÑERÍA 1.

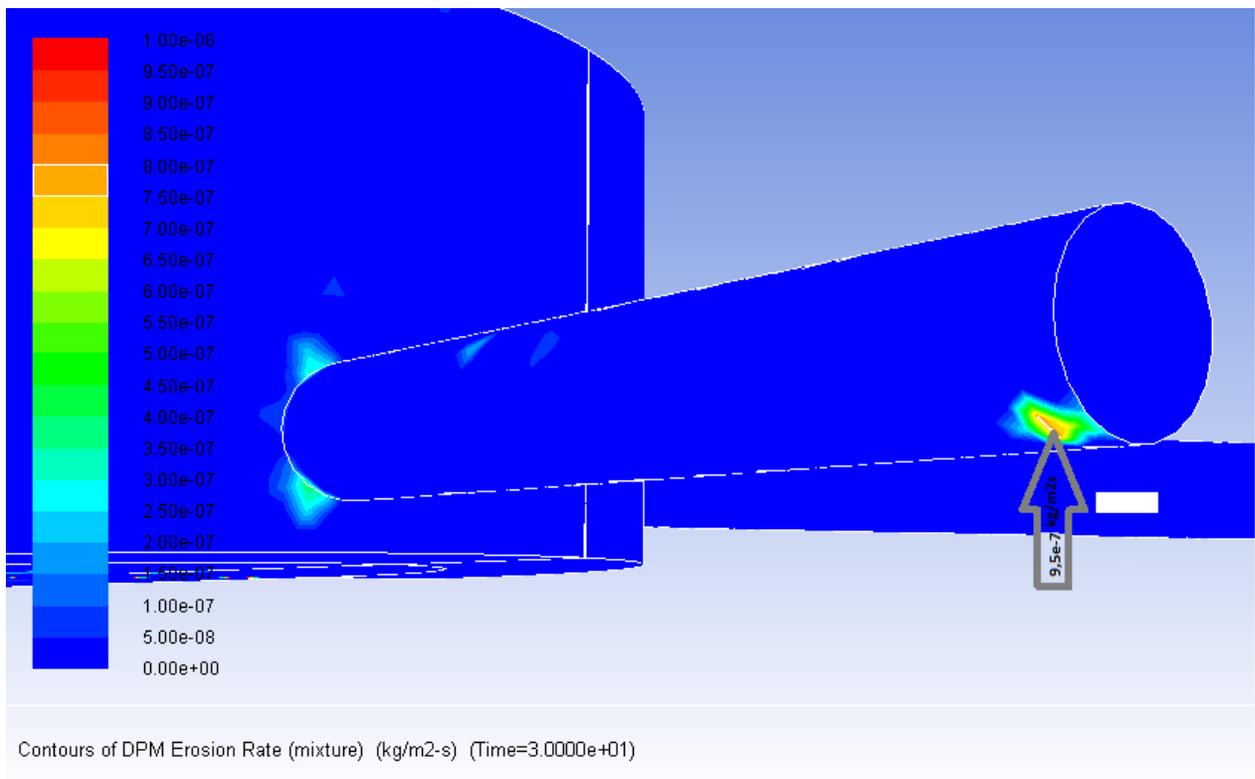


FIGURA 9.25 EROSIÓN MÁXIMA EN KG/M² S EN LA CAÑERÍA 2.

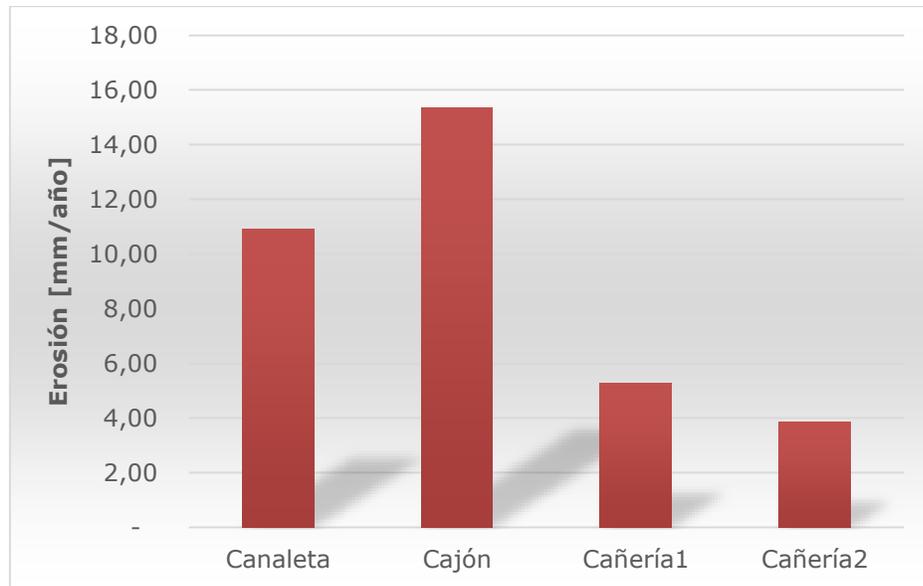


FIGURA 9.26 GRÁFICO DE EROSIÓN MÁXIMA EN LAS DIFERENTES ZONAS DEL CAJÓN DE TRANSICIÓN, PARA UN RELAVE CON CP 55%.

9.2.1.5. Comparación

En la Figura 9.27, se muestra la erosión promedio en el cajón, para los diferentes casos estudiados. Para obtener la erosión promedio, en “Reports” se debe seleccionar “Surface Integrals”, luego en el tipo de reporte se elige “Area-Weighted Average”, seleccionando la variable de erosión de la fase discreta, y por último se selecciona la superficie “wall-solid”.

Se puede notar del gráfico que se tiene una erosión máxima promedio con una concentración en peso del 45%, o sea, al pasar a plástico de Bingham. Luego la erosión va disminuyendo a medida que aumenta la concentración, se cree que esto ocurre debido a que a medida que aumenta la concentración, disminuye la velocidad del relave, lo que produce menos erosión.

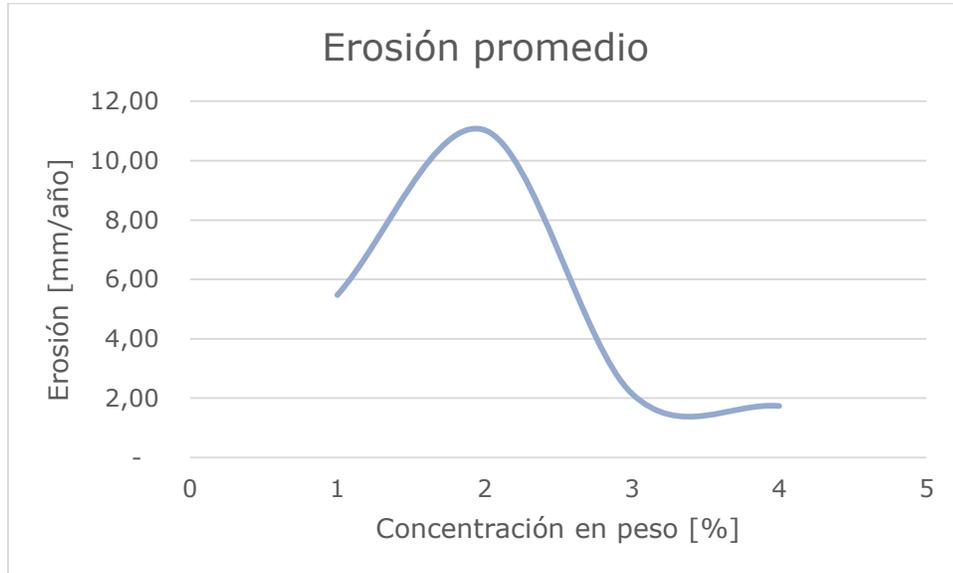


FIGURA 9.27 GRÁFICO QUE MUESTRA LA EROSIÓN PROMEDIO ALCANZADA EN EL CAJÓN DE TRANSICIÓN, PARA LAS DIFERENTES CONCENTRACIONES EN PESO.

10. CONCLUSIONES

Es importante mencionar que los resultados obtenidos se hicieron en base a los datos de muestras de relave de la minera Codelco entregados por [7], en donde la fracción máxima de empaquetamiento es 0,35; esto implica que no se pueden obtener concentraciones volumétricas mayores al 35% (concentración en peso de 58,3% aprox.), por lo que si se desea obtener resultados de relaves con mayores concentraciones, se debe aumentar la fracción de empaquetamiento, aumentando el grosor de las partículas.

A continuación se exponen las principales conclusiones de esta memoria.

- Se logró simular el fluir del relave de alta concentración en peso a través de un cajón de transición diseñado hidráulicamente, en el software ANSYS Fluent. Se pudo corroborar la validez de los resultados numéricos, al comparar las velocidades obtenidas en la canaleta de entrada con las velocidades teóricas calculadas para los diferentes casos. A medida que aumenta la concentración en peso, se va perdiendo precisión en los resultados, pero dentro de valores cercanos a lo esperado, lo que indica que el software ANSYS Fluent es una herramienta confiable para la simulación de fluidos
- Para poder modelar el relave de alta concentración como plástico de Bingham, se necesita utilizar el modelo viscoso laminar, ya que el modelo de turbulencia k- ϵ no incluye el modelo de Herschel-Bulkley para plásticos de Bingham. Para validar el uso del modelo laminar, se hizo una comparación entre los resultados obtenidos para flujo turbulento v/s flujo laminar para una misma concentración de 35% en peso. En ambos casos se tuvieron resultados similares de velocidades y caudales, lo que justifica el uso del modelo viscoso laminar para la simulación del fluir del relave.
- Dentro de los datos obtenidos se puede destacar que a medida que aumenta la concentración en peso, disminuye la velocidad del relave. Al aumentar la concentración, aumenta el esfuerzo de corte en el cajón.
- Haciendo un estudio de deposición de relave para las tres zonas críticas del cajón, que son la canaleta de entrada, la zona de la esclusa y la cañería de salida, se obtuvo que para las 4 concentraciones, no se tiene obstrucción del relave, o sea, que las velocidades alcanzadas por el fluido son suficientes para permitir una turbulencia que evite la segregación del relave.
- Además se hizo un análisis de sedimentación en las zonas de baja velocidad del relave, donde se comprobó que tampoco se tiene sedimentación en estas zonas. En el caso del relave con concentración en peso de 35%, las partículas tienen régimen turbulento, y para los demás casos el régimen de las partículas es laminar.

- El modelo de fase discreta no es representativo del comportamiento del relave en el cajón de transición, entregando valores de partículas retenidas muy altas, que no concuerdan con los resultados antes obtenidos.
- El cálculo de la erosión resultó ser muy útil para medir el desgaste en el cajón, donde se obtuvo un desgaste máximo de 210[mm/año] en la canaleta de entrada para el relave con C_p de 35%. Luego los valores máximos disminuyen a 12 [mm/año] aprox., lo cual es aceptable, pero si se quiere aumentar la vida útil del cajón, sería recomendable recubrir la base del cajón y la canaleta, que son las zonas que reciben mayor erosión.
- Viendo los resultados obtenidos tanto de velocidades, como sedimentación y deposición, para las diferentes concentraciones del relave, se puede comprobar el buen funcionamiento del cajón, donde el diseño hidráulico realizado, evita el desgaste acelerado y la sedimentación, esto permite seleccionar esta geometría como la adecuada dadas las condiciones de operación planteadas en la memoria.

11. BIBLIOGRAFÍA

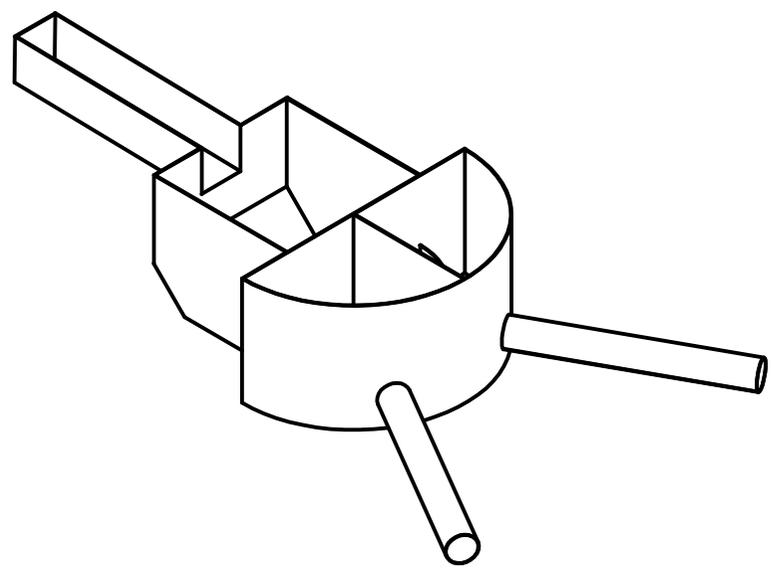
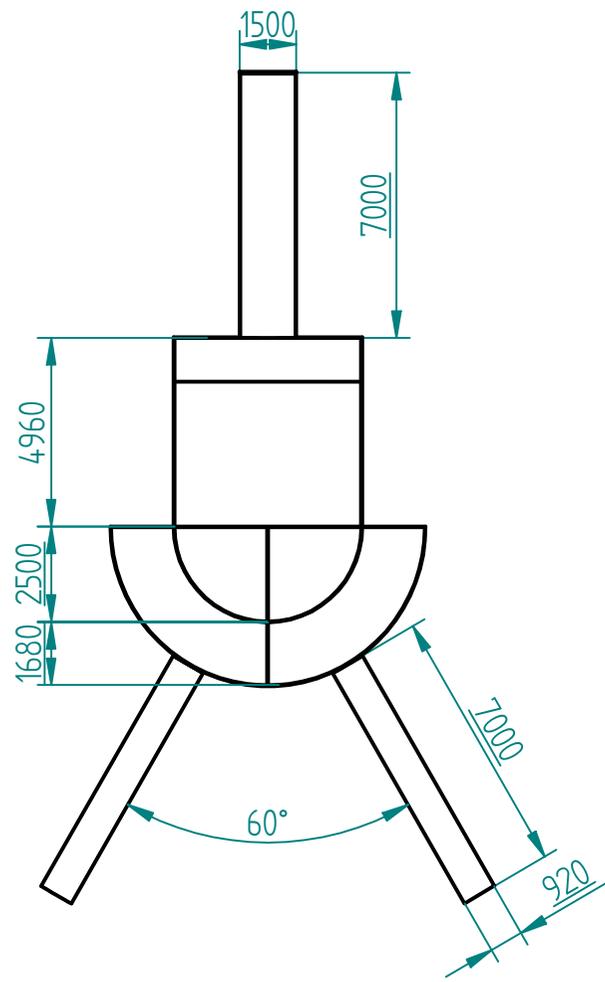
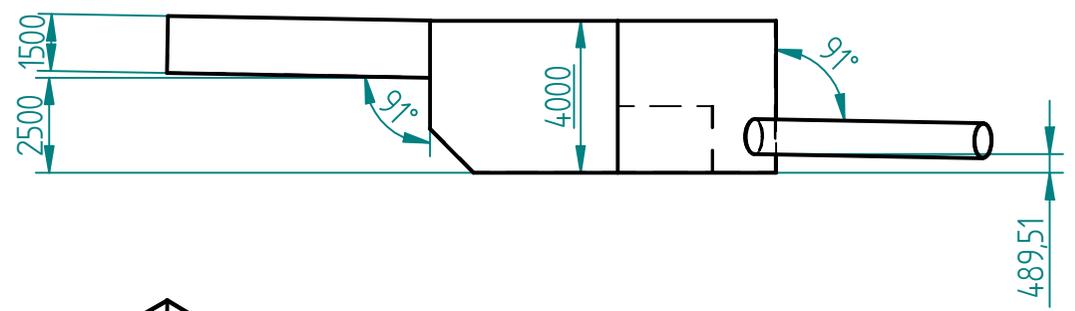
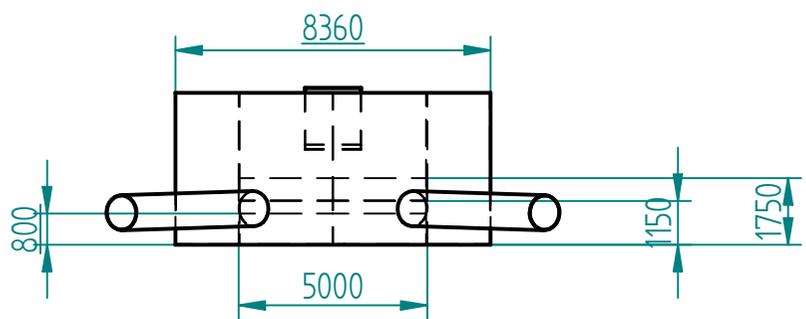
- [1] N. A. R. Morandé, «Guía técnica de control y operación de depósitos de relaves,» Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile, 2007.
- [2] I. Olivares A., «Estudio de la fluidodinámica de relaves de diferentes concentraciones en cajones de distribución,» Universidad de Chile. Facultad de Ciencias físicas y matemáticas. Departamento de ingeniería mecánica, Santiago, 2014.
- [3] R. W. Fox, A. T. McDonald y P. J. Pritchard, Introduction to fluid mechanics, USA: John Wiley & Sons, inc, 2003.
- [4] E. L. Ibarrola, «Introducción a los fluidos No-Newtonianos,» Cátedra de Mecánica de los Fluidos- UNCor, 2009.
- [5] B. Abulnaga, Slurry Systems Handbook, McGraw, Hill, 2002.
- [6] C. F. Ihle, «A cost perspective for long distance ore pipeline water and energy utilization. Part I: Optimal base values,» Department of Civil Engineering, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2002.
- [7] B. Alejo y A. Barrientos, «Model for yield stress of quartz pulps and copper tailings,» Department of Metallurgical Engineering, University of Concepción, Concepción, Chile, 2009.
- [8] P. G. Vallebuona, «Curso MI42C: Análisis de Sistemas Particulados,» 2007-semester primavera. [En línea]. Available: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/MI42C/1/material_docente/.
- [9] J. r. Prieto, «Transporte Hidráulico de Sólidos, Curso de Perfeccionamiento,» Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, Junio 1982.
- [10] R. Haldenwang, «Flow of Non-Newtonian fluids,» Department of Civil Engineering, Cape Technikon, Cape Town, South Africa, August 2003.
- [11] J. I. S.A., «CURSO DE CANALETAS,» Área hidráulica, Agosto, 2007.
- [12] F. M. White, Fluid Mechanics, 6a ed., Estados Unidos: McGraw-Hill, 2008.

- [13] H. A. Linke, «Launders,» American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, New York Meeting, 1940.
- [14] «Introduction to Multiphase Flows,» de *Multiphase Flow Modeling in ANSYS CFX*, 2014.
- [15] «Lecture 2: RANS Turbulence Models in ANSYS Fluent,» de *Turbulence Modeling Using ANSYS Fluent*, 2013.
- [16] «Lecture 2: Near-Wall Modeling & Transition Modeling,» de *Turbulence Modeling Using ANSYS Fluent*, 2013.
- [17] Á. Valencia, «Modelos Físicos y Matemáticos de Turbulencia,» ME67A Mecánica de Fluidos Computacional, Primavera-2014.
- [18] ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide, ANSYS, Inc., Abril, 2009.
- [19] P. Chacón, «Proyecto La Colosa, estudio de prefactibilidad, diseño de reservorio de agua fresca y depósito de relaves. Criterios de diseño hidráulicos para conducciones de relave y agua,» Arcadis, ANGLO GOLD ASHANTI, Santiago, 2013.
- [20] J. A. Facusse, «Análisis mediante simulación fluidodinámica computacional del flujo de relaves de minería en desgaste de cajones disipadores.,» Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Santiago, Chile, Enero, 2013.
- [21] VirginiaTech, «5.2.2. Mesh Quality,» [En línea]. Available: http://www.arc.vt.edu/ansys_help/flu_ug/flu_ug_mesh_quality.html. [Último acceso: 10 09 2014].
- [22] «ITCH: Curso Ingeniería de Calidad,» [En línea]. Available: <http://www.itch.edu.mx/academic/industrial/ingcalidad/unidad3.html>. [Último acceso: 23 12 2014].
- [23] F. Inc., «Tutorial: Using FLUENT's Erosion Model to Investigate,» 2006.

ANEXO A: PLANO DE CAJÓN DE TRANSICIÓN

REVISION HISTORY

| REV | DESCRIPTION | DATE | APPROVED |
|-----|-------------|------|----------|
| | | | |



| | | | | | | |
|---|--|------------|----------|--|----------------|-------------|
| DIBUJADO | | NOMBRE | FECHA | <p>SOLID EDGE UGS - The PLM Company</p> <p>Dimensiones de cajón de transición</p> | | |
| CHEQUEADO | | M Martínez | 11/18/14 | | | |
| ENG APPR | | | | | | |
| MGR APPR | | | | | | |
| <p>Dimensiones en milímetros, a menos que se especifique lo contrario Ángulo ±X.X° El espesor del cajón es de 20mm.</p> | | | | TAMANO | DWG NO | REV |
| | | | | A4 | | |
| | | | | NOMBRE DE ARCHIVO: cajoncañ.dft | | |
| | | | | ESCALA: 1:200 | PESO: 44800 KG | HOJA 1 DE 1 |