



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

**EFFECTO DE CURVAS EN CANALES ABIERTOS SOBRE EL FLUJO DE
RELAVES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

LARS ANDERS NIELSEN ISLA

PROFESOR GUÍA:

ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ
ALEJANDRO ORTIZ BERNANDIN

SANTIAGO DE CHILE

2014

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico
POR: Lars Anders Nielsen Isla
FECHA: 05/09/2014
PROFESOR GUÍA: Álvaro Valencia Musalem

EFFECTO DE CURVAS EN CANALES ABIERTOS SOBRE EL FLUJO DE RELAVES

En la industria minera muchas veces se requiere transportar fluidos a través de grandes distancias, fluidos que tienen una fase líquida (generalmente agua) y una fase sólida.

Los canales abiertos o canaletas son bastante utilizados para el transporte de relaves debido a su mayor facilidad para la inspección y mantención. Por este motivo, es importante estudiar el impacto que tienen las curvas en el transporte de relaves y como mejorar el diseño a través del estudio del comportamiento del fluido en éstas.

En el presente trabajo se estudia el comportamiento del flujo en canaletas en presencia de curvas y el desgaste producido en ellas debido a las características abrasivas de los relaves, a través de un software CFD (Computational Fluid Dynamics).

Para esto se comparan canaletas con distintos radios de curvatura, para analizar la influencia de este parámetro sobre la altura máxima de escurrimiento y la tasa de erosión producida en las paredes de la canaleta.

Las simulaciones se llevan a cabo en tres etapas. En primer lugar se efectúa una simulación bifásica para obtener una solución fluidodinámica del problema. Luego a través de una inyección de partículas se puede apreciar la trayectoria de éstas. Finalmente se calcula a través de la simulación, la tasa de desgaste producida en las paredes de la canaleta.

El análisis de resultados se realiza para cada canaleta en particular, para posteriormente comparar los resultados entre ellas, analizando así las semejanzas o diferencias que existan entre cada uno de los casos.

Finalmente se concluye sobre la influencia del radio de curvatura sobre las variables de interés y se plantean recomendaciones para trabajos futuros.

Agradecimientos

A mi familia, mis padres, Christian y María Loreto, y mi hermano Sven por la infinita paciencia y las enseñanzas a lo largo de este importante proceso.

A Elena por el apoyo incondicional, por siempre estar a mi lado, sobre todo en los momentos complejos y por compartir las alegrías del día a día. Sin ti, no lo hubiese logrado.

A mis amigos, por las experiencias vividas durante todos estos años, haciendo de esta etapa, una más de las que compartiremos juntos.

A mi profesor guía, Álvaro Valencia, por su buena disposición en el desarrollo de este trabajo, su constante ayuda y conocimientos entregados sin esperar nada a cambio.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Motivación	1
1.2	Alcances.....	1
1.3	Objetivos	2
2	Antecedentes.....	3
2.1	Clasificación de fluidos y flujos.....	3
2.2	Caracterización de Pulpa	6
2.3	Transporte en Canales Abiertos.....	6
2.4	Ecuaciones para definición de canales	8
2.5	Tasa de Desgaste	10
2.6	Curvas en Canaletas.....	11
3	Modelos	13
3.1	Modelo Multifásico.....	13
3.2	Modelo de Partículas.....	15
3.3	Modelos de Turbulencia	16
3.4	Modelo de Erosión	17
4	Metodología.....	18
4.1	Definición de parámetros	19
4.2	Geometría	21
4.3	Mallado.....	23
4.4	Metodología Computacional.....	25
5	Resultados.....	30
5.1	Fluidodinámicos	30
5.2	Turbulencia	61

5.3	Trayectoria de Partículas	62
5.4	Erosión	64
6	Análisis de Resultados.....	68
6.1	Fluidodinámica	68
6.2	Erosión	71
7	Conclusiones y Recomendaciones.....	74
8	Bibliografía.....	75

1 Introducción

1.1 Motivación

En la industria minera muchas veces se requiere transportar fluidos a través de grandes distancias. Por ejemplo, el transporte desde la mina hasta el puerto de concentrado de mineral o de los desechos (relaves) del proceso. En estos casos el fluido transportado tiene una fase líquida (generalmente agua) y una fase sólida.

Los canales abiertos o canaletas son bastante utilizados para el transporte de relaves debido a su mayor facilidad para la inspección y mantención, además del hecho que las conducciones son gravitacionales y no necesitan de equipos de bombeo para la conducción.

Como generalmente en Chile, las plantas procesadoras de mineral se encuentran en zonas montañosas, las pendientes son favorables para el uso de canaletas. Aun así, la geografía hace que generalmente se necesiten cambios de dirección en el transporte, ya sea para evitar grandes pendientes como también para adaptarse al terreno.

Por este motivo, es importante estudiar el impacto que tienen las curvas en el transporte de relaves y como mejorar el diseño a través del estudio del comportamiento del fluido en éstas. Estos estudios tienen como fin de evitar rebases o desgaste acelerado debido a las propiedades altamente abrasivas del concentrado.

En el presente trabajo se realiza un estudio mediante simulación fluidodinámica computacional (CFD) para observar y concluir sobre el comportamiento del fluido frente a una curvatura en canales abiertos.

1.2 Alcances

El presente estudio se limita a canaletas con geometría rectangular, para la cual se modelan un número limitado de casos donde el parámetro variable es el radio de curvatura de la canaleta. En cuanto a los datos utilizados para caracterizar el relave, serán datos generales, no teniéndose datos específicos de algún relave en particular.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Generales

- Analizar el efecto de curvas en canales abiertos sobre el flujo de relaves utilizando simulación fluidodinámica computacional.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar el flujo de relave a través de un canal abierto con una curva para distintos radios de curvatura utilizando simulaciones CFD (Dinámica de Fluidos Computacional).
- Analizar la altura de escurrimiento y la tasa de erosión en cada uno de los casos para determinar la influencia del radio de curvatura en éstas variables.

2 Antecedentes

2.1 Clasificación de fluidos y flujos

Existen diferentes clasificaciones para los fluidos y flujos que transportan partículas. Para el presente trabajo serán importantes las siguientes clasificaciones:

- Según comportamiento reológico.
- Según número de Reynolds
- Según distribución de las partículas
- Según su estabilidad

2.1.1 Según reología

Un fluido puede ser clasificado como newtoniano o no-newtoniano dependiendo de su comportamiento reológico. Aquí el factor determinante para clasificar el fluido es su viscosidad. La viscosidad se define como la oposición de un fluido a la deformación frente a un esfuerzo de corte. ^[6]

Un fluido es newtoniano si su viscosidad es constante en el tiempo y no depende de su velocidad de deformación.

Para los fluidos no-newtonianos su viscosidad es variable en el tiempo y dependiendo de su relación con la velocidad de deformación se pueden clasificar en plásticos, pseudoplásticos y dilatantes. En la Figura 2.1 (a) se observan las curvas de cada uno de los fluidos anteriormente descritos en un gráfico esfuerzo de corte versus gradiente de velocidad de deformación. En la Figura 2.1 (b) el gráfico muestra la viscosidad dinámica aparente versus el gradiente de velocidad de deformación.

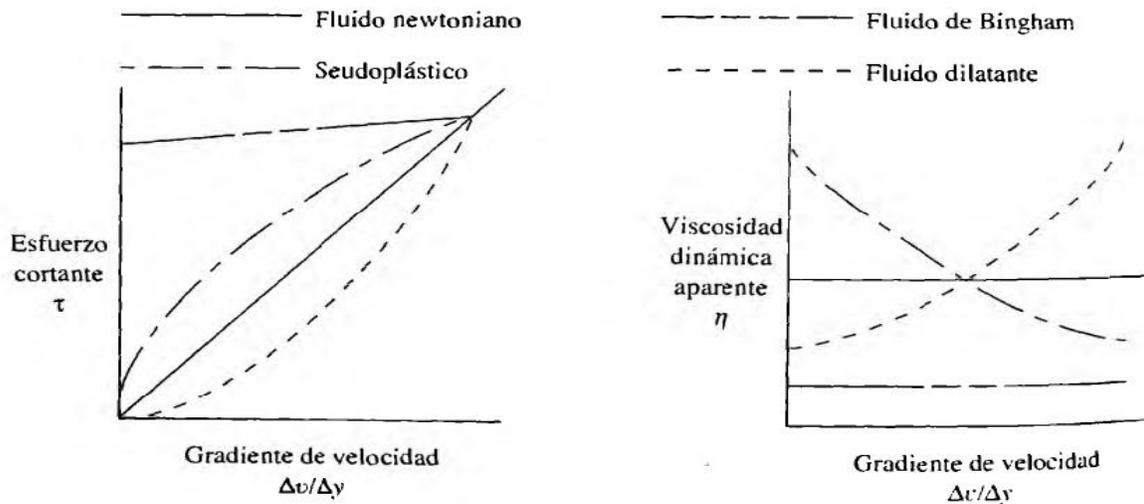


Figura 2.1 Fluidos Newtonianos y no-newtonianos

2.1.2 Según número de Reynolds

El número de Reynolds es un parámetro adimensional de los flujos que caracteriza el movimiento de éstos. Basados en este parámetro los flujos son clasificados como laminares, turbulentos o en transición entre laminar y turbulento.

El número de Reynolds para fluidos newtonianos se calcula como sigue:

$$Re = \frac{v D_h}{\mu} \quad (2.1)$$

Donde:

Re : Número de Reynolds

D_h : Diámetro hidráulico (D para tuberías y R_h para canaletas)

μ : Viscosidad

R_h : Radio hidráulico

En canaletas el radio hidráulico está dado por el cociente entre la sección que atraviesa el fluido y su perímetro mojado.^[2]

Un flujo en canaleta se clasifica como laminar si su número de Reynolds es menor a 500 y turbulento si su número de Reynolds es superior a 2000.^[1]

2.1.3 Según distribución de las partículas transportadas

Dependiendo del tamaño de las partículas transportadas y la velocidad del flujo, se pueden clasificar los flujos en homogéneos, heterogéneos, de lecho móvil y de lecho fijo.

Mientras más grandes sean las partículas y menor la velocidad habrá una mayor sedimentación, lo que llevará a una mayor concentración de partículas en el fondo del canal en el caso de este estudio. Por el contrario mientras más finas sean las partículas y mayor sea la velocidad, las partículas se desplazarán a la misma velocidad que el fluido, manteniendo una concentración uniforme a lo alto y ancho de la sección del canal. En la Figura 2.2 se observa un gráfico donde se ven representadas las zonas en función del tamaño de partícula y la velocidad media del fluido.

El flujo de pulpa en canaletas se mueve entre las zonas de fluidos heterogéneos, cuando la molienda realizada deja partículas muy finas, y flujo con lecho móvil.

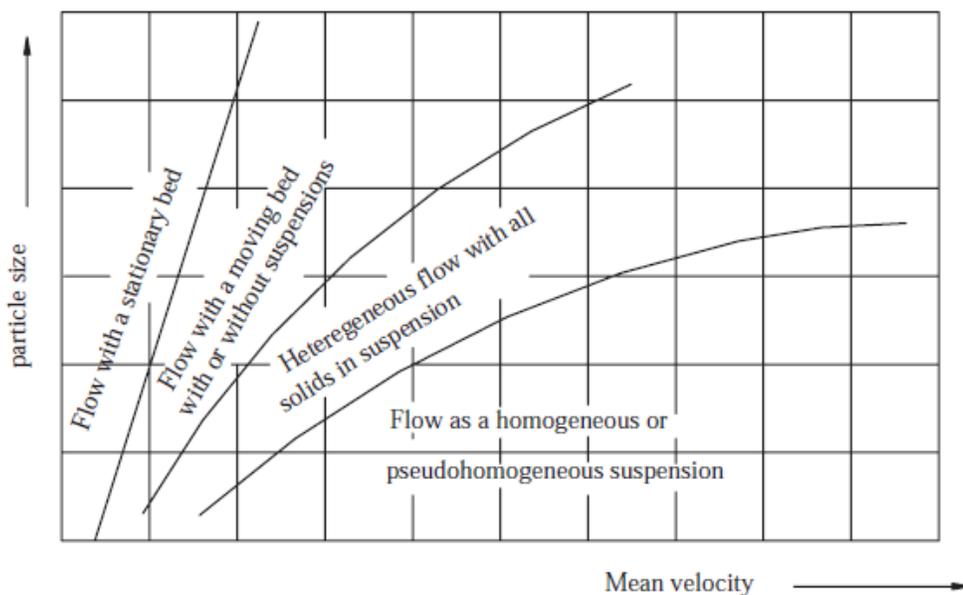


Figura 2.2 Tipos de flujo en función de su velocidad y el tamaño de partículas

2.1.4 Según estabilidad

Una de las formas de medir la estabilidad de un fluido es a través del número de Froude (F_r). Este número adimensional relaciona las fuerzas inerciales de un fluido con las fuerzas de gravedad.

$$F_r = \sqrt{\frac{v^2 T}{g A}} \quad (2.2)$$

Donde:

v : Velocidad del fluido [m/s]
 T : Ancho de la superficie libre [m]
 g : Aceleración de gravedad [m/s²]
 A : Sección del canal abierto [m²]

Si $F_r < 1$ el fluido es subcrítico, si $F_r = 1$ el fluido es crítico y si $F_r > 1$, es supercrítico. Para el transporte de pulpa en canaletas el fluido debe ser supercrítico para evitar la aparición de ondas superficiales e inestabilidades que se generan en las cercanías de puntos críticos o crisis. Se recomienda un $F_r > 1.1$.

La importancia que tiene que el flujo sea supercrítico es el hecho de que en esta condición perturbaciones que se produzcan aguas abajo, no afectarán el flujo aguas arriba. ^[1]

2.2 Caracterización de Pulpa

Para la caracterización de cualquier fluido son necesarios varios parámetros como pueden ser su viscosidad y su densidad. Para el caso de relaves, por el hecho de tener una fase líquida y una fase sólida, son necesarios bastantes parámetros más para que el fluido quede caracterizado. Como mínimo se deben especificar los siguientes parámetros:

- Concentración en masa C_m
- Concentración en volumen C_v
- Densidad media ρ_m
- Densidad relativa ρ_r
- Viscosidad μ

2.3 Transporte en Canales Abiertos

El transporte en canales abiertos se realiza desde hace muchos años y tiene un sinnúmero de utilidades en distintos ámbitos como la minería, la agricultura o el alcantarillado. Su gran diferencia con el transporte por tuberías es que el

transporte se realiza a presión atmosférica debido a que consta de una superficie libre. Por lo mismo el transporte por canales abiertos es una conducción gravitacional en que debe existir una pendiente favorable para poder realizarla, solo en tramos cortos podrían haber pendientes adversas.

Los canales abiertos pueden tener distintas geometrías e incluso ser parte de la naturaleza como son los ríos, por ejemplo. En la Figura 2.3 se muestran las geometrías típicamente utilizadas, las cuales son (a) rectangular, (b) trapezoidal, (c) circular e (d) irregular. ^[1]

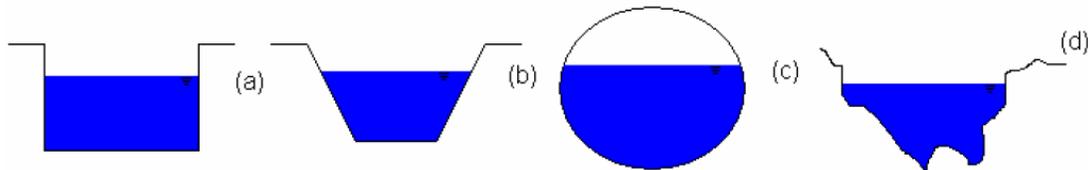


Figura 2.3 Geometrías típicamente utilizadas en el diseño de canales abiertos

Es de vital importancia en el diseño de un canal abierto la definición de radio hidráulico R_h .

$$R_h = \frac{A}{PM} \quad (2.3)$$

Donde:

A: sección transversal del canal abierto.

PM: Perímetro mojado.

El perímetro mojado de una canaleta corresponde al contorno de la sección de escurrimiento sin contar la superficie libre.

Una de las ventajas que tiene el transporte por canaletas es que la inspección, detección y mantención se realiza de manera más fácil que en el transporte por tuberías. Por el contrario, cuando se requiere de cambios en los parámetros operacionales, el transporte por tuberías se adecúa mejor. Materiales utilizados en la construcción de canales pueden ser el concreto, acero o bien materiales plásticos dependiendo de la función asignada y el fluido a transportar.

En general, los cambios de dirección en canaletas se realizan mediante cajones de traspaso o cámaras de inspección, en los cuales se aprovecha de disipar además la energía si el transporte es a gran velocidad. Se utilizan curvas solamente para cambios de dirección suaves, con el fin de evitar un desgaste acelerado de la canaleta. Por el mismo motivo, se utilizan pendientes no muy pronunciadas.

En la Figura 2.4 se observa una canaleta rectangular de la industria minera.



Figura 2.4 Ejemplo de una canaleta en la industria minera

2.4 Ecuaciones para definición de canales

Basada en la fórmula de Chezy, Manning plantea una fórmula para calcular la velocidad en canales abiertos.

$$V_h = \frac{1}{n} * R_h^{2/3} * \sqrt{i} \quad (2.4)$$

Donde:

n : Coeficiente de Manning.

i : Pendiente de la canaleta.

Se recomiendan pendientes en torno al 1% para el transporte de pulpa y no inferiores a 0,5%.

En la Tabla 2-1 se observan algunos coeficientes de rugosidad de Manning recomendados para el diseño de canales abiertos.

Tabla 2-1 Coeficientes de rugosidad de Manning [2]

Material	Coficiente de Manning
Acero	0,012
Metal Corrugado	0,025
Concreto	0,013
Madera	0,012
Polietileno de alta densidad (HDPE)	0,011

Otro variable de gran importancia en el diseño de canaletas es la velocidad límite, V_L . La velocidad límite de un fluido es aquella velocidad mínima para que no exista sedimentación en la canaleta. Se puede decir que es la velocidad que determina la separación entre un flujo heterogéneo y uno con lecho móvil.

Una de las expresiones más conocidas para calcular la velocidad límite corresponde a la fórmula de Durand. Esta fórmula es válida para fluidos con hasta 15% de concentración volumétrica.

$$v_L = F_L \sqrt{2g (SG_p - 1)D} \quad (2.5)$$

Donde:

F_L : Factor de velocidad límite de deposición.

SG_p : Gravedad específica de las partículas.

D: Diámetro interno de la tubería.

Posteriormente McElvain y Cave ampliaron el rango de fluidos para la cual la fórmula es válida hasta concentraciones de hasta 30% en volumen utilizando otros factores de velocidad límite. ^[5]

Finalmente basado en experiencias en Chile de pulpas de concentrado, Juan Rayo realizó correcciones a esta fórmula para hacerla válida para canaletas obteniéndose la siguiente expresión.

$$v_L = 1.25 F_L \sqrt[4]{2g (SG_p - 1) h} \quad (2.6)$$

Donde h es la altura normal de escurrimiento.

2.5 Tasa de Desgaste

El desgaste en el transporte de relaves es un tema de vital importancia, puesto que en función de éste se estima la vida útil de instalaciones y los planes de mantenimiento asociados.

En general, al ser de grandes extensiones las canaletas son construidas en hormigón por su bajo costo y la facilidad para repararlas en caso de desgaste. El problema es que el concreto se desgaste con mucha mayor facilidad que materiales como el acero, dada su menor resistencia a la abrasión generada por el material transportado.

Se pueden considerar como variables que inciden en el desgaste de una canaleta, el diámetro de las partículas, la geometría de la canaleta, el ángulo de impacto de las partículas con las paredes y la velocidad de transporte del fluido. De todas las variables antes mencionadas, la más determinante es la velocidad de transporte.

Existen estudios que relacionan la velocidad de transporte con la tasa de desgaste anual que puede sufrir una canaleta de concreto. En la Tabla 2-2 se muestran valores expuestos por Juan Rayo para la tasa de desgaste de una tubería de concreto en función de la velocidad para un mineral de cobre.^[4]

Tabla 2-2 Tasas de Desgaste en Tuberías de Concreto

Velocidad [m/s]	Tasa de Desgaste [mm/año]
2	2
2,5	3
3	5
8	50
10	80

Para velocidades intermedias se puede utilizar la siguiente expresión para calcular la tasa de desgaste:

$$T_D = K v^n \quad (2.7)$$

Donde:

T_D : Tasa de desgaste [mm/año]

v : Velocidad [m/s]

K, n : Constantes empíricas ($K=0,38$ y $n=2,33$).

2.6 Curvas en Canaletas

Cuando se requiere de cambios de dirección en las canaletas es posible ocupar cajones de distribución, los que cumplen además la función de ser disipadores de energía, o curvas. Una de las desventajas de las curvas frente a los cajones de distribución es el riesgo de que el fluido rebalse la canaleta en esta zona si el radio de curvatura no es el adecuado. En contraste, es mucho más económico en términos constructivos una curva que un cajón de distribución.

Por el riesgo expuesto anteriormente existen recomendaciones de radios mínimos de curvatura en función del caudal a transportar. En la Tabla 2-3 se observa la recomendación.

Tabla 2-3 Radio de curvatura mínimo canaletas

Caudal Conducido [m³/s]	Radio de curvatura mínimo [m]
0,5	5
1	10
5	20
10	60
15	80
20	100

El riesgo de rebalse se produce por el aumento de la altura de escurrimiento en la zona de curvas. Este aumento de la altura de escurrimiento depende principalmente del radio de curvatura y la velocidad de transporte del fluido.

Para poder dimensionar esta diferencia en la altura de escurrimiento producida por la curva el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos recomienda la siguiente expresión para el cálculo de esta diferencia:

$$\Delta y = \frac{V^2 B}{g R_o} \quad (2.8)$$

Donde:

V: Velocidad media de transporte del fluido [m/s].

B: Ancho de la canaleta [m].

Ro: Radio de curvatura [m].

3 Modelos

3.1 Modelo Multifásico

Para el desarrollo de este trabajo se utiliza el modelo multifásico Volume of Fluid (VOF), el cual está diseñado para ser usado en flujos de superficie libre, con burbujas u otros similares. Este modelo resuelve las ecuaciones de continuidad o conservación de masa y la ecuación de conservación momentum y está diseñado para dos o más fases. ^[8]

3.1.1 Continuidad

Se debe cumplir que la fracción de fases debe sumar 1, lo que implica:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (3.1)$$

Donde:

α_q : Es la fracción en volumen de la fase q.

Con esto se define la ecuación de continuidad:

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

Donde:

ρ_q : Densidad de la fase q

\vec{v}_q : Velocidad de la fase q

S_{α_q} : Término fuente de la ecuación

m_{pq} : Transferencia de masa de la fase p a la fase q

m_{qp} : Transferencia de masa de la fase q a la fase p

3.1.2 Momentum

Por su parte, la ecuación de momentum para el modelo multifásico se puede expresar como:

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

Donde:

ρ : Densidad.

\vec{v} : Velocidad.

p : Presión.

μ : Viscosidad dinámica.

\vec{g} : Gravedad.

S_i : Término fuente.

El modelo VOF resuelve una sola ecuación de momentum y se comparte entre las fases el campo de velocidades resultantes.

Existen dos esquemas o métodos en el modelo VOF para la resolución de las dos ecuaciones antes descritas. Por un lado está el método implícito, en el cual las ecuaciones de momentum y continuidad se resuelven simultáneamente y por otro, el método explícito, en el cual se resuelve la ecuación de continuidad en primer lugar y posteriormente la ecuación de momentum.

La ventaja que tiene el método explícito por sobre el método implícito es el hecho de generar una interfaz bien definida, lo que permite un mayor acercamiento hacia la situación real. El método explícito depende del número de Courant, que se define como sigue: ^[8]

$$\text{Número de Courant} = \frac{\Delta t}{\Delta x_{\text{celda}}/V_{\text{fluido}}} \quad (3.4)$$

Donde:

Δt : Paso de tiempo [s]

Δx : Longitud de la celda cerca de la interfaz [m]

V_{fluido} : Velocidad del fluido [m/s]

Esta dependencia, implica la utilización de pasos de tiempo pequeños, lo que hace que las simulaciones efectuadas bajo este esquema requieran mayores recursos computacionales o un mayor tiempo de cálculo.

Por otro lado el método implícito tiene la ventaja de poder ser utilizado tanto en simulaciones estacionarias como en simulaciones transientes, a diferencia del método explícito que solo puede ser utilizado en simulaciones transientes. Al no depender del número de Courant, este método puede utilizar pasos de tiempo más grandes y/o mallas más gruesas, reduciendo los tiempos de cálculo. Sin embargo, la interfaz no se presenta del todo definida, lo que dificulta una predicción precisa del comportamiento del flujo. De todas formas las soluciones

ocupando el método implícito pueden ser buenas aproximaciones en la mayoría de los casos.

3.2 Modelo de Partículas

Actualmente existen dos formas de abordar el cálculo numérico de flujos multifásicos: el enfoque Euler – Lagrange y el enfoque Euler – Euler.

El modelo de fase discreta Lagrangiano, utilizado en el presente trabajo, tiene un enfoque Euler – Lagrange, en que la fase del fluido es tratada como un continuo, mientras que la fase dispersa es resuelta a través del seguimiento de un gran número de partículas a través del campo de flujo antes calculado.

Particularmente, se predice la trayectoria de las partículas de la fase discreta mediante la integración del balance de fuerzas sobre la partícula, utilizando un marco de referencia Lagrangiano. [7]

El balance de fuerzas antes mencionado puede ser escrito de la siguiente manera:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = F_D(\vec{u} - \vec{u}_p) + \frac{\vec{g}(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \vec{F} \quad [m/s^2] \quad (3.5)$$

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} : Término de aceleración adicional [m/s²]

$F_D(\vec{u} - \vec{u}_p)$: Fuerza de arrastre por unidad de masa de la partícula

3.2.1 Distribución de Rosin-Rammler

Cuando se cuenta con un conjunto de partículas de diferente diámetro es frecuente el uso de la distribución de Rosin-Rammler para representar la distribución granulométrica de las partículas.

Se define como sigue [9]:

$$R = e^{-(d/\bar{d})^n} \quad (3.6)$$

Donde:

d: Tamaño de partícula [mm].

\bar{d} : Módulo de tamaño [mm].

n: Módulo de distribución.

La función anterior representa la fracción másica de partículas cuyo diámetro es mayor al diámetro en que la función es evaluada.

El módulo de distribución se calcula como sigue:

$$n = \frac{\ln(-\ln(R))}{\ln(d/\bar{d})} \quad (3.7)$$

Por otro lado, el módulo de tamaño \bar{d} , se puede aproximar a d talque la función R sea igual a 0,368.

3.3 Modelos de Turbulencia

Existe una gran cantidad modelos de turbulencia, muchos de los cuales están incorporados en ANSYS FLUENT. Como ejemplos es posible mencionar el modelo k – ω , Spallart-Allmaras y el modelo k – ϵ .

Este último resuelve las escalas de longitud y tiempo utilizando dos ecuaciones de transporte. Una de las ecuaciones es asociada a la energía cinética turbulenta, k, y la otra asociada a la tasa de disipación, ϵ . Se trata de un modelo ampliamente utilizado por necesitar pocos recursos y presentar una aceptable precisión para un amplio rango de flujos turbulentos.

A continuación se plantean las dos ecuaciones de transporte antes mencionadas, la primera para k y la segunda para ϵ :

$$\frac{\partial(\rho uk)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vk)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] + P_k + G_k - \rho \epsilon - Y_M \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial(\rho u \epsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \epsilon)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} [P_k + C_{3\epsilon} G_k] - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3.9)$$

Donde:

P_k : Generación de la energía cinética turbulenta debido al gradiente de velocidad.

G_k : Generación de energía cinética turbulenta debido a las fuerzas de flotación.

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$: Números de Prandtl turbulentos.

μ_t : Viscosidad turbulenta.

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$: Constantes.

Y_M : Contribución de fluctuación de la dilatación en la turbulencia compresible debido a la tasa de disipación.

La viscosidad turbulenta se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

En que C_μ es una constante.

3.4 Modelo de Erosión

Es posible en ANSYS FLUENT monitorear la tasa de erosión provocada por las partículas en las paredes del dominio. La tasa de erosión se define como: ^[7]

$$R_{erosión} = \sum_{p=1}^{N_{particulas}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{cara}} \quad (3.11)$$

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]

$C(d_p)$: Función del diámetro de la partícula

$f(\alpha)$: Función del ángulo de impacto

La tasa de erosión calculada como se expone anteriormente está expresada en unidades de material removido/área – tiempo, como podría ser [kg/m² s].

4 Metodología

Para desarrollar este trabajo se deben realizar pasos previos a la simulación para definir completamente el problema y acotar las simulaciones para hacer un análisis pertinente de los resultados con las variables definidas previamente.

Con ese objetivo se divide la metodología en las siguientes cuatro etapas:

- Definición de parámetros
- Generación de la geometría
- Generación del mallado
- Metodología computacional

En la definición de parámetros, se fijan algunos parámetros y se definen las variables del problema. Con esto, se determinan la geometría de la canaleta y se verifica que cumpla con las condiciones para hacer una simulación que represente la realidad bajo las recomendaciones anteriormente expuestas.

Con una planilla Excel y las ecuaciones expuestas en el capítulo 2 del presente trabajo, se definen los parámetros de entrada de la simulación y se verifican que cumplan con las condiciones recomendadas.

Luego se genera la geometría de las distintas canaletas para las simulaciones con la ayuda del módulo Design Modeler de ANSYS y se dibuja la canaleta con la geometría definida en el paso anterior de definición de parámetros.

Para la generación del mallado se utiliza el módulo Mesh de ANSYS y una vez generado el mallado se verifica que la malla sea aceptable y cumpla con las condiciones mínimas para generar una simulación comparable con la realidad.

Finalmente en la etapa de metodología computacional se explica todo el seteo de las condiciones y modelos seleccionados para las distintas simulaciones. Las simulaciones de cada canaleta se dividen en tres etapas. En la primera se realiza una simulación con un fluido newtoniano sin partículas, considerando una modelación bifásica, con aire y pulpa. En la segunda etapa, se le incorporan partículas mediante una inyección para que estas partículas se muevan en función de la solución fluidodinámica de la primera etapa. En la tercera etapa, se introduce un módulo de erosión para obtener la tasa de desgaste en función de los parámetros de la solución de la primera etapa y el material de la canaleta.

Luego de obtener los resultados de las simulaciones, éstos se procesan para obtener los gráficos e imágenes que permitan exponer los resultados de manera clara y comparativa entre las distintas simulaciones. La exposición de resultados

también se dividirá en tres. Se expondrán por separado los resultados fluidodinámicos, correspondientes a la primera etapa de simulación. Posteriormente los resultados de la simulación con inyección de partículas. Finalmente se expondrán los resultados del desgaste obtenidos en el módulo de erosión.

Posteriormente se analizan estos resultados en el capítulo 6 y en el capítulo 7 se plantean las conclusiones del presente trabajo y posibles mejoras para un trabajo futuro.

4.1 Definición de parámetros

En esta etapa se definieron las variables y los valores de los parámetros fijos para poder calcular las condiciones de entrada y la geometría de la canaleta. La única variable en este problema es el radio de curvatura de la canaleta.

Los parámetros fijos son la velocidad de entrada, la pendiente de la canaleta, el material de la canaleta, la densidad del material transportado, el tipo de canaleta y la razón entre la altura normal de escurrimiento y la altura total de la canaleta.

Se define que el material de la canaleta para el presente estudio es hormigón y su sección escuadrada.

En la Tabla 4-1 Tabla 4-1 Valores de parámetros se pueden apreciar los valores definidos para cada uno de estos parámetros.

Tabla 4-1 Valores de parámetros

Parámetro	Valor
Velocidad de Entrada [m/s]	3,2
Pendiente Canaleta	1%
Densidad Media Material Transportado [kg/m ³]	1584
Viscosidad Dinámica Pulpa [kg/m*s]	0,0086
Altura Normal Escurrimiento/Altura Total Canaleta	0,5
Coeficiente de Manning	0,013

Con estos valores, se calcula el radio hidráulico despejando este parámetro de la ecuación 2.4. Una vez obtenido el radio hidráulico, se obtiene la altura de escurrimiento y la altura total de la canaleta con la suposición descrita anteriormente de la razón entre estos valores. En la Tabla 4-2 se observan los valores obtenidos.

Tabla 4-2 Valores Calculados

Parámetro	Valor
Radio Hidráulico [m]	0,333
Altura de Escurrimiento [m]	0,665
Altura Total Canaleta [m]	1,33

Se calculan además los números de Reynolds, Froude y la velocidad límite para verificar que los datos utilizados para el cálculo y los obtenidos de éste cumplan con las recomendaciones para simular el problema. En la Tabla 4-3 se observan los valores obtenidos.

Tabla 4-3 Verificación de Parámetros

Parámetro	Valor
Número de Reynolds	196018
Número de Froude	1,253
Velocidad Límite [m/s]	2,88

Se puede apreciar por los números de Reynolds y Froude que se trata de un flujo turbulento y supercrítico, que era lo recomendado para este problema. Además la velocidad utilizada es mayor a la velocidad límite por lo que se trata de un flujo heterogéneo lo que asegura que no exista sedimentación.

Se trabaja con seis radios de curvatura distintos para analizar su influencia sobre la altura máxima de escurrimiento y el desgaste provocado en las paredes

de la canaleta. Existen recomendaciones de radios de curvatura mínimos en función del caudal volumétrico transportado como se especifica en la sección 2.6 del presente trabajo. Dado que en este caso el caudal es cercano a $3 \text{ [m}^3/\text{s]}$, la recomendación de radio de curvatura mínimo es de aproximadamente $12,5 \text{ [m]}$. Se seleccionan radios de curvatura menores que el mínimo para observar el fenómeno en esos casos y dos radios de curvatura superiores al mínimo recomendado para corroborar esta recomendación.

Los valores para el radio de curvatura utilizados son: $2,5 \text{ [m]}$, 5 [m] , $7,5 \text{ [m]}$, $12,5 \text{ [m]}$, 15 [m] y 20 [m] .

4.2 Geometría

En la definición de parámetros quedó definida la geometría de la canaleta, ante lo cual se procede a dibujarla en el módulo Design Modeler de ANSYS Workbench. Se dibujan las seis canaletas, cada cual con su respectivo radio de curvatura.

La sección es de $1,3 \text{ [m]}$ de alto y $1,3 \text{ [m]}$ de ancho. Se dibuja una canaleta de 10 [m] antes de la curva y 15 [m] a la salida de ésta, con un ángulo de curvatura de 90° .

Si bien para la simulación fluidodinámica no es relevante, se dibuja la canaleta con un espesor de pared de $0,25 \text{ [m]}$. En la Figura 4.1 y Figura 4.2 se pueden observar una vista en planta de la canaleta dibujada y una vista de la sección a la entrada de la canaleta, la cual es constante hasta la salida.

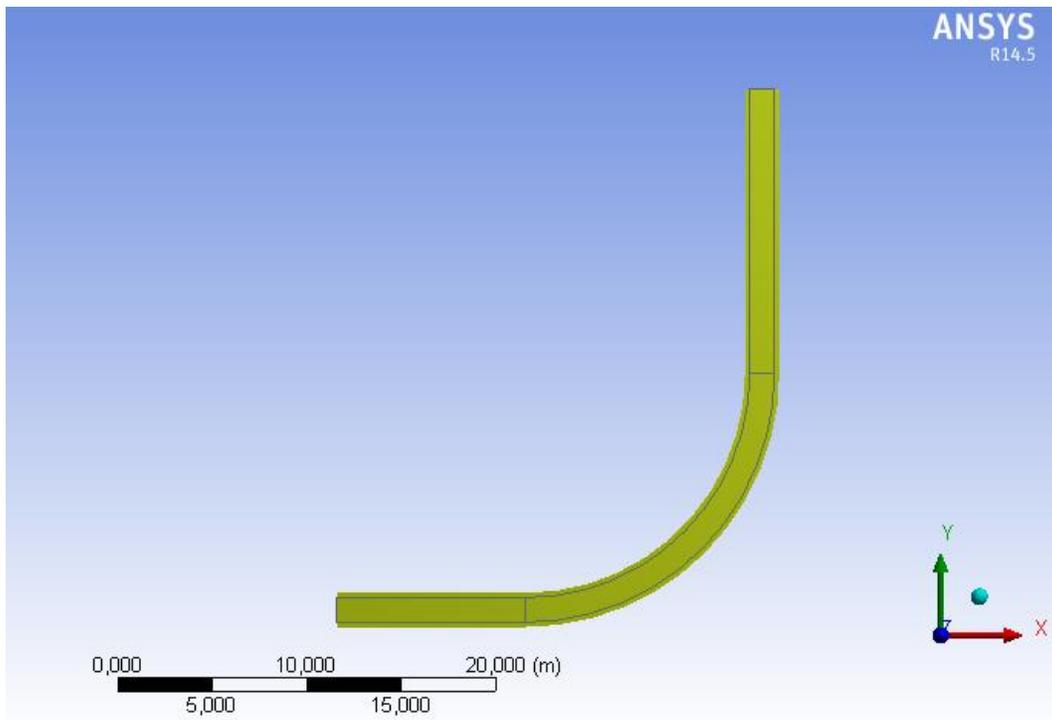


Figura 4.1 Vista en Planta Canaleta Radio 12,5 [m]

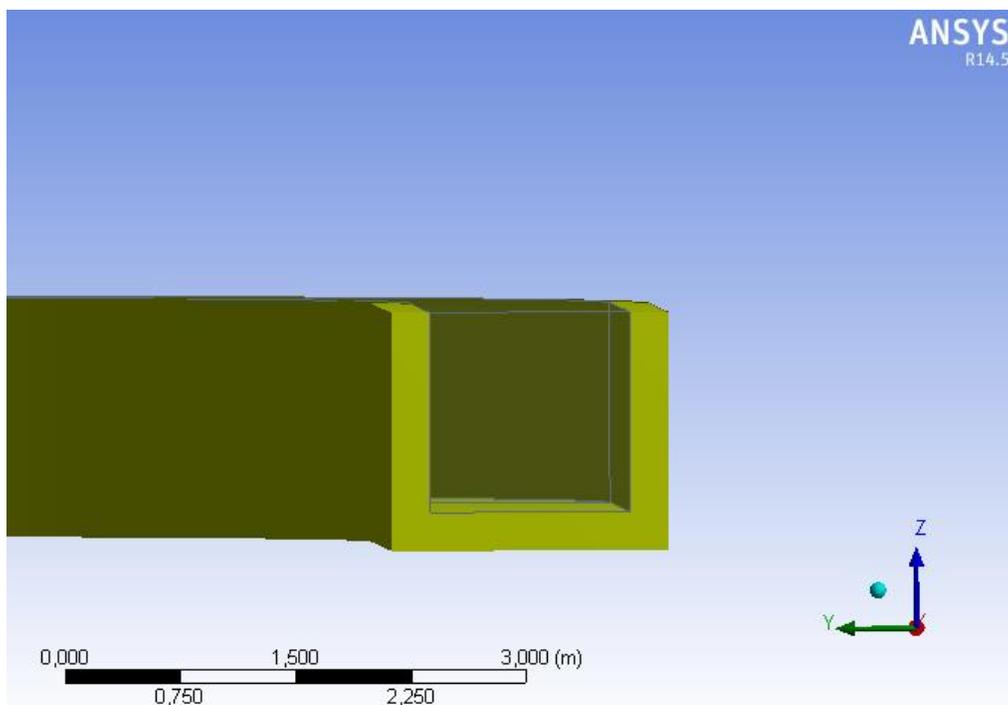


Figura 4.2 Vista Sección Canaleta

Para la simulación es necesario definir el dominio del fluido. Con la ayuda de la herramienta Fill de Ansys, se obtiene este dominio que en este caso corresponde al espacio delimitado por las paredes de la canaleta y por la altura total de la canaleta en la parte superior. Este dominio se puede apreciar en la Figura 4.3.

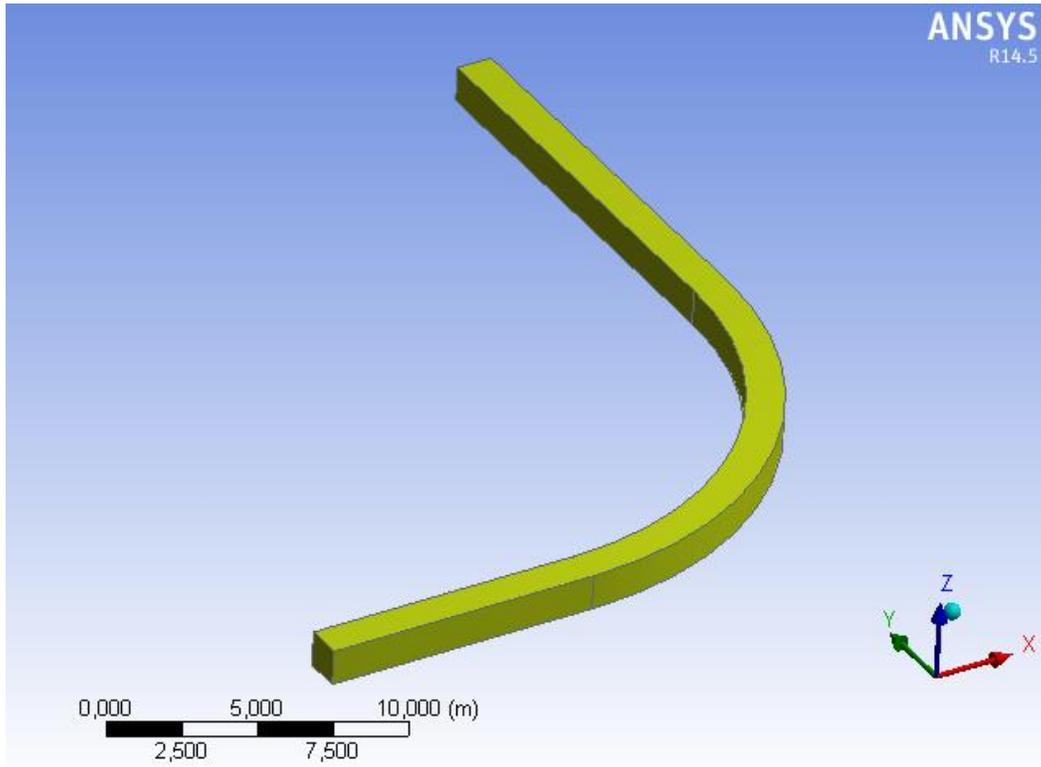


Figura 4.3 Vista del dominio del fluido para la simulación.

4.3 Mallado

El mallado del dominio se efectúa mediante el módulo de ANSYS, ANSYS-Mesh. Se utiliza una combinación de elementos hexaédricos y tetraédricos. Como uno de los objetivos es poder llevar a cabo este estudio en un computador personal, se utiliza un mallado no muy fino, con el fin de realizar simulaciones en periodos cortos de tiempo. Además como se trata de una geometría sencilla, no es necesario tener una gran cantidad de elementos para poder observar el fenómeno en estudio. De todas maneras, luego de llevar a cabo cada uno de los mallados se procede a verificar los valores de su calidad ortogonal y de skewness, según las recomendaciones del manual de Ansys.

En este se especifica que un mallado aceptable debe tener un valor mínimo en su calidad ortogonal de 0,01 y un valor promedio superior a 0,2. Además el valor máximo para el parámetro Skewness, asociado a la distancia entre el centro de los elementos y sus lados, debe ser inferior a 0,8. En la Tabla 4-4 se observan los valores de éstos tres parámetros y el número de elementos para cada uno de los mallados. Se puede apreciar que el número de elementos crece a medida que crece el radio de curvatura de la canaleta. Esto simplemente debido a que aumenta la longitud total de la canaleta.

Tabla 4-4 Parámetros del Mallado de las Canaletas

Canaleta	Número de Elementos	Skewness	Orthogonal Quality	
		Máximo	Mínimo	Promedio
2,5	43.820	0,78	0,251	0,857
5	50.294	0,792	0,268	0,858
7,5	60.203	0,79	0,286	0,858
12,5	67.460	0,755	0,309	0,864
15	75.645	0,79	0,265	0,86
20	87.980	0,792	0,28	0,861

En la Figura 4.4 se observa un detalle de uno de los mallados.

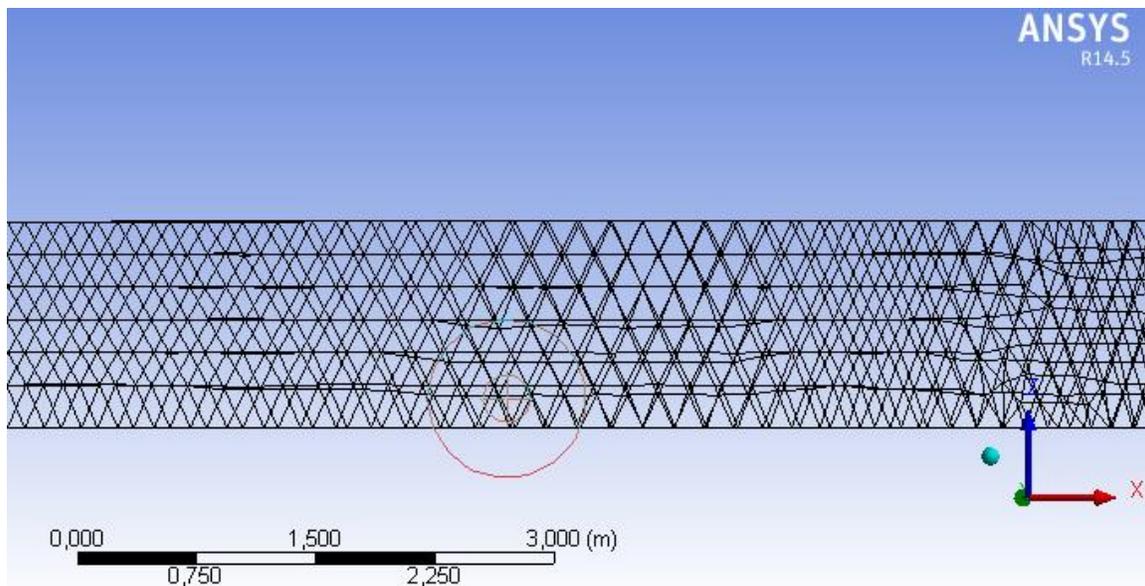


Figura 4.4 Detalle Mallado del Dominio del Fluido

A continuación se especifica la configuración para el mallado del dominio del fluido.

En primer lugar se crean tres “Named Selections”: Inlet, Outlet y Techo. La primera corresponde a la cara de entrada del fluido, la segunda a la cara de salida del fluido y la tercera corresponde a la cara superior del dominio del fluido, por donde podría rebalsar el fluido.

Hecho lo anterior se procede a configurar el mallado propiamente tal. En “Details of Mesh”, en el apartado Defaults, se fijan los siguientes valores. CFD para “Physics Preference”, Fluen para “Solver Preference” y una relevancia de 100.

En Sizing, entre lo más relevante, se fija “On: Prox and Curvature” el parámetro Use Advanced Size Function y se fija el valor máximo de tamaño de cara del elemento como 0,3 [m].

En Advanced, se ingresa CDF para Shape Checking y Kept para Element Midside Nodes.

Con esta configuración se obtuvo valores aceptables para la verificación del mallado por una parte y un número de elementos no muy elevado para hacer llevadera la simulación en término de tiempo y recursos computacionales.

4.4 Metodología Computacional

En este apartado se exponen los parámetros ingresados y los modelos utilizados en el módulo Setup de ANSYS FLUENT para llevar a cabo la simulación del presente trabajo.

En primer lugar, en la pestaña “General” se define la gravedad en el eje Z. La sección de entrada a la canaleta, como se aprecia en la Figura 4.2 fue dibujada en el plano YZ y la sección de salida en el plano XZ. Se fija el valor de la aceleración de gravedad como $-9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$ en el eje Z. Además se selecciona la opción transiente para el tiempo.

En la definición de modelos, se activa el modelo multifásico “Volume of Fluid”, se fijan dos fases en la esquina superior derecha, se selecciona el esquema implícito y se selecciona en las opciones “Open Channel Flow”. Esto nos permite simular un canal abierto. En este trabajo se opta por un esquema implícito en vez de explícito, debido a que, si bien este último genera mejores resultados en términos de tener una interfaz entre las fases mejor definida, requiere de muchos más recursos computacionales y tiempo para estar corriendo la simulación. De todas formas, como se aprecia en el siguiente capítulo “Resultados”, el esquema implícito permite apreciar el fenómeno en estudio.

En la definición de modelos se activa también el modelo viscoso o de turbulencia k-epsilon estándar, dejando los valores de las constantes por defecto.

En la pestaña Materials, se crea un material con el nombre de pulpa, con una densidad de $1584 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ y una viscosidad dinámica de $0,0086 \text{ [kg/m*s]}$, ambos valores constantes. Con la creación de este material y utilizando aire como el otro fluido se definen a continuación las dos fases para este estudio.

En la pestaña Phases, se define como fase primaria el aire y la pulpa como fase secundaria. Se crea una interacción entre las fases, correspondiente a una tensión superficial constante con un valor de $0,074 \text{ [N/m]}$.

Posteriormente se procede a configurar las condiciones de borde del problema. En la pestaña Boundary Conditions se deben fijar las condiciones de borde para las zonas antes definidas en el mallado: Inlet, Outlet y Techo. Se define la entrada "Inlet" como un mass-flow-inlet, activando en su pestaña "Multiphase" para la mezcla, la opción de Open Channel y fijando la superficie libre a $0,67 \text{ [m]}$ y el fondo a 0 [m] , debido a que al dibujar la canaleta se ubicó el punto $[0,0,0]$ en el fondo de la canaleta y equidistante de las dos paredes laterales. Se define además en el Inlet, el caudal másico de pulpa que ingresa como $4484,83 \text{ [kg/s]}$, valor obtenido a partir de la densidad media del material, la velocidad de entrada y la sección de la canaleta en función de la altura normal de escurrimiento.

El "Outlet" se define como outflow, fijando el valor de Flow Rate Weighting como 1. Con esto se define que la totalidad del fluido debe salir por esta cara. Al contar con una sola salida, esta configuración simplifica el problema y debido a lo anterior, no existe incompatibilidad con fijar "Techo" como un pressure-outlet.

Se define "Techo" como pressure-outlet, fijando la presión manométrica en 0 Pascales por tratarse de un canal abierto. Para la pulpa se fija el parámetro Backflow Volume Fraction como 0.

En la pestaña de Solution Methods se configuran los siguientes métodos:

- Pressure-Velocity Coupling Scheme: SIMPLEC.
- Gradient: Least Squares Cell Based.
- Pressure: PRESTO!
- Momentum: First Order Upwind.
- Volume Fraction: First Order Upwind.
- Turbulent Kinetic Energy: First Order Upwind.
- Turbulent Dissipation Rate: First Order Upwind.
- Transient Formulation: First Order Implicit.

Luego se procede a configurar las condiciones iniciales para la simulación en la pestaña Solution Initialization fijando la velocidad en X como 3,2 [m/s]. Para crear un patch, se utiliza la herramienta Adapt Region el cual se aprecia en la Figura 4.5. Esto se hace para fijar una solución inicial desde donde empezar las simulaciones.

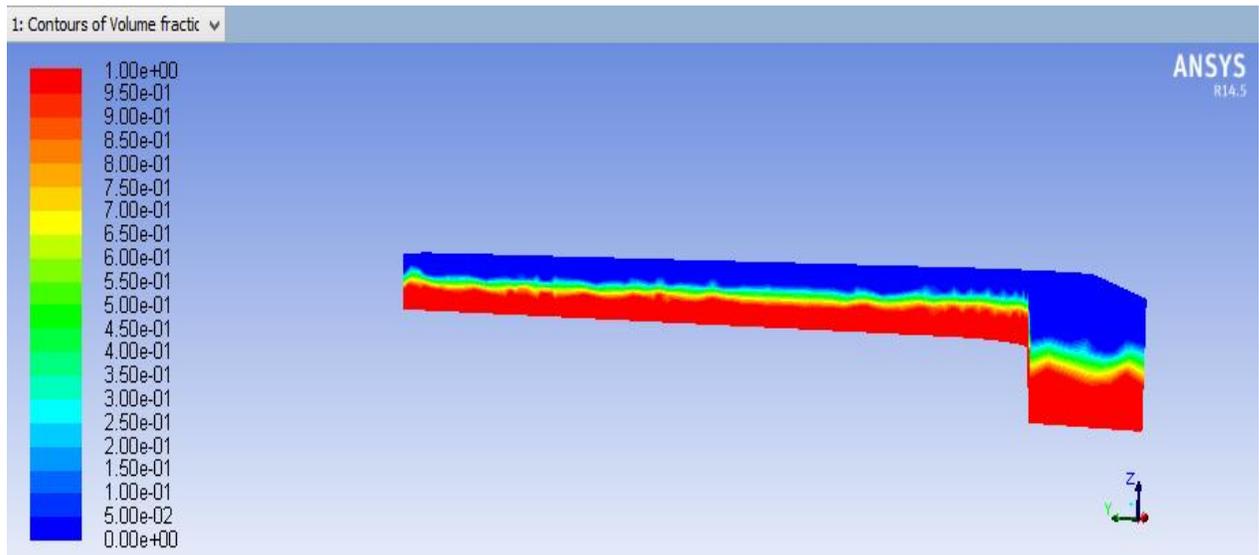


Figura 4.5 Vista del Patch de Inicialización

Finalmente en la pestaña Run Calculation, se fija el tamaño de los pasos de tiempo en 0,01 [s], el número de pasos de tiempo en 2000 y el número máximo de iteraciones por paso de tiempo en 2. Hecho todo esto, se procede a correr la simulación. Con este procedimiento se obtienen los resultados fluidinámicos.

Luego de que se complete la simulación, se procede a configurar la simulación con partículas basada en la simulación anterior. Esto quiere decir que las partículas se moverán en función de las velocidades obtenidas de la simulación fluidodinámica. Para hacer esto, se debe configurar una inyección de partículas en el módulo Solution de ANSYS.

Una vez en el módulo Solution, en la pestaña Models, se activa el modelo de Discrete Phase y dentro de éste se desactiva la opción Unsteady y se fija el número de pasos en 5000. A continuación se crea una inyección de partículas inertes del tipo Group. Se selecciona un material que tenga una densidad lo más parecida a las partículas de relave, en este caso carbonato de calcio. Posteriormente se procede a ingresar las características de las partículas. Para esto se utiliza una distribución de Rosin Rammler. Los datos utilizados

corresponden a una distribución granulométrica del Sernageomin [10]. En la Tabla 4-5 se exponen los valores utilizados para este trabajo.

Tabla 4-5 Parámetros Rosin-Rammler

Diámetro mínimo partículas [mm]	0,000625
Diámetro medio partículas o módulo de tamaño [mm]	0,48
Diámetro máximo partículas [mm]	1,25
Módulo de distribución	0,561

Una vez ingresados estos parámetros, en la pestaña de Graphics and Animations, se configura en Particle Tracks, para poder observar el Streamline de la inyección de partículas.

Para la tercera etapa de la simulación, en la cual se busca determinar la tasa de desgaste de la canaleta debido a la acción de las partículas o sólidos en el relave, se utiliza también un modelo de fase discreta como en la etapa anterior.

Particularmente, en la pestaña de Discrete Phase Model, se debe activar la interacción de la fase discreta con la fase continua y seleccionar el modelo de fase discreta Erosion/Accretion. Por otro lado, en las condiciones de borde de la pared se deben configurar condiciones para la interacción de las partículas con ella.

Basados en la ecuación 3.11 se deben definir para el cálculo de la erosión, los valores de la función del diámetro de partícula, la función del ángulo de impacto y la función de velocidad relativa de partícula.

Se consideran las siguientes constantes para la función del diámetro de partícula y velocidad relativa de partícula.

$$C(d_p) = 1,8 \times 10^{-9} ; b(v) = 2,6$$

Para la función del ángulo de impacto se utilizan los valores de la Tabla 4-6.

Tabla 4-6 Valores Función Ángulo de Impacto

Ángulo (°)	Función Ángulo de Impacto
0	0
20	0,8
30	1
45	0,5
90	0,4

Se ingresan además los coeficientes de restitución normal y tangencial, los cuales representan la cantidad de momentum retenida por la partícula luego del impacto.

En esta ocasión ambos coeficientes se representan mediante un polinomio cúbico del ángulo de impacto. En las siguientes ecuaciones se muestran las constantes utilizadas en cada caso.

$$e_n = 0,993 - 0,0307\theta + 4,74 \times 10^{-4} \theta^2 - 2,61 \times 10^{-6} \theta^3 \quad (4.1)$$

$$e_t = 0,988 - 0,029 \theta + 6,43 \times 10^{-4} \theta^2 - 3,56 \times 10^{-6} \theta^3 \quad (4.2)$$

Esta tercera etapa, está basada igualmente en la solución fluidodinámica y la inyección de partículas de la etapa anterior.

5 Resultados

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos. Se separa en tres sub-capítulos en el cual cada uno contempla los resultados de una etapa. En primer lugar se presentan los resultados fluidodinámicos, es decir, de las simulaciones con pulpa y aire. En el siguiente se muestra una imagen con la trayectoria de las partículas en la canaleta. Finalmente se muestran los resultados del módulo de erosión.

5.1 Fluidodinámicos

Para presentar los resultados de la simulación bifásica se utilizarán distintas imágenes de la simulación que posteriormente permitan comparar las distintas simulaciones, es decir, de canaletas con distinto radio de curvatura.

Para este efecto se utilizarán imágenes de las mismas variables en los mismos planos para cada una de las canaletas y una isosuperficie que permita apreciar a lo largo de la canaleta, la interfaz entre las fases.

En primer lugar se crearán tres planos, uno a la entrada de la curva, uno en medio de la curva y uno a la salida de la curva como se puede apreciar en la Figura 5.1.

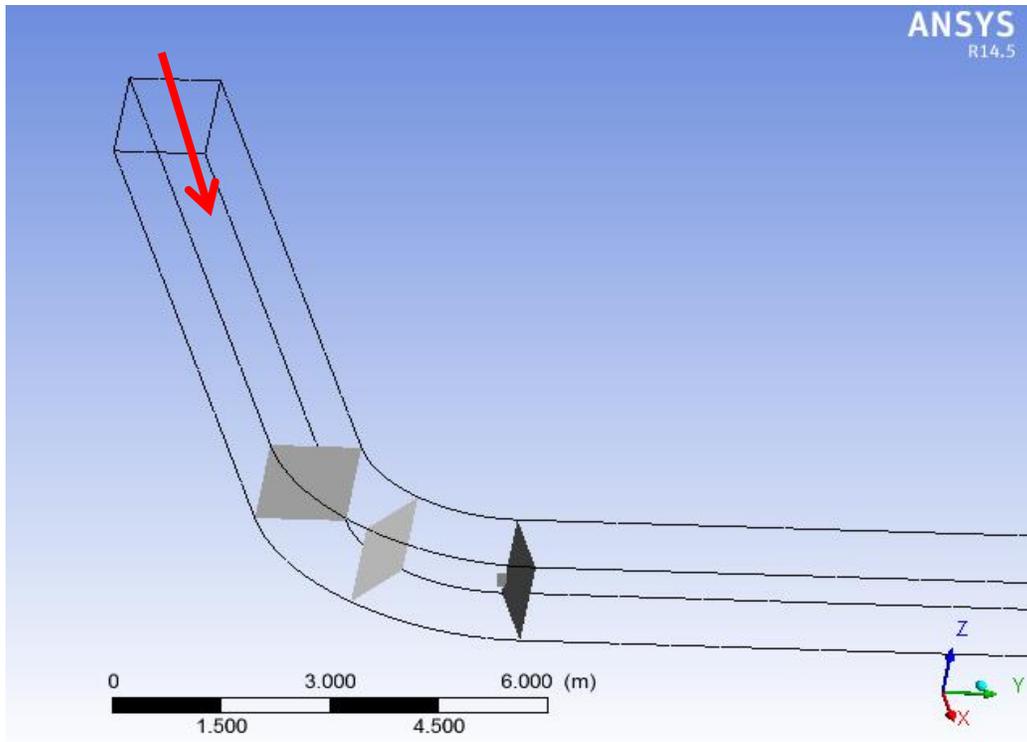


Figura 5.1 Planos utilizados para la muestra de resultados

En estos tres planos se mostrarán la fracción volumétrica y la velocidad. Así será posible ver si es que existe un aumento en la altura de escurrimiento en alguno de estos puntos, así como el comportamiento de la velocidad en ellos.

Asimismo, se mostrará la velocidad utilizando una imagen de las líneas de corriente a lo largo de la canaleta.

Se mostrará también el esfuerzo de corte en las paredes de la canaleta, simplemente para comparar si es que existe un mayor esfuerzo de corte en la pared interior de la curva o en la exterior de la curva en relación a la otra.

Se utilizará además la herramienta de isosuperficie para mostrar la interfaz entre las fases fijando este límite en un 65% de fracción volumétrica de pulpa. Esto debido a que como las simulaciones se corrieron bajo el esquema implícito, la interfaz no queda definida claramente y para fracciones volumétricas menores a 65% puede atribuirse a espuma o a una mezcla entre aire y pulpa.

Habiendo obtenido esta isosuperficie se procederá a encontrar el punto máximo y mínimo en el eje Z en que se encuentre la interfaz entre pulpa y aire, para determinar la altura máxima y mínima de escurrimiento a lo largo de la canaleta.

En resumen, para cada una de las canaletas, es decir para cada simulación, se mostrarán 6 imágenes de planos (2 variables en 3 planos), una imagen de las líneas de corriente, una isosuperficie de fracción volumétrica de la pulpa, un punto máximo, un punto mínimo y el esfuerzo de corte en las paredes.

5.1.1 Resultados Canaleta Radio 2,5 [m]

A continuación en las imágenes Figura 5.2, Figura 5.3 y Figura 5.4 se observa la fracción volumétrica en los tres planos mostrados en la Figura 5.1.

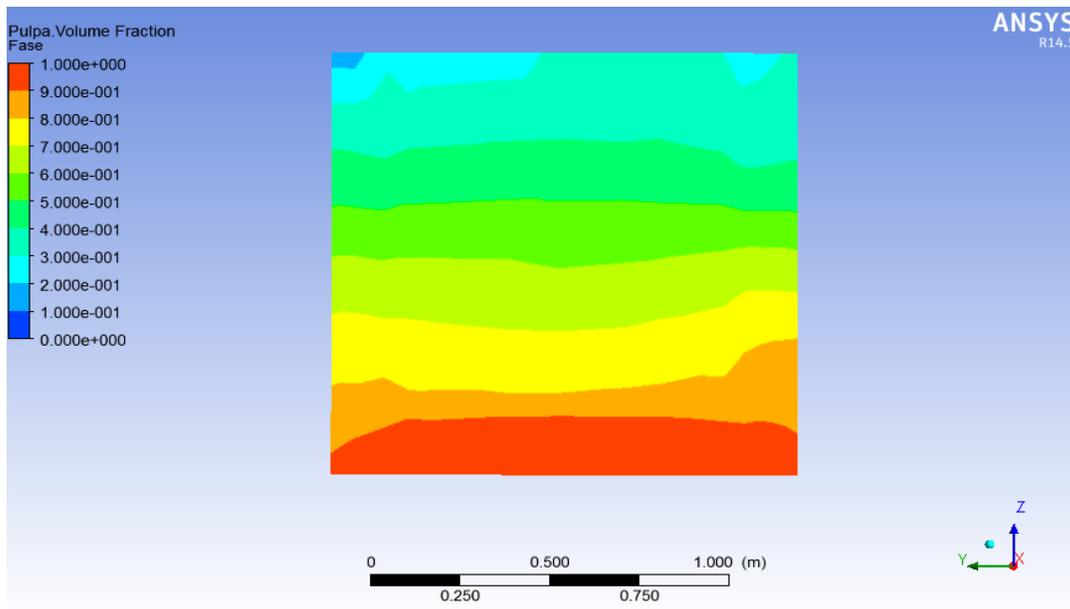


Figura 5.2 Fracción Volumétrica a la Entrada de la Curva Canaleta 2,5

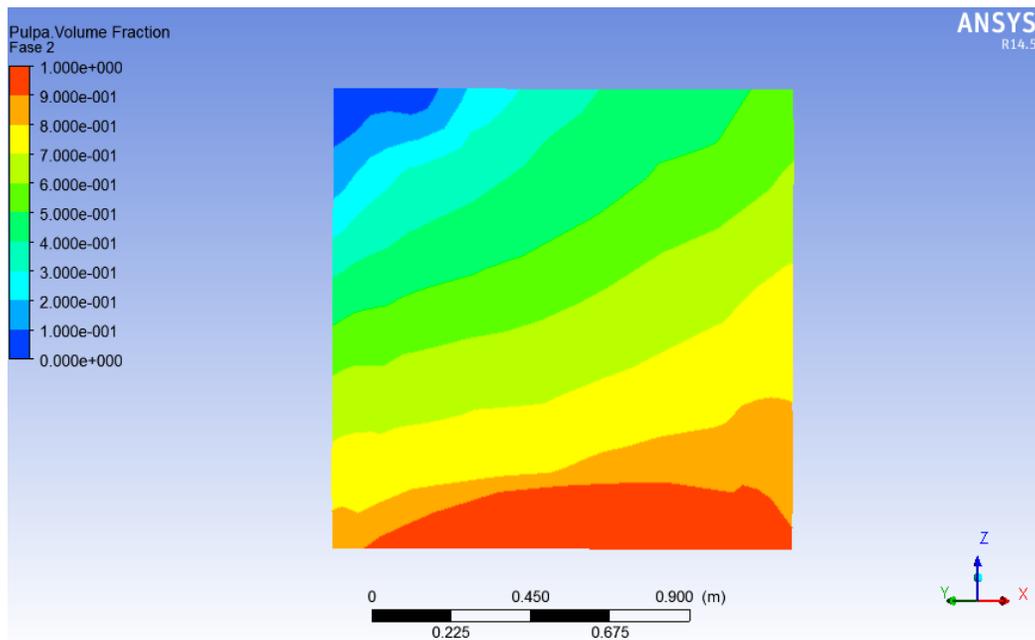


Figura 5.3 Fracción Volumétrica en Mitad de la Curva Canaleta 2,5

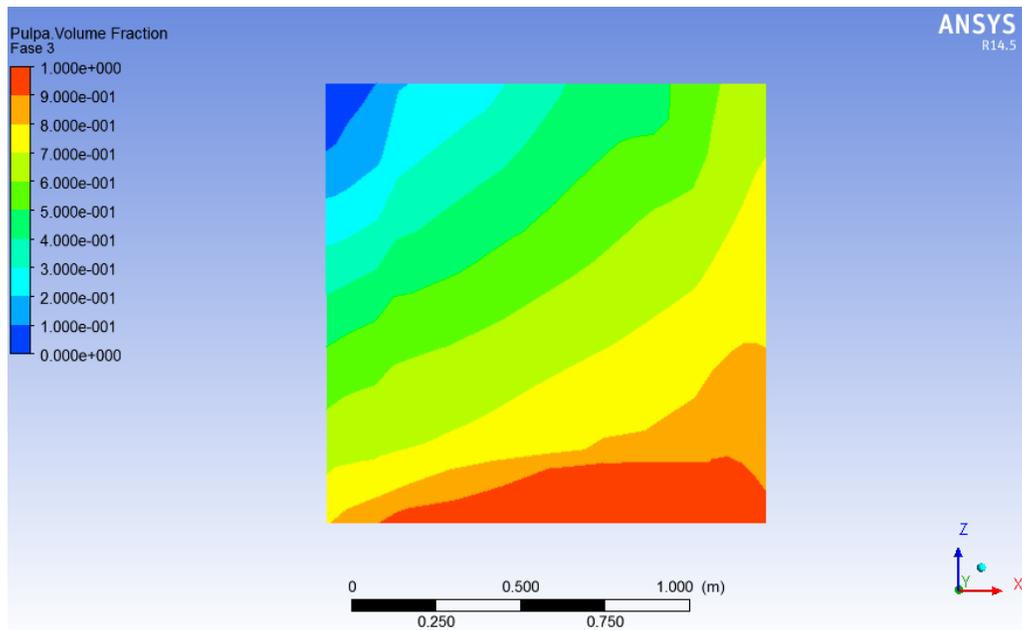


Figura 5.4 Fracción Volumétrica a la Salida de la Curva Canaleta 2,5

En las imágenes Figura 5.5, Figura 5.6 y Figura 5.7 se aprecia la velocidad de las fases en los mismos tres planos para la canaleta de radio de curvatura 2,5 [m].

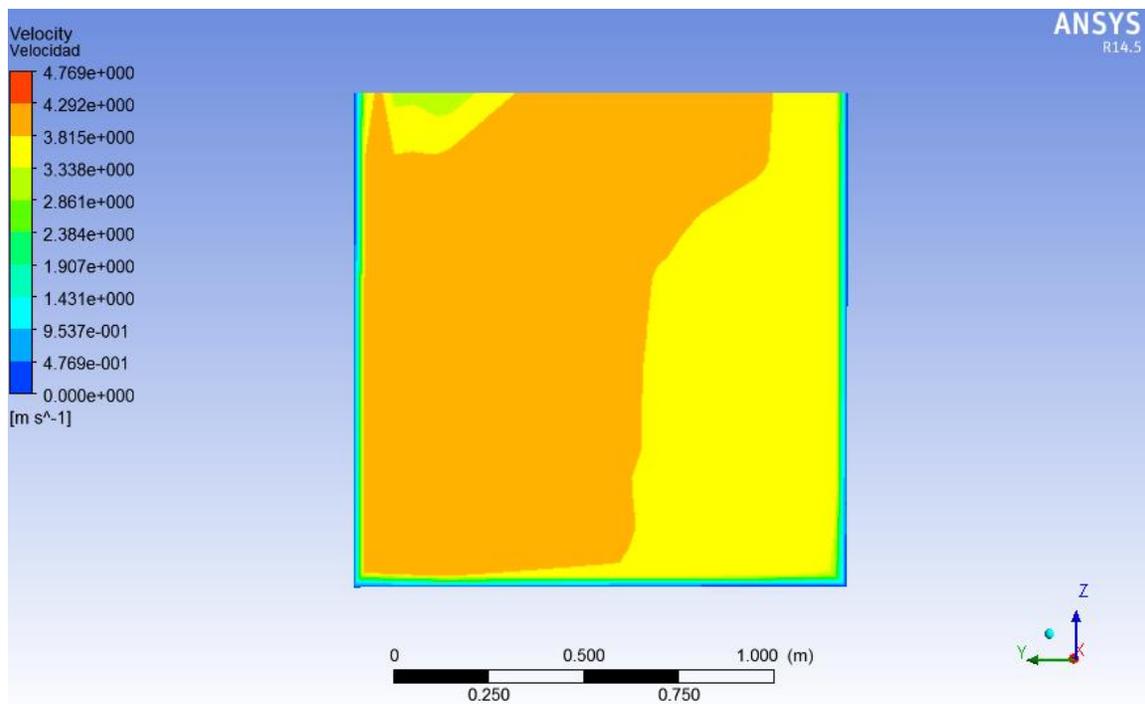


Figura 5.5 Velocidad a la Entrada de la Curva Canaleta 2,5

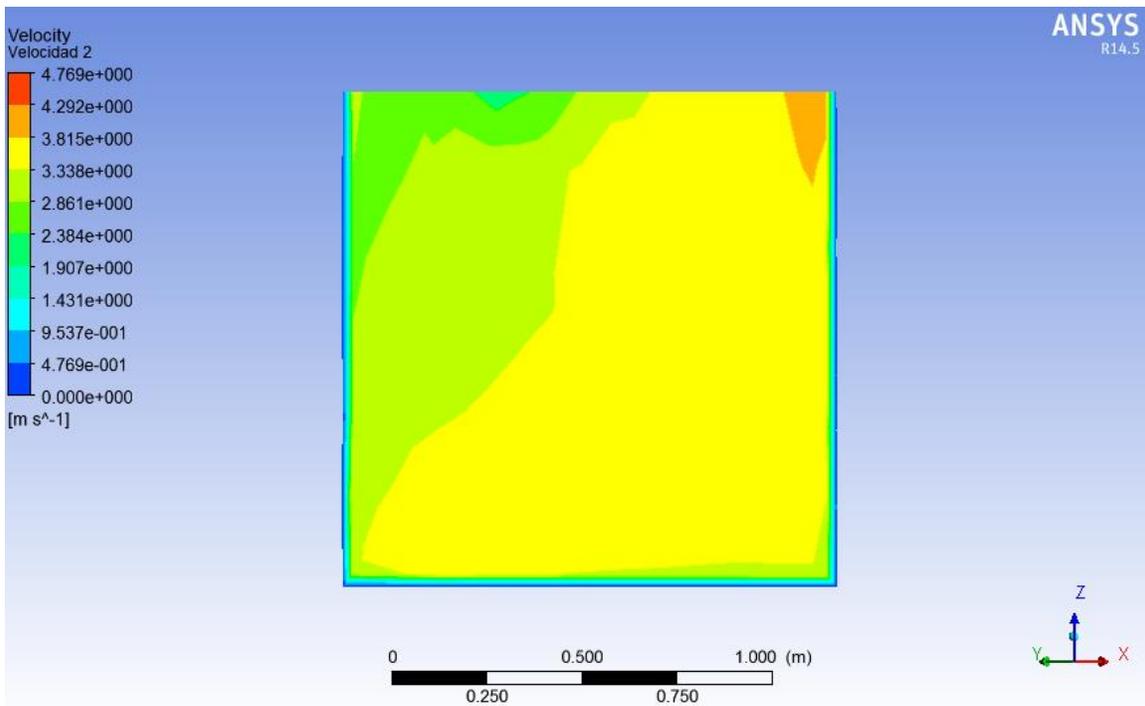


Figura 5.6 Velocidad en la Mitad de la Curva Canaleta 2,5

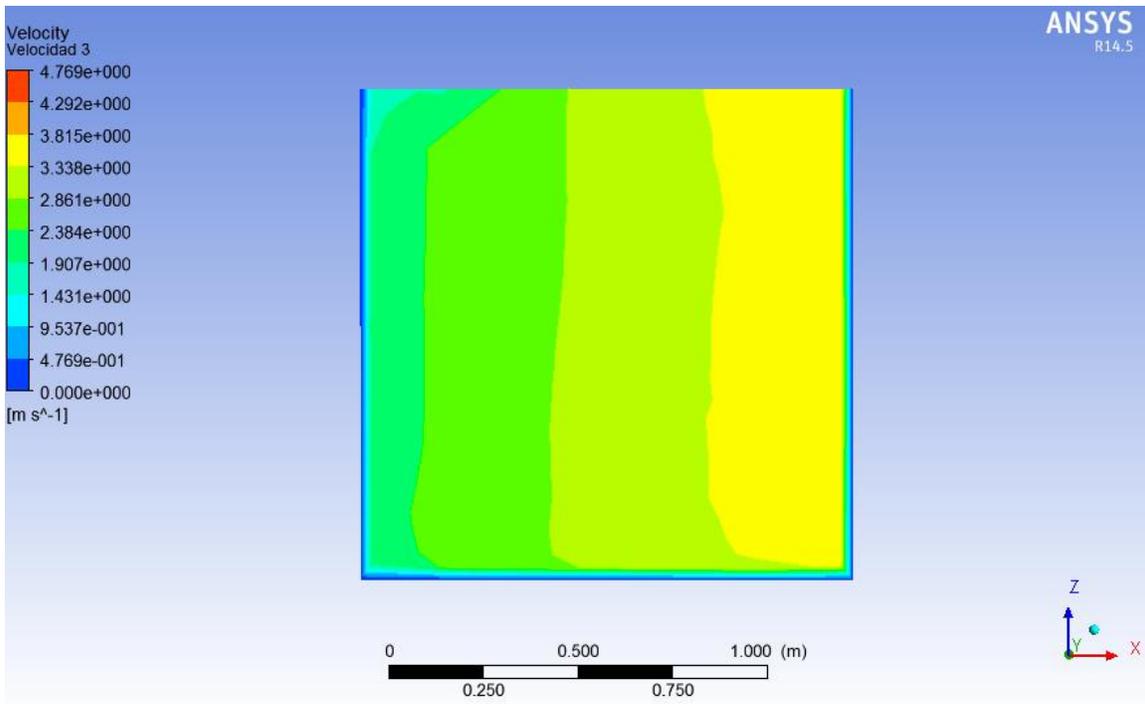


Figura 5.7 Velocidad a la Salida de la Curva Canaleta 2,5

En la imagen Figura 5.8 se observan las líneas de corriente a lo largo de la canaleta.

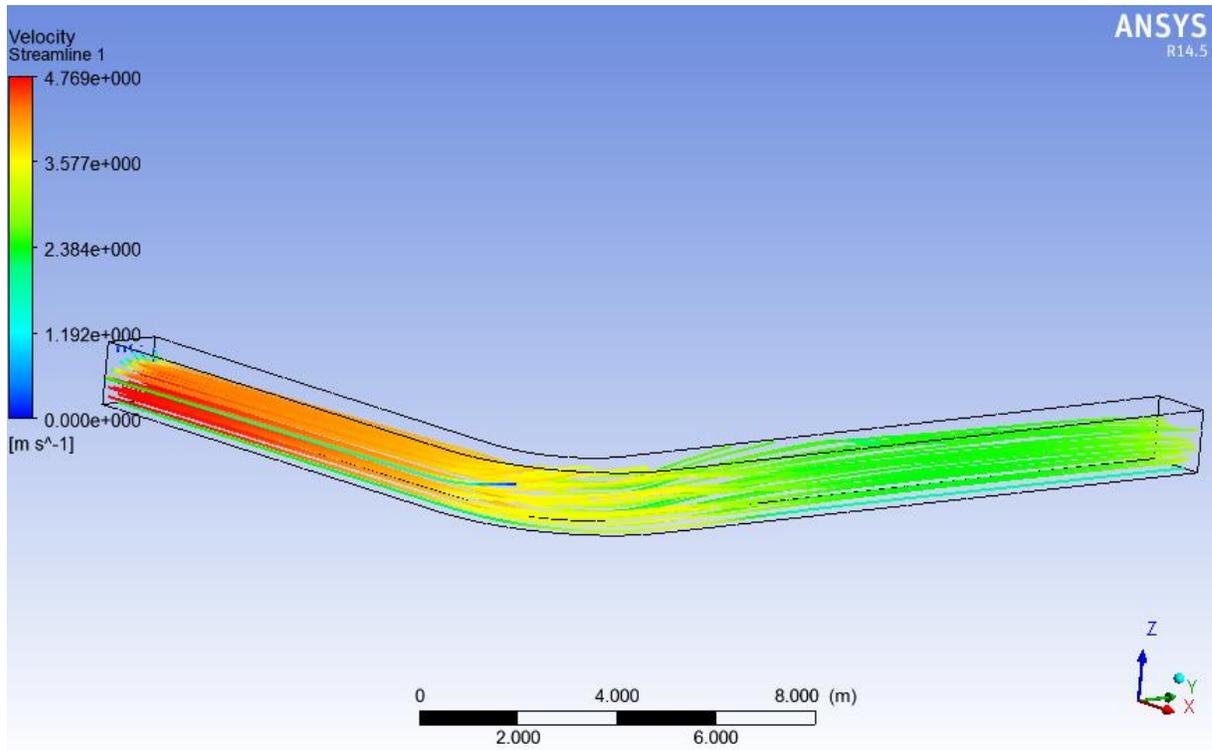


Figura 5.8 Líneas de Corriente en Canaleta 2,5

En la imagen Figura 5.9 se muestra la isosuperficie de la variable fracción volumétrica de la pulpa con un valor 0,65. Además con cruces se muestran la altura máxima y mínima en el eje Z de esa isosuperficie.

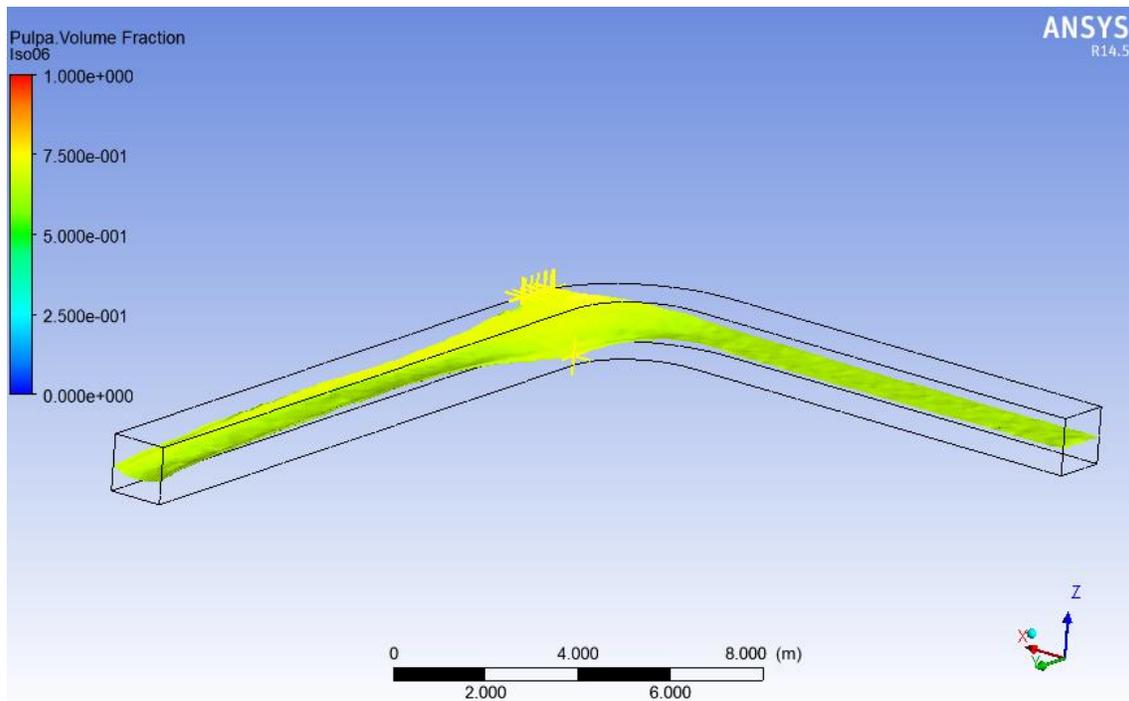


Figura 5.9 Isosuperficie Fracción Volumétrica en Canaleta 2,5

Finalmente en la imagen Figura 5.10 se observa el esfuerzo de corte en las paredes de la canaleta.

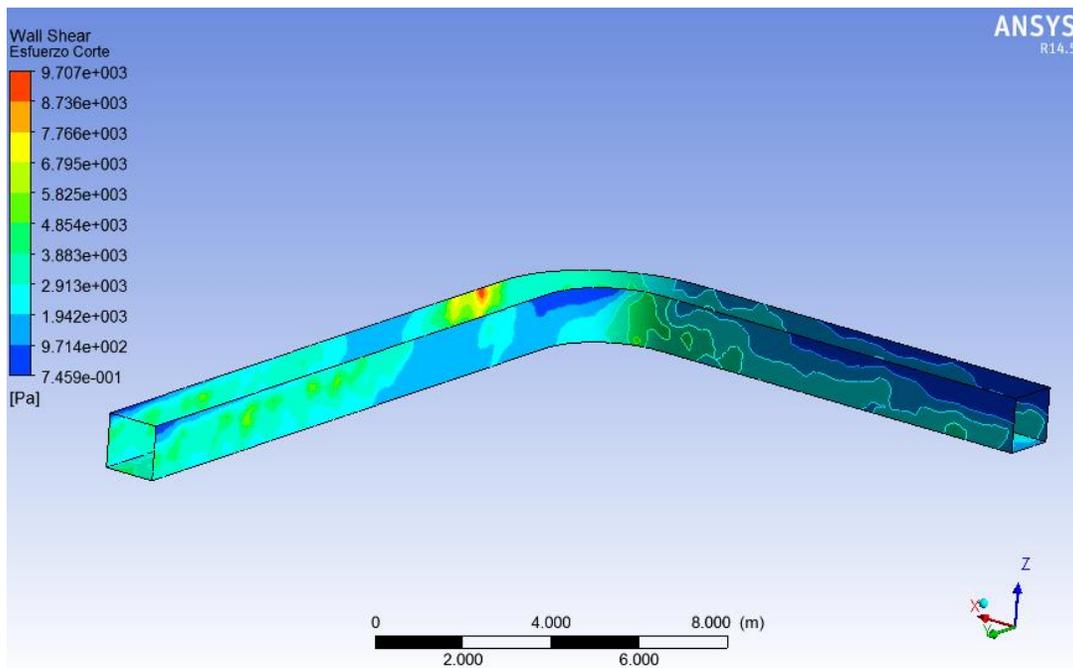


Figura 5.10 Esfuerzo de Corte en las Paredes Canaleta 2,5

5.1.2 Resultados Canaleta Radio 5 [m]

A continuación en las imágenes Figura 5.11, Figura 5.12 y Figura 5.13 se observa la fracción volumétrica en los tres planos mostrados en la Figura 5.1.

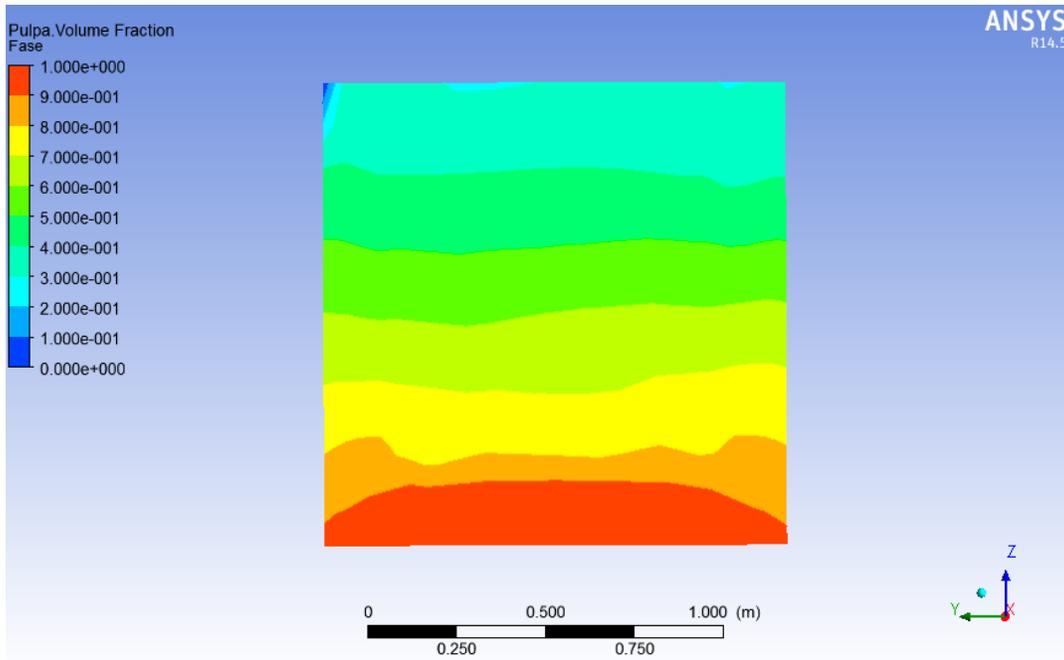


Figura 5.11 Fracción Volumétrica a la Entrada de la Curva Canaleta 5

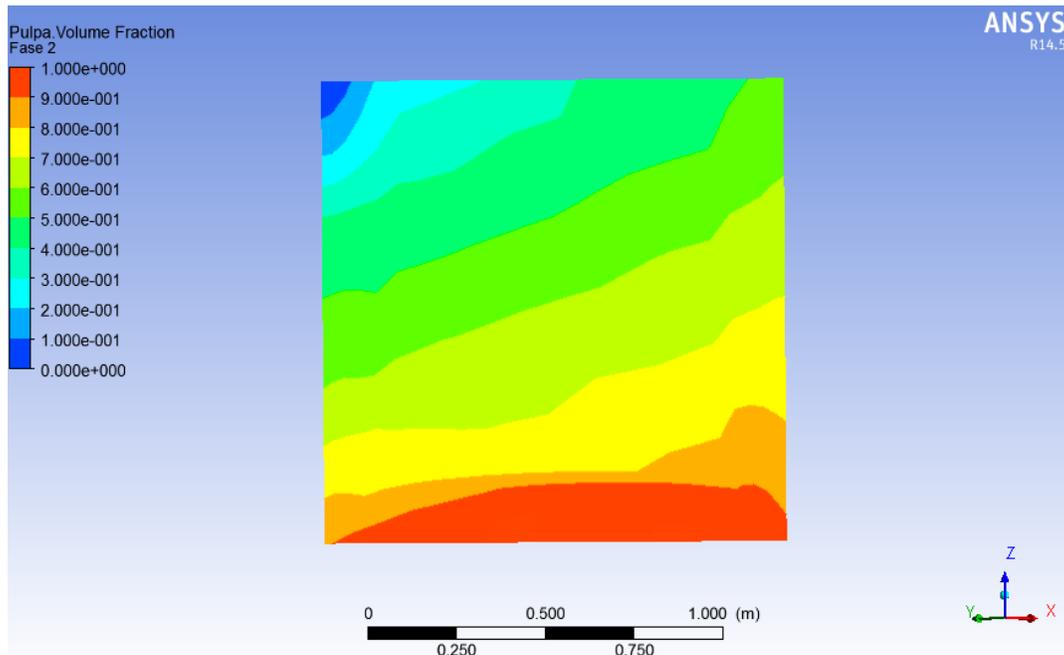


Figura 5.12 Fracción Volumétrica en la Mitad de la Curva Canaleta 5

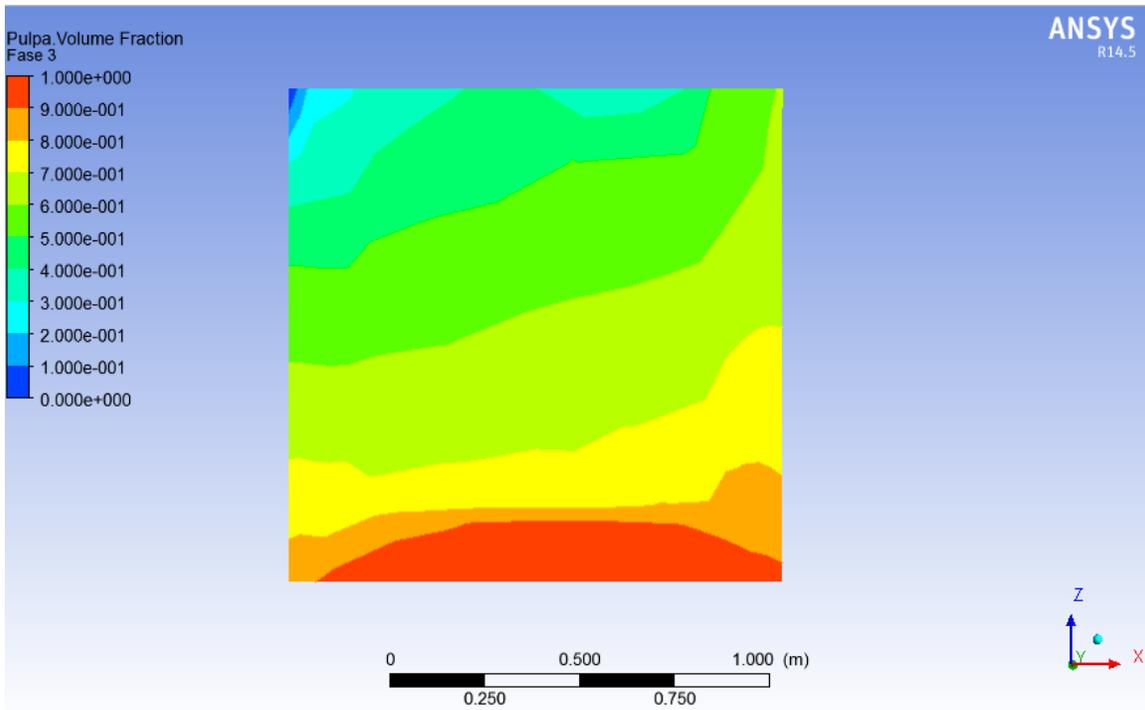


Figura 5.13 Fracción Volumétrica a la Salida de la Curva en Canaleta 5

En las imágenes Figura 5.14, Figura 5.15 y Figura 5.16 se aprecia la velocidad de las fases en los mismos tres planos para la canaleta de radio de curvatura 5 [m].

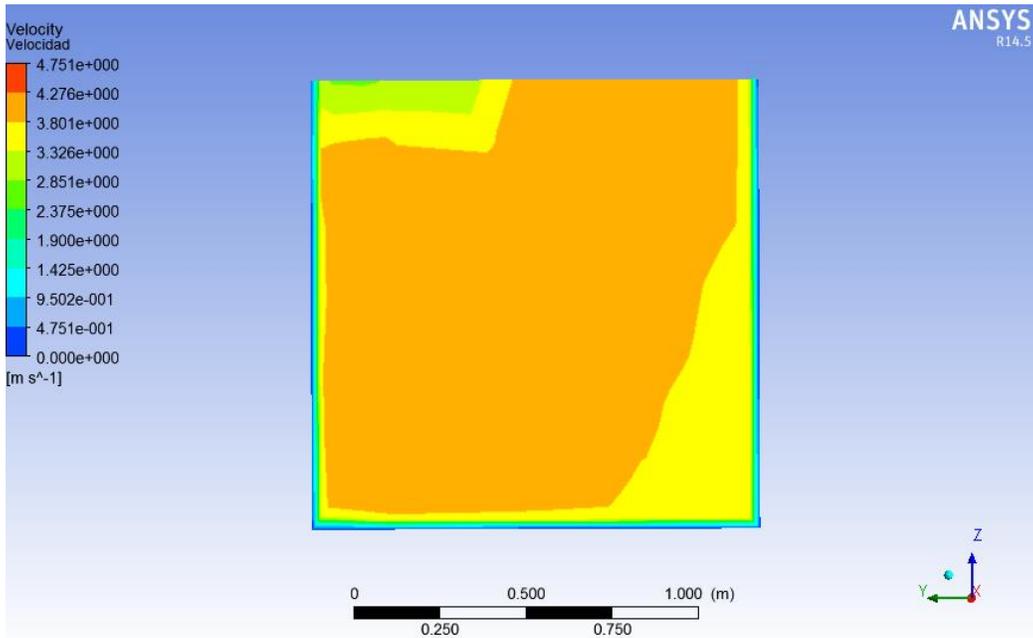


Figura 5.14 Velocidad a la Entrada de la Curva en Canaleta 5

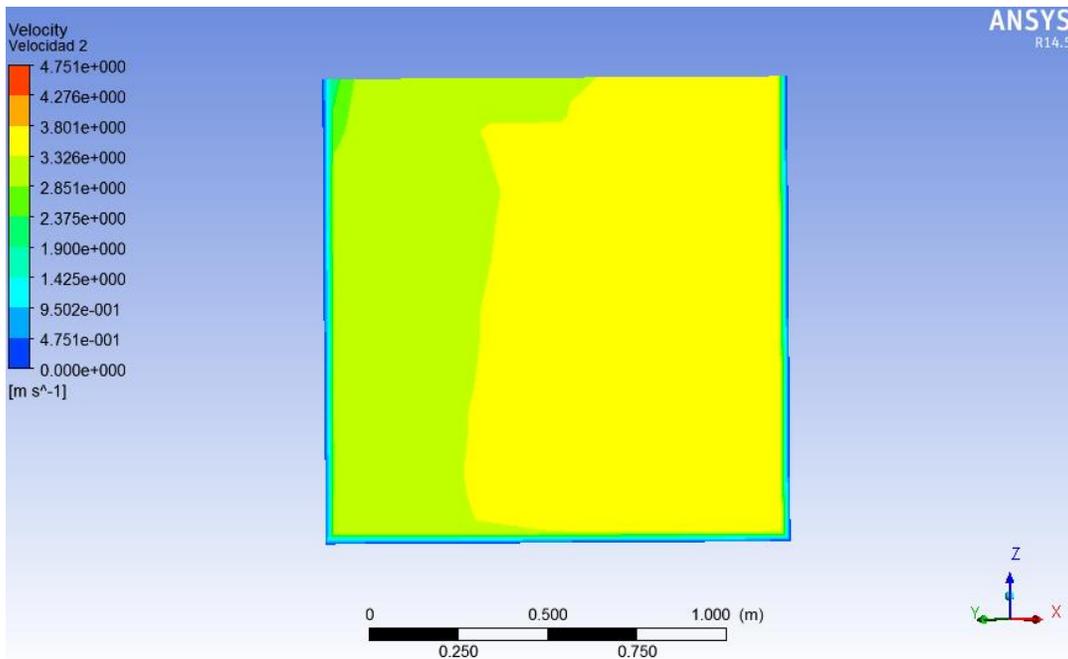


Figura 5.15 Velocidad en la Mitad de la Curva en Canaleta 5

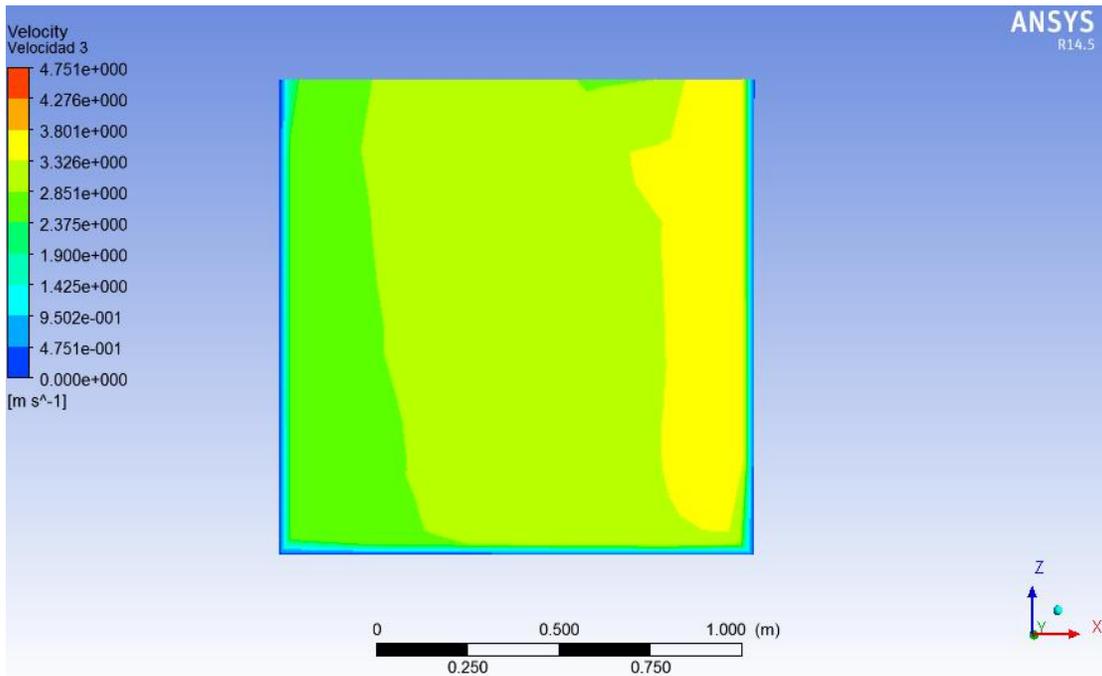


Figura 5.16 Velocidad a la Salida de la Curva en Canaleta 5

En la imagen Figura 5.17 se observan las líneas de corriente a lo largo de la canaleta.

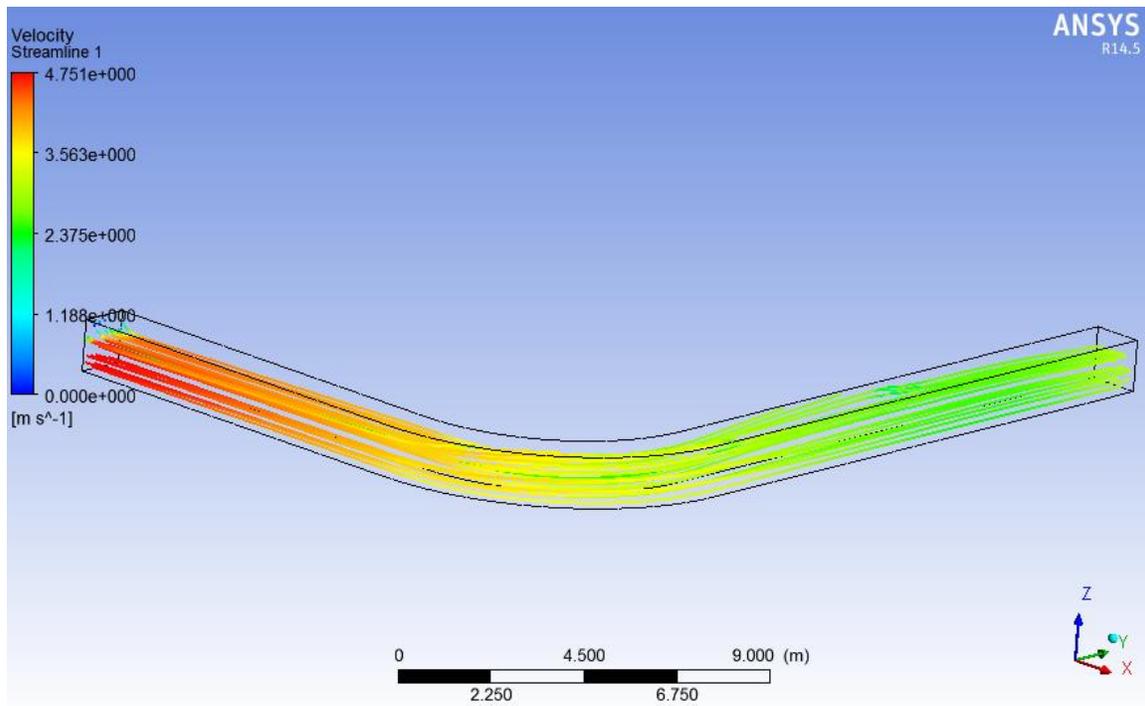


Figura 5.17 Líneas de Corriente en Canaleta 5

En la imagen Figura 5.18 se muestra la isosuperficie de la variable fracción volumétrica de la pulpa con un valor 0,65. Además con cruces se muestran la altura máxima y mínima en el eje Z de esa isosuperficie.

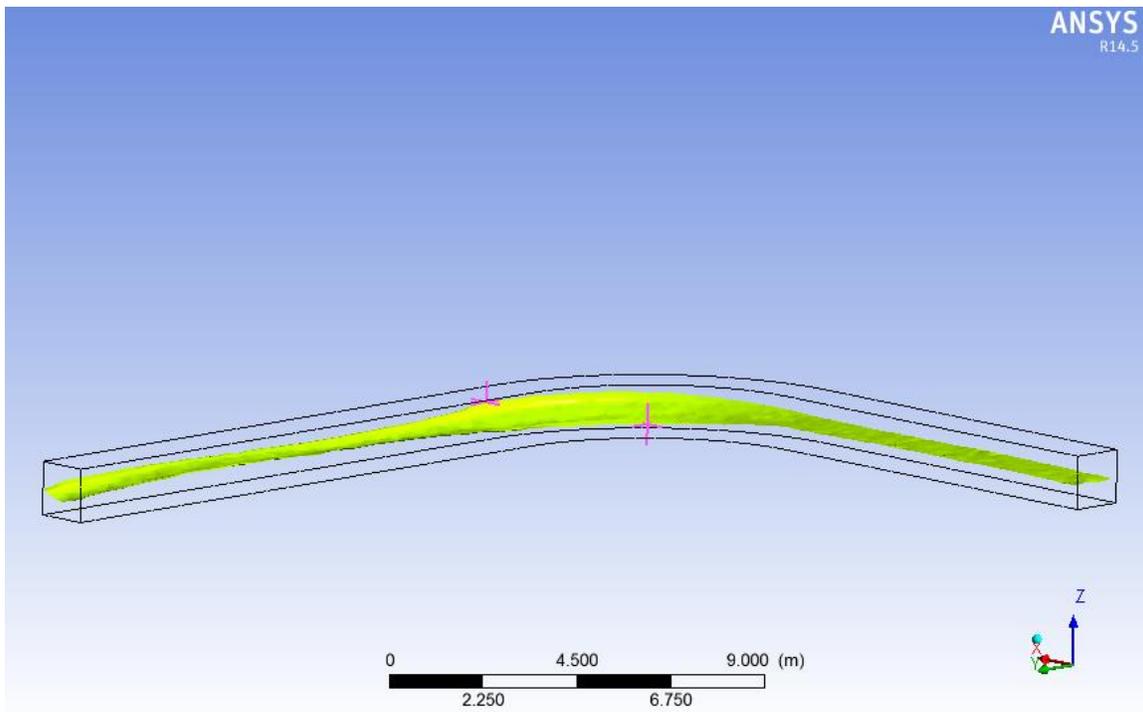


Figura 5.18 Isosuperficie Fracción Volumétrica en Canaleta 5

Finalmente en la imagen se observa el esfuerzo de corte en las paredes de la canaleta.

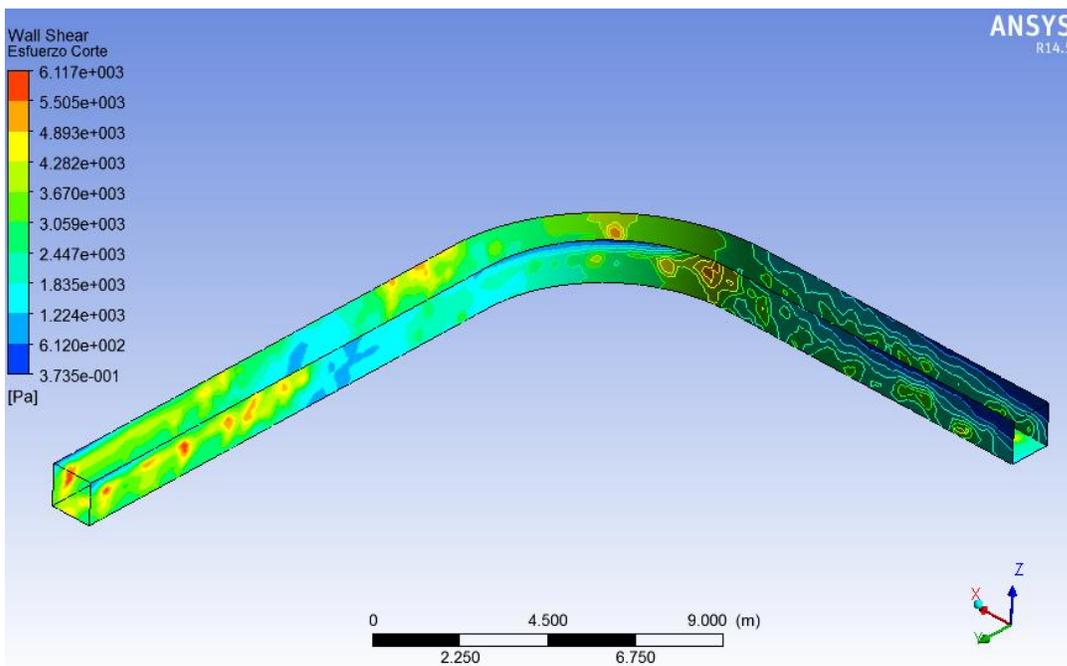


Figura 5.19 Esfuerzo de Corte en Paredes Canaleta 5

5.1.3 Resultados Canaleta Radio 7,5 [m]

A continuación en las imágenes Figura 5.20, Figura 5.21 y Figura 5.22 se observa la fracción volumétrica en los tres planos mostrados en la Figura 5.1.

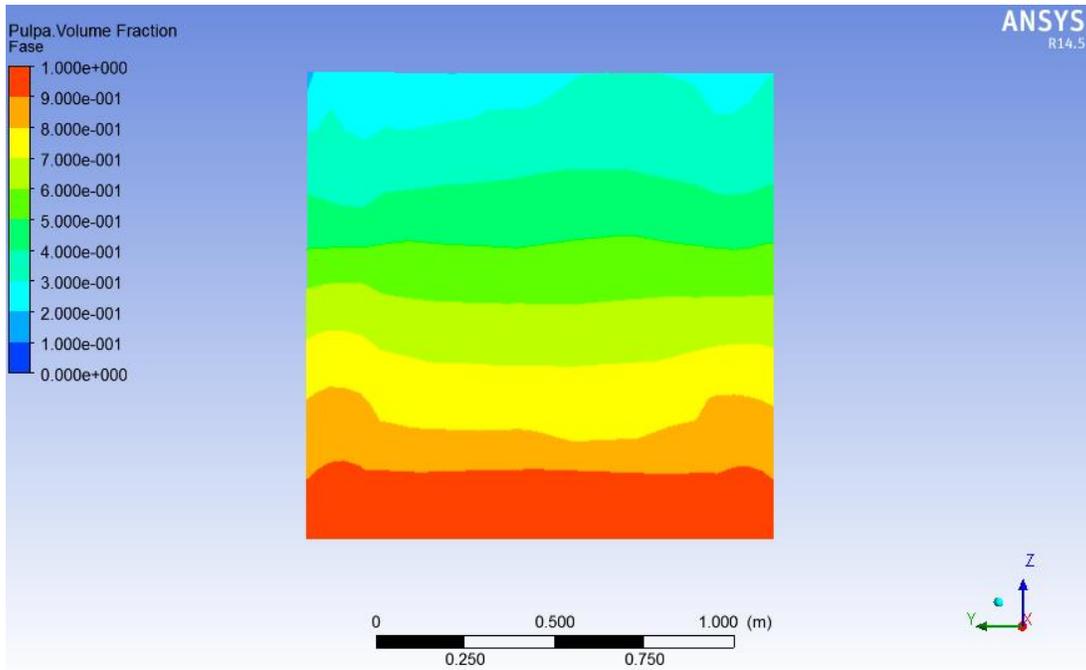


Figura 5.20 Fracción Volumétrica a la Entrada de la Curva Canaleta 7,5

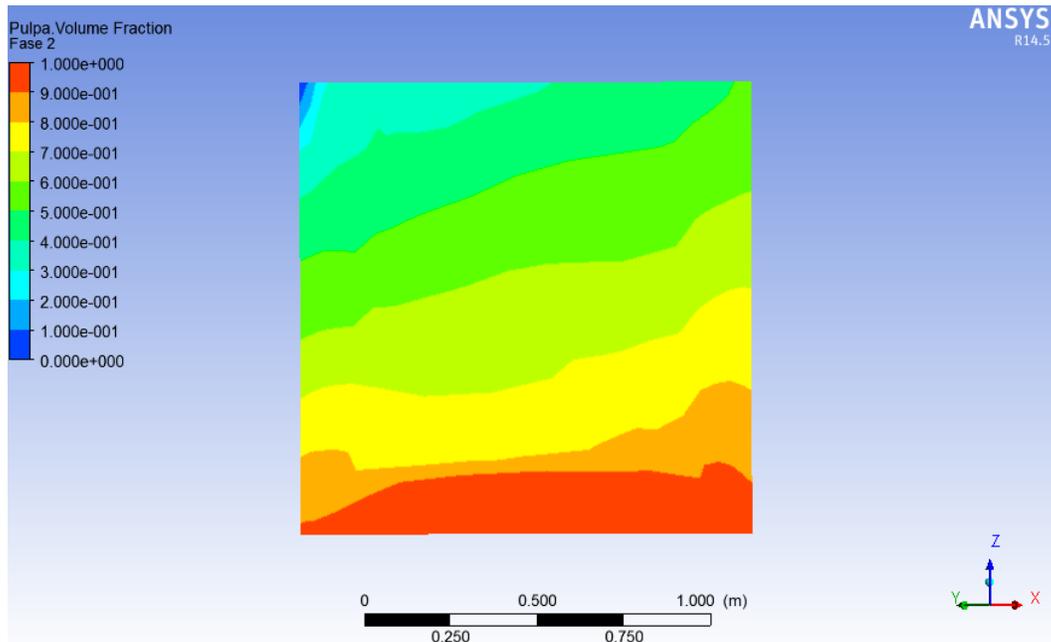


Figura 5.21 Fracción Volumétrica en la Mitad de la Curva Canaleta 7,5

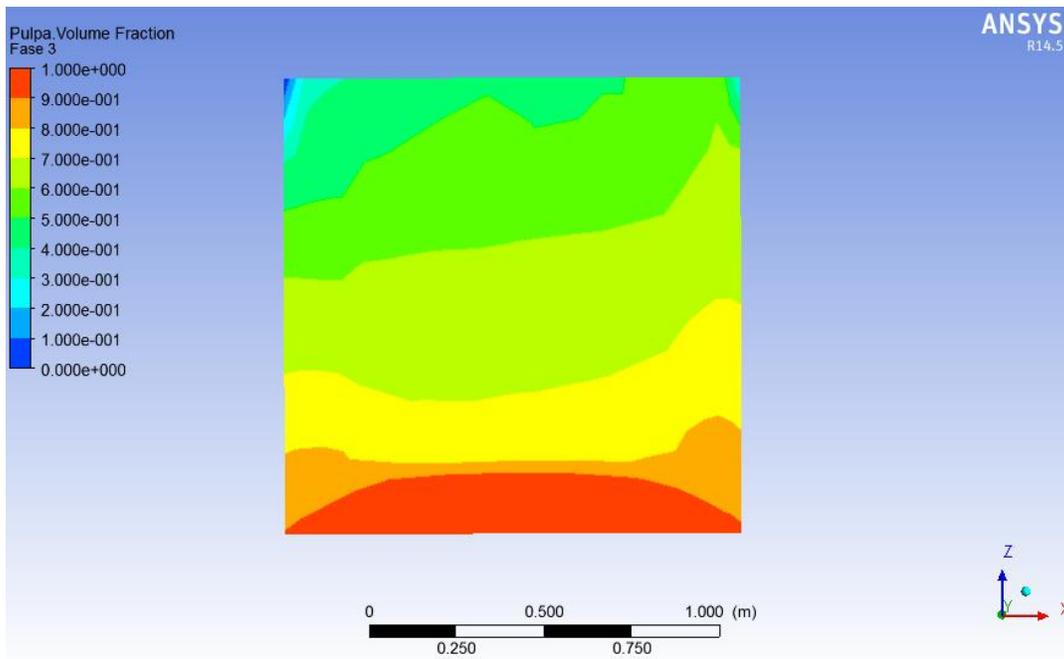


Figura 5.22 Fracción Volumétrica a la Salida de la Curva Canaleta 7,5

En las imágenes Figura 5.23, Figura 5.24 y Figura 5.25 se aprecia la velocidad de las fases en los mismos tres planos para la canaleta de radio de curvatura 7,5 [m].

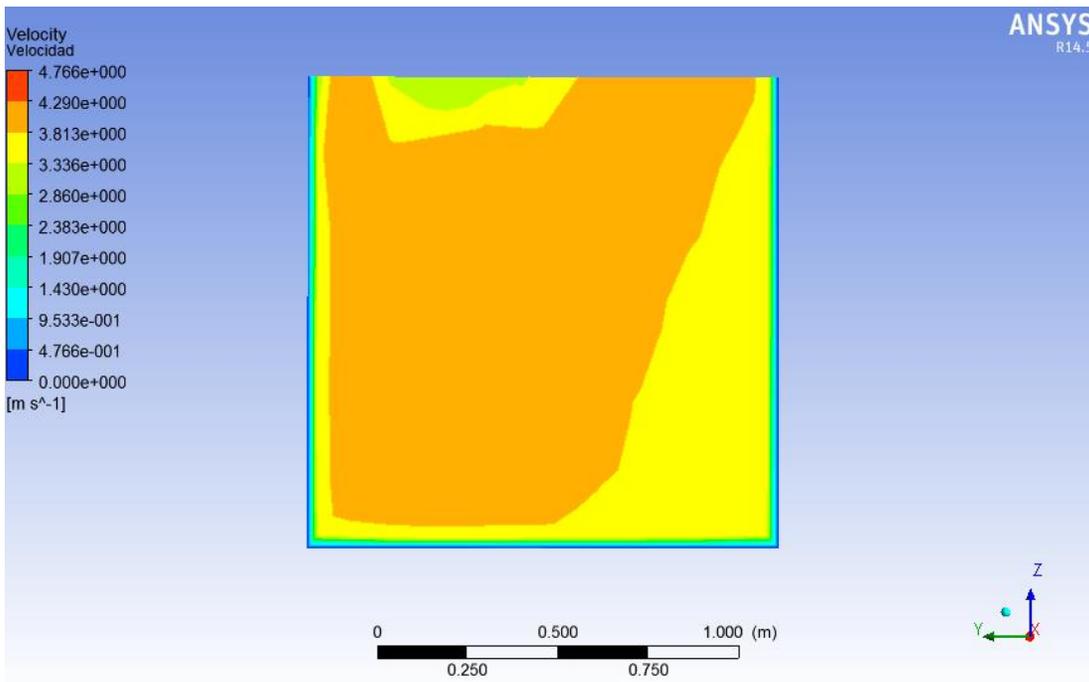


Figura 5.23 Velocidad a la Entrada de la Curva Canaleta 7,5

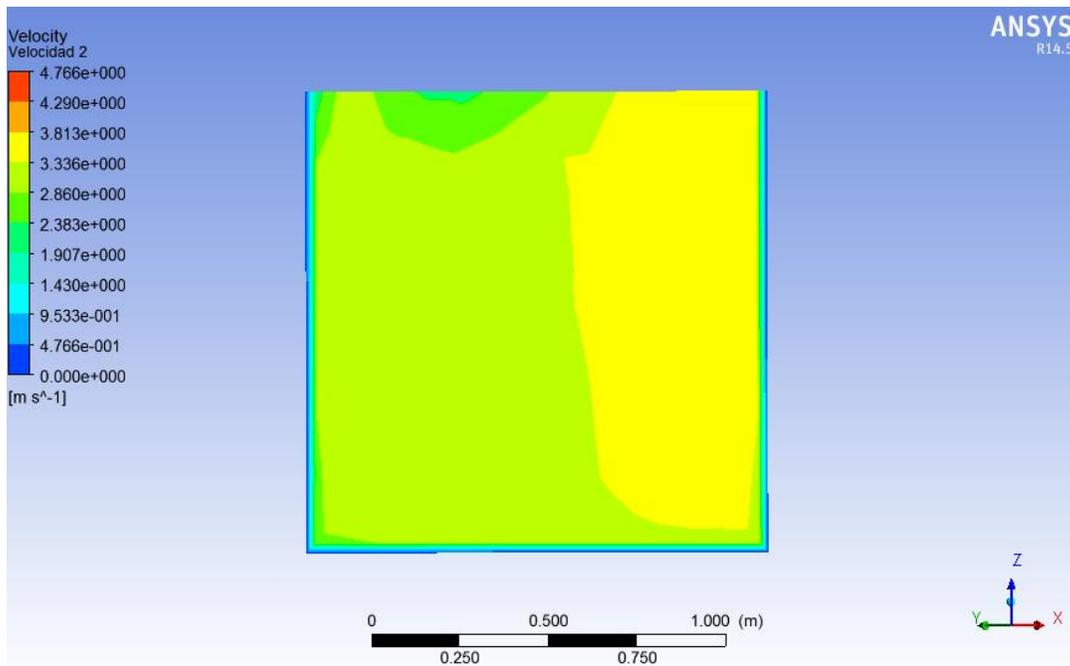


Figura 5.24 Velocidad en la Mitad de la Curva Canaleta 7,5

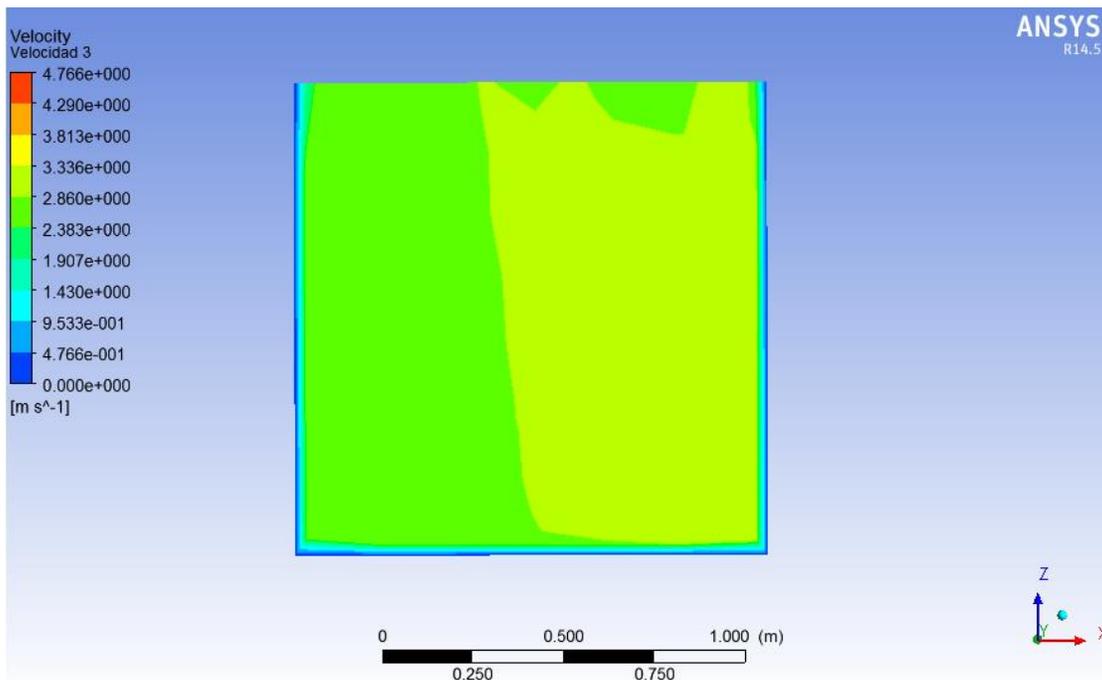


Figura 5.25 Velocidad a la Salida de la Curva Canaleta 7,5

En la imagen Figura 5.26 se observan las líneas de corriente a lo largo de la canaleta.

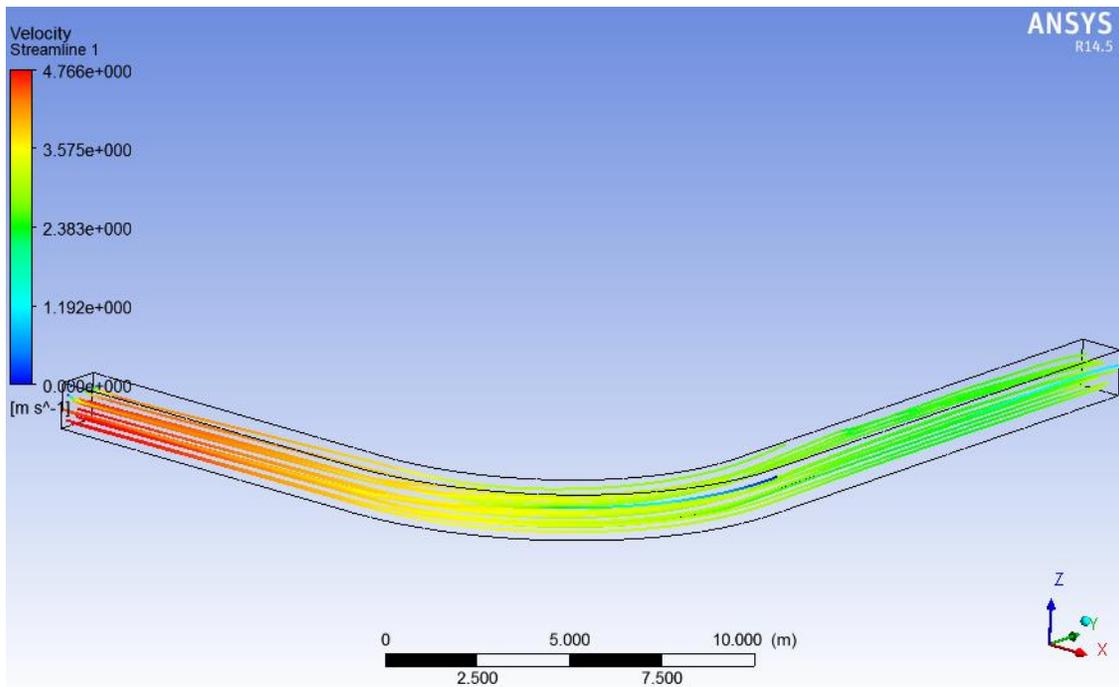


Figura 5.26 Líneas de Flujo Canaleta 7,5

En la imagen Figura 5.27 se muestra la isosuperficie de la variable fracción volumétrica de la pulpa con un valor 0,65. Además con cruces se muestran la altura máxima y mínima en el eje Z de esa isosuperficie.

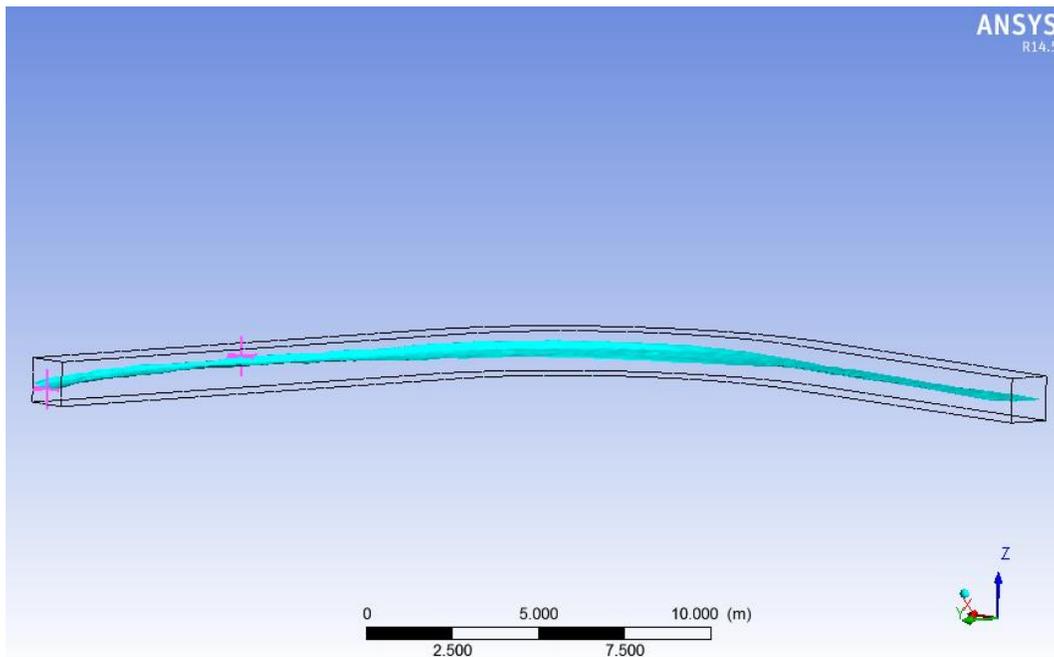


Figura 5.27 Isosuperficie Fracción Volumétrica Canaleta 7,5

Finalmente en la imagen se observa el esfuerzo de corte en las paredes de la canaleta.

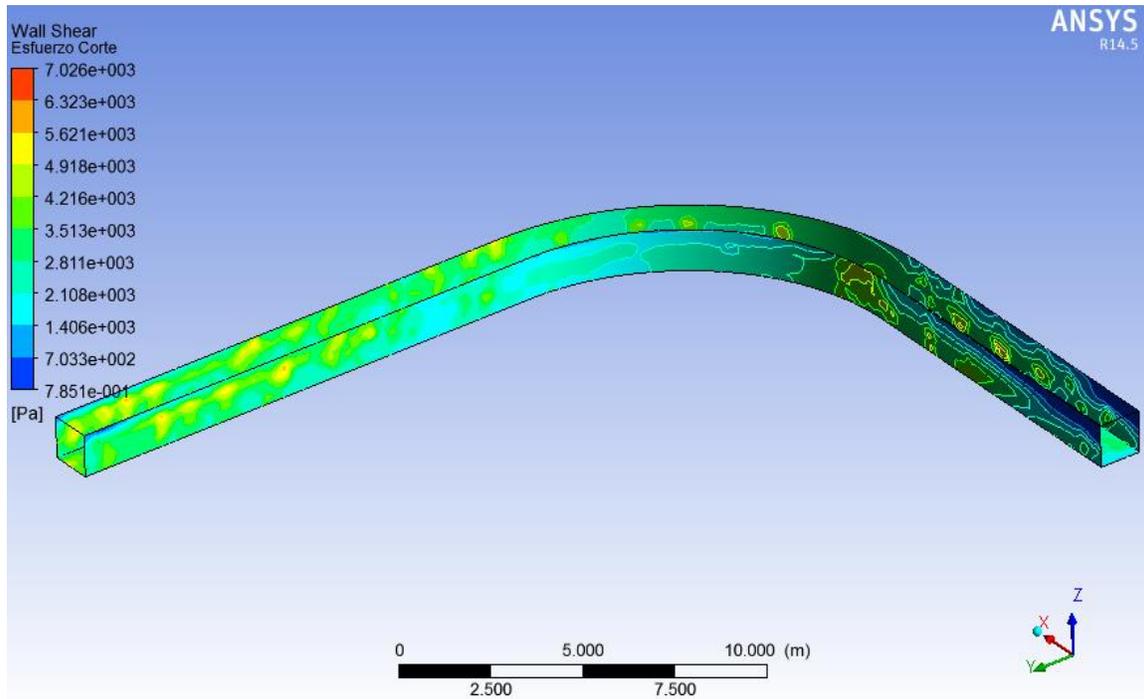


Figura 5.28 Esfuerzo de Corte en Paredes Canaleta 7,5

5.1.4 Resultados Canaleta Radio 12,5 [m]

A continuación en las imágenes Figura 5.29, Figura 5.30 y Figura 5.31 se observa la fracción volumétrica en los tres planos mostrados en la Figura 5.1.

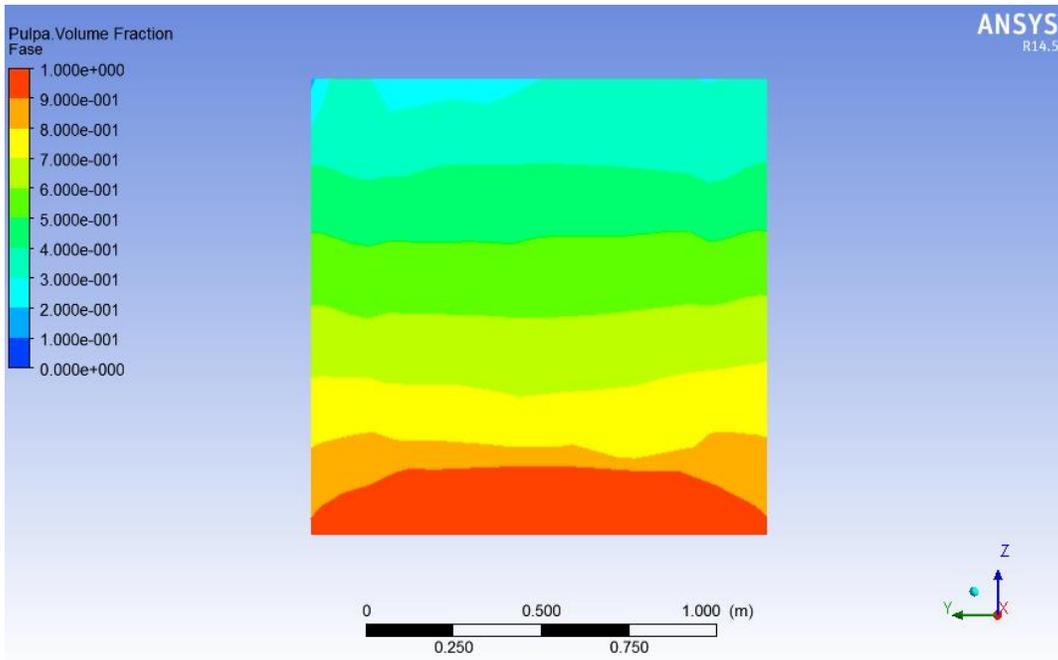


Figura 5.29 Fracción Volumétrica a la Entrada de la Curva Canaleta 12,5

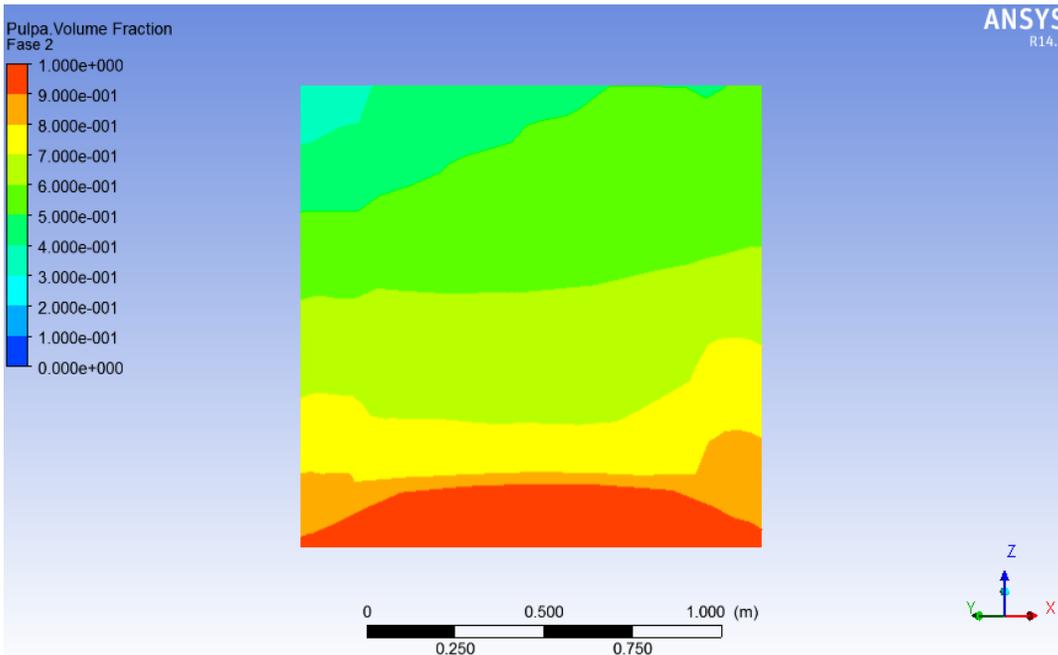


Figura 5.30 Fracción Volumétrica en la Mitad de la Curva Canaleta 12,5

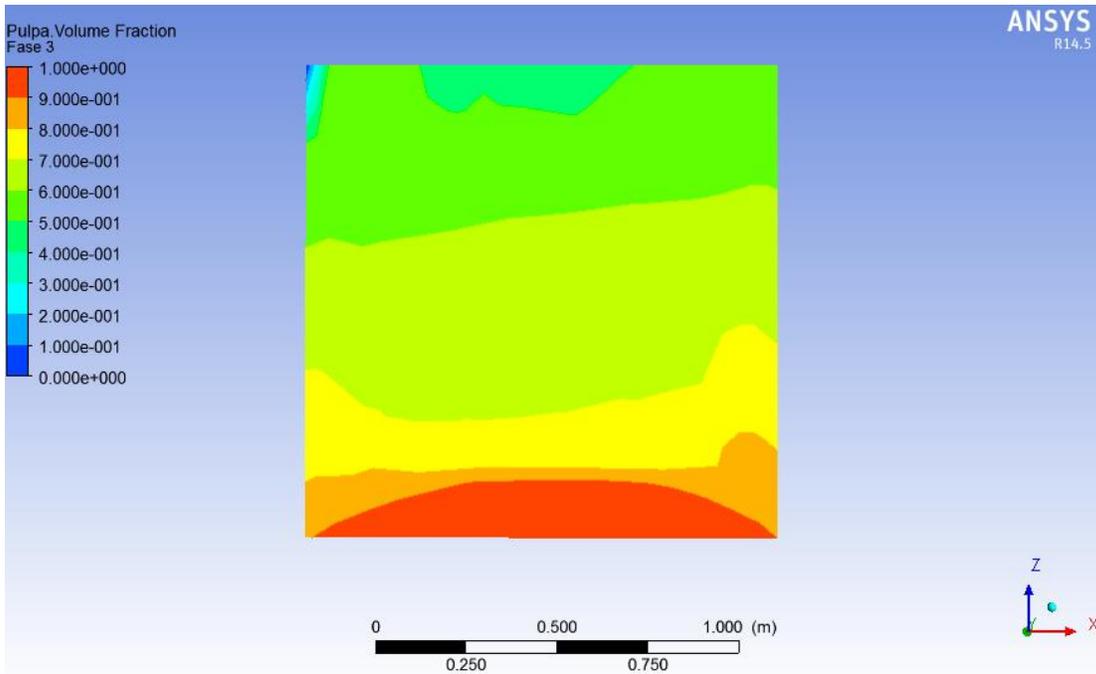


Figura 5.31 Fracción Volumétrica a la Salida de la Curva Canaleta 12,5

En las imágenes Figura 5.32, Figura 5.33 y Figura 5.34 se aprecia la velocidad de las fases en los mismos tres planos para la canaleta de radio de curvatura 12,5 [m].

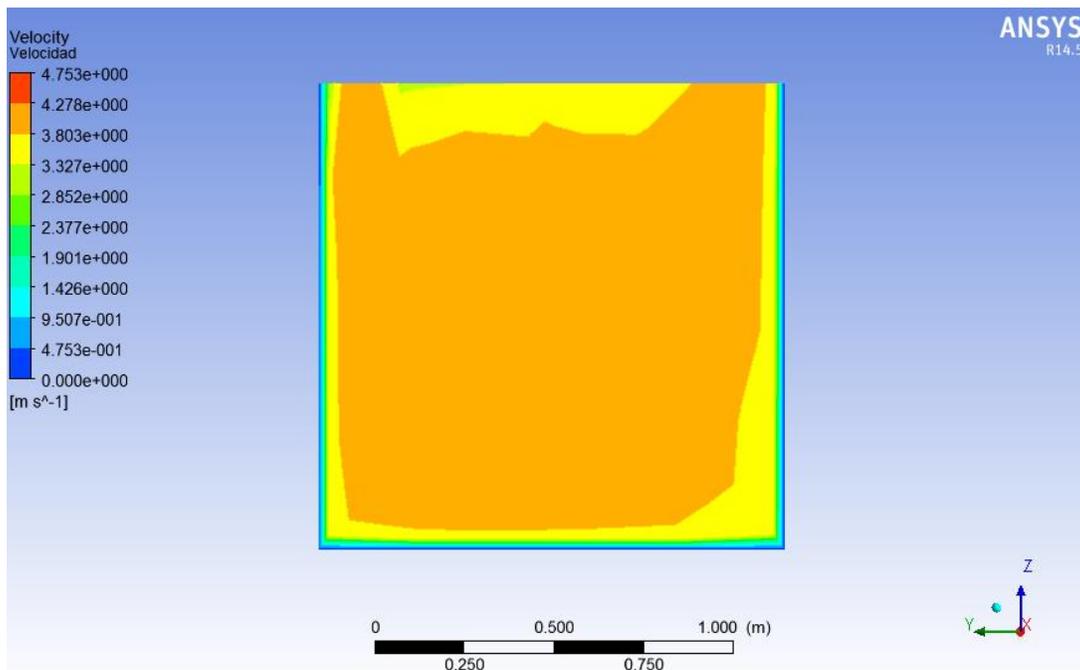


Figura 5.32 Velocidad a la Entrada de la Curva Canaleta 12,5

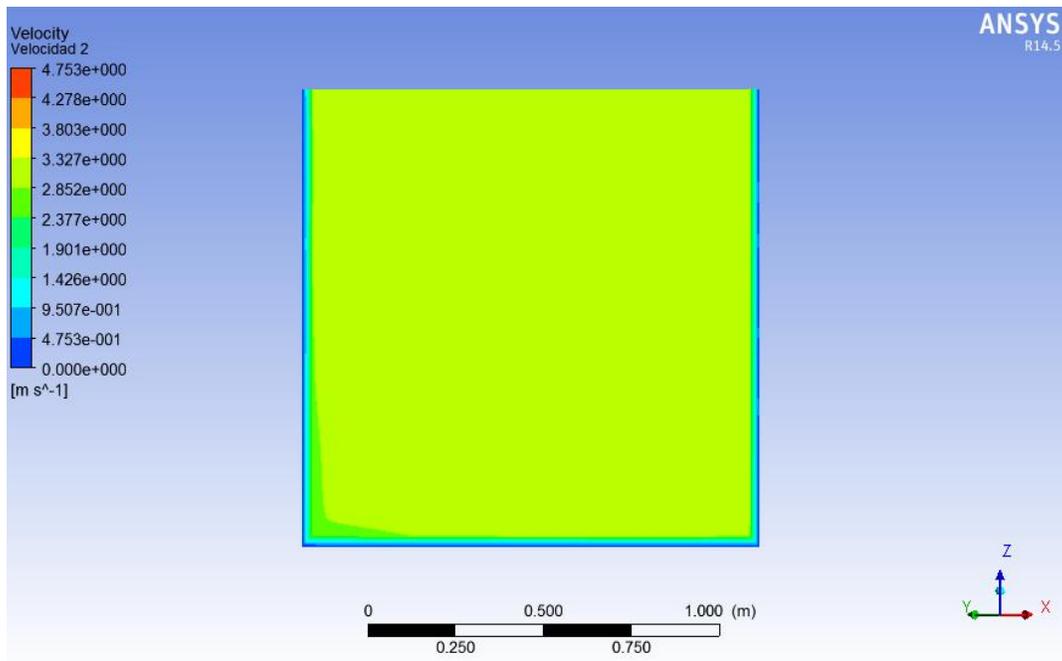


Figura 5.33 Velocidad en Medio de la Curva Canaleta 12,5

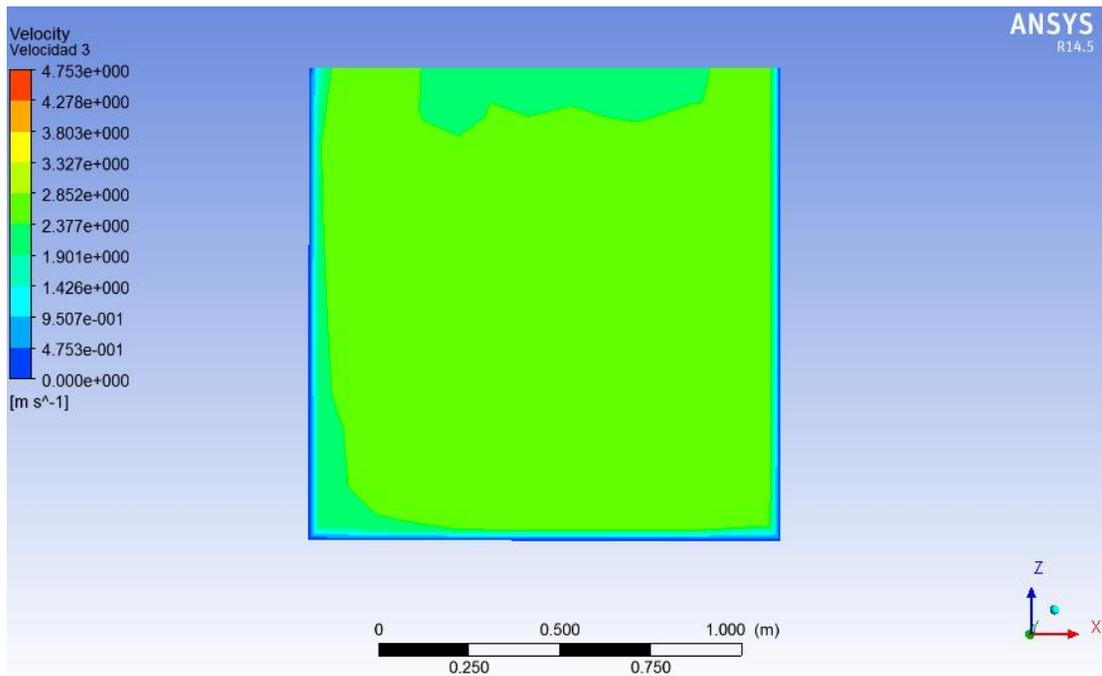


Figura 5.34 Velocidad a la Salida de la Curva Canaleta 12,5

En la imagen Figura 5.35 se observan las líneas de corriente a lo largo de la canaleta.

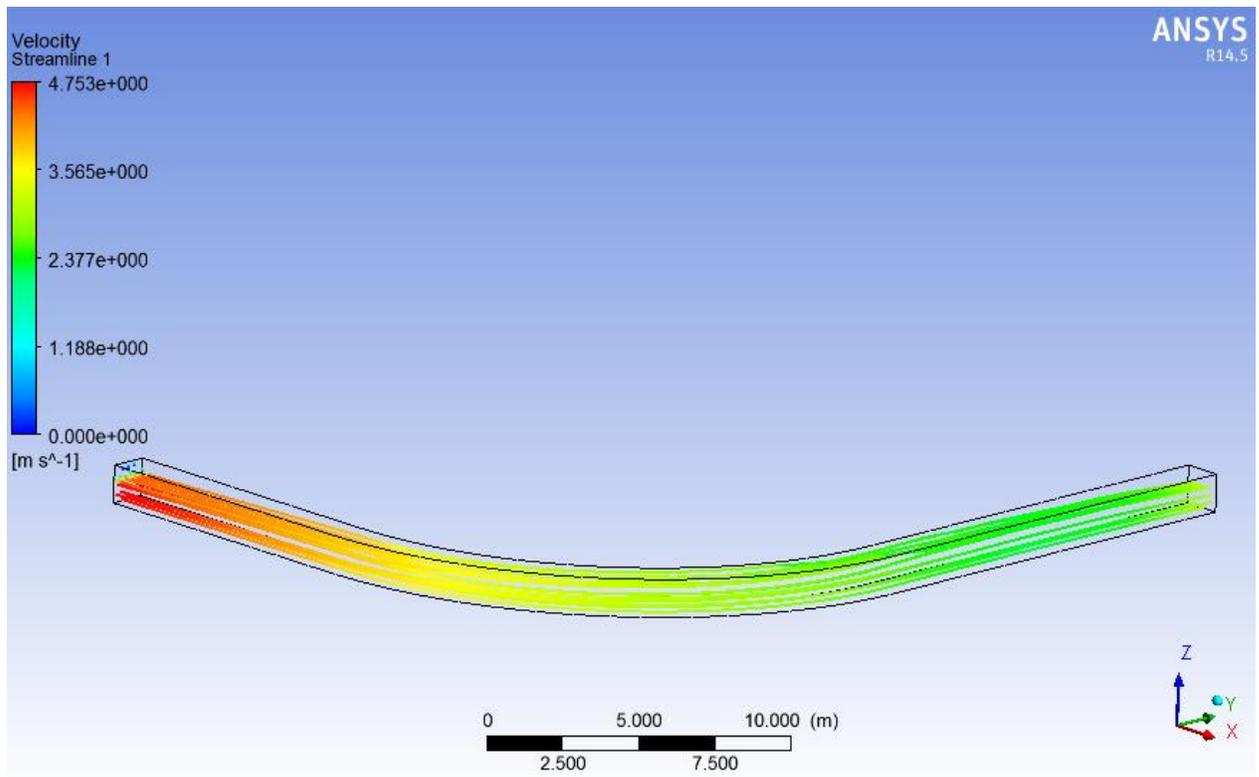


Figura 5.35 Líneas de Corriente Canaleta 12,5

En la imagen Figura 5.36 se muestra la isosuperficie de la variable fracción volumétrica de la pulpa con un valor 0,65. Además con cruces se muestran la altura máxima y mínima en el eje Z de esa isosuperficie.

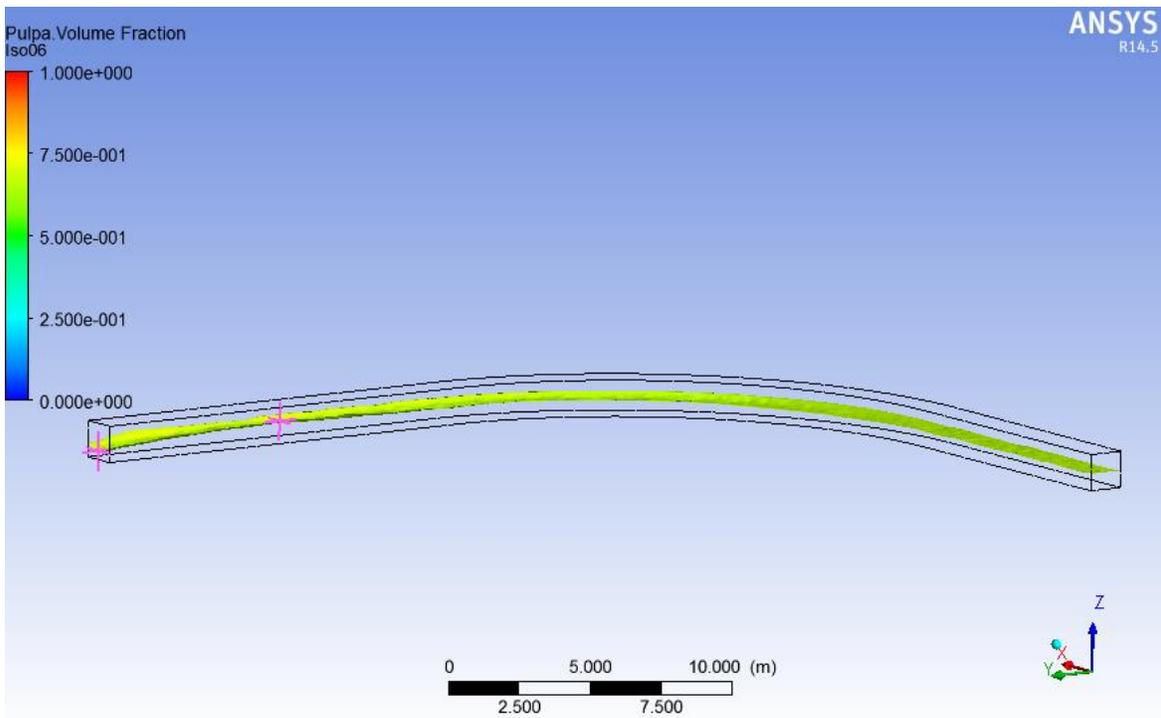


Figura 5.36 Isosuperficie Fracción Volumétrica Canaleta 12,5

Finalmente en la imagen Figura 5.37 se observa el esfuerzo de corte en las paredes de la canaleta.

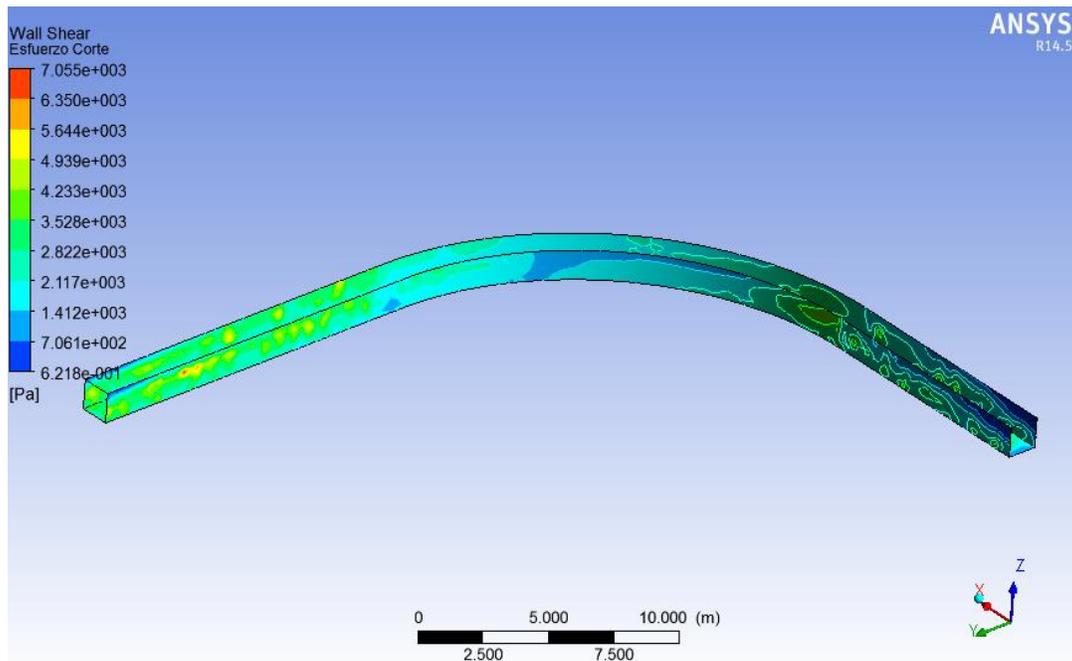


Figura 5.37 Esfuerzo de Corte en Paredes Canaleta 12,5

5.1.5 Resultados Canaleta Radio 15 [m]

A continuación en las imágenes Figura 5.38, Figura 5.39 y Figura 5.40 se observa la fracción volumétrica en los tres planos mostrados en la Figura 5.1.

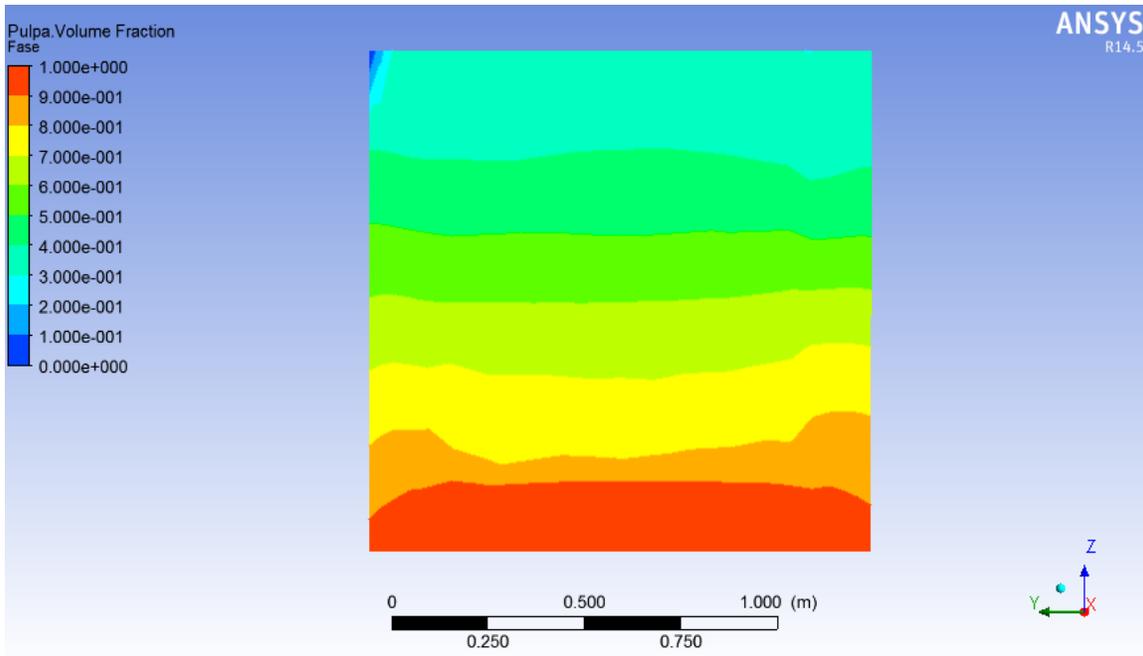


Figura 5.38 Fracción Volumétrica a la Entrada de la Curva Canaleta 15

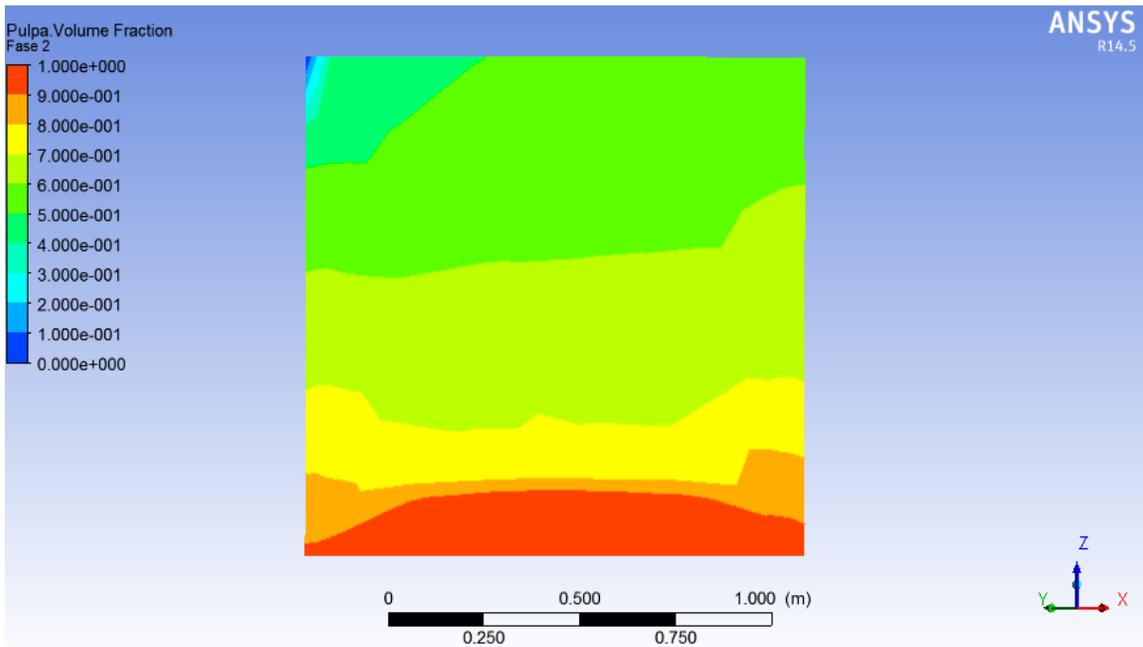


Figura 5.39 Fracción Volumétrica en la Mitad de la Curva Canaleta 15

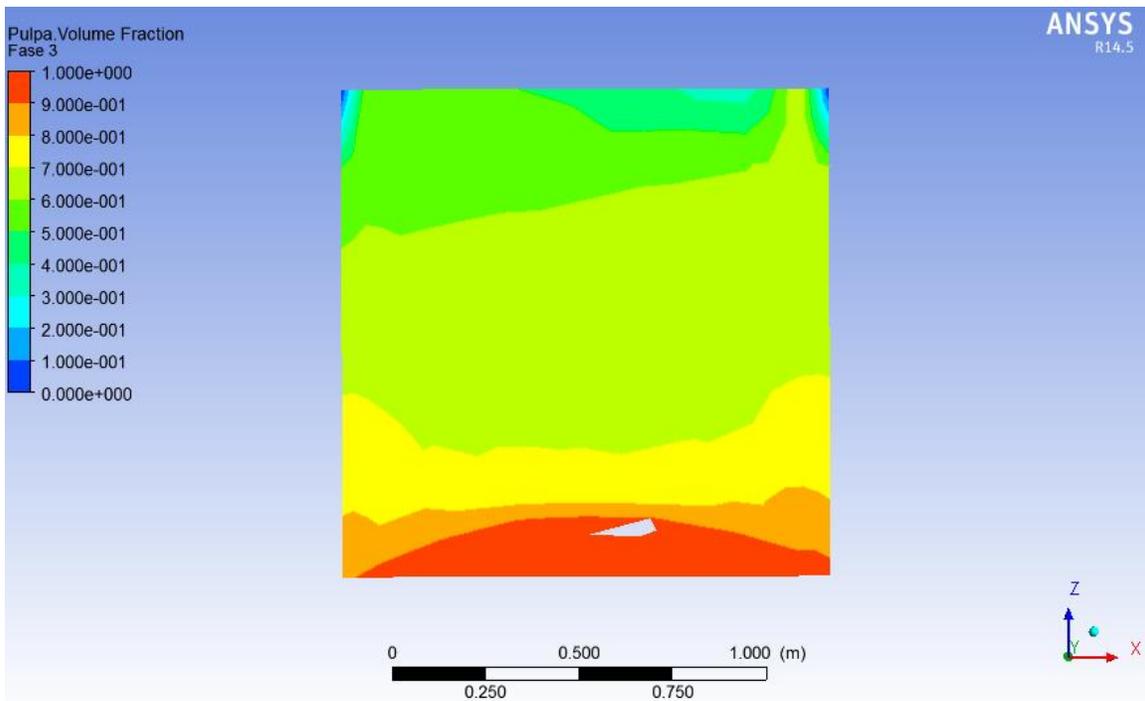


Figura 5.40 Fracción Volumétrica a la Salida de la Curva Canaleta 15

En las imágenes Figura 5.41, Figura 5.42 y Figura 5.43 se aprecia la velocidad de las fases en los mismos tres planos para la canaleta de radio de curvatura 15 [m].

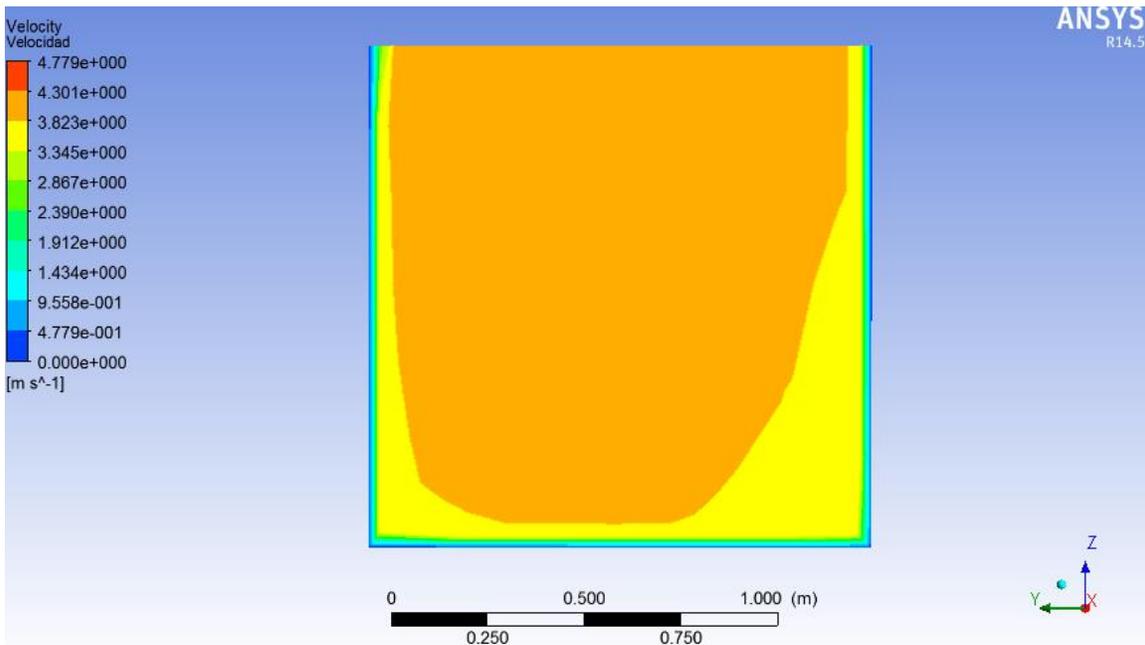


Figura 5.41 Velocidad a la Entrada de la Curva Canaleta 15

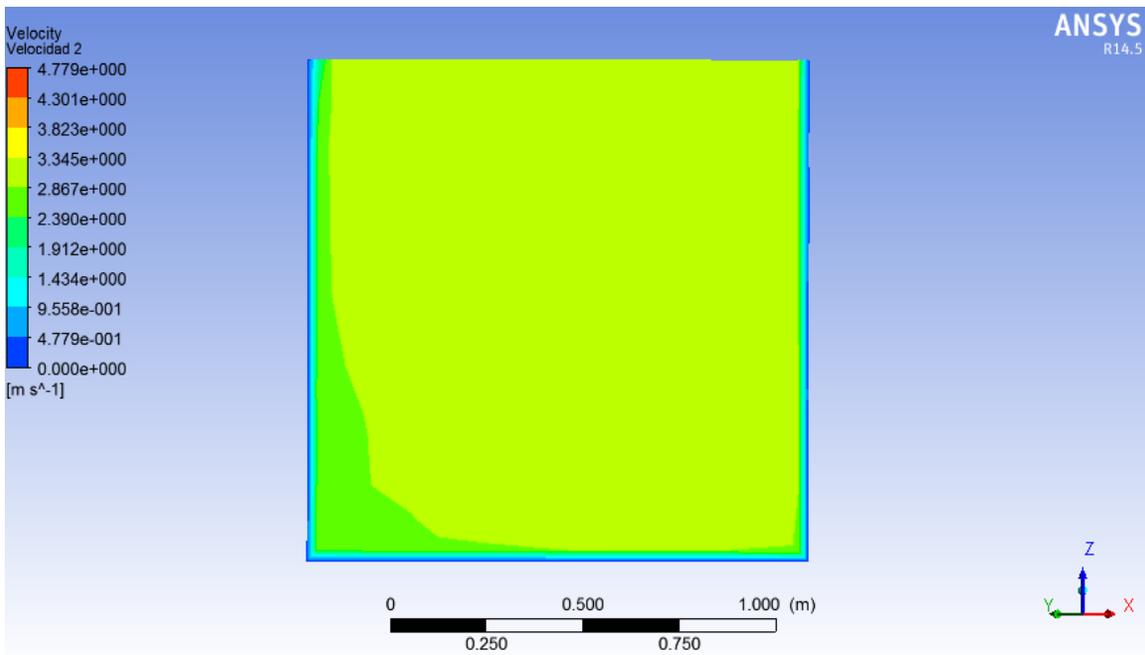


Figura 5.42 Velocidad en la Mitad de la Curva Canaleta 15

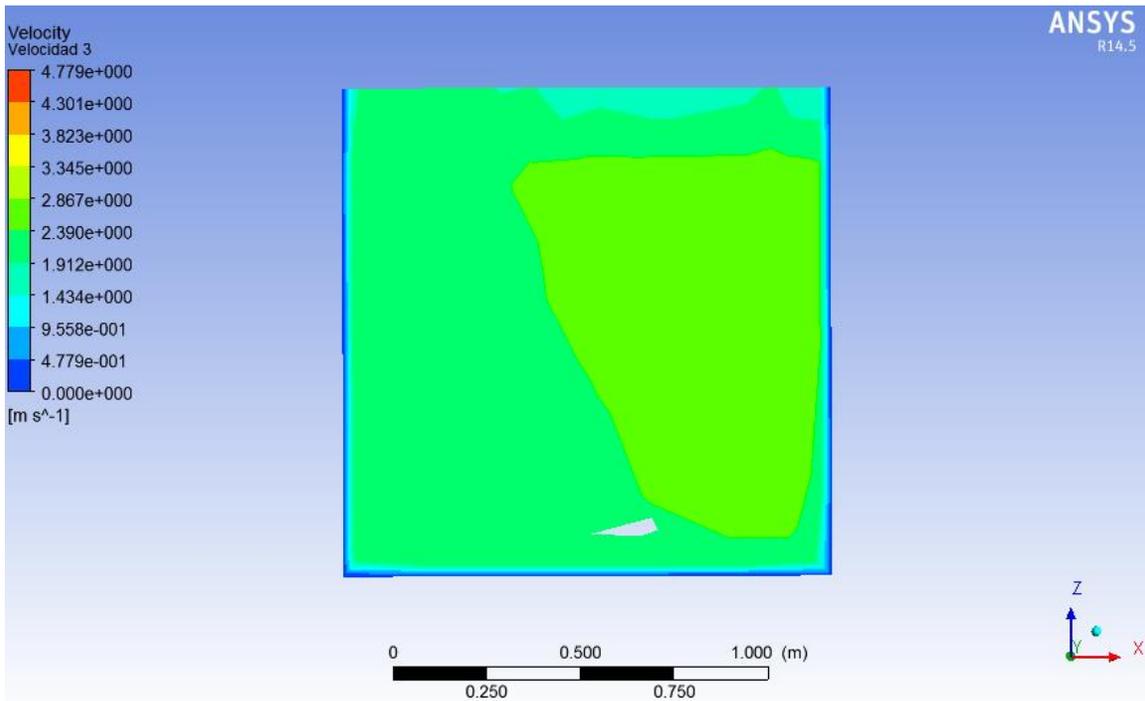


Figura 5.43 Velocidad a la Salida de la Curva Canaleta 15

En la imagen Figura 5.44 se observan las líneas de corriente a lo largo de la canaleta.

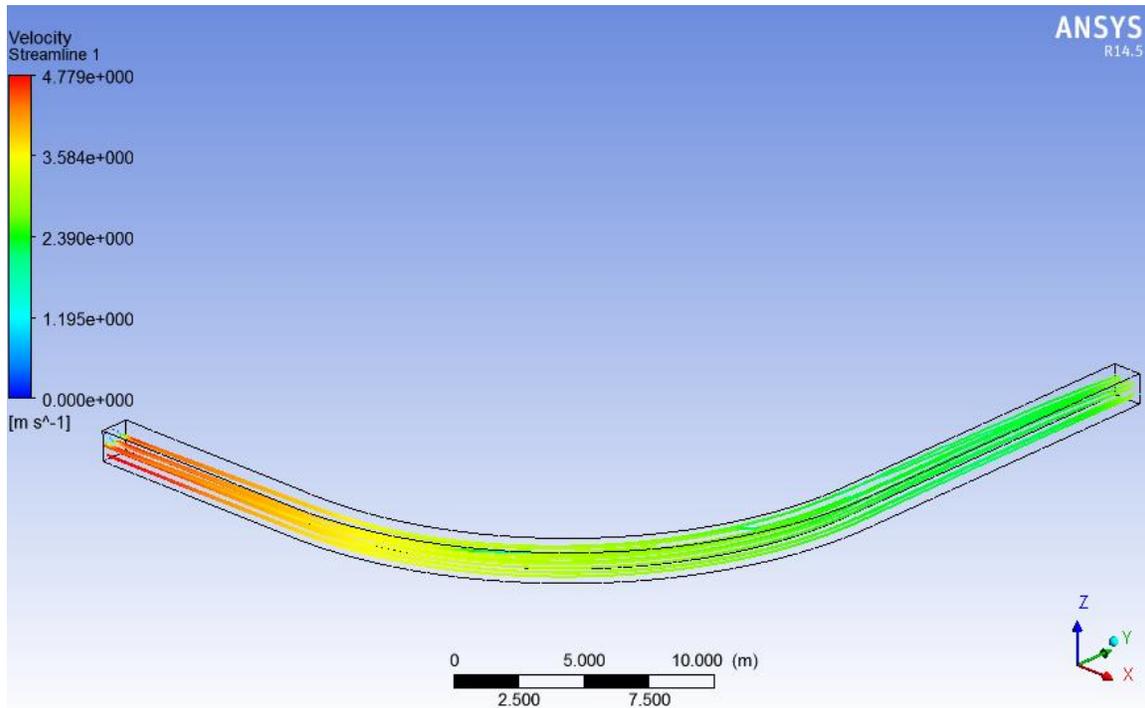


Figura 5.44 Líneas de Corriente en Canaleta 15

En la imagen Figura 5.45 se muestra la isosuperficie de la variable fracción volumétrica de la pulpa con un valor 0,65. Además con cruces se muestran la altura máxima y mínima en el eje Z de esa isosuperficie.

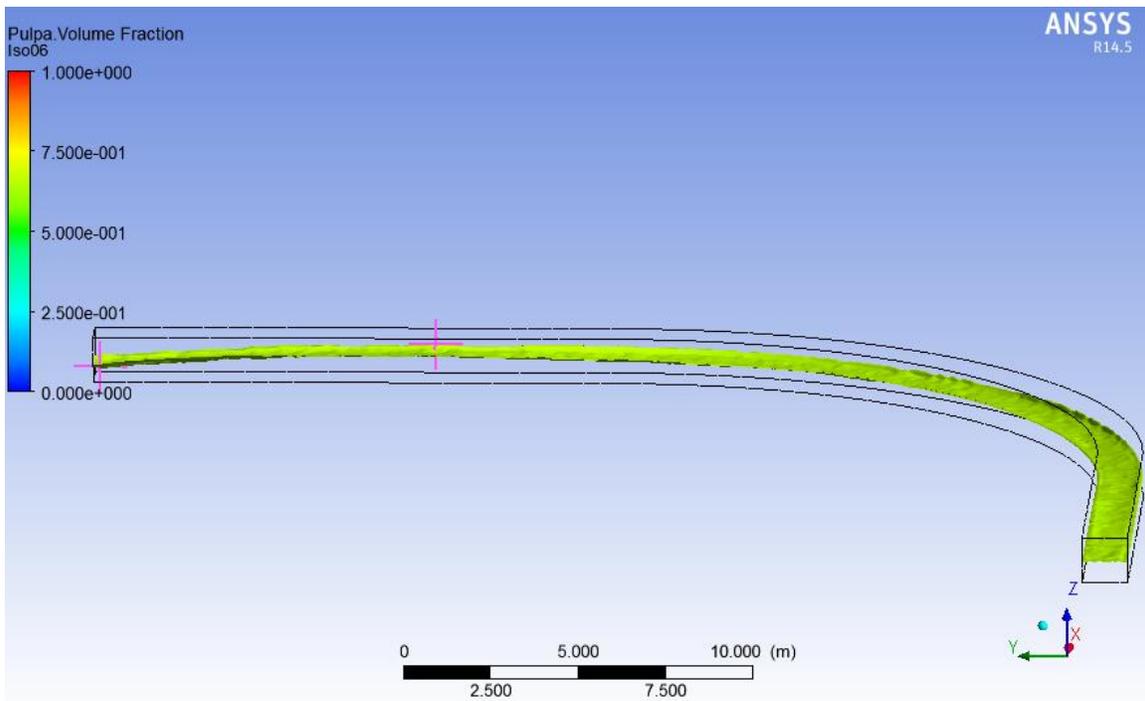


Figura 5.45 Isosuperficie Fracción Volumétrica Canaleta 15

Finalmente en la imagen se observa el esfuerzo de corte en las paredes de la canaleta.

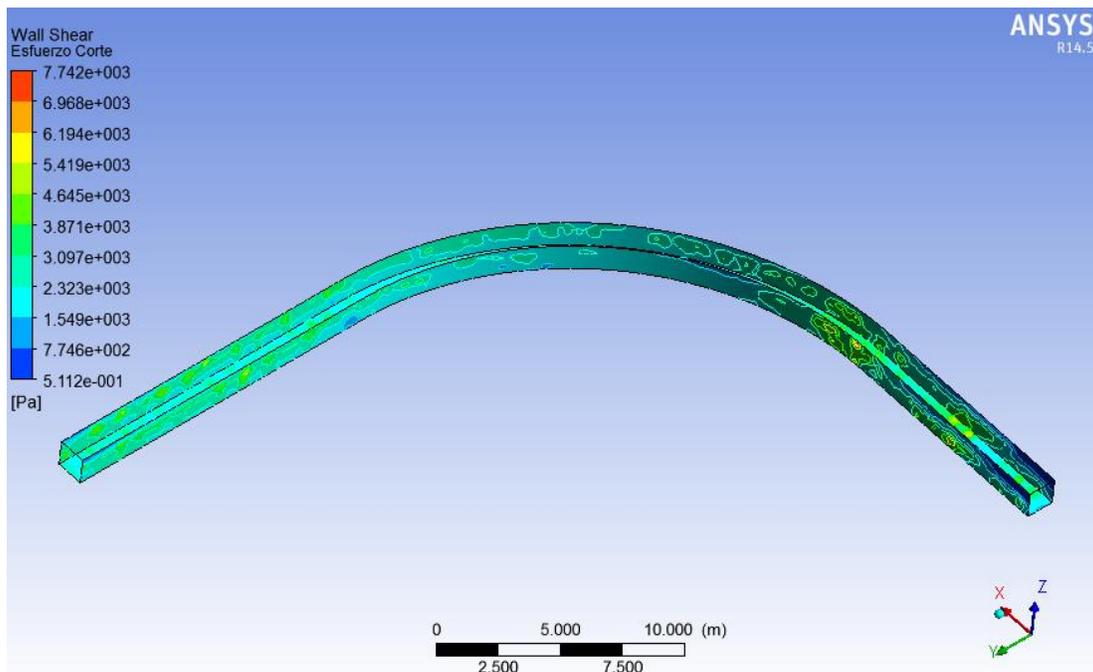


Figura 5.46 Esfuerzo de Corte en Paredes Canaleta 15

5.1.6 Resultados Canaleta Radio 20 [m]

A continuación en las imágenes Figura 5.47, Figura 5.48 y Figura 5.49 se observa la fracción volumétrica en los tres planos mostrados en la Figura 5.1.

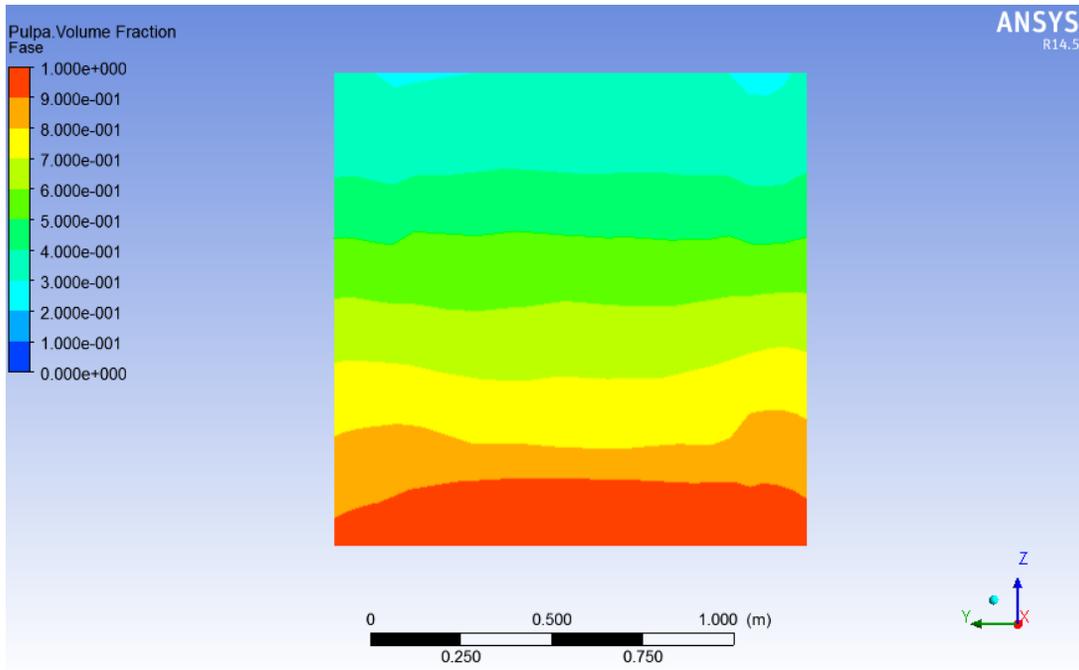


Figura 5.47 Fracción Volumétrica a la Entrada de la Curva Canaleta 20

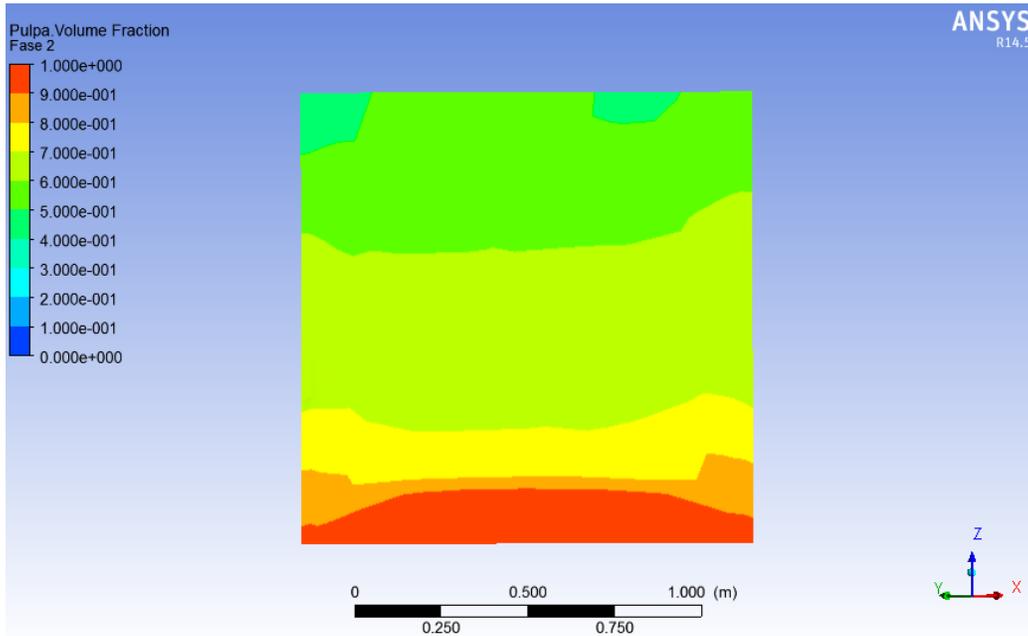


Figura 5.48 Fracción Volumétrica en la Mitad de la Curva Canaleta 20

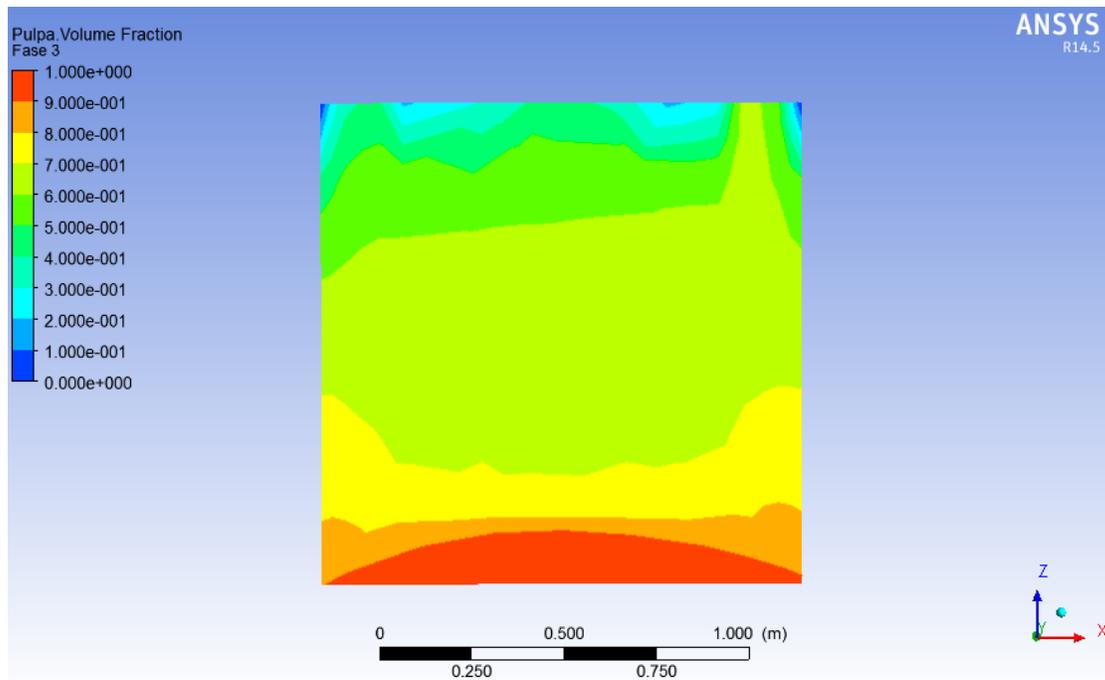


Figura 5.49 Fracción Volumétrica a la Salida de la Curva Canaleta 20

En las imágenes Figura 5.50, Figura 5.51 y Figura 5.52 se aprecia la velocidad de las fases en los mismos tres planos para la canaleta de radio de curvatura 20 [m].

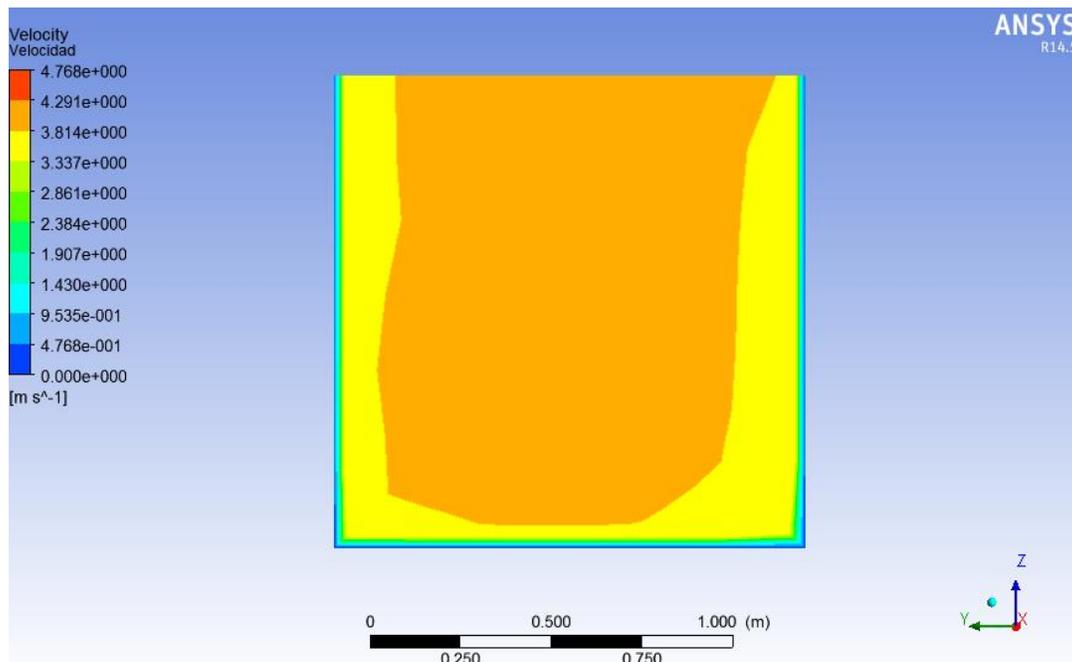


Figura 5.50 Velocidad a la Entrada de la Curva Canaleta 20

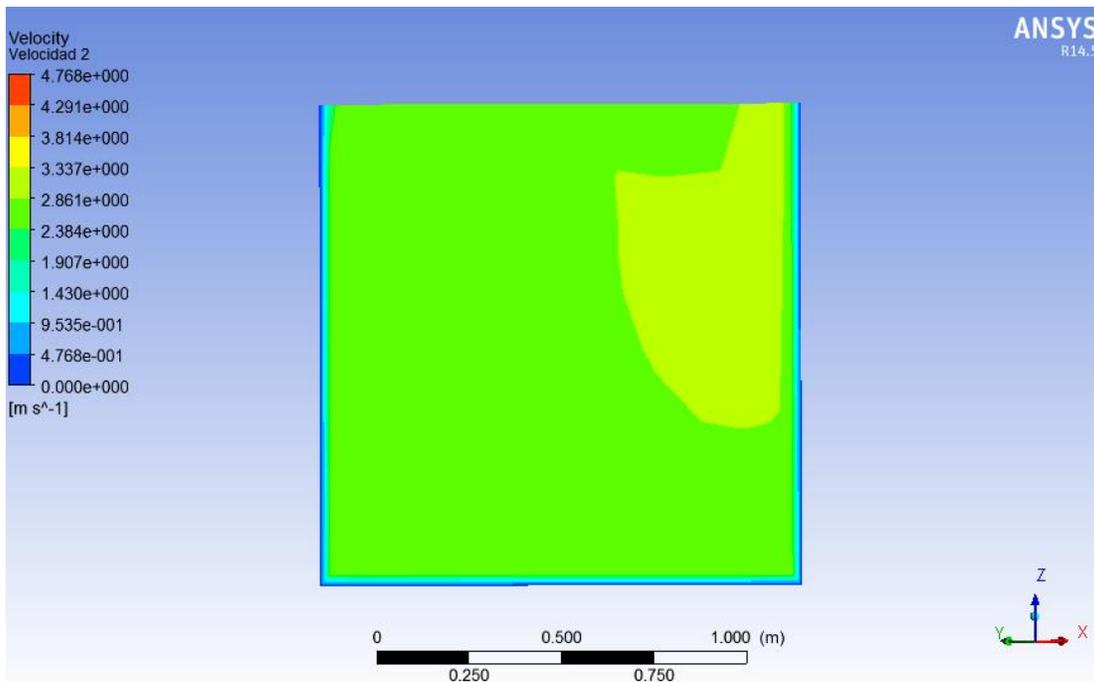


Figura 5.51 Velocidad en la Mitad de la Curva Canaleta 20

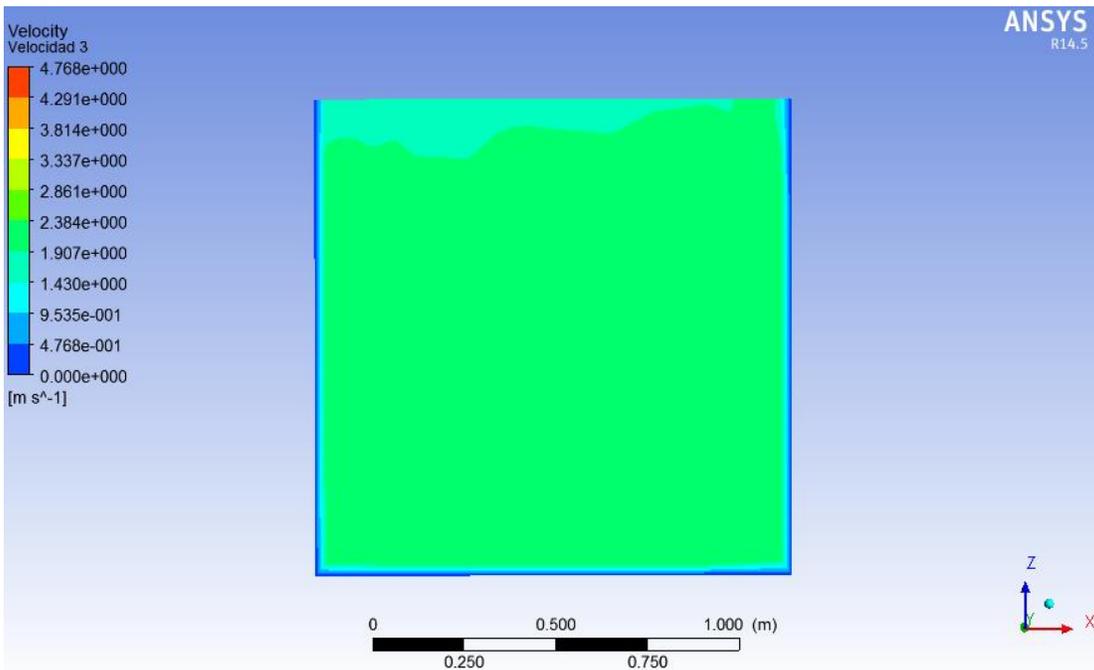


Figura 5.52 Velocidad a la Salida de la Curva Canaleta 20

En la imagen Figura 5.53 se observan las líneas de corriente a lo largo de la canaleta.

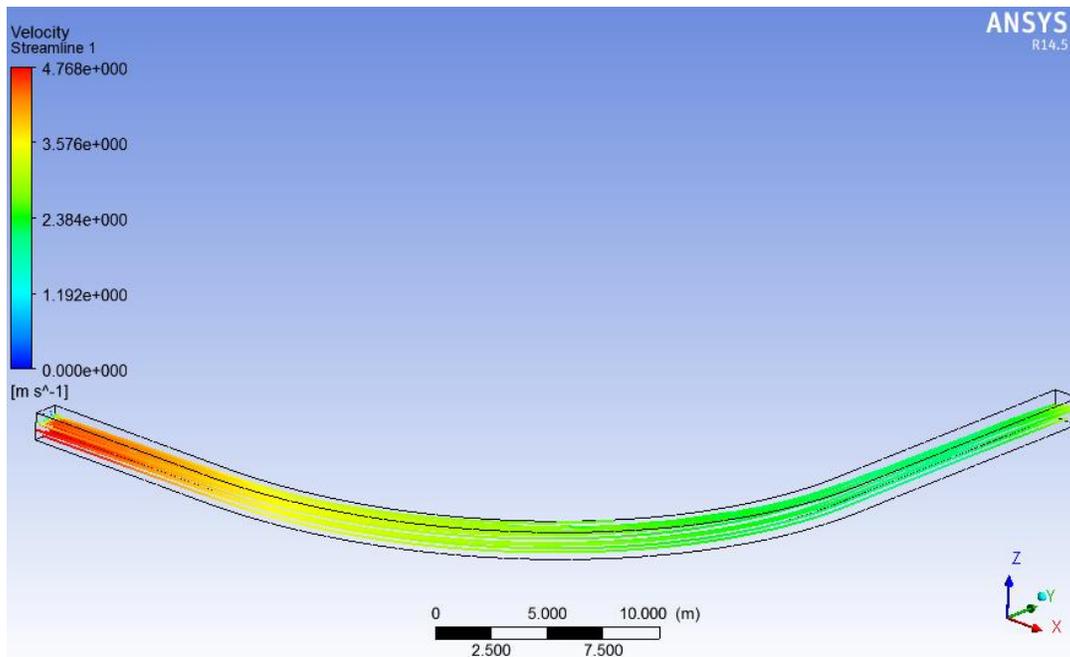


Figura 5.53 Líneas de Corriente en Canaleta 20

En la imagen se muestra la isosuperficie de la variable fracción volumétrica de la pulpa con un valor 0,65. Además con cruces se muestran la altura máxima y mínima en el eje Z de esa isosuperficie.

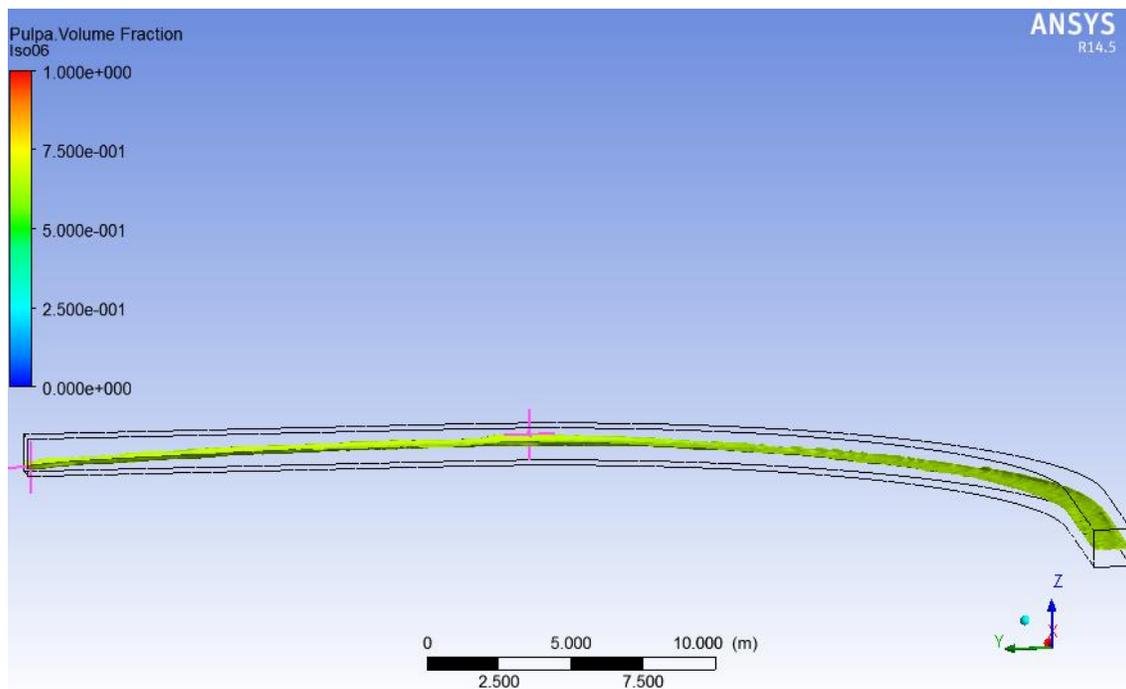


Figura 5.54 Isosuperficie Fracción Volumétrica Canaleta 20

Finalmente en la imagen Figura 5.55 se observa el esfuerzo de corte en las paredes de la canaleta.

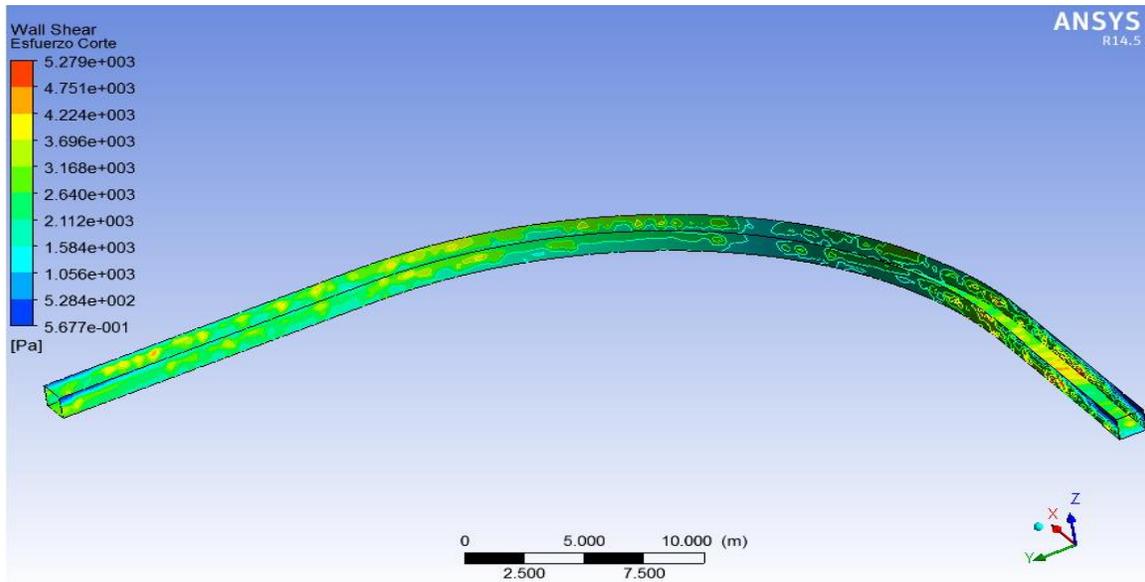


Figura 5.55 Esfuerzo de Corte en Paredes Canaleta 20

5.2 Turbulencia

A continuación en la Figura 5.56 se muestran los valores de y^+ obtenidos de la simulación con la canaleta de radio de curvatura 2,5. Se aprecia que los valores de este parámetro adimensional de turbulencia en ningún caso son inferiores a 15, que es el valor mínimo recomendado [7].

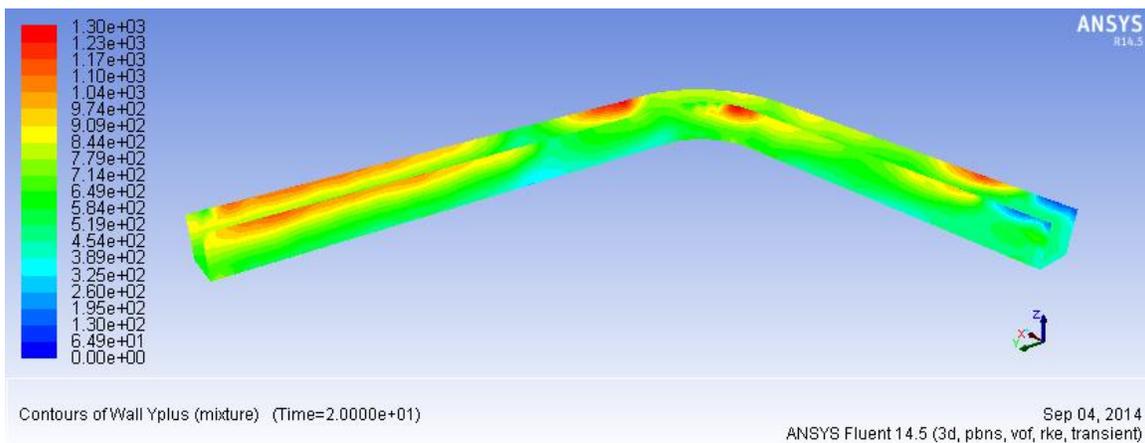


Figura 5.56 Valores de y^+ en las paredes de la canaleta 2,5

5.3 Trayectoria de Partículas

Para presentar los resultados de la trayectoria de las partículas se utiliza una imagen de las líneas de corriente para cada una de las canaletas.

En la Figura 5.57 se observa la trayectoria de partículas en la canaleta de radio de curvatura 2,5 [m]. Los colores representan el tiempo de residencia de las partículas en el dominio del fluido.

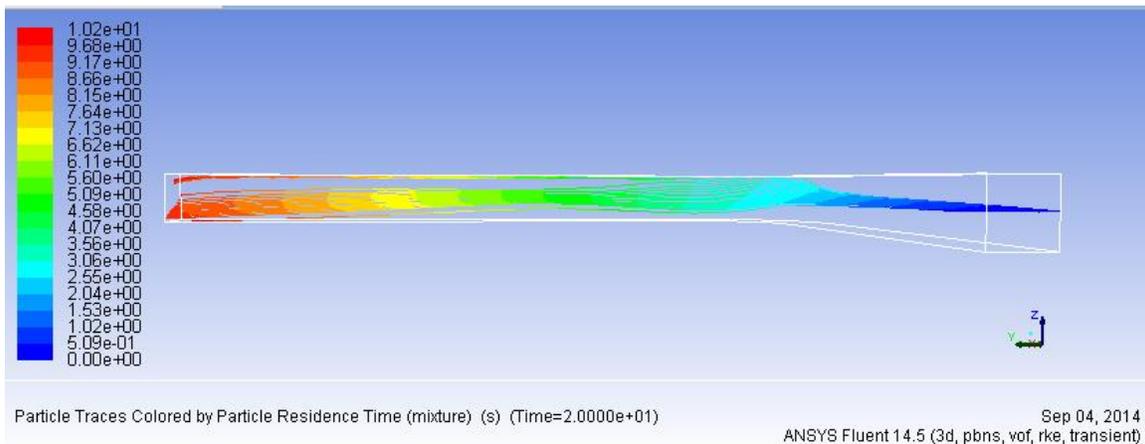


Figura 5.57 Trayectoria de Partículas Canaleta 2,5

En la Figura 5.57 se observa la trayectoria de partículas en la canaleta de radio de curvatura 5 [m].

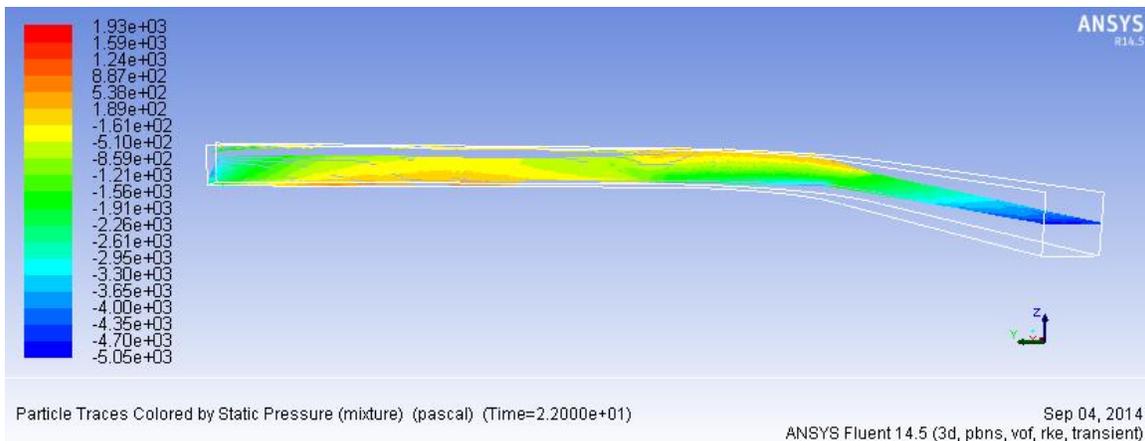


Figura 5.58 Trayectoria de Partículas Canaleta 5

En la Figura 5.57 se observa la trayectoria de partículas en la canaleta de radio de curvatura 7,5 [m].

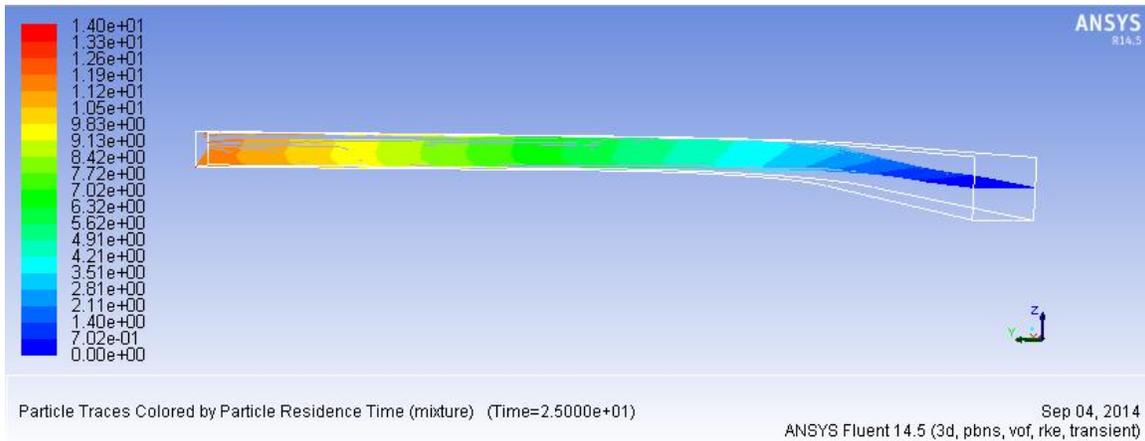


Figura 5.59 Trayectoria Partículas Canaleta 7,5

En la Figura 5.60 se observa la trayectoria de partículas en la canaleta de radio de curvatura 12,5 [m].

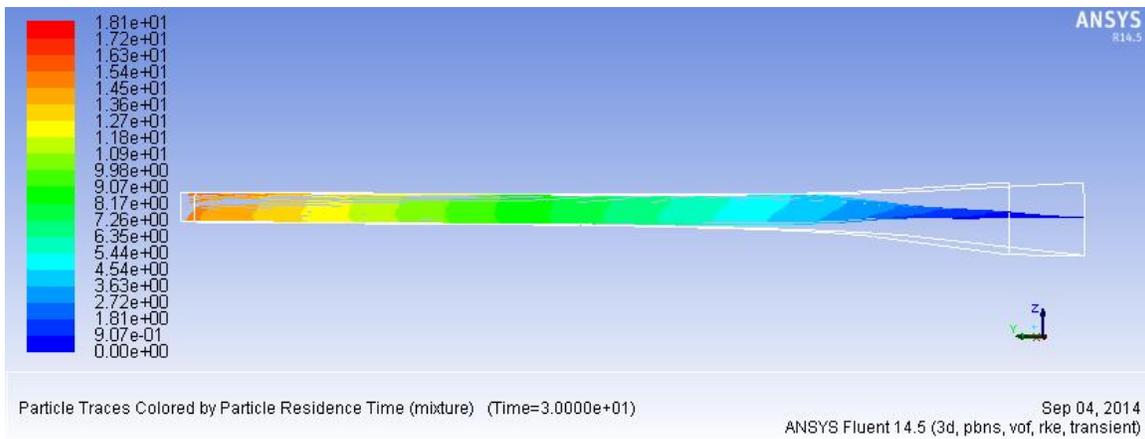


Figura 5.60 Trayectoria de Partículas Canaleta 12,5

En la Figura 5.61 se observa la trayectoria de partículas en la canaleta de radio de curvatura 15 [m].

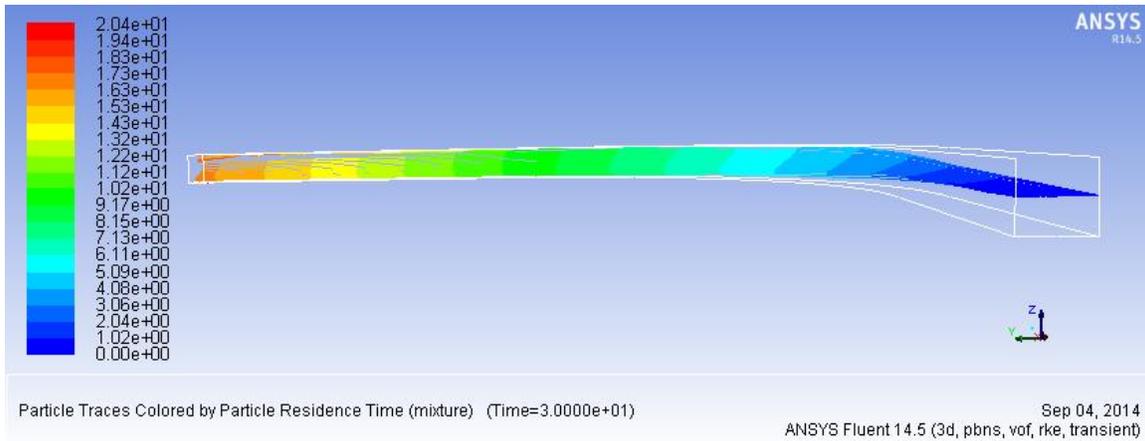


Figura 5.61 Trayectoria Partículas Canaleta 15

En la Figura 5.62 se observa la trayectoria de partículas en la canaleta de radio de curvatura 20 [m].

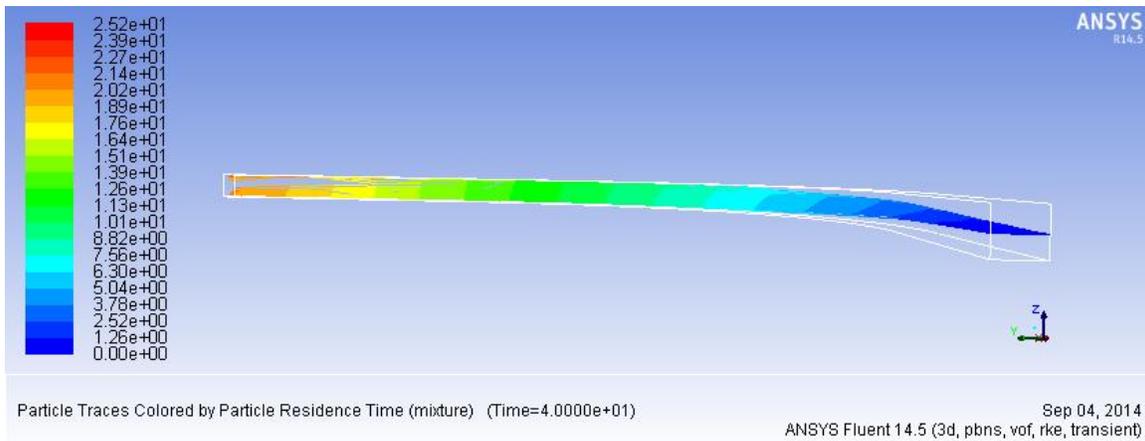


Figura 5.62 Trayectoria de Partículas Canaleta 20

5.4 Erosión

En las imágenes a continuación se presentan los resultados para la tasa de desgaste debido a la erosión en las paredes de las respectivas canaletas.

En todas las figuras la unidad para la erosión es de $[\text{kg}/\text{m}^2\text{s}]$.

En la Figura 5.63 se observa la erosión en la canaleta de radio de curvatura 2,5 [m].

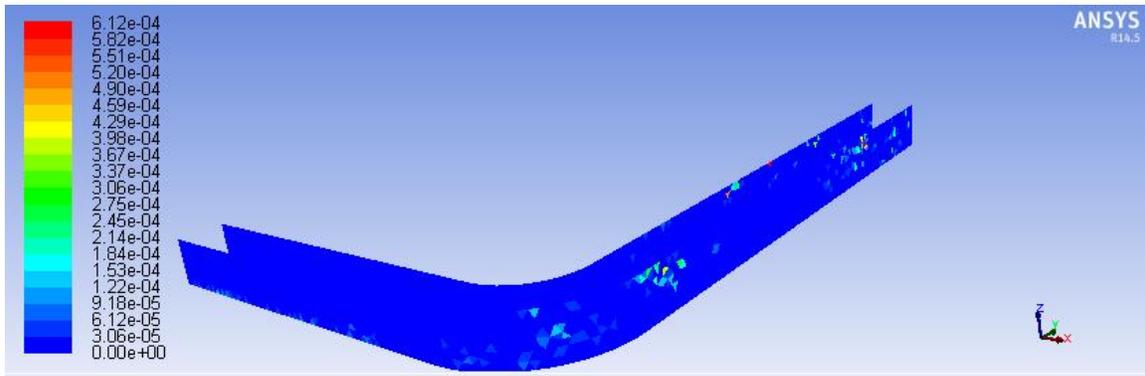


Figura 5.63 Erosión en Canaleta 2,5

En la Figura 5.64 se observa la erosión en la canaleta de radio de curvatura 5 [m].

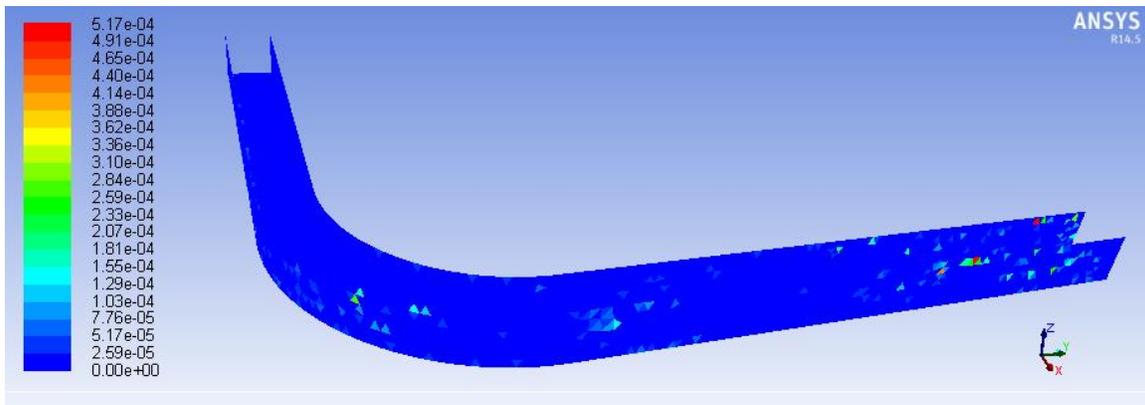


Figura 5.64 Erosión en Canaleta 5

En la Figura 5.65 se observa la erosión en la canaleta de radio de curvatura 7,5 [m].

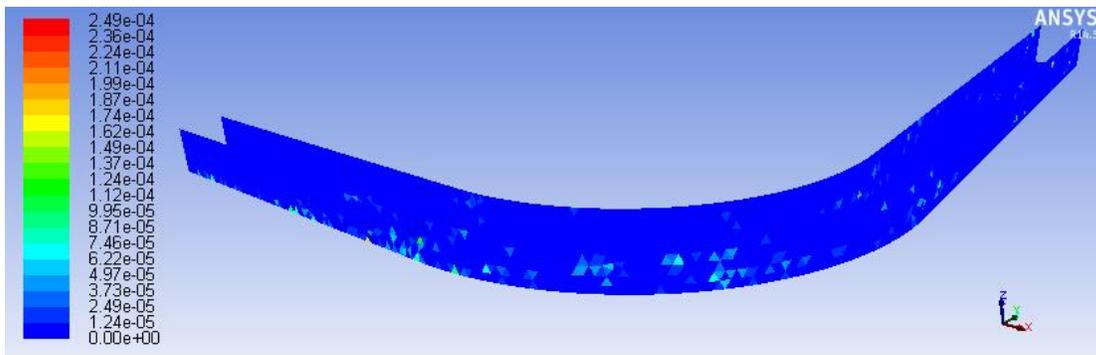


Figura 5.65 Erosión en Canaleta 7,5

En la Figura 5.66 se observa la erosión en la canaleta de radio de curvatura 12,5 [m].

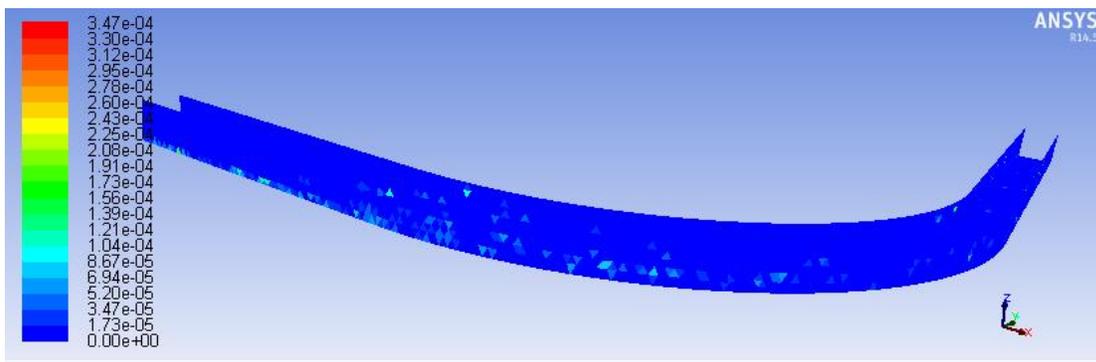


Figura 5.66 Erosión en Canaleta 12,5

En la Figura 5.67 se observa la erosión en la canaleta de radio de curvatura 15 [m].

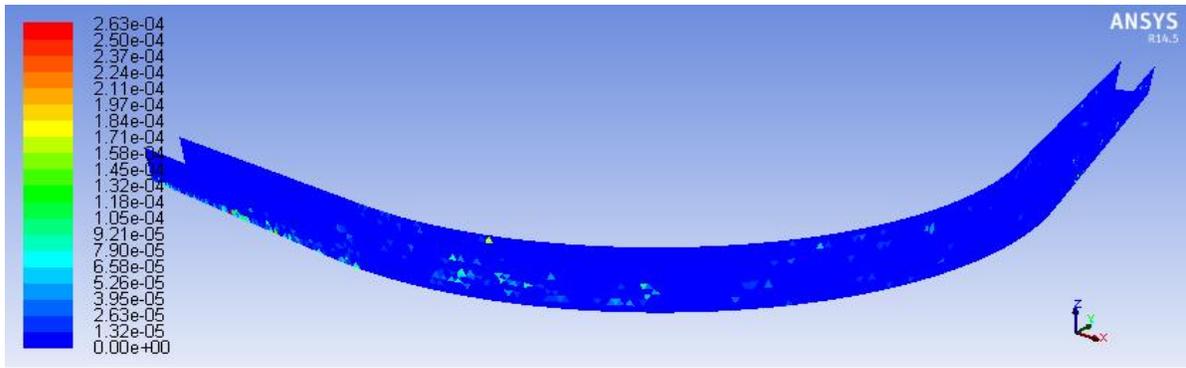


Figura 5.67 Erosión en Canaleta 15

En la Figura 5.68 se observa la erosión en la canaleta de radio de curvatura 20 [m].

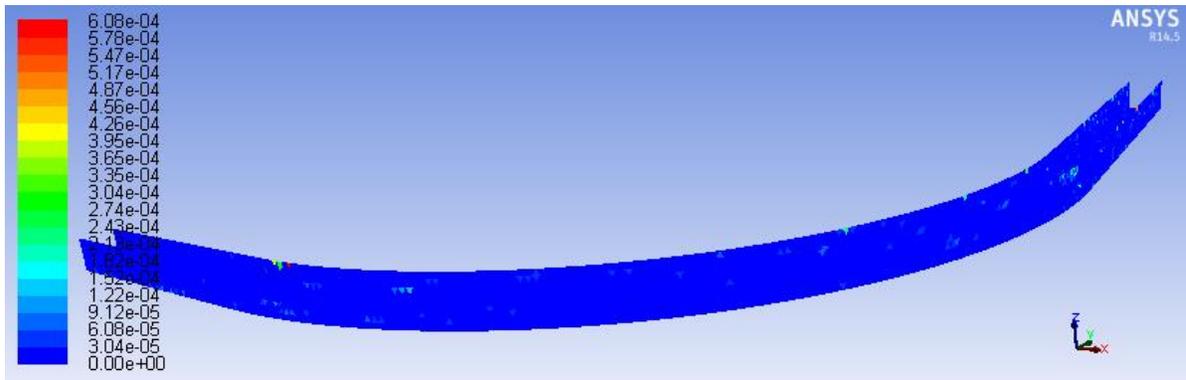


Figura 5.68 Erosión en Canaleta 20

6 Análisis de Resultados

Basado en los resultados del capítulo anterior, en este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos y una comparación entre las simulaciones. Se espera poder determinar la influencia del radio de curvatura en las distintas variables en estudio.

En particular para la comparación se utilizarán los gráficos altura máxima de escurrimiento vs radio de curvatura y tasa de desgaste anual vs radio de curvatura.

6.1 Fluidodinámica

En primer lugar, se puede observar en todas las figuras de fracción volumétrica pertenecientes a la mitad de la curva y a la salida de la curva, que se forma una pendiente en la interfaz producida por la curva. Además se aprecia que esta pendiente es cada vez más tenue a medida que crece el radio de curvatura, haciéndose casi imperceptible en la canaleta de radio de curvatura 20 [m].

Se esperaba que se produjese este fenómeno en que se forma esta diferencia de alturas de escurrimiento en el mismo plano a lo largo de la curva, pudiendo producirse un rebalse de relave en alguno de los casos.

Es apreciable en las imágenes de las Isosuperficies que la inclinación disminuye a medida que se agranda el radio de curvatura. Particularmente en la canaleta con radio 2,5 [m] se produce una pendiente muy superior a la que se produce en todas las otras canaletas. Sin embargo, hasta en la canaleta con radio de curvatura de 20 [m] se puede apreciar una leve pendiente que se produce en la curva.

En lo que a la velocidad respecta, es apreciable para todas las simulaciones que en la curva, se produce una diferencia de velocidades entre la fracción del fluido hacia el interior de la curva y el fluido hacia el exterior de la curva, siendo mayor en este último caso.

Se observa también que a medida que el radio de curvatura es mayor, la velocidad se vuelve casi contante en la sección en un punto determinado de la canaleta. Esto se aprecia en los planos en la mitad de la curva y a la salida de la curva de las simulaciones con radios de curvatura 12,5 [m], 15 [m] y 20 [m].

Otro aspecto relacionado a la velocidad que se aprecia en los resultados, es el hecho que ésta se ve reducida con la curva. Esto es claramente apreciable en las imágenes de las líneas de corriente. Esto era algo esperable debido al cambio de dirección que se produce en la curva y el roce producido con las paredes en la curva.

Como se menciona en el capítulo anterior, se supuso que la interfaz entre pulpa y aire se producía en un 65% de fracción volumétrica de pulpa. Basado en esto, se determina la altura máxima de escurrimiento para cada una de las simulaciones.

Es importante mencionar que para los radios de curvatura más grandes la altura máxima de escurrimiento se produce más allá de la curva, en una especie de resalto en la zona posterior a la curva. Sin embargo para los tres radios de curvatura menores, 2,5 [m], 5 [m] y 7,5 [m], la altura máxima de escurrimiento se produce en la zona de la curva y como se menciona anteriormente va decreciendo a medida que crece el radio de curvatura.

Una explicación posible para el resalto que se produce es el número de Froude. Si bien se utiliza un número de Froude 1,25 con la disminución de velocidad luego de la curva este se ve reducido y se acerca al valor crítico de 1. Como se expone en el capítulo de antecedentes, un valor del número de Froude mayor que 1 asegura que perturbaciones que se produzcan aguas abajo, no afecten el flujo aguas arriba.

Se puede apreciar en la isosuperficie de la canaleta de radio de curvatura 2,5 [m] que el relave rebalsaría. Esto debido a que se producen varios puntos máximos con $z=1,3$ [m], el cual es el alto total de la sección de la canaleta. Es la única canaleta en la que se produciría este fenómeno de acuerdo a los resultados de las simulaciones. Claramente una canaleta con esa sección nunca debiese tener un radio de curvatura de esa magnitud, el cual es 5 veces menor al recomendado para el caudal utilizado.

En la Figura 6.1 se muestra un gráfico altura máxima de escurrimiento vs radio de curvatura. Se puede apreciar que entre el radio de curvatura 2,5 [m] y 5 [m] se produce un pronunciado descenso. A partir de ahí, continúa disminuyendo la altura máxima de escurrimiento pero de manera más paulatina, hasta la última canaleta, de radio de curvatura 20 [m], en la cual se presenta un aumento. Como se expuso anteriormente, esto se debe a un resalto a la salida de la curva, que se ocasiona probablemente por el bajo número de Froude en esa zona.

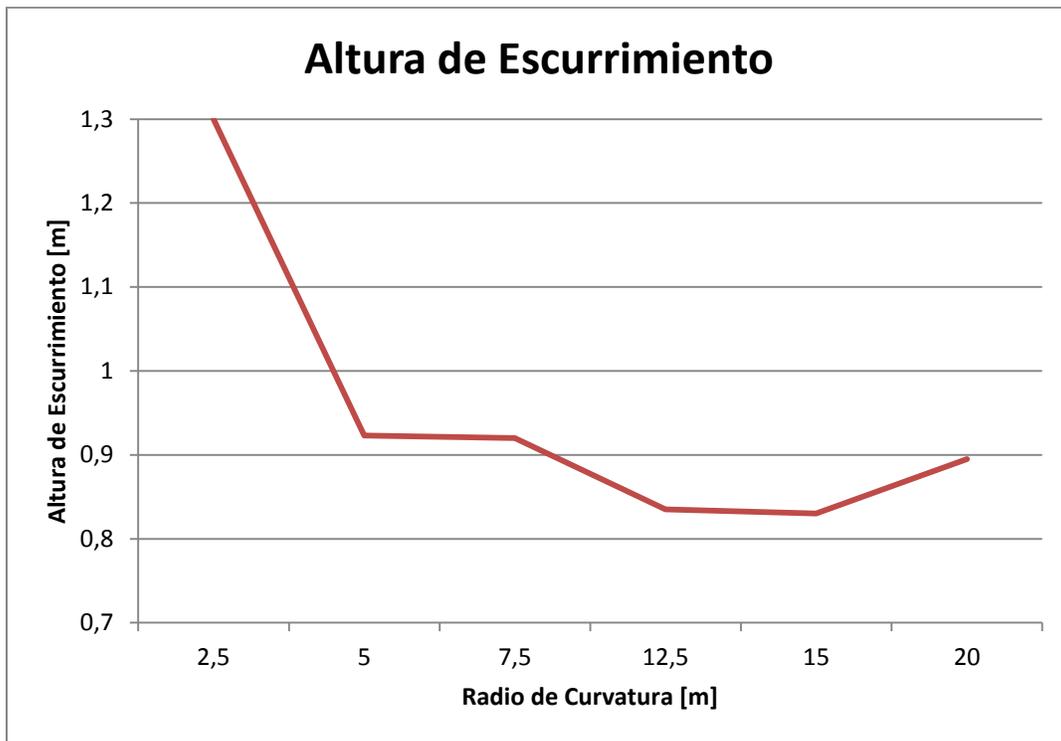


Figura 6.1 Gráfico Altura de Escurrimiento vs Radio de Curvatura

A continuación en la Figura 6.2 se junta la curva del gráfico anterior (curva roja) con la curva que refleja el resultado esperado con la ecuación 2.8 expuesta en el capítulo de antecedentes (curva azul). Se puede apreciar que los resultados obtenidos son bastante parecidos a los esperados, siguiendo la misma tendencia excepto en la canaleta de radio de curvatura 20 [m]. Como se menciona anteriormente esto puede deberse al hecho de que esa altura máxima de escurrimiento en la canaleta de radio de curvatura 20 [m] se produce en un sobresalto posterior a la curva, probablemente por el número de Froude en ese tramo de la canaleta.

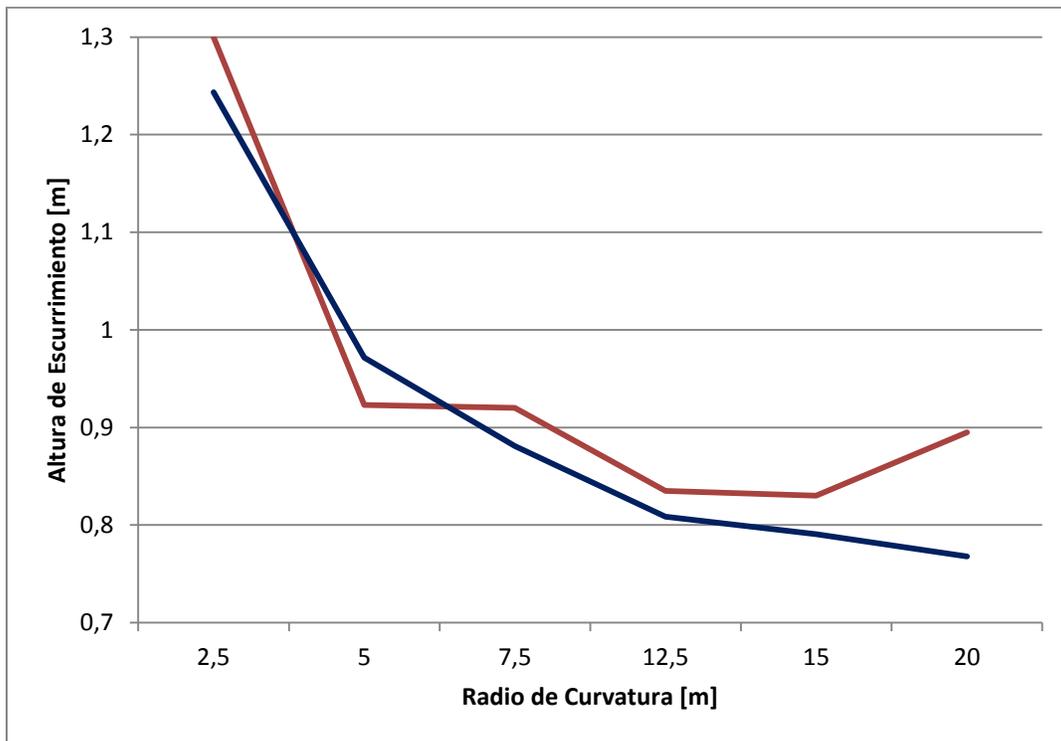


Figura 6.2 Gráfico comparación resultado obtenidos vs resultado esperado

Si se observan las isosuperficies de las canaletas con radios más grandes, luego del sobresalto y hasta la salida de la canaleta, se produce un descenso pronunciado y se puede apreciar que la altura mínima de escurrimiento se da en la salida de la canaleta. Esto puede deberse al hecho de que a medida que se avanza por la canaleta se va produciendo una mayor formación de espuma o mezcla entre aire y pulpa, lo que hace que hacia el final de la canaleta, la fracción volumétrica de la pulpa propiamente tal sea menor que el valor establecido anteriormente. A medida que crece el radio de curvatura y con él, el largo total de la canaleta, este hecho se hace cada vez más pronunciado y evidente.

Analizando finalmente el esfuerzo de corte en las paredes para cada una de las canaletas, se puede apreciar en las imágenes correspondientes al capítulo anterior, el hecho de que se produce un mayor esfuerzo de corte en la pared exterior de la curva que en la pared interior de la misma. Lo anterior se condice con el resultado obtenido para la erosión de las paredes de las respectivas canaletas.

6.2 Erosión

Se observa en las imágenes expuestas en el capítulo anterior, el hecho de que en todas las canaletas, existe una mayor erosión en la pared exterior de la curva

que en su pared interior. Esto era lo esperado pues coincide con el hecho de que la velocidad del fluido es mayor hacia el exterior de la curva.

Otro hecho apreciable en los resultados obtenidos para la erosión, es que a medida que el radio de curvatura crece, la tasa promedio de erosión disminuye. En la imagen correspondiente a la erosión en la canaleta de radio de curvatura 20 [m], se puede observar que casi no se presenta erosión alguna, o al menos muy inferior a la apreciada en las canaletas con radio de curvatura menor. En la Figura 6.3 se muestra un gráfico que sintetiza lo anterior.

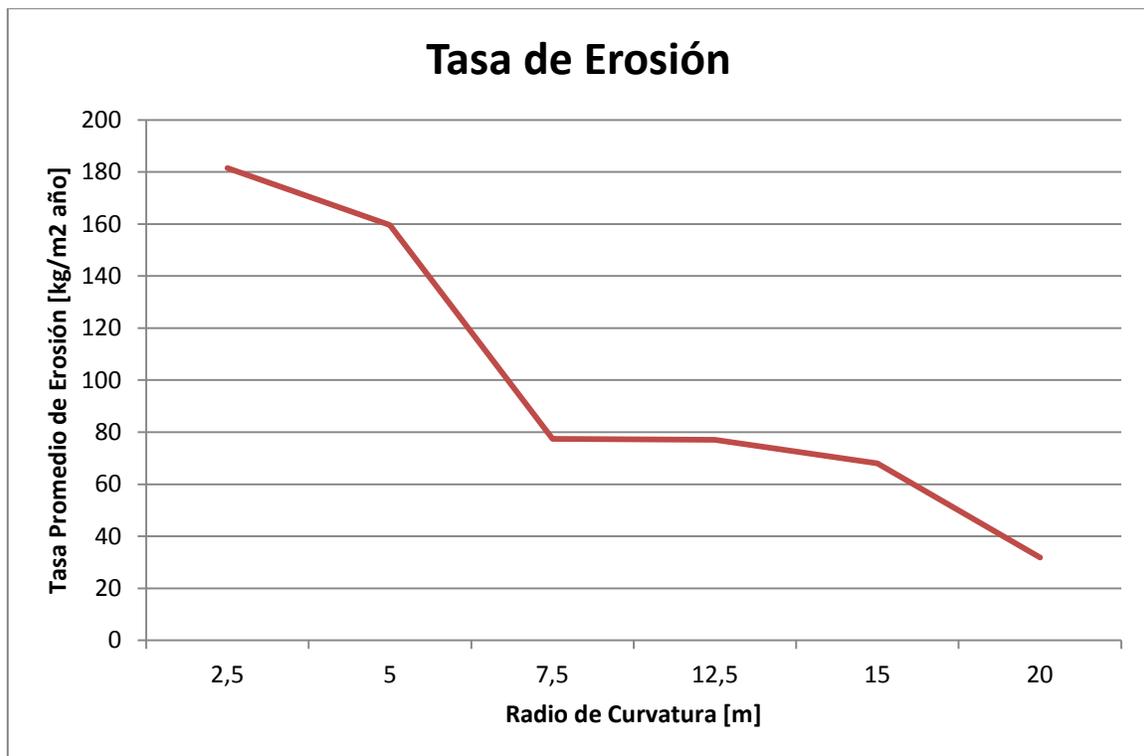


Figura 6.3 Gráfico Tasa de Erosión Promedio vs Radio de Curvatura

Por lo general los datos de tasa de erosión son expresados en unidades de longitud por unidad de tiempo. Para obtener los valores en esas unidades es necesario dividir los resultados obtenidos por la densidad del material de la canaleta, en este caso hormigón. Se utiliza una densidad del hormigón de 2600 [kg/m³]. En la figura Figura 6.4 se aprecian los resultados de la tasa promedio de erosión en cada canaleta expresada en [cm/año].

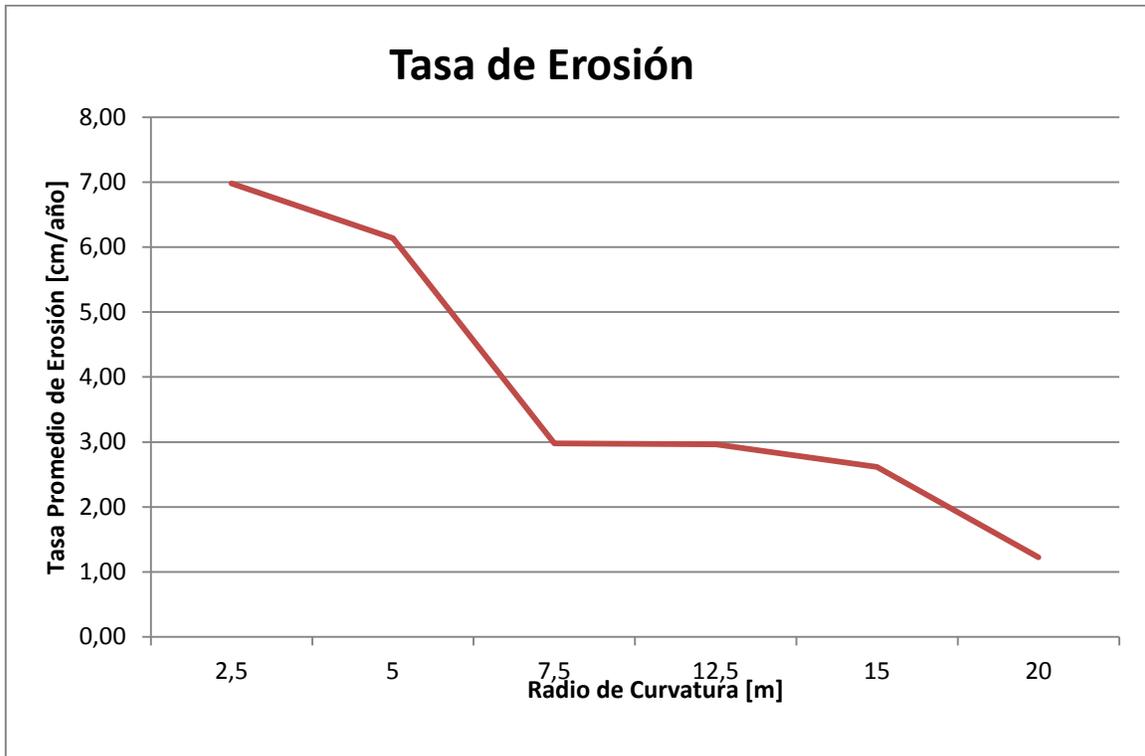


Figura 6.4 Tasa de Erosión Promedio en [cm/año] vs Radio de Curvatura

Es posible apreciar que existe un descenso pronunciado entre la canaleta de radio de curvatura 5 [m] y la de 7,5 [m]. Las canaletas con radio de curvatura 2,5 [m] y 5 [m] presentan una tasa de erosión muy elevada. Todo el resto quedan en el rango de aceptable, es decir a partir del radio de curvatura 7,5 [m].

7 Conclusiones y Recomendaciones

A modo de conclusión de este trabajo se puede establecer que se cumplen los objetivos planteados al inicio del presente informe.

Se llevan a cabo simulaciones utilizando como geometría seis canales abiertos con distintos radios de curvatura. A partir de lo anterior, es posible analizar los resultados y observar la influencia del radio de curvatura sobre distintos parámetros, principalmente la altura máxima de escurrimiento del fluido y la erosión producida en las paredes de las distintas canaletas.

Basado en los resultados obtenidos y el posterior análisis a partir de ellos, se puede concluir que para el caso estudiado los radios de curvatura 2,5 [m] y 5 [m] no son recomendables. En primer lugar por el aumento en la altura de escurrimiento en la curva, que se produce en ellas, incluso rebalsando la canaleta de 2,5 [m]. Por otro lado, la erosión que se presenta en ellas es muy alta en comparación al resto.

Basado en los antecedentes en el capítulo 2, el radio de curvatura mínimo recomendado para este trabajo es de aproximadamente 12,5 [m], por lo que los radios de curvatura 2,5 [m] y 5 [m], son respectivamente 5 y 2,5 veces menor al mínimo recomendado.

Por lo anterior se puede concluir que esta recomendación de radio de curvatura mínimo para este caso puntual en el que el caudal queda fijo, es válida. En futuros trabajos podría estudiarse el caso variando el caudal de entrada para ver si sigue la misma tendencia.

Con respecto a las simulaciones, para futuros trabajos o en caso de querer efectuar las simulaciones obteniendo resultados más precisos, se recomienda utilizar el esquema explícito en el modelo VOF, con el cual se establecerá de forma más clara la interfaz entre pulpa y aire, sin que sea necesario suponer como en este trabajo el límite en un valor de fracción volumétrica.

Se recomienda además utilizar un número de Froude mayor para evitar que al existir una disminución de la velocidad, el número de Froude no se acerque tanto al valor crítico y no se produzcan resaltos en la zona posterior a la curva.

Otro aspecto a considerar para trabajos futuros, es el hecho de utilizar un tramo de mayor extensión luego de la curva para los radios de curvatura más grandes, para así permitir que el flujo se desarrolle por completo antes de abandonar la canaleta.

8 Bibliografía

- [1] R. Fuentes, Slurry Flow In Open Flumes Seminar, Santiago, 2007.
- [2] V. T. Chow, Open-Channel Hydraulics, Ed. McGraw-Hill, 1959.
- [3] B. Abulnaga. Slurry Systems Handbook. Estados Unidos, McGraw-Hill, 2002.
- [4] J. Facusse, Análisis mediante simulación fluidodinámica computacional del flujo de relaves de minería en desgaste de cajones disipadores. Memoria (Ingeniero Civil Mecánico). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2013.
- [5] R. E. McElvain y I. Cave, Transportation of tailings, de International Tailing Symposium, Tucson, Arizona, USA, 1972.
- [6] R. Mott. Mecánica de Fluidos Sexta Edición. México, Ed. Pearson Educación, 2006.
- [7] ANSYS Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide Release 14.0, 2011.
- [8] ANSYS Inc., ANSYS FLUENT User's Guide, Release 14.0, 2011.
- [9] Fluent, Inc. Using FLUENT's Erosion Model to Investigate Erosion in a 90 degree Elbow Bend, 2006.
- [10] Ramírez, N. 2007. Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves. Chile, SERNAGEOMIN.