



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

**ANÁLISIS MEDIANTE SIMULACIÓN FLUIDODINÁMICA
COMPUTACIONAL DEL FLUJO DE RELAVES DE MINERÍA EN
DESGASTE DE CAJONES DISIPADORES**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO**

JOSÉ ANTONIO FACUSSE SAAVEDRA

PROFESOR GUÍA:
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALEJANDRO ORTIZ BERNARDIN
VIVIANA MERUANE NARANJO

SANTIAGO DE CHILE
ENERO DE 2013

RESUMEN EJECUTIVO

Para lograr el transporte de relaves en la minería del cobre a través de la accidentada geografía del norte de Chile, en algunos casos se opta por utilizar una configuración de canaletas y cajones disipadores. El propósito de los cajones es amortiguar caídas bruscas de elevación y cambiar la dirección del flujo. Estos sistemas de transporte en canaletas y cajones disipadores han sido estudiados en las últimas décadas obteniendo una metodología de diseño medianamente probada, que es el resultado de la experiencia adquirida en proyectos desarrollados en Chile. Sin embargo, la mayoría de estos estudios y los datos obtenidos son de carácter privado y no son del todo generalizables, dependiendo cada caso de las condiciones de operación y las características del relave a transportar.

Se cuenta con datos de un cajón que presentó fallas en el pasado debido al desgaste acelerado provocado por un mal diseño. El desgaste es un tema fundamental a la hora de diseñar estos sistemas, debido a las características abrasivas del relave. Se quiere estudiar más en profundidad la fluidodinámica detrás del funcionamiento de este tipo de cajones, y en este contexto, una metodología que viene siendo desarrollada con gran fuerza en el último tiempo es la simulación computacional, la cual será aplicada en este trabajo.

El objetivo del presente trabajo de título es analizar, mediante la simulación fluidodinámica computacional, el flujo de relaves de minería en un cajón disipador de canaleta, y su relación con el desgaste en las paredes.

Para esto, se utilizará el software comercial CFX 14.0, parte de la suite ANSYS. Se generará un modelo 3D del cajón a estudiar, se realizará un análisis de sensibilidad de mallado y se simulará para cuatro caudales de operación distintos. Se analizarán los datos obtenidos, poniendo énfasis en variables de interés como la trayectoria del chorro, el campo de velocidades del relave y los esfuerzos de corte y presiones, tanto en el fondo como en las paredes del cajón. Se espera encontrar condiciones propicias para la aparición de desgaste acelerado, como altas velocidades y concentración de esfuerzos de corte cerca de la zona de desgaste observada en la realidad. Además, se propondrán modificaciones al diseño de acuerdo a los resultados y se simulará para las mismas cuatro condiciones de caudal que el caso base. Finalmente, se concluirá respecto de la fluidodinámica detrás de la disipación del chorro dentro del cajón estudiado y su vinculación con el desgaste observado, y de la efectividad de las modificaciones propuestas para este caso.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
1.1	Motivación	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Limitaciones	3
1.4	Unidades	4
2	Antecedentes Generales	5
2.1	Tipos de Fluidos	5
2.2	Escurremientos en Transporte de Sólidos	8
2.3	Propiedades del Relave	11
2.4	Flujo de Relave en Canales Abiertos	13
2.5	Trayectoria de Chorro en Caida Libre	19
2.6	Diseño de Cajones	21
2.7	Desgaste	22
2.8	Cajón Real	24
3	Antecedentes Modelación Computacional	27
3.1	Modelos Multifásicos	28
3.2	Modelos de Turbulencia	29
3.3	Transferencia de Interfase	30
3.4	Mallado del Dominio	35
4	Metodología	37
5	Definición del Modelo	39
5.1	Supuestos y Consideraciones	39
5.2	Ecuaciones a Resolver	40
5.3	Dominio Computacional	41
5.4	Casos a Simular	42
5.5	Propiedades de los Fluidos	43
5.6	Canaleta de Entrada al Cajón	43
5.7	Condiciones de Borde	52

6	Primera Etapa: Modelación Computacional Caso Base	54
6.1	Geometría del Dominio Computacional	54
6.2	Análisis de Sensibilidad	56
6.3	Mallado	62
6.4	Detalles Condiciones de Borde	62
6.5	Condiciones Iniciales	64
6.6	Resultados	65
6.7	Análisis de Resultados Primera Etapa	94
7	Segunda Etapa: Modelación Computacional Caso Modificado	98
7.1	Geometría y Dimensiones del Dominio Computacional	98
7.2	Mallado	101
7.3	Detalles Condiciones de Borde	101
7.4	Condiciones Iniciales	103
7.5	Resultados	104
7.6	Análisis de Resultados Segunda Etapa	133
8	Conclusiones	135
9	Bibliografía	136
	ANEXOS – Líneas de Corriente	138

1 INTRODUCCIÓN

Los relaves de minería de cobre son desechos minerales provenientes de las plantas procesadoras y se componen principalmente de una fase acuosa (agua) y una fase sólida de partículas (rocas + minerales). Debido a su bajo costo y fácil mantención, frecuentemente este fluido bifásico es transportado a los tranques de relave mediante flujo gravitacional a través de canaletas de hormigón, las cuales están limitadas en pendiente y curvatura para evitar desgaste acelerado.

Generalmente la geografía montañosa donde se ubican las plantas procesadoras de mineral crea la necesidad de utilizar trazados bastante irregulares. Esto motiva la utilización de una serie de cajones disipadores de canaleta para lograr ajustar mejor estos trazados, permitiendo bajar rápidamente algunos metros mediante caída libre, así como efectuar cambios de dirección bruscos evitando utilizar canaletas con un radio de curvatura menor al mínimo aceptado. Los cajones cumplen la función de disipar tanto la energía que gana el relave a medida que fluye canaleta abajo, como la debida a la caída libre en su interior. En la Figura 1-1 se puede apreciar un esquema de un cajón disipador típico.

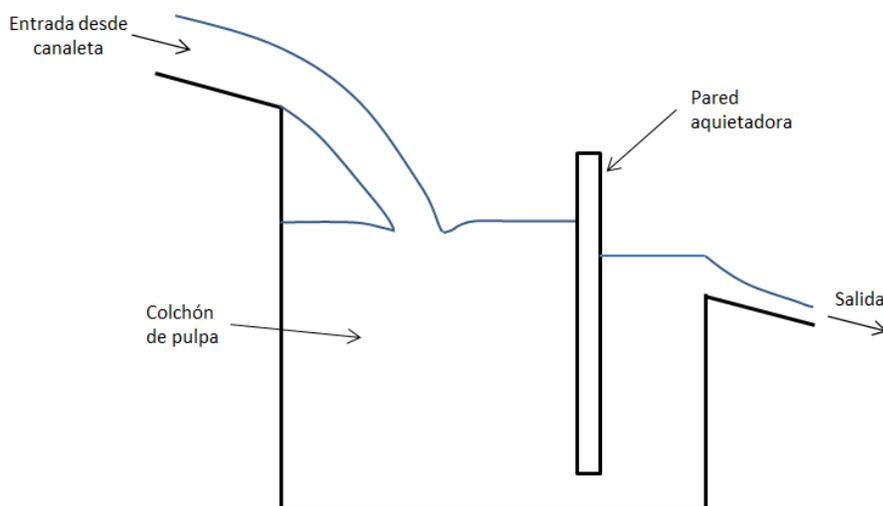


Figura 1.1. Esquema de cajón disipador.

Para que los cajones puedan cumplir con su propósito sin sufrir daños acelerados o catastróficos, deben ser diseñados de tal manera que logren disipar la energía que lleva relave

mediante el choque con el colchón de fluido dentro del cajón, evitando que la energía sea absorbida por las paredes y/o el fondo.

1.1 MOTIVACIÓN

Antiguamente, los sistemas de transporte de relave de canaletas y cajones disipadores se diseñaban con métodos basados en la experiencia e intuición. Posteriormente, se desarrolló una metodología para su diseño que incluía parámetros obtenidos empíricamente y en base a experiencia adquirida en proyectos anteriores, como por ejemplo División Andina y División El Teniente, ambas de Codelco y que transportan sus relaves con este tipo de sistemas. El problema es que estos datos no son de libre acceso y son algo antiguos (década de los 80's). Además, cada sistema es distinto dependiendo de las condiciones de operación y las características del relave a transportar, lo que hace que el diseño sea poco generalizable. Debido a esto, los cajones disipadores pueden resultar demasiado sobredimensionados y por lo general se necesitan decenas de unidades para un sistema completo de transporte, por lo que un sobredimensionamiento innecesario tiene una repercusión bastante importante en su costo de construcción. Por otro lado, debido a las características abrasivas del relave transportado, los cajones deben ser diseñados de tal manera que sean capaces de resistir la operación sin sufrir daños excesivos producto de las partículas y sólidos presentes en el relave. Esto significa que cualquier falla en el diseño se puede traducir en elevados costos de mantención o incluso el colapso de los cajones.

De lo anterior nace la necesidad de investigar y estudiar más en detalle estos equipos, comprender mejor la fluidodinámica involucrada en su funcionamiento, de modo de mejorar y ajustar su diseño, asegurando su capacidad de resistir las condiciones a las que operan sin sufrir daños por desgaste prematuros o acelerados.

Se cuenta con datos de un cajón que se encuentra actualmente en operación y que presentó fallas en el pasado debido a un mal diseño. Según los antecedentes, para ciertas condiciones del flujo, como altas velocidades cerca de la pared, se produce desgaste a una tasa muy alta, pudiendo provocar la falla del cajón por ruptura. Indicios de desgaste acelerado fueron encontrados en el cajón de estudio y se quiere estudiar más en profundidad la fluidodinámica

detrás de este fenómeno. En este contexto, una herramienta que se ha venido desarrollando con gran crecimiento en el último tiempo es la simulación fluidodinámica computacional, que se vuelve una alternativa cada vez más recurrente gracias a los avances tecnológicos en materia de hardware y a las investigaciones que se realizan año tras año utilizando esta herramienta. Es por esto que se pretende utilizar en este trabajo y comparar los resultados que se obtengan con las observaciones realizadas en el cajón de estudio.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

El objetivo del presente trabajo de título es analizar, mediante simulación fluidodinámica computacional, el flujo de relaves de minería en un cajón disipador de canaleta y su relación con el desgaste en las paredes.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Modelar el flujo de relaves en régimen permanente en el cajón de estudio para distintos caudales, utilizando el software CFX 14.0.
- Analizar variables de interés en cada uno de los casos y estudiar el comportamiento fluidodinámico. Las variables a analizar serán: trayectoria del chorro, campo de velocidades del chorro y del relave dentro del cajón, los esfuerzos de corte en las paredes y fondo del cajón, el nivel de relave en el cajón antes y después del baffle y la presión en las paredes y fondo del cajón.
- Encontrar relación entre los resultados, principalmente esfuerzos de corte y presiones en las paredes y fondo del cajón, y el desgaste acelerado observado en operación.
- Proponer diseño modificado y verificar la efectividad de las modificaciones en relación a las condiciones de aparición de desgaste acelerado.

1.3 LIMITACIONES

El alcance de esta memoria se limita a simulaciones de relave como un fluido monofásico con propiedades de plástico de Bingham. Esto limita el estudio del desgaste en el modelo solo a analizar el campo de velocidades y los esfuerzos de corte y presiones en las paredes y fondo del

cajón, dejando de lado la influencia de las partículas en este fenómeno. Por otro lado, la información disponible del cajón de estudio se limita simplemente a análisis cualitativos de imágenes y algunos datos generales de operación de un corto periodo de tiempo (caudales, niveles y características del relave transportado), excluyendo tasas de desgaste, presiones en las paredes o velocidades locales dentro del cajón.

1.4 UNIDADES

Para todas las variables, parámetros y magnitudes se considerarán unidades del Sistema Internacional (SI), a menos que se especifique lo contrario.

2 ANTECEDENTES GENERALES

2.1 TIPOS DE FLUIDOS

Un fluido se puede definir como: *“sustancia que se deforma continuamente cuando se ve sometida a un esfuerzo de corte, sin importar la magnitud de éste”*. El grado de oposición del fluido a esta deformación se denomina viscosidad, y en base a ésta, los fluidos se pueden clasificar en dos grupos: Newtoniano y No-Newtoniano.

2.1.1 Fluidos Newtonianos

Son aquellos fluidos cuya viscosidad es constante e independiente del tiempo y de la velocidad de deformación. En un fluido Newtoniano, el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la velocidad de deformación.

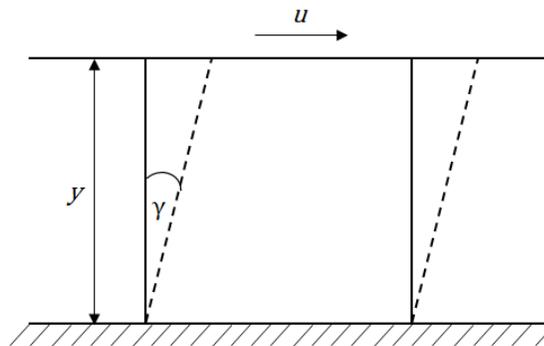


Figura 2.1. Deformación de un fluido entre dos planos.

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (2.1)$$

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

, donde:

$\dot{\gamma}$ = Velocidad o tasa de deformación

u = Velocidad tangencial del plano móvil

y = Distancia entre los planos

- τ = Esfuerzo de corte
- μ = Viscosidad
- γ = Deformación angular

2.1.2 Fluidos No-Newtonianos

Un fluido no-Newtonianos es aquel en que la viscosidad no es constante, sino que varía en el tiempo o con respecto a la velocidad de deformación. Estos pueden clasificarse a su vez en tres categorías: plásticos, pseudo-plásticos y dilatantes. La Figura 2.2 muestra la curva para cada uno de estos fluidos.

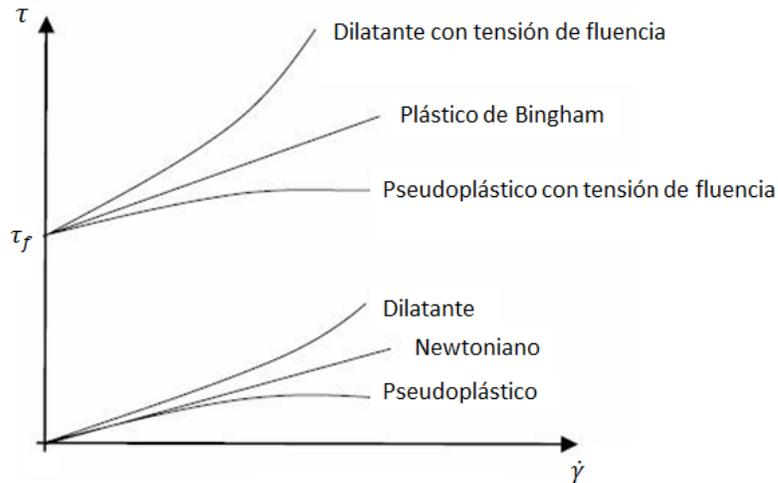


Figura 2.2. Diagrama reológico para fluidos no-Newtonianos.

2.1.2.1 Plástico de Bingham

Estos fluidos se caracterizan por comportarse como un sólido rígido cuando el esfuerzo de corte es menor que cierto esfuerzo crítico, pero una vez excedido este valor el material fluye como si fuera un fluido Newtoniano. El comportamiento de un plástico de Bingham puede ser descrito como [1]:

$$\dot{\gamma} = 0 \quad \text{si } \tau < \tau_0 \quad (2.3)$$

$$\tau = \tau_f + \mu_B \dot{\gamma} \quad \text{si } \tau > \tau_0 \quad (2.4)$$

, donde:

τ_f = Esfuerzo crítico o de fluencia

μ_B = Viscosidad de Bingham

Algunos autores señalan que las pulpas chilenas tienen un comportamiento marcadamente Newtoniano [2], pero es una práctica muy extendida en la industria utilizar los parámetros de Bingham para definir sus principales propiedades, debido a su simplicidad y buena correlación con los datos experimentales.

2.1.2.2 Pseudoplástico

En los pseudoplásticos, la tasa de deformación aumenta a medida que aumentamos el esfuerzo de corte. Su comportamiento se puede modelar como un caso particular de la Ley de Potencia de Ostwald:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (2.5)$$

, donde:

K = Índice de consistencia

n = Índice de potencia

Para el caso particular de los fluidos pseudo-plásticos, se considera $n < 1$. Ambos índices son propios del fluido y se obtienen de manera empírica.

2.1.2.3 Fluido Dilatante

Es el caso opuesto a los fluidos pseudo-plásticos, ya que en los fluidos dilatantes la tasa de deformación disminuye al aumentar el esfuerzo de corte. Su comportamiento es también modelable mediante la Ley de Potencia de Ostwald, pero con valores de $n > 1$.

2.1.2.4 Fluido Pseudoplástico y Dilatante con Tensión de Fluencia

Estos fluidos se comportan de la misma manera que los pseudoplásticos y dilatantes, pero presentan una tensión de fluencia. Su comportamiento se puede modelar con la ecuación de Herschel y Bulkley.

$$\tau = \tau_f + K\dot{\gamma}^n \quad (2.6)$$

El valor de n define si se trata de Pseudoplástico o Dilatante al igual que en los casos sin tensión de fluencia.

2.2 ESCURRIMIENTOS EN TRANSPORTE DE SÓLIDOS

Como ya se había dicho, los relaves son un fluido bifásico compuesto por una fase fluida y una fase sólida, que corresponde a las partículas transportadas. El modo de transporte de estas partículas varía dependiendo de diferentes parámetros. Por ejemplo, suponiendo partículas de composición y diámetro uniforme, se pueden observar los siguientes regímenes de transporte para distintos diámetros de partículas y velocidades de flujo, mostrados en la Figura 2.3.

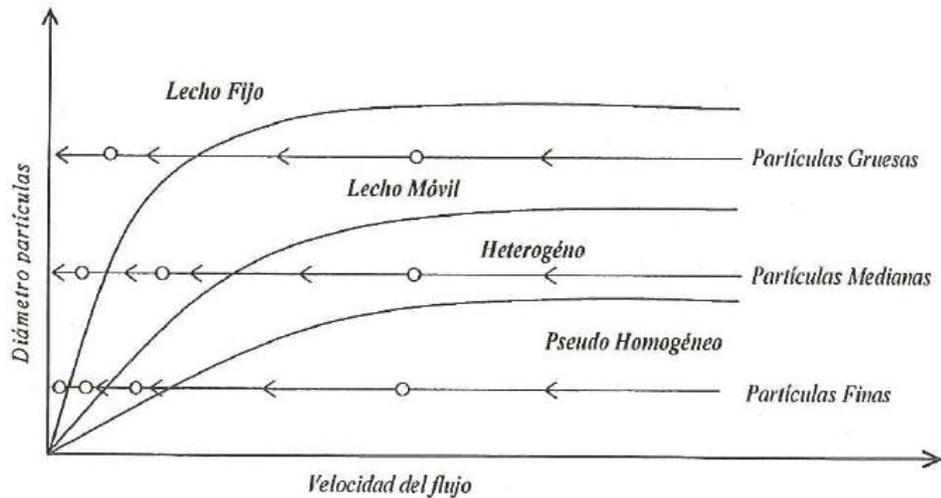


Figura 2.3. Regímenes de escurrimiento.

Los esquemas y detalles de cada uno de los regímenes se exponen a continuación.

2.2.1 Escurrimiento como Suspensión Homogénea

También llamado flujo pseudo-homogéneo. Las partículas son transportadas todas en suspensión, sin presentar diferencias en concentración en la sección (Figura 2.4) y con la misma velocidad que el fluido base. Se presenta a baja velocidad de flujo y diámetro de partículas pequeño.

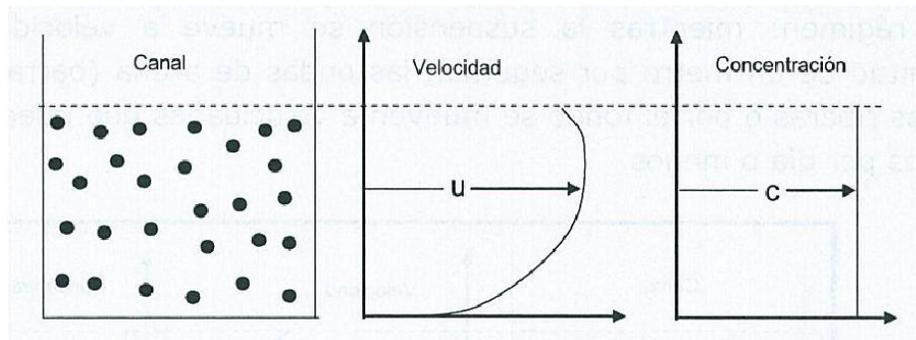


Figura 2.4. Flujo de suspensión homogénea.

Este régimen se puede encontrar en transportes hidráulicos industriales, como por ejemplo agua con concentraciones moderadas de arcilla.

2.2.2 Ecurrimiento como Suspensión Heterogénea

Todas las partículas van en suspensión, pero existe un gradiente de concentración en la sección (Figura 2.5). Las partículas más pesadas tienden a caer pero sin llegar a chocar de manera notoria contra el fondo. A pesar de esto, las partículas aún se mueven con la misma velocidad del fluido, presentando un pequeño deslizamiento cerca de las paredes. Este flujo se observa con diámetro de partículas pequeño y velocidades moderadas.

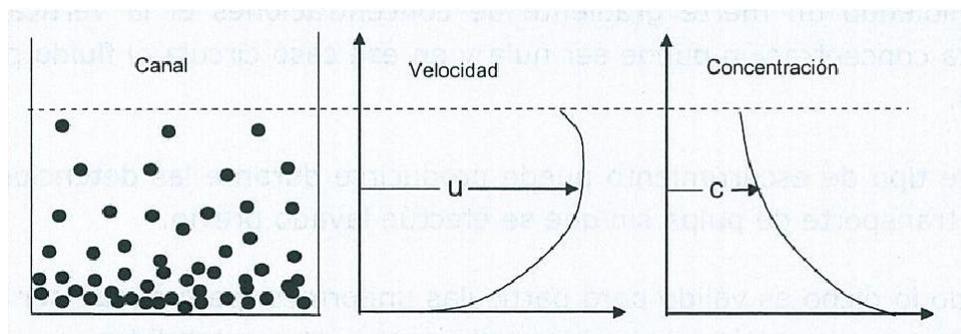


Figura 2.5. Flujo de suspensión heterogénea.

Un ejemplo bastante común de este tipo de flujo es el transporte hidráulico de relaves con alto grado de molienda.

2.2.3 Ecurrimiento con Lecho Móvil

Una parte de los sólidos va en movimiento por el fondo, el resto se encuentra en suspensión. Un marcado gradiente de concentración se puede observar con respecto al fondo. Este

régimen se observa con velocidades bajas y/o partículas grandes. Los sólidos del fondo pueden llegar a tener una velocidad de un orden de magnitud menor que los que se encuentran en suspensión.

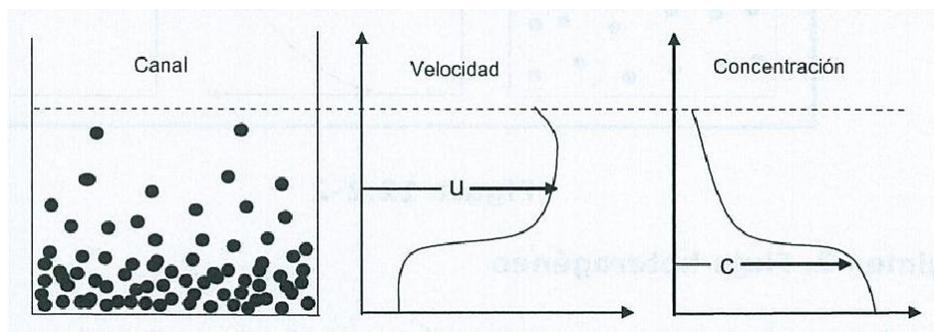


Figura 2.6. Flujo de suspensión con lecho móvil.

Ejemplos de este régimen se observan en la naturaleza en ríos de pequeña pendiente y en instalaciones industriales de transporte hidráulico para la minería. Estos últimos presentan velocidades bajas para evitar la abrasión.

2.2.4 Ecurrimiento con Lecho Fijo

Una parte importante de los sólidos se encuentra estancada en el fondo mientras por encima de ellos circula el resto de sólidos en suspensión. Presenta un muy marcado gradiente de concentraciones vertical, que puede llegar a ser cero y solo circule fluido puro por sobre el lecho fijo. Las velocidades suelen ser muy pequeñas y/o las partículas de gran tamaño.

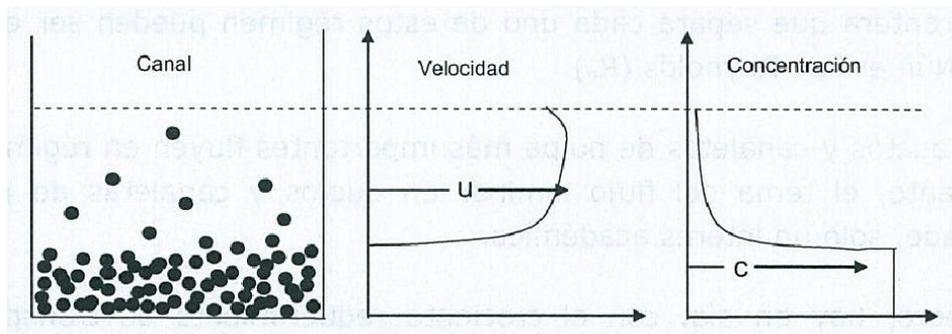


Figura 2.7. Flujo de suspensión con lecho fijo.

Este régimen se puede dar durante las detenciones de un sistema de transporte de pulpa sin que se efectúe lavado previo.

2.3 PROPIEDADES DEL RELAVE

En esta memoria se pretende modelar el relave como fluido No-Newtoniano, suponiendo que el flujo es suficientemente homogéneo. Para llevar esto a cabo, es necesario definir sus propiedades principales.

2.3.1 Densidad del Relave

La densidad del relave ρ_r depende de la densidad de los sólidos transportados ρ_s , de la fracción sólida en peso C_p y de la densidad del medio fluido ρ_a , que en este caso corresponde a agua, según la siguiente expresión:

$$\rho_r = \frac{1}{\frac{C_p}{\rho_s} + \frac{1-C_p}{\rho_a}} \quad (2.7)$$

2.3.2 Viscosidad

En el caso de un fluido en general, se pueden definir dos viscosidades: la viscosidad aparente y la viscosidad local. La viscosidad aparente μ_a se define como:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.8)$$

Para un fluido Newtoniano $\mu_a = \mu = cte$. En todos los demás casos la viscosidad aparente depende de $\dot{\gamma}$ por lo que no está bien definida a menos que se especifique la tasa de deformación. La viscosidad aparente puede entenderse como la viscosidad que tendría un fluido Newtoniano que presentara el mismo esfuerzo de corte que el fluido estudiado para un valor determinado de $\dot{\gamma}$.

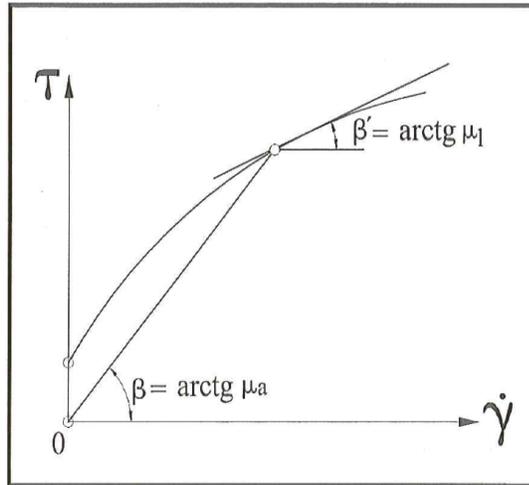


Figura 2.8. Esquema de viscosidades.

Por otro lado, la viscosidad local μ_l se define como:

$$\mu_l = \frac{d\tau}{d\dot{\gamma}} \quad (2.9)$$

En este caso, para un fluido Newtoniano $\mu_l = \mu_a = \mu = cte$, y para un fluido de Bingham se tiene que $\mu_l = \mu_B = cte$. En todos los demás casos la viscosidad local depende de $\dot{\gamma}$. Se deduce que, en general la viscosidad aparente y la viscosidad local carecen de significado a menos que se especifique el valor de $\dot{\gamma}$ para la cual fueron medidas.

Se puede introducir el concepto de viscosidad aparente asintótica μ_∞ , que es la viscosidad aparente cuando la velocidad de deformación tiende a infinito, según la siguiente expresión:

$$\mu_\infty = \lim_{\dot{\gamma} \rightarrow \infty} \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.10)$$

En algunos casos este límite no existe, pero para el caso de Bingham se tiene que $\mu_\infty = \mu_B$.

2.3.3 Parámetros de Bingham

Para el cálculo de la viscosidad de Bingham y la tensión de fluencia se utilizan las siguientes expresiones [3]:

$$\phi = \frac{C_p}{C_p + (1 - C_p) \cdot \frac{SG_s}{SG_l}} \quad (2.11)$$

$$\tau_f = A \cdot \phi^B \quad (2.12)$$

$$V_R = \frac{SG_l}{SG_s} \cdot \frac{C_p}{(1 - C_p)} \quad (2.13)$$

$$\frac{\mu_B}{\mu_{agua}} = 10^{V_R \cdot B'} \quad (2.14)$$

, donde:

ϕ = Concentración volumétrica de sólidos

SG_s = Gravedad específica de los sólidos

SG_l = Gravedad específica del líquido

V_R = Volumen reducido de sólidos

μ_{agua} = Viscosidad del agua

Los parámetros A , B y B' son parámetros de ajuste que se obtienen mediante una correlación con datos experimentales obtenidos para el relave específico a estudiar.

2.4 FLUJO DE RELAVE EN CANALES ABIERTOS

El flujo en las canaletas y cajones es de tipo gravitacional y para su diseño es necesario introducir algunos conceptos.

2.4.1 Altura Normal de Escurrimiento

La altura normal de escurrimiento se puede determinar mediante la ecuación de Manning. Esta ecuación relaciona la velocidad media de escurrimiento con las características de la canaleta mediante un coeficiente de rugosidad.

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad (2.15)$$

, donde:

v = Velocidad media de escurrimiento

Q = Caudal de transporte

A = Sección de escurrimiento

R_H = Radio hidráulico

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

i = Pendiente de la canaleta

Esta expresión, en general, no se puede resolver en forma directa por lo que se debe recurrir a métodos numéricos iterativos dependiendo de la geometría de la canaleta.

El radio hidráulico de la canaleta, utilizado en la ecuación anterior, se define como:

$$R_H = \frac{A}{P_m} \quad (2.16)$$

, donde P_m es el perímetro mojado y corresponde al contorno de la sección de escurrimiento, sin contar la superficie libre.

La siguiente Tabla 2-1 muestra valores típicos de coeficientes de rugosidad de Manning para canales revestidos con distintos materiales.

Tabla 2-1. Coeficientes de rugosidad de Manning [4].

Material	n
Concreto	0.011
Acero liso	0.012
Ladrillo barnizado	0.013
Plástico	0.016
Metal maquinado	0.016

A pesar de que los coeficientes de fricción de Manning son referidos a casos de canaletas que transportan agua, es posible utilizarlos para el caso de flujo de relaves siempre que no presenten sedimentación y cuya concentración en peso no exceda el 55% [3]. Para mayores concentraciones este modelo se invalida debido a las altas viscosidades y tensión de fluencia involucrada.

2.4.2 Estabilidad de Flujo y Número de Froude

Una forma de medir la estabilidad de un flujo en canal abierto es mediante el número de Froude. Este número compara la velocidad del flujo con la velocidad de propagación de una onda superficial.

$$Fr = \frac{Q^2 \cdot T}{g \cdot A^3} \quad (2.17)$$

, donde:

Fr = Número de Froude

g = Aceleración de gravedad

T = Ancho de la superficie de escurrimiento

Si $Fr < 1$ el fluido es subcrítico, si $Fr = 1$ el fluido es crítico y si $Fr > 1$ el fluido es supercrítico. El flujo en canaletas de relave debe ser supercrítico, para evitar la aparición de ondas superficiales e inestabilidades que se generan en las cercanías de puntos críticos o crisis. Por esto un Froude mínimo de 1.4 debe ser considerado [3]. Esto además le brinda robustez al sistema, ya que en un flujo supercrítico cualquier perturbación que se produzca en una sección aguas abajo no afecta a las secciones aguas arriba.

2.4.3 Velocidad de Flujo Mínima

Para evitar el “embancamiento” o deposición de partículas, el sistema se debe diseñar de manera que el escurrimiento sea, en el peor de los casos, de tipo flujo de suspensión heterogénea. Para esto es necesario calcular la velocidad mínima de flujo, que corresponde a la mayor entre la velocidad límite de depósito y la velocidad crítica turbulenta.

2.4.3.1 Velocidad Crítica Turbulenta

La velocidad crítica turbulenta es la velocidad en que el flujo se vuelve turbulento. En el caso de fluidos Newtonianos, la transición entre laminar y turbulento es fácilmente identificable mediante el número de Reynolds, que compara el efecto de la viscosidad en relación a las fuerzas de inercia del fluido mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{v \cdot D_H}{\mu} \quad (2.18)$$

, donde:

Re = Numero de Reynolds

D_H = Diámetro hidráulico ($D_H = D$ para tuberías y $D_H = 4 \cdot R_H$ para canaletas)

La transición entre régimen laminar y turbulento se encuentra para flujos con un número de Reynolds cercano a 2000 en tuberías, y entre 500 y 2000 en canaletas [5].

Para el caso del relave es necesario tomar algunas consideraciones adicionales debido a la existencia de partículas en el fluido, las que imponen condiciones físicas y dinámicas distintas a las de un fluido Newtoniano. Es por esto que se utilizará la ecuación propuesta en [6]:

$$Re_2 = \frac{8 \cdot \rho \cdot v^2}{\tau_f + K \left(\frac{8 \cdot v}{D_H} \right)^n} \quad (2.19)$$

, donde:

Re_2 = Numero de Reynolds para fluido no-Newtoniano

ρ = Densidad del fluido (relave)

K, n corresponden a los parámetros reológicos del modelo Herschel y Bulkley (sección 2.1.2). Para el caso de un plástico de Bingham se tiene que $K = \mu_B$ y $n = 1$, además para canaletas se tiene que $L = 4 \cdot R_H$, por lo que se obtiene:

$$Re_2 = \frac{8 \cdot \rho \cdot v^2}{\tau_f + \mu_B \left(\frac{2 \cdot v^2}{R_H} \right)} \quad (2.20)$$

De acuerdo a lo encontrado en [7] la transición entre régimen laminar y turbulento se encuentra para flujos en canaletas con un Re_2 entre 2000 y 8000. Además se determina que para un régimen turbulento desarrollado completamente, que se obtiene con un Re_2 mayor a 10000, el coeficiente de rugosidad de Manning toma un valor constante, por lo que se considera este como valor crítico para el diseño.

2.4.3.2 Velocidad Límite de Depósito

Por otro lado, hay que considerar que la velocidad del flujo sea mayor que la velocidad límite de depósito, que puede definirse como la velocidad que separa el régimen de flujo heterogéneo del régimen con arrastre de fondo. Esta velocidad es probablemente el parámetro más importante a la hora de diseñar un sistema de transporte hidráulico de sólidos.

Existe una gran cantidad de fórmulas que intentan estimar el valor de esta velocidad y cada una depende de los criterios y métodos utilizados por los autores, lo que puede generar resultados muy distintos entre cada una de ellas.

El planteamiento más básico es el realizado por Durand (1953) [8], quién estudió el transporte hidráulico de partículas de carbón en tuberías para concentraciones en volumen de hasta un 15%.

$$v_{L\ Durand} = F_L \cdot \sqrt{2 \cdot g(SG_s - 1) \cdot D} \quad (2.21)$$

, donde:

$v_{L\ Durand}$ = Velocidad límite de Durand

F_L = Factor de velocidad límite de deposición

D = Diámetro interno de la tubería

F_L es un factor que depende del diámetro de las partículas y de la concentración en volumen. Posteriormente McElvain y Cave (1972) [9] aumentaron el rango válido de concentraciones hasta el 30% en volumen y granulometrías extendidas, obteniendo valores para F_L que se muestran en la Figura 2.9.

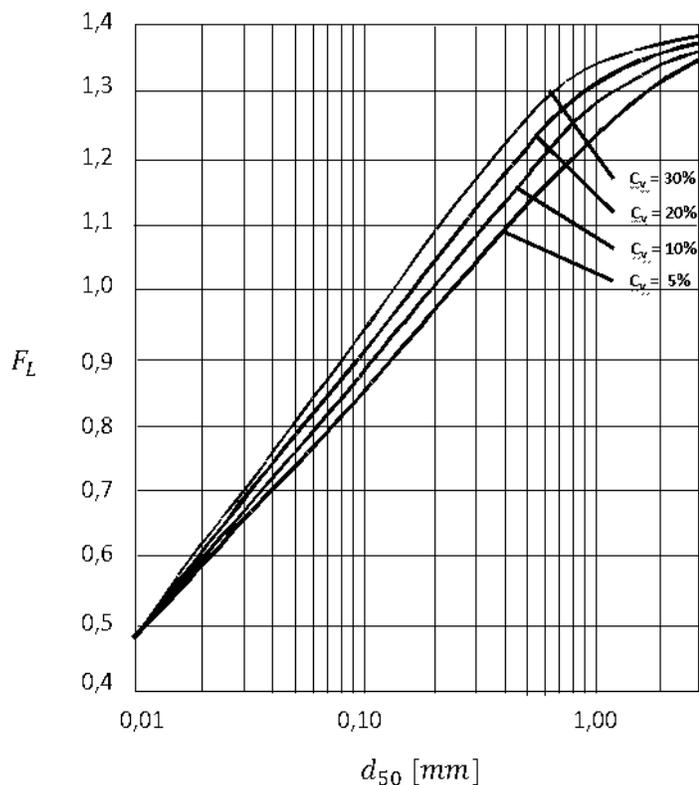


Figura 2.9. Factor de velocidad límite de McElvain and Cave en función de la granulometría.

Dado que estas ecuaciones no fueron planteadas para transporte de sólidos de densidad alta, existen correcciones realizadas por Juan Rayo (1974) [10] utilizando datos empíricos de pulpas chilenas. Estas ecuaciones a su vez fueron modificadas para el caso de flujo en canaletas, obteniéndose la siguiente expresión:

$$v_{L\text{Rayo}} = 1.25 \cdot F_L \cdot \sqrt[4]{2 \cdot g(SG_s - 1) \cdot h} \quad (2.22)$$

, donde:

h = Altura normal de escurrimiento

2.4.4 Factor de Forma de la Sección

El factor de forma de la sección se define como:

$$\lambda = \frac{h}{T} \quad (2.23)$$

, donde:

λ = Factor de forma de la sección

T = Ancho de la sección e escurrimiento

Se puede demostrar [11] que el caudal Q y la velocidad del flujo v se hacen máximos para valores de λ cercanos a 0.5, por lo que como buena práctica se considera un rango de entre 0.3 y 0.6 para el factor de forma.

2.5 TRAYECTORIA DE CHORRO EN CAIDA LIBRE

La caída del chorro desde la canaleta hacia el cajón ocurre de forma gravitacional. La trayectoria de este chorro, así como sus velocidades, pueden ser calculadas como una descarga libre a la atmósfera de trayectoria parabólica, obviando la disipación de energía por aireación. Esto puede hacerse bajo el supuesto de que la trayectoria es pequeña en longitud.

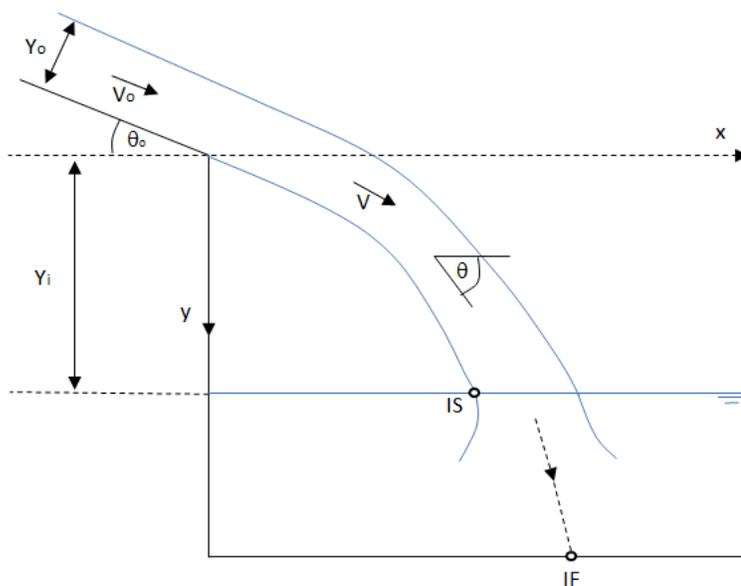


Figura 2.10. Cálculo de chorro en caída libre.

Los cálculos se hacen teniendo en cuenta las variables mostradas en la Figura 2.8, usando las siguientes relaciones:

$$Y = \tan(\theta_o) X + \frac{g}{2} \frac{X^2}{(V_o \cos(\theta_o))^2} \quad (2.24)$$

$$\frac{gX}{(V_o \cos(\theta_o))^2} = \tan(\theta) - \tan(\theta_o) \quad (2.25)$$

$$\tan(\theta) = \sqrt{\tan^2(\theta_o) + \frac{2gY}{(V_o \cos(\theta_o))^2}} \quad (2.26)$$

$$V = \sqrt{V_o^2 + 2gY} \quad (2.27)$$

Con estas relaciones se puede calcular el punto IS, que corresponde al punto de impacto del chorro con la superficie de la pulpa dentro del cajón, y la velocidad V_{is} en ese punto.

Una vez en el volumen de pulpa, el chorro se expande recorriendo en línea recta [12] hasta llegar al fondo con una velocidad V_{if} , que puede estimarse con la siguiente expresión:

$$\frac{V_{if}}{V_{is}} = C \frac{D_e}{L'} \quad (2.28)$$

, donde:

D_e = Diámetro equivalente

L' = Distancia entre IS y IF

C = Constante que puede aproximarse por 6

Q = Caudal de relave

El diámetro equivalente puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$D_e = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi V_{is}}} \quad (2.29)$$

2.6 DISEÑO DE CAJONES

El cajón a modelar en este estudio forma parte de un sistema de transporte de relaves que cuenta con canaletas y cajones disipadores. Los cajones disipadores son simplemente fosas que producen un resalto, que es controlado aguas abajo mediante una barrera y/o obstáculo encargado de aumentar la disipación de energía (compuertas a la salida).

Se distinguen tres tipos de cajones:

- Disipadores de rápidos: son cajones de gran tamaño ubicados a la salida de un rápido (sección de canaleta de alta pendiente).
- Disipadores para canaletas: son cajones de tamaño mediano ubicados a la salida de canaletas de pendiente moderada y sirven para ajustar el trazado a la topografía del terreno y aquietar el flujo.
- De traspaso: son cajones destinados a cambiar la dirección del flujo de manera abrupta.

El cajón de este estudio es una mezcla entre un cajón disipador de canaleta y un cajón de traspaso, ya que cumple ambas funciones.

Otra función importante de estos cajones es independizar el flujo aguas arriba del flujo aguas abajo, con el fin de dar mayor robustez al sistema de transporte.

Se han realizado estudios y se ha llegado a un método de diseño para estos cajones que se basa en las condiciones de escurrimiento a la salida del cajón, pero debido a la gran variedad de cajones que se utilizan esta metodología es poco generalizable.

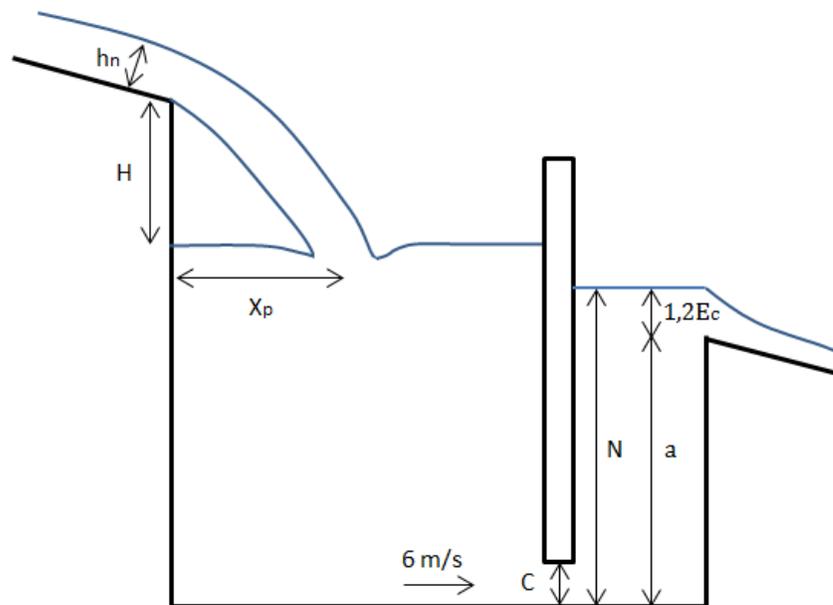


Figura 2.11. Parámetros de dimensionamiento de cajón disipador.

La Figura 2.11 muestra los principales parámetros de diseño de un cajón. La abertura bajo la pared aquietadora C se fija normalmente en 0.5 [m]. La profundidad del colchón de pulpa debe ser suficiente para que el relave llegue con menos de 6 [m/s] a las paredes del cajón, debido a que a esa velocidad el desgaste se empieza a considerar alto, como se detalla en la sección 2.7. La caída H puede ir entre 0.5 y 4 [m], según se requiera por el terreno. La altura de la revancha a se estima a partir del nivel del colchón de pulpa requerido, con una altura mínima de 0.7 [m]. El nivel a la salida N se determina mediante una ponderación de la energía crítica E_c en ese punto más la revancha ($a + 1.2E_c$).

La longitud del cajón se fija como al menos 2 veces la distancia longitudinal de impacto del eje central del chorro con la superficie del relave, y el ancho como 3 veces el ancho de la canaleta de entrada para evitar desgaste en las paredes laterales.

2.7 DESGASTE

El desgaste en sistemas de transporte de relaves es un tema muy importante, ya que de él depende la vida útil de las instalaciones y se definen los períodos de mantención y reparación. Muchos estudios se han llevado a cabo en esta materia, pero debido a la gran lista de variables

que intervienen en este fenómeno, aún no está completamente estudiado. Debido a su bajo costo y grandes dimensiones, las canaletas se fabrican de concreto, que posee una resistencia a la abrasión mucho menor que otros materiales de construcción, como el acero, pero que es de muy fácil reparación.

Dentro de las variables que intervienen en el desgaste están el diámetro de las partículas y el ángulo de impacto de estas con la superficie, pero en general, la variable más influyente en el desgaste es la velocidad.

Juan Rayo [2] ha dado tasas de desgaste en tuberías de concreto en función de la velocidad, para un mineral de cobre típico de yacimientos chilenos. Estos valores se muestran en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2. Tasas de desgaste en tuberías de concreto

Velocidad [m/s]	Tasa de desgaste [mm/año]
0	0.0
0.5	0.1
1	0.4
1.5	1.0
2	1.9
2.5	3.2
3	34.9
3.5	7.0
4	9.6
4.5	12.6
5	16.2
6	24.7
7	35.4
8	48.3
9	63.6
10	81.2

Para velocidades intermedias, los valores para la tasa de desgaste pueden ser interpolados mediante la siguiente expresión:

$$T_D = Kv^n \quad (2.30)$$

, donde:

T_D = Tasa de desgaste

v = Velocidad

K, n = Constantes empíricas ($K=0.38$ y $n=2.33$)

De acuerdo a lo anterior, una velocidad de 3 [m/s] se observa una tasa de desgaste de casi 5 [mm/año], lo que se considera moderado, pero con velocidades de 4 [m/s] o mayores el desgaste se considera alto [2].

En cuanto a cajones disipadores, se han realizado estudios que sugieren la aparición de desgaste acelerado cuando el chorro llega al fondo o paredes del cajón a velocidades mayores que 6 [m/s] [3].

2.8 CAJÓN REAL

Se poseen datos de un cajón que presentó daños prematuros por desgaste acelerado en su fondo y pared. La Figura 2.12 muestra una vista superior del interior del cajón en operación antes de presentar la falla, donde se observa la agitación que produce la caída del chorro en el colchón de pulpa dentro del cajón y el resalto cerca de la pared.



Figura 2.12. Cajón real en operación.

La zona que presentó daños se puede observar en la Figura 2.13. Esta fotografía fue tomada durante una parada del sistema efectuada a los dos años de entrar en funcionamiento. Se aprecia desgaste en el fondo y en la pared del cajón, siendo en esta última donde el relave generó mayor daño. Las marcas dejadas por el flujo en la pared siguen un patrón radial, alejándose radialmente de la zona dañada.



Figura 2.13. Zona desgastada del cajón real.

3 ANTECEDENTES MODELACIÓN COMPUTACIONAL

La mecánica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) es un área de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver modelos matemáticos mediante un computador. Este método es utilizado para representar y analizar el flujo de sustancias de manera aproximada, con el fin de obtener mayor entendimiento de un fenómeno de estudio que se quiera analizar.

El método matemático más utilizado en este tipo de software es el de volúmenes finitos [13], que consiste en discretizar el dominio fluido mediante un mallado, manteniendo las propiedades del fluido en cada uno de los volúmenes definidos. Cada volumen se construye de manera que no se traslape con los volúmenes vecinos, así el volumen total del fluido es igual a la suma de los volúmenes de control considerados. Luego se resuelven las ecuaciones de continuidad y de conservación de momentum para cada volumen de control.

Se han desarrollado, además, diferentes algoritmos que incorporan efectos por turbulencia de diversos grados de complejidad. Dentro de estos, el modelo $k-\epsilon$ es el más ampliamente utilizado [14], [15], [16], pero presenta problemas cuando existe separación de flujo en una superficie lisa. Para estos casos se desarrolló el modelo SST, basado en el modelo $k-\omega$, el cual presenta mayor precisión para describir este fenómeno [17], [18].

En el caso de modelamientos de flujo de relaves en canal abierto, se trata de sistemas multifásicos donde el aire corresponde a una fase y en el relave se encuentran otras dos fases: agua y partículas. El término “fase” es utilizado en este lenguaje para denotar indistintamente tanto estados de la materia como elementos o materiales con estructura y/o composición distinta. Para modelar este tipo de flujos existen tres aproximaciones que son mencionadas más recurrentemente en la literatura: modelo Euleriano-Euleriano, modelo Euleriano-Lagrangiano y modelo monofásico no-Newtoniano. Se excluye la simulación directa, ya que se vuelve inaplicable debido a su alto costo computacional.

3.1 MODELOS MULTIFÁSICOS

3.1.1 Modelo Euleriano-Euleriano

Este modelo es referido también como modelo multi-fluido o modelo continuo debido a que cada fase se describe de forma Euleriana, tratándose tanto a las fases fluidas (aire y agua) como a la fase dispersa (partículas) como fluidos continuos interpenetrantes, con interfases definidas adecuadamente para cada caso. Por cada fase Euleriana se requiere un juego de ecuaciones de conservación y los acoplamientos se resuelven mediante términos de transferencia de interfase. Este modelo es ideal para modelar fluidos con un amplio rango de concentración de partículas ya que permite capturar el efecto del acoplamiento fluido-partícula y la interacción entre las partículas, pero se limita solo a sistemas con una distribución granulométrica pequeña. Por cada tamaño de partícula es necesario incluir un juego de ecuaciones de conservación, lo que aumenta el costo computacional de manera rápida, y hace conveniente definir un tamaño representativo de partículas para utilizar este método.

3.1.2 Modelo Lagrangiano

En este modelo se mantiene una aproximación Euleriana para las fases fluidas y se resuelven las ecuaciones de movimiento de Newton para determinar la trayectoria de partículas individuales o grupos de partículas. A cada partícula se le puede dar diferentes propiedades como densidad, forma, tamaño, condiciones iniciales) y por esto este modelo es ideal para fluidos con una distribución granulométrica amplia o con diferentes tipos de partículas en suspensión a la vez. La limitación de este modelo viene dada por sistemas con concentraciones de partículas demasiado altas, donde el acoplamiento partícula-fluido se vuelve significativo. Este efecto puede evaluarse resolviendo la fase particulada de manera acoplada con la fase continua, pero para obtener un acoplamiento realista es necesario obtener una adecuada resolución de la distribución espacial de las partículas y la gran cantidad de trayectorias lo vuelve costoso. Además, este modelo no contempla la fracción volumétrica ocupada por las partículas para resolver la fase continua, por lo que está limitada a fracciones de volumen menores a 10% [13] para no perder confiabilidad de los resultados.

3.1.3 Modelo Monofásico no-Newtoniano

Este modelo es el más simple de los tres, ya que trata al relave como fluido monofásico, considerando una aproximación Euleriana sin partículas, cuyo efecto se incorpora mediante un modelo de fluido no-Newtoniano para la viscosidad, en este caso plástico de Bingham. Este modelo tiene un costo computacional mucho menor que los dos anteriores, debido a que solo resuelve un juego de ecuaciones de conservación para caracterizar el flujo del relave. Además, no posee limitaciones en cuanto a concentraciones o granulometría. La desventaja de este modelo radica en su incapacidad para describir el movimiento individual de las partículas, pero es utilizado ampliamente en la modelación y diseño de sistemas de relaves y pulpas debido al buen ajuste que presentan los parámetros de Bingham con respecto a los datos experimentales.

3.2 MODELOS DE TURBULENCIA

Dadas las características del flujo, se hace necesario incluir un modelo de turbulencias. Los modelos de turbulencia más usados son los llamados “modelos de dos ecuaciones” debido a que ofrecen una buena relación entre costo computacional y precisión en los resultados [13]. Estos modelos resuelven las escalas de longitud y de velocidad usando dos ecuaciones separadas, por eso su nombre.

Dentro de esta familia de modelos de turbulencia existen dos modelos principales: $k-\epsilon$ y $k-\omega$. Ambos utilizan la hipótesis de un gradiente de difusión para relacionar los esfuerzos de Reynolds con los gradientes medios de velocidad y la viscosidad turbulenta. La viscosidad turbulenta es modelada como el producto entre la velocidad turbulenta y la escala de longitud turbulenta.

Uno de los principales problemas del modelamiento de turbulencia es lograr predecir con precisión el flujo al separarse de una superficie lisa. En general los modelos basados en ecuaciones “ ϵ ” predicen la aparición de la separación demasiado tarde y con poca precisión, por lo que no son recomendables para aplicaciones donde los desprendimientos sean importantes. Para resolver este problema se utiliza recurrentemente los modelos basados en las ecuaciones $k-\omega$ [19]. En particular, el modelo SST, basado en $k-\omega$, fue diseñado para

entregar gran precisión en la aparición y cantidad de flujo de separación bajo gradientes de presión adversos, mediante la inclusión de efectos de transporte en la formulación de la viscosidad turbulenta o “eddy” [13]. Esto aumenta la precisión a la hora de predecir la separación, como ha sido demostrado en un gran número de estudios de validación [20].

Un aspecto importante de destacar es que este modelo de turbulencia, SST, solo genera beneficios cuando se tiene una resolución de capa límite de por lo menos 10 puntos, en todo el resto del flujo es idéntico al modelo k- ϵ .

3.3 TRANSFERENCIA DE INTERFASE

El modelo Euleriano-Euleriano tiene dos submodelos diferentes: el modelo homogéneo y el modelo de transferencia de interfase o modelo inhomogéneo. En el modelo homogéneo todas las fases comparten los mismos campos de velocidad, turbulencia y temperatura, simplificando las ecuaciones, pero perdiendo precisión en predecir interfases que no estén bien definidas. Para estos últimos casos, como por ejemplo cuando existe salpique o choque de fluidos, es más acertado utilizar el modelo inhomogéneo. En este modelo cada fluido posee su propio campo de solución y estos interactúan mediante términos de transferencia de interfase, lo que por cierto aumenta los tiempos computacionales, ya que debe resolver ecuaciones adicionales para cada una de las fases, en vez de una para todas.

3.3.1 Densidad de Área de Interfase

La transferencia de interfase, tanto para el caso de momentum, masa o calor, es directamente dependiente del área de la superficie de contacto entre ambas fases. La forma de caracterizar esto es mediante el área de interfase por unidad de volumen entre la fase α y β (aire y relave en este caso), conocida como densidad de área de interfase $A_{\alpha\beta}$. Existen dos aproximaciones para modelar esta magnitud, el modelo de mezclas y el modelo de partículas.

3.3.1.1 Modelo de mezclas

Este modelo es más simple que el anterior, ya que trata a ambas fases de manera simétrica. El área superficial por unidad de volumen se calcula mediante la siguiente expresión:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{r_{\alpha}r_{\beta}}{d_{\alpha\beta}} \quad (3.1)$$

, donde:

r_{α} = Fracción volumétrica de la fase α

r_{β} = Fracción volumétrica de la fase β

$d_{\alpha\beta}$ = Escala de longitud a especificar

Los coeficientes adimensionales de transferencia de interfase pueden ser correlacionados en términos del número de Reynolds y el número de Prandtl de la mezcla.

$$Re_{\alpha\beta} = \frac{\rho_{\alpha\beta}|U_{\beta} - U_{\alpha}|d_{\alpha\beta}}{\mu_{\alpha\beta}} \quad (3.2)$$

$$Pr_{\alpha\beta} = \frac{\mu C_{P\alpha\beta}}{\lambda_{\alpha\beta}} \quad (3.3)$$

, donde:

$\rho_{\alpha\beta}$ = Densidad de la mezcla

$\mu_{\alpha\beta}$ = Viscosidad de la mezcla

$C_{P\alpha\beta}$ = Capacidad calórica específica de la mezcla

$\lambda_{\alpha\beta}$ = Conductividad térmica de la mezcla

La densidad y la viscosidad de mezcla se definen de la siguiente manera:

$$\rho_{\alpha\beta} = r_{\alpha}\rho_{\alpha} + r_{\beta}\rho_{\beta} \quad (3.4)$$

$$\mu_{\alpha\beta} = r_{\alpha}\mu_{\alpha} + r_{\beta}\mu_{\beta} \quad (3.5)$$

, donde:

ρ_α = Densidad de la fase α

ρ_β = Densidad de la fase β

μ_α = Viscosidad de la fase α

μ_β = Viscosidad de la fase β

3.3.1.2 Modelo de partículas

Este modelo para la transferencia de interfase es el que se utilizará en esta memoria, el cual asume que una de las fases es continua (fase α) y la otra dispersa (fase β). La fase dispersa se considera como partículas esféricas de diámetro medio d_β . Usando este modelo, el área de contacto de interfase queda definida como:

$$A_{\alpha\beta} = \frac{6r_\beta}{d_\beta} \quad (3.6)$$

, donde:

r_β = Fracción de volumen de la fase β

Los coeficientes adimensionales de transferencia de interfase pueden ser correlacionados en términos del número de Reynolds de las partículas y el número de Prandtl del fluido.

$$Re_{\alpha\beta} = \frac{\rho_\alpha |U_\beta - U_\alpha| d_\beta}{\mu_\alpha} \quad (3.7)$$

$$Pr_{\alpha\beta} = \frac{\mu_\alpha C_{P\alpha}}{\lambda_\alpha} \quad (3.8)$$

, donde:

μ_α = Viscosidad de la fase α

$C_{P\alpha}$ = Capacidad calórica específica de la fase α

λ_α = Conductividad térmica de la fase α

3.3.2 Transferencia de Momentum Interfase

La transferencia de momentum interfase $M_{\alpha\beta}$ da cuenta de las fuerzas que actúan sobre una fase α debido a la interacción con otra fase β . La fuerza total M_{α} que actúa sobre la fase α debido a todas las demás fases esta dada por:

$$M_{\alpha} = \sum_{\beta \neq \alpha} M_{\alpha\beta} \quad (3.9)$$

Estas fuerzas interfaciales son iguales y opuestas entre dos fases, por lo que la fuerza interfacial neta es cero.

$$(M_{\alpha\beta} = -M_{\beta\alpha}) \Rightarrow \sum_{\alpha} M_{\alpha} = 0 \quad (3.10)$$

Esta fuerza que actúa entre dos fases puede tener origen en variados efectos físicos independientes, incluyendo empuje, lubricación de pared, masa virtual, dispersión turbulenta y el arrastre interfacial. Para el caso particular de las simulaciones a realizar en esta memoria solo se considera relevante esta última.

La forma general para describir la fuerza de arrastre que se ejerce sobre una fase α debido a una fase β (dispersa) es:

$$M_{\alpha\beta} = c_{\alpha\beta}(U_{\beta} - U_{\alpha}) \quad (3.11)$$

, donde $(U_{\beta} - U_{\alpha})$ corresponde a la velocidad relativa y $c_{\alpha\beta}$ son coeficientes que determinan la magnitud de la interacción entre cada fase.

La fuerza de arrastre total sobre un cuerpo es descrita más convenientemente en términos del coeficiente de arrastre C_D , un parámetro adimensional que puede expresarse de la siguiente manera:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_{\alpha}(U_{\alpha} - U_{\beta})^2 A} \quad (3.12)$$

, donde D es la magnitud de la fuerza de arrastre y A es el área proyectada del cuerpo en la dirección del fluido. La fase continua se denota como α y la fase dispersa se denota como β .

Si se considera a la fase dispersa como partículas esféricas, los coeficientes $c_{\alpha\beta}$ se pueden obtener analíticamente. El área de una partícula proyectada en la dirección del flujo A_p y el volumen de una partícula V_p se definen como:

$$A_p = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.13)$$

$$V_p = \frac{\pi d^3}{6} \quad (3.14)$$

, donde d es el diámetro medio de la partícula. Así, la cantidad de partículas por unidad de volumen está dada por:

$$n_p = \frac{r_\beta}{V_p} = \frac{6r_\beta}{\pi d^3} \quad (3.15)$$

El arrastre ejercido por una partícula sobre la fase continua es:

$$D_p = \frac{1}{2} C_D \rho_\alpha A_p |U_\beta - U_\alpha| (U_\beta - U_\alpha) \quad (3.16)$$

De esta forma, el arrastre total ejercido por la fase dispersa por unidad de volumen de la fase continua es:

$$D_{\alpha\beta} = n_p D_p = \frac{3 C_D}{4} \frac{r_\beta}{d} \rho_\alpha |U_\beta - U_\alpha| (U_\beta - U_\alpha) \quad (3.17)$$

Al comparar esta expresión con (3.11) se obtiene:

$$c_{\alpha\beta} = \frac{3 C_D}{4} \frac{r_\beta}{d} \rho_\alpha |U_\beta - U_\alpha| \quad (3.18)$$

, que utilizando (3.6) se puede reescribir como:

$$c_{\alpha\beta} = \frac{C_D}{8} A_{\alpha\beta} \rho_{\alpha} |U_{\beta} - U_{\alpha}| \quad (3.19)$$

Existen correlaciones para determinar el coeficiente de arrastre C_D para partículas esféricas. Para bajos números de Reynolds de las partículas (régimen viscoso), se puede obtener una expresión de manera analítica:

$$C_D = \frac{24}{Re}, \quad Re \ll 1 \quad (3.20)$$

Para números de Reynolds de las partículas altos, los efectos de inercia dominan a los efectos viscosos, por lo que el coeficiente de arrastre es independiente del número de Reynolds:

$$C_D = 0.44, \quad 1000 \geq Re \geq 1 - 2 \times 10^5 \quad (3.21)$$

Para la región de transición, $0.1 < Re < 1000$, tanto los efectos viscosos como inerciales son importantes, por lo que el coeficiente de arrastre es una función compleja del número de Reynolds que debe ser determinada de manera experimental. Esto se ha hecho para el caso de partículas esféricas obteniendo variadas correlaciones, entre ellas la realizada por Schiller and Naumann (1993) [21] que se detalla a continuación:

$$C_D = \frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}) \quad (3.22)$$

Para asegurar un comportamiento en el régimen inercial, ANSYS CFX modifica la ecuación dejándola de la siguiente forma:

$$C_D = \max\left(\frac{24}{Re} (1 + 0.15Re^{0.687}), 0.44\right) \quad (3.23)$$

3.4 MALLADO DEL DOMINIO

Como ya fue dicho en un punto anterior, se utilizará el método de volúmenes finitos (MVF) para resolver las ecuaciones involucradas en el modelo. Es por esto que el mallado resulta fundamental a la hora de resolver dichas ecuaciones y encontrar su equilibrio, tanto en la

forma de los elemento como en su cantidad. ANSYS CFX 14.0 ofrece la posibilidad de emplear diferentes tipos de elementos para realizar el mallado del dominio.

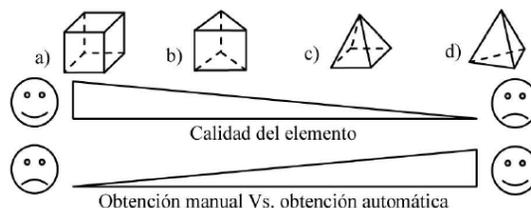


Figura 3.1. Tipos de elementos de mallado. a) hexaédrico; b) prisma; c) pirámide; d) tetraedro.

La principal diferencia entre los distintos tipos de elemento radica en el número de nodos con el que se resuelven las ecuaciones dentro de cada volumen de control. Si el número de nodos por elemento es mayor, mayor será la precisión interna que se obtiene. La Tabla 3-1 muestra la cantidad de nodos que presenta cada tipo de elemento.

Tabla 3-1. Tipos de elementos y cantidad de nodos

Forma del elemento	Nodos por elemento
Tetraedro	4
Pirámide	5
Prisma	6
Hexaedro	8

Para el caso de dominios fluidos, el mallado hexaédrico presenta ventajas con respecto a los demás. Este permite una reducción del número de elementos del dominio fluido y mejora la convergencia de la solución, lo que se traduce en menores tiempos de ejecución. Además ha demostrado ser más preciso a la hora de resolver problemas de caída en chorro [18].

Por otro lado, hay que tener en consideración que el mallado hexaédrico es de difícil obtención automática, por lo que requiere mallar manualmente el dominio, lo que significa un tiempo mayor de dedicación a esta etapa de la modelación. Además, para igual número de elementos una malla hexaédrica requiere más memoria RAM que una malla tetraédrica por ejemplo, por lo que es necesario contar con los recursos computacionales adecuados.

4 METODOLOGÍA

Se utilizará el software CFX 14.0, parte de la suite ANSYS. El trabajo se dividirá en dos etapas. La primera etapa se llamará “caso base”, y en ella se generará un modelo computacional utilizando las dimensiones que presentaba el cajón a estudiar al momento de presentar la falla. Para lograr un correcto modelamiento, se simulará de manera preliminar la canaleta que alimenta al cajón con distintas condiciones de entrada a modo esclarecer cuál de ellas da resultados más cercanos al caso teórico de flujo en canal abierto.

Para definir el mallado, se realizará un análisis de sensibilidad, que consiste en simulaciones utilizando agua como fluido de prueba, refinando el mallado hasta que la solución varíe de manera despreciable con respecto al refinamiento.

Ya definido el modelo y la malla, se procederá con las simulaciones. Se utilizará un fluido no-Newtoniano con características de plástico de Bingham para representar las propiedades del relave. Para esto es necesario conocer los parámetros de Bingham empíricos del relave y su comportamiento reológico. Se llevarán a cabo cuatro simulaciones con cuatro caudales distintos, a modo de ver la sensibilidad de los resultados con respecto a esta condición de operación. El alcance del estado estacionario se determinará a partir del monitoreo de la presión y velocidad en la canaleta de entrada y en ambas canaletas de salida.

Luego de haber completado las simulaciones de la primera etapa, se llevará a cabo el análisis de los datos obtenidos, poniendo énfasis en variables como la trayectoria del chorro, el campo de velocidades del relave y los esfuerzos de corte y presiones en el fondo y paredes del cajón. Se espera encontrar condiciones propicias para la aparición de desgaste acelerado, como velocidades altas y concentración de esfuerzos de corte cerca de la zona de desgaste observada en la realidad.

La segunda etapa será llamada “caso modificado”, y en ella, en base a los datos obtenidos y a la metodología de diseño expuesta en los antecedentes, se propondrán modificaciones al diseño y se generará un nuevo modelo con la geometría mejorada. Se simulará para las mismas cuatro condiciones de caudal utilizadas en el caso base y se analizarán los resultados obtenidos, comparando las variables de interés ya mencionadas anteriormente.

Finalmente, se concluirá respecto de la fluidodinámica detrás de la disipación del chorro dentro del cajón estudiado y su vinculación con el desgaste acelerado, en particular los esfuerzos de corte, y de la efectividad de las modificaciones propuestas.

5 DEFINICIÓN DEL MODELO

5.1 SUPUESTOS Y CONSIDERACIONES

Para llevar a cabo la simulación del cajón disipador a estudiar se consideran los siguientes supuestos y consideraciones:

- Los fluidos involucrados en el modelo, aire y relave, son inmiscibles (no se mezclan). El aire será modelado como fluido continuo y el relave como fluido disperso.
- El relave se considera lo suficientemente homogéneo para ser modelado como un fluido monofásico no-Newtoniano. El efecto de las partículas en las propiedades del relave se incluye dándole a este último características de plástico de Bingham.
- Las propiedades de los fluidos se asumen constantes en el tiempo, así como la temperatura del sistema (modelo isotérmico).
- Cada fase tiene su propio campo de velocidad (modelo inhomogéneo).
- Las paredes del cajón se asumen infinitamente rígidas.
- Se realizan simulaciones estacionarias, teniendo en cuenta que el modelo puede nunca llegar a tal estado debido a la naturaleza turbulenta del fenómeno. A pesar de esto, el sistema debe alcanzar un estado “cuasi-estático” a partir del cual es posible realizar un análisis del comportamiento del flujo y de las variables de interés, y obtener conclusiones coherentes.
- Se cuenta con información de la operación del cajón de solo algunos meses, a pesar de que el cajón llevaba operando cerca de 2 años al momento de ser encontrada la falla. Sin embargo, los rangos de operación en este periodo observado cubren el rango de operación normal del cajón, por lo que los resultados se consideran representativos.
- Se obviará el llenado del cajón, debido a que es una operación que se realiza paulatinamente, partiendo con caudales bajos, y dura solo unos minutos. Por ende, no alcanza a generar daño visible a las paredes y/o fondo del cajón.

5.2 ECUACIONES A RESOLVER

A continuación se presentan las ecuaciones implementadas en ANSYS CFX 14.0 para resolver el problema propuesto.

5.2.1 Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad para el sistema puede ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) = 0 \quad (5.1)$$

Además, se debe satisfacer la condición de que cada volumen de control está totalmente ocupado por una combinación de las fases sin dejar partes vacías:

$$\sum_{\alpha=1}^n r_\alpha = 1 \quad (5.2)$$

5.2.2 Ecuación de Conservación de Momentum

La ecuación de conservación de momentum puede ser escrita como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha \otimes U_\alpha)) = -r_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \bar{\tau}_\alpha + r_\alpha \rho_\alpha g + M_\alpha \quad (5.3)$$

En la ecuación anterior, $\bar{\tau}_\alpha$ corresponde al tensor de esfuerzos viscosos de la fase α y se define como:

$$\bar{\tau}_\alpha = r_\alpha \mu_\alpha (\nabla \cdot U_i + (\nabla \cdot U_i)^T) + r_\alpha (\lambda_\alpha - \frac{2}{3} \mu_\alpha) \nabla \cdot U_\alpha \bar{I} \quad (5.4)$$

, donde λ_α es la viscosidad dilatacional o volumétrica de la fase α .

5.2.3 Ecuaciones de Turbulencia

El modelo de turbulencia elegido, $k - \omega SST$, se describe mediante las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha k) + \nabla \cdot \left(r_\alpha \left(\rho_\alpha U_\alpha k - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) \right) = r_\alpha (P_\alpha - \beta^* \rho_\alpha k \omega) \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha \omega) + \nabla \cdot \left(r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha \omega - \left(\mu + \frac{\mu_{t\alpha}}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right) &= r_\alpha \left(\alpha \frac{\omega}{k} P_\alpha - \beta \rho_\alpha \omega^2 \right) \\ &+ r_\alpha (1 - F_1) 2 \rho_\alpha \frac{1}{\sigma_\omega \omega} \nabla k \nabla \omega \end{aligned} \quad (5.6)$$

Las variables y constantes involucradas corresponden a las descritas en [22].

5.3 DOMINIO COMPUTACIONAL

A continuación se puede observar un esquema general del dominio computacional a utilizar para simular la geometría del cajón.

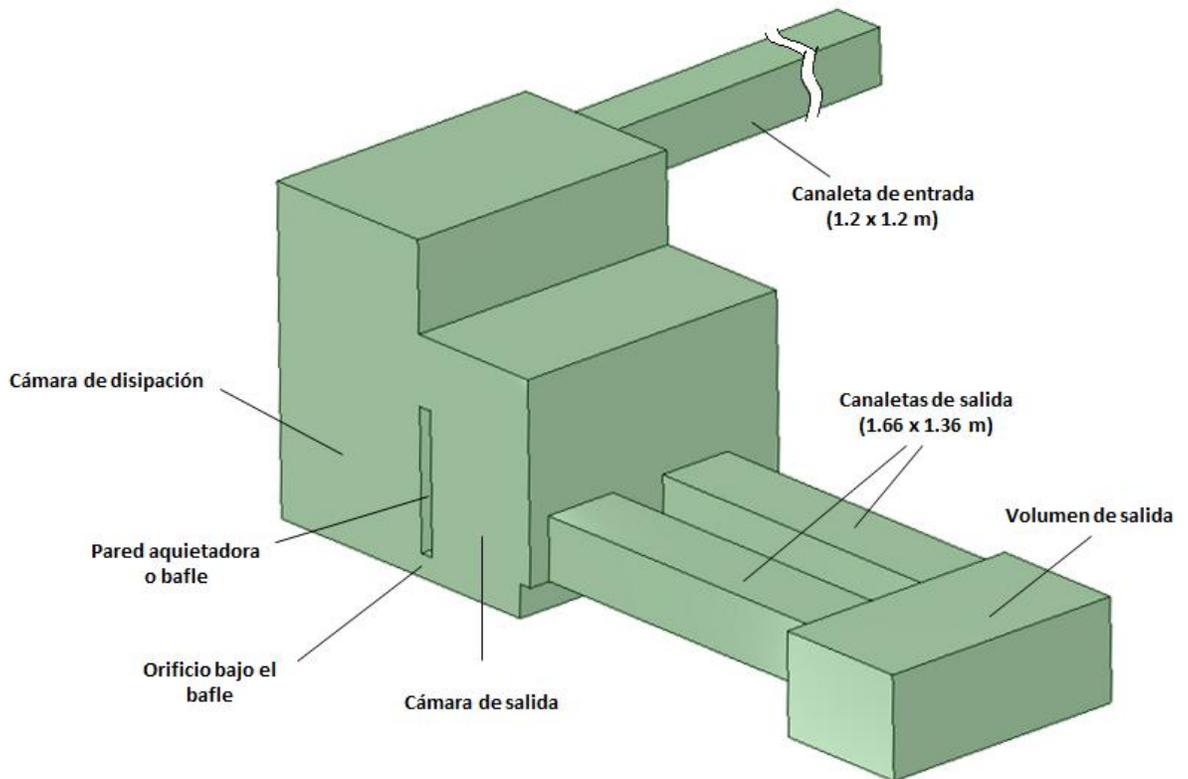


Figura 5.1. Esquema dominio computacional. Vista isométrica posterior.

En la Figura 5.1 se pueden apreciar las partes principales que componen el dominio como la canaleta de entrada, la cámara de disipación, la cámara de salida, las canaletas de salida y un volumen de salida utilizado para obtener las condiciones de escurrimiento a la salida del cajón. Se puede ver también un volumen vaciado en el centro del dominio que representa la pared aquietadora o baffle y que da lugar al orificio de paso bajo este. Esta distribución general es válida para todos los casos a simular, aceptando modificaciones en su distribución y dimensiones.

5.4 CASOS A SIMULAR

Como se describe en la sección 4, se realizarán distintas simulaciones que contemplan parámetros distintos debido a cambios de caudal, de fluido o de geometría según sea el caso, pero que mantendrán las características del modelo general. En la Tabla 5-1 se resumen los casos a simular.

Tabla 5-1. Casos a simular

	Caso	Fluido	Caudal [m ³ /h]
Primera etapa			
	Sensibilidad 1 al 5	Agua	11500
	Base 1	Relave	9500
	Base 2	Relave	10500
	Base 3	Relave	11500
	Base 4	Relave	12500
Segunda etapa			
	Modificado 1	Relave	9500
	Modificado 2	Relave	10500
	Modificado 3	Relave	11500
	Modificado 4	Relave	12500

Los caudales para cada caso fueron seleccionados de acuerdo a los datos de operación del cajón real disponibles, cuyo registro se llevó a cabo por un periodo de 9 meses anteriores al momento de encontrar la falla, siendo el caudal mínimo registrado igual a 9500 [m³/h] y el máximo cercano a 12500 [m³/h].

5.5 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

Las propiedades de los fluidos a utilizar en el modelo se detallan en la Tabla 5-2, que se presenta a continuación.

Tabla 5-2. Propiedades de los fluidos del modelo

Fluido	Densidad, ρ [kg/m ³]	Viscosidad dinámica, μ [Pa·s]	Viscosidad Bingham, μ_B [Pa·s]	Esfuerzo de fluencia, τ_f [Pa]
Aire	1.185	1.83×10^{-5}	-	-
Agua	997	8.9×10^{-4}	-	-
Relave	1567	-	8.6×10^{-3}	1.11

5.6 CANALETA DE ENTRADA AL CAJÓN

Para poder definir de manera más realista las condiciones de entrada al cajón, se considera en el modelo un segmento de la canaleta de alimentación. En la realidad la longitud de esta canaleta de entrada es de alrededor de cien metros, pero debido a limitaciones computacionales se le da una longitud menor. A pesar de que el estudio de esta canaleta escapa del alcance de este trabajo, se opta por simularla de manera preliminar, con distintas alternativas de condiciones de borde, con el fin de apreciar el desarrollo del flujo para cada caso. Esto se realiza sin un análisis demasiado detallado, más bien a modo de acercamiento a las condiciones de entrada reales del cajón.

La solución teórica del problema de flujo en canal abierto se detalla a continuación. La Figura 5.2 muestra el flujo de dos fluidos paralelos entre dos placas planas, que en este caso es análogo al caso de un canal abierto. En la interfase, tanto la velocidad como los esfuerzos de corte entre ambos fluidos deben coincidir.

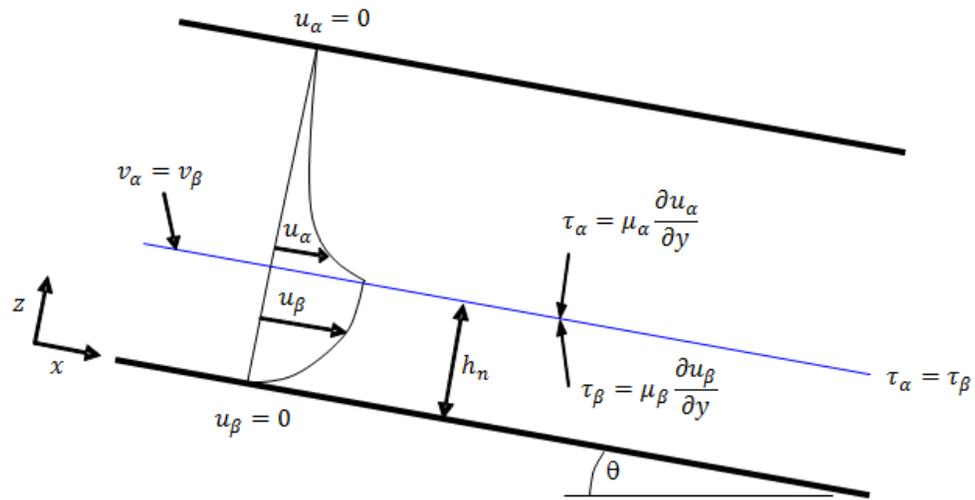


Figura 5.2. Esquema de flujo en canal abierto.

Se aprecia que la velocidad presenta un perfil parabólico, que va desde cero en el fondo hasta un máximo en la superficie o cerca de esta, dependiendo de la geometría del canal y de la rugosidad del lecho.

Debido a que la viscosidad del relave es mucho mayor que la del aire, el desarrollo de su perfil de velocidad se ve muy poco influenciado por este último, considerando que no hay viento. Es por esto que este modelo se suele simplificar, sacando al aire del análisis e imponiendo la condición de esfuerzo de corte nulo en la superficie libre, como se muestra a en la Figura 5.3.

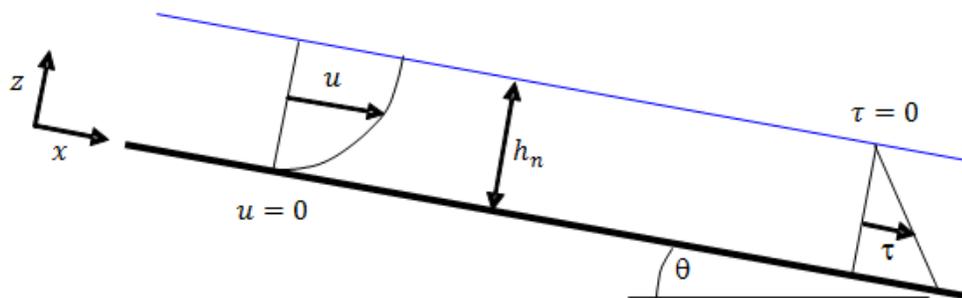


Figura 5.3. Esquema de flujo en canal abierto simplificado.

Este caso simplificado se simuló a modo de control, para obtener el desarrollo del perfil de velocidades más cercano al teórico y luego compararlo con los casos que incluyen aire. La geometría de la canaleta de entrada se muestra en la Figura 5.4.

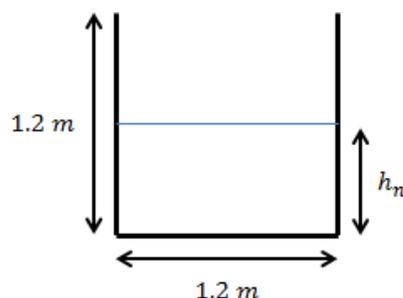


Figura 5.4. Geometría de canaleta de entrada al cajón.

La canaleta posee una pendiente del 1% y una longitud de 40 [m]. La altura de escurrimiento normal h_n es calculada en cada caso, dependiendo del caudal, con la ecuación 2.15, para un valor de $n = 0.011$, y la velocidad media del relave queda determinada por esta altura y el caudal volumétrico. La siguiente Tabla 5-3 muestra las alturas normales de escurrimiento y la velocidad media en la canaleta para los distintos caudales.

Tabla 5-3. Altura normal de escurrimiento y velocidad media del relave.

Caudal [m ³ /h]	Altura normal de escurrimiento [m]	Velocidad media del relave [m/s]
9500	0.555	3.96
10500	0.597	4.07
11500	0.640	4.16
12500	0.682	4.24

Estas simulaciones preliminares fueron realizadas considerando un caudal de relave de 11500 [m³/h]. Para el caso simplificado (sin aire), se utilizó un volumen con las dimensiones de la canaleta y una altura igual a la altura normal de escurrimiento para el caudal mencionado. Para los casos simulados incluyendo el aire, se añadió un volumen superior de igual ancho y longitud, pero de una altura tal que la altura total de los dos volúmenes sea igual a la altura de

la canaleta. La geometría del dominio y las condiciones de borde utilizadas en cada caso se presentan a continuación en la Figura 5.5 y Figura 5.6.

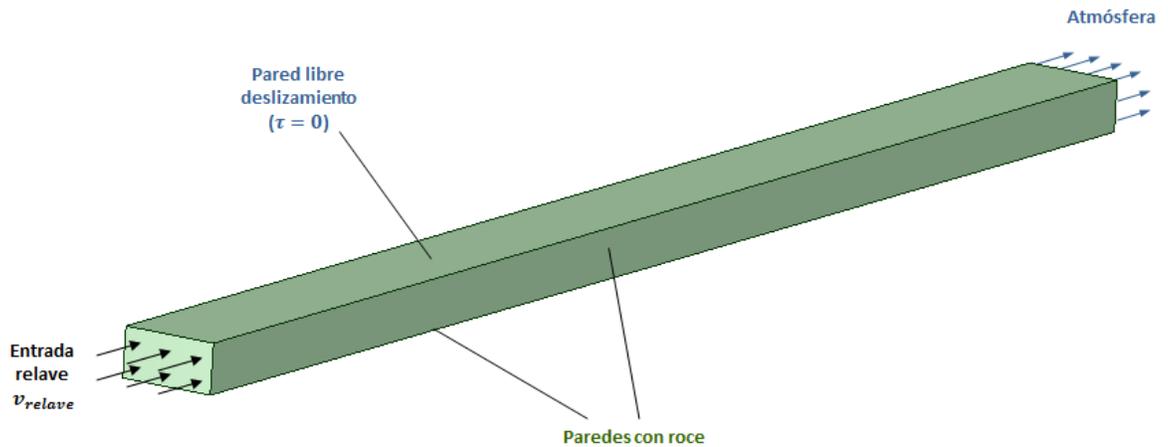


Figura 5.5. Condiciones de borde para el dominio computacional canaleta de entrada, caso simplificado. Vista isométrica.

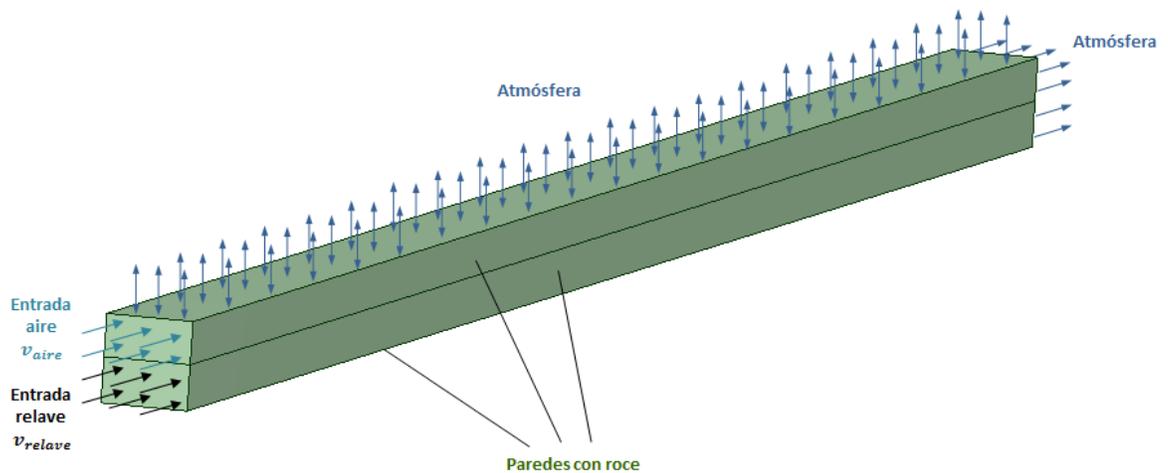


Figura 5.6. Condiciones de borde para el dominio computacional canaleta de entrada, caso con aire. Vista isométrica.

En un principio se intentó simular el caso con aire con una condición de borde atmosférica, es decir, una abertura en vez de una entrada de aire, pero los resultados presentaron errores en la interfaz entre ambas condiciones de borde de entrada, probablemente debido a la abrupta

diferencia de velocidad, que no pudieron ser eliminados, por lo que finalmente no fueron incluidos en el análisis. Se optó, en vez de lo anterior, por un caso con entrada de aire a baja velocidad y otro con entrada de aire a la misma velocidad del relave.

Los resultados obtenidos en estas simulaciones se presentan a continuación. En la Figura 5.7, se puede apreciar el perfil de velocidad del relave, para el caso sin aire, a medida que avanza a lo largo de la canaleta.

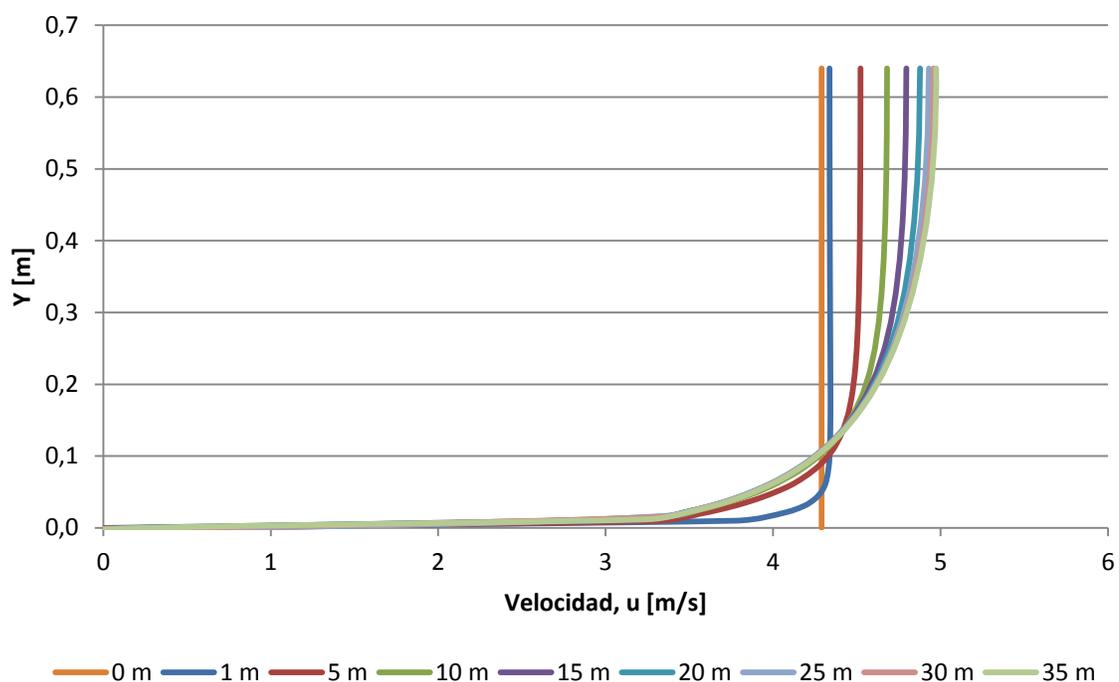


Figura 5.7. Desarrollo del perfil de velocidad del relave a lo largo de la canaleta de entrada. Caso sin aire.

El relave parte con un perfil uniforme en la cara de entrada y termina con un perfil parabólico, como se esperaba, completamente desarrollado a partir de los 35 [m]. Esto se resume en la Tabla 5-4, a continuación.

Tabla 5-4. Resultados canaleta de entrada. Caso sin aire.

Posición en la canaleta, x [m]	Velocidad máxima, $v_{m\acute{a}x}$ [m/s]	Diferencia, $\frac{(v_i - v_{i-1})}{v_{i-1}}$ [%]
0	4.16	-
5	4.39	5.5 %
10	4.55	3.6 %
15	4.67	2.6 %
20	4.75	1.7 %
25	4.80	1.1 %
30	4.83	0.6 %
35	4.84	0.2 %

La Figura 5.8 muestra el perfil de velocidad del relave para el caso con aire a baja velocidad de entrada.

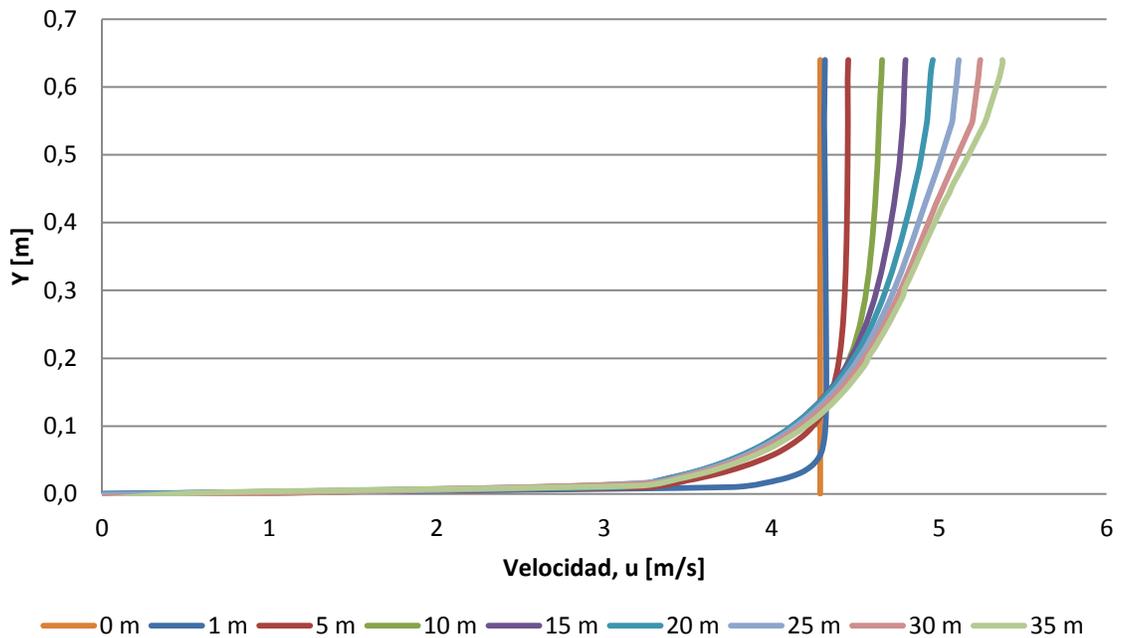


Figura 5.8. Desarrollo del perfil de velocidad del relave a lo largo de la canaleta de entrada. Caso con aire a baja velocidad de entrada ($v_{in,aire} = 0.1$ [m/s]).

La velocidad de entrada del aire en este caso se fijó en 0.1 [m/s] para intentar acercarse lo más posible a una condición de aire quieto, pero evitando errores singulares en la interfaz de ambas condiciones de borde de entrada debido a la gran diferencia entre las velocidades en esa zona.

El relave en este caso parte con un perfil uniforme en la cara de entrada y termina con un perfil parabólico, al igual que el caso sin aire, pero que no logra un desarrollo completo en la longitud de la canaleta simulada. Esto se resume en la Tabla 5-5 a continuación.

Tabla 5-5. Resultados canaleta de entrada. Caso con aire a baja velocidad de entrada ($v_{in_aire} = 0.1$ [m/s]).

Posición en la canaleta, x [m]	Velocidad máxima, $v_{m\acute{a}x}$ [m/s]	Diferencia, $\frac{(v_i - v_{i-1})}{v_{i-1}}$ [%]
0	4.16	-
5	4.35	4.6 %
10	4.52	3.9 %
15	4.70	4.0 %
20	4.85	3.2 %
25	5.00	3.1 %
30	5.12	2.4 %
35	5.20	1.6 %

La Figura 5.10 muestra el perfil de velocidad del relave para el caso con aire a igual velocidad de entrada que el relave.

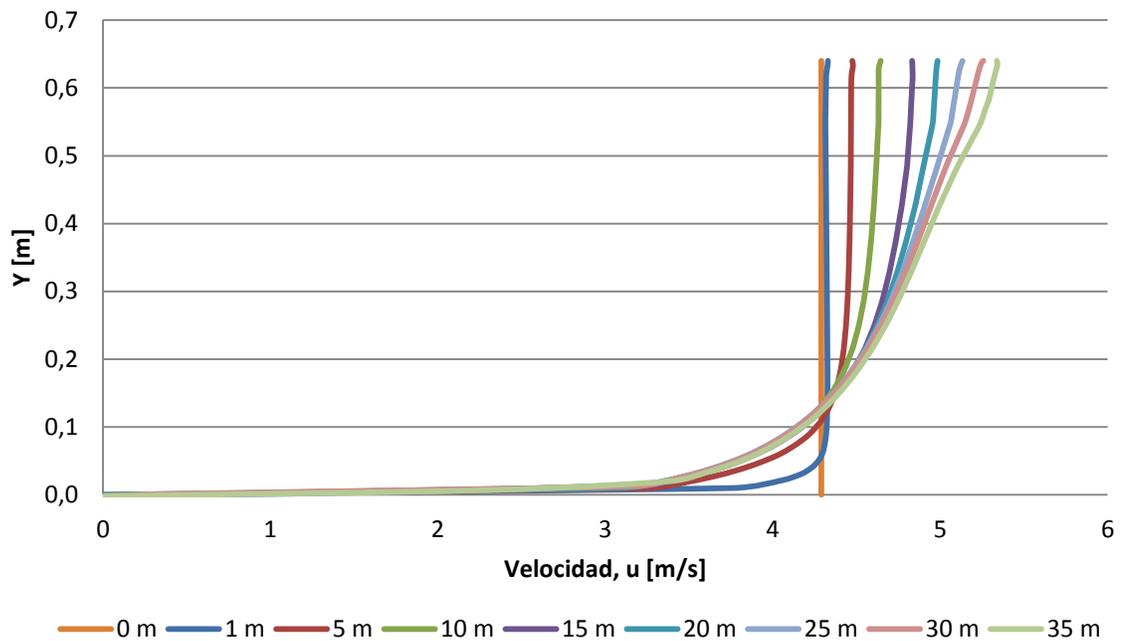


Figura 5.9. Desarrollo del perfil de velocidad del relave a lo largo de la canaleta de entrada.
Caso con aire a igual velocidad de entrada que el relave ($v_{in,aire} = 4.16$ [m/s]).

La velocidad de entrada del aire en este caso se fijó en 4.16 [m/s], igual a la velocidad de entrada del relave, esto con el fin de corroborar que la velocidad de entrada del aire no tenga incidencia sobre el desarrollo del perfil de velocidad del relave.

El relave en este caso parte con un perfil uniforme en la cara de entrada y termina con un perfil parabólico, bastante parecido al caso con aire a baja velocidad de entrada, que tampoco logra un desarrollo completo en la longitud de la canaleta simulada. Esto se resume en la Tabla 5-6, a continuación.

Tabla 5-6. Resultados canaleta de entrada. Caso con aire a igual velocidad de entrada que el relave ($v_{in_aire} = 4.16$ [m/s]).

Posición en la canaleta, x [m]	Velocidad máxima, $v_{m\acute{a}x}$ [m/s]	Diferencia, $\frac{(v_i - v_{i-1})}{v_{i-1}}$ [%]
0	4.16	-
5	4.35	4.6 %
10	4.51	3.7 %
15	4.71	4.4 %
20	4.85	3.0 %
25	5.00	3.1 %
30	5.13	2.6 %
35	5.21	1.6 %

El desarrollo del perfil de velocidad en los casos con aire es bastante similar a lo largo de la canaleta, con pequeñas diferencias que pueden ser producto de la diferencia de velocidad del aire de entrada en cada caso, pero que no afectan mayormente al perfil de velocidades del relave ni su desarrollo. Comparado con el caso sin aire, existen diferencias en los perfiles debido a la inclusión de la fase aire en el modelo, pero no se aprecia diferencias significativas, en cuanto a la condición de entrada de este, en el flujo de relave en la canaleta. Un resumen de los tres casos se puede observar en la Tabla 5-7, a continuación.

Tabla 5-7. Resumen resultados canaleta de entrada.

Posición en la canaleta, x [m]	Caso sin aire		Caso con aire a baja velocidad de entrada		Caso con aire a igual velocidad de entrada que el relave	
	Velocidad máxima, $v_{m\acute{a}x}$ [m/s]	Diferencia, $\frac{(v_i - v_{i-1})}{v_{i-1}}$ [%]	Velocidad máxima, $v_{m\acute{a}x}$ [m/s]	Diferencia, $\frac{(v_i - v_{i-1})}{v_{i-1}}$ [%]	Velocidad máxima, $v_{m\acute{a}x}$ [m/s]	Diferencia, $\frac{(v_i - v_{i-1})}{v_{i-1}}$ [%]
0	4.16	-	4.16	-	4.16	-
5	4.39	5.5 %	4.35	4.6 %	4.35	4.6 %
10	4.55	3.6 %	4.52	3.9 %	4.51	3.7 %
15	4.67	2.6 %	4.70	4.0 %	4.71	4.4 %
20	4.75	1.7 %	4.85	3.2 %	4.85	3.0 %
25	4.80	1.1 %	5.00	3.1 %	5.00	3.1 %
30	4.83	0.6 %	5.12	2.4 %	5.13	2.6 %
35	4.84	0.2 %	5.20	1.6 %	5.21	1.6 %

Finalmente, para simular con condiciones de borde lo más parecidas al caso teórico, que es ampliamente aceptado, y cuidando no aumentar demasiado los costos computacionales, se decide añadir una canaleta de 20 [m] a la entrada del cajón. Esto último debido a que a esa distancia se obtiene una velocidad máxima muy parecida a la velocidad máxima del perfil desarrollado del caso teórico sin aire, y el perfil ya se aprecia bastante desarrollado, con una forma marcadamente parabólica, y con diferencias de velocidad máxima cercanas al 3%.

5.7 CONDICIONES DE BORDE

Las condiciones de borde impuestas al dominio se pueden apreciar en la Figura 6.3, a continuación:

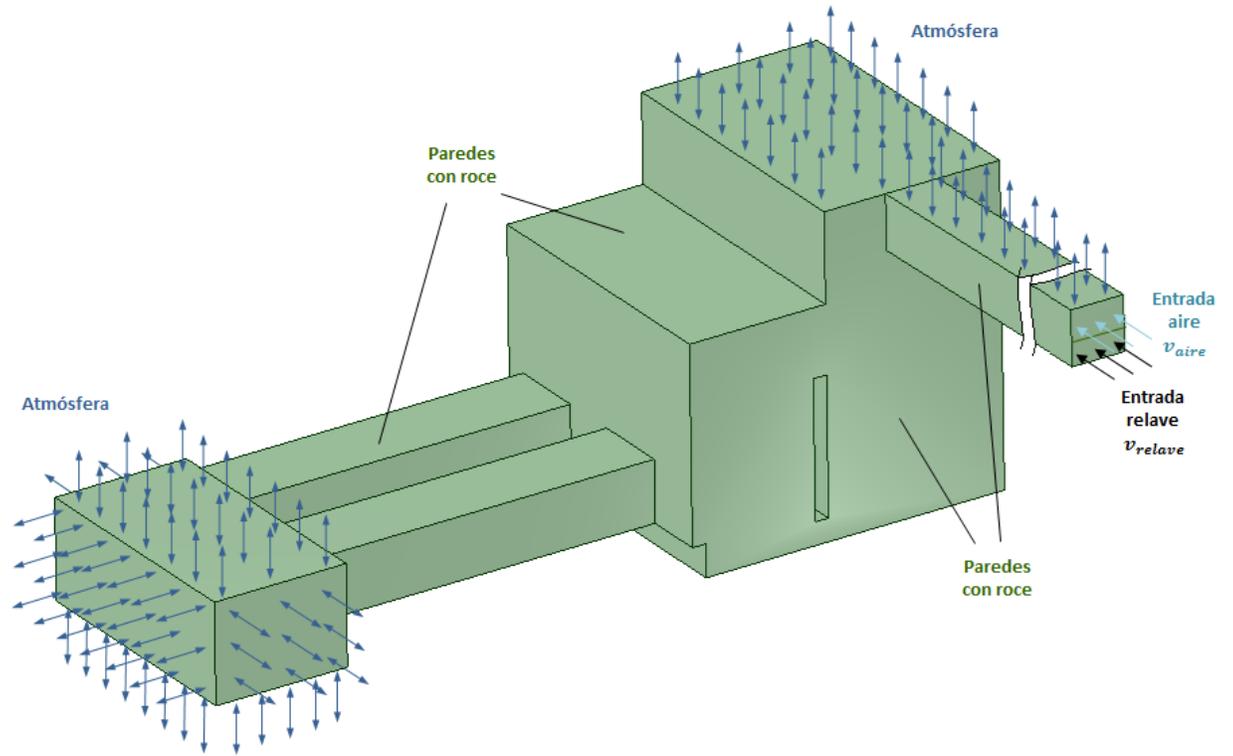


Figura 5.10. Condiciones de borde para el dominio computacional. Vista isométrica anterior.

La cara de la canaleta de entrada se divide en dos, una cara superior para definir la entrada de aire y una inferior para la entrada del flujo de relave, como fue discutido en la sección 5.6.

Los detalles de las condiciones de borde e iniciales aplicadas al modelo en cada uno de los casos a simular se abordan en las secciones siguientes.

6 PRIMERA ETAPA: MODELACIÓN COMPUTACIONAL CASO BASE

6.1 GEOMETRÍA DEL DOMINIO COMPUTACIONAL

La geometría y dimensiones generales del dominio pueden observarse en las Figuras 6.1 y 6.2.

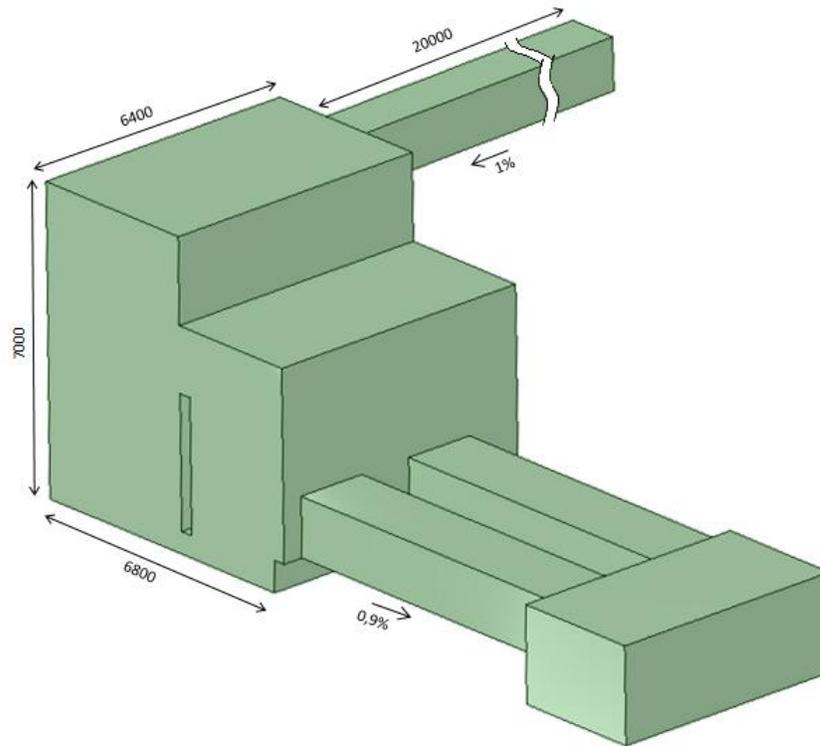


Figura 6.1. Dimensiones dominio computacional, caso base. Vista isométrica, dimensiones en milímetros.

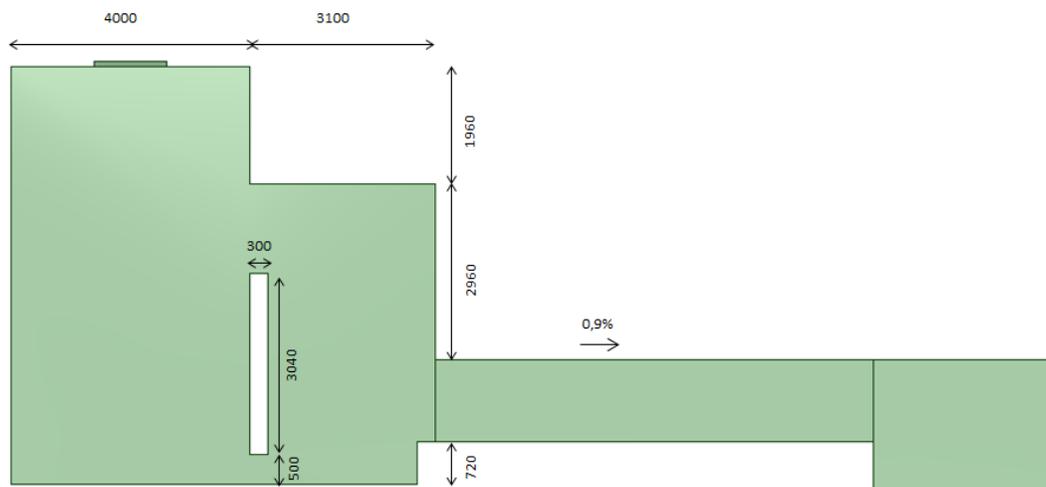


Figura 6.2. Dimensiones dominio computacional, caso base. Vista frontal, dimensiones en milímetros.

Los detalles del dominio computacional se presentan en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Detalles del dominio. Caso base.

	Caso base
Condiciones básicas	
Tipo de dominio	Dominio fluido
Lista de fluidos	Aire a 25°C, Relave ^a
Modelos del dominio	
Presión de referencia	1 [atm]
Flotabilidad	
Opción	Boyante
Gravedad en x	0
Gravedad en y	-g
Gravedad en z	0
Densidad boyante de referencia	1.185 [kg/m ³]
Modelos de los fluidos	
Opción de multifase	Modelo inhomogéneo
Modelo de superficie libre	Standard
Transferencia de calor	Modelo isotérmico
Turbulencias	Modelo homogéneo
Modelo de turbulencias	k-omega SST
Detalles de los fluidos	
Aire a 25°C	
Morfología	Fluido continuo
Modelo boyante de fluidos	Diferencia de densidad
Relave	
Morfología	Fluido disperso
Diámetro medio	0.005 [m]
Modelo boyante de fluidos	Diferencia de densidad
Pares de fluidos	
Aire a 25°C - Relave	
Transferencia interfacial	Modelo de partículas
Transferencia de momentum	Coefficiente de arrastre
Coefficiente de arrastre	Schiller-Naumann

^aEl relave es remplazado por agua para el caso del análisis de sensibilidad.

6.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En cualquier simulación numérica es importante independizar los resultados de la resolución de la malla utilizada, por lo que se realiza un análisis de sensibilidad de mallado para este fin.

A medida que se refina el mallado se obtienen resultados cada vez más precisos y cercanos a la realidad, pero los tiempos de resolución aumentan considerablemente con el número de elementos de la malla. El fin del análisis de sensibilidad es encontrar la malla a partir de la cual el costo de seguir refinando es muy superior a la ganancia en precisión que se obtiene. Esto se mide mediante un error máximo tolerado, que para este caso se fijará en 5% y a partir del cual los errores propios del mallado no se consideran influyentes en el resultado de las simulaciones.

Los parámetros utilizados para el análisis de sensibilidad se presentan a continuación.

6.2.1 Mallado

El mallado utilizado para el análisis de sensibilidad se realizó mediante el mallador CFX-Mesh. Se utilizó el método "Sweep" (barrido) para lograr elementos del tipo hexaédricos. Además, se refinó cerca de los bordes de la canaleta de entrada y salida, así como de la región cercana al paso bajo la pared aquietadora.

La Tabla 6-2 muestra un resumen de las mallas generadas para el análisis de sensibilidad.

Tabla 6-2. Detalles del mallado. Análisis de sensibilidad

Malla	Número de elementos	Tipo de elementos	Tamaño elementos cámara de disipación [m]
1	111598	Hexaédrico	0.3
2	253859	Hexaédrico	0.2
3	395815	Hexaédrico	0.125
4	728172	Hexaédrico	0.1
5	1310754	Hexaédrico	0.08

6.2.2 Detalles Condiciones de Borde

6.2.2.1 Entrada

Las condiciones de entrada para ambas fases se detallan en la Tabla 6-3, a continuación.

Tabla 6-3. Detalles condiciones de entrada. Análisis de sensibilidad.

	Análisis de sensibilidad
Entrada de aire	
Tipo de condición de borde	Entrada (Inlet)
Definición de la condición	Velocidad normal a la entrada
Velocidad	0.1 [m/s]
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen de aire	1
Fracción en volumen de agua	0
Entrada de agua	
Tipo de condición de borde	Entrada (Inlet)
Definición de la condición	Velocidad normal a la entrada
Velocidad	4.16 [m/s] (Q=11500 [m ³ /h])
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen de aire	0
Fracción en volumen de agua	1

6.2.2.2 Abertura (Atmósfera)

Las condiciones de abertura, que corresponden a las caras abiertas a la atmósfera, se detallan en la Tabla 6-4, a continuación.

Tabla 6-4. Detalles condiciones de abertura. Análisis de sensibilidad.

	Análisis de sensibilidad
Tipo de condición de borde	Abertura (Opening)
Definición de la condición	Presión normal a la abertura
Presión relativa de la abertura	0 [Pa]
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen de aire	1
Fracción en volumen de agua	0

6.2.2.3 Pared

Las condiciones de pared se detallan en la Tabla 6-5, a continuación.

Tabla 6-5. Detalles condiciones de abertura. Análisis de sensibilidad.

	Análisis de sensibilidad
Tipo de condición de borde	Pared (Wall)
Definición de la condición	Sin deslizamiento (No slip)
Rugosidad de la pared	0.15 [mm]

6.2.3 Condiciones Iniciales

Las condiciones iniciales del dominio son detalladas en la Tabla 6-6, a continuación.

Tabla 6-6. Condiciones iniciales del dominio. Análisis de sensibilidad.

	Análisis de sensibilidad
Condiciones globales	
Presión relativa	0 [Pa]
Energía cinética turbulenta	Automática
Disipación de energía cinética turbulenta	Automática
Condiciones de cada fluido	
Aire a 25°C	
Velocidad inicial	Cartesiana
U	0 [m/s]
V	0 [m/s]
W	0 [m/s]
Fracción de volumen inicial	Función escalón de altura y – 0.72 [m]
Agua	
Velocidad inicial	Cartesiana
U	0 [m/s]
V	0 [m/s]
W	0 [m/s]
Fracción de volumen inicial	1 – Fracción en volumen de aire

6.2.4 Resultados

Los resultados del análisis de sensibilidad de mallado se presentan en esta sección. La Figura 6.3 muestra el caudal másico de entrada y total de salida en función del número de elementos del mallado.

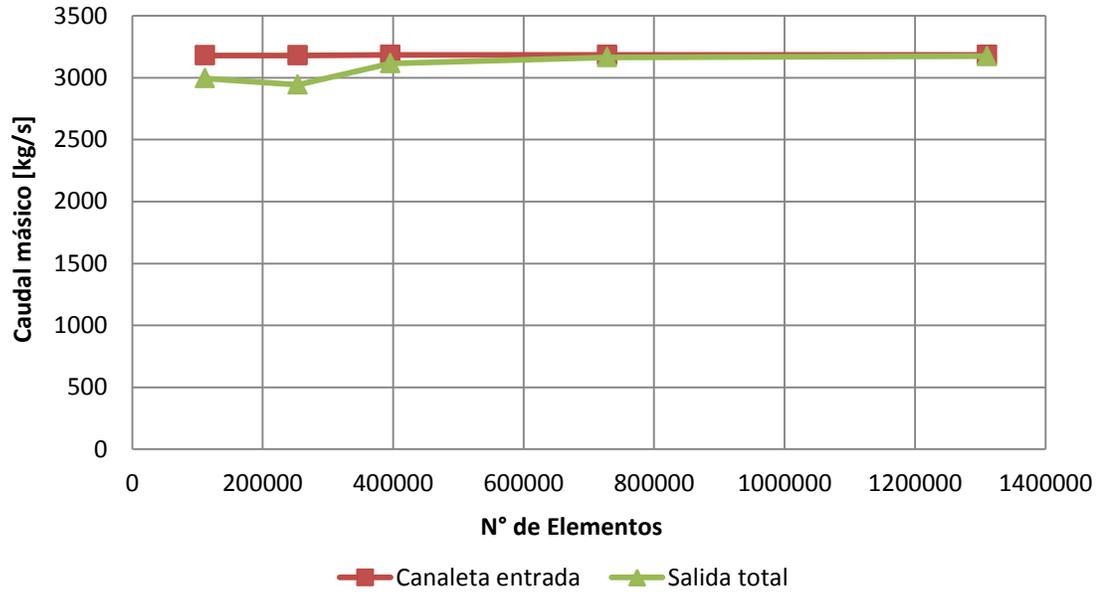


Figura 6.3. Caudal másico en función del mallado.

La Figura 6.4 muestra la presión en la canaleta de entrada y las canaletas de salida en función del número de elementos del mallado.

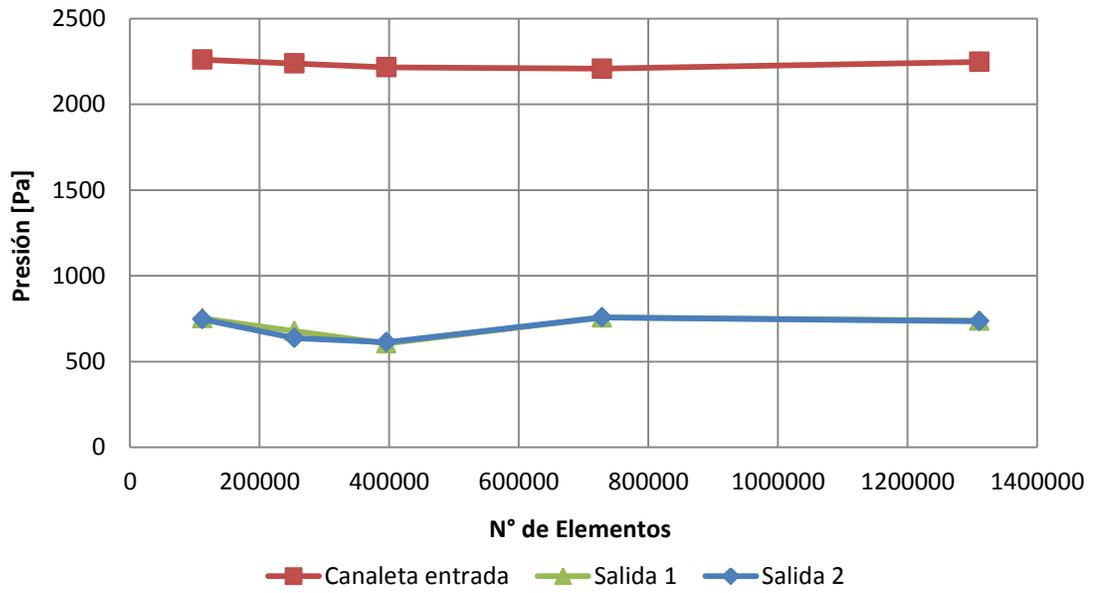


Figura 6.4. Presión en función del mallado.

La Figura 6.5 y Figura 6.6 muestran los esfuerzos de corte máximo y promedio, respectivamente, en el fondo y en la pared del cajón opuesta a la entrada.

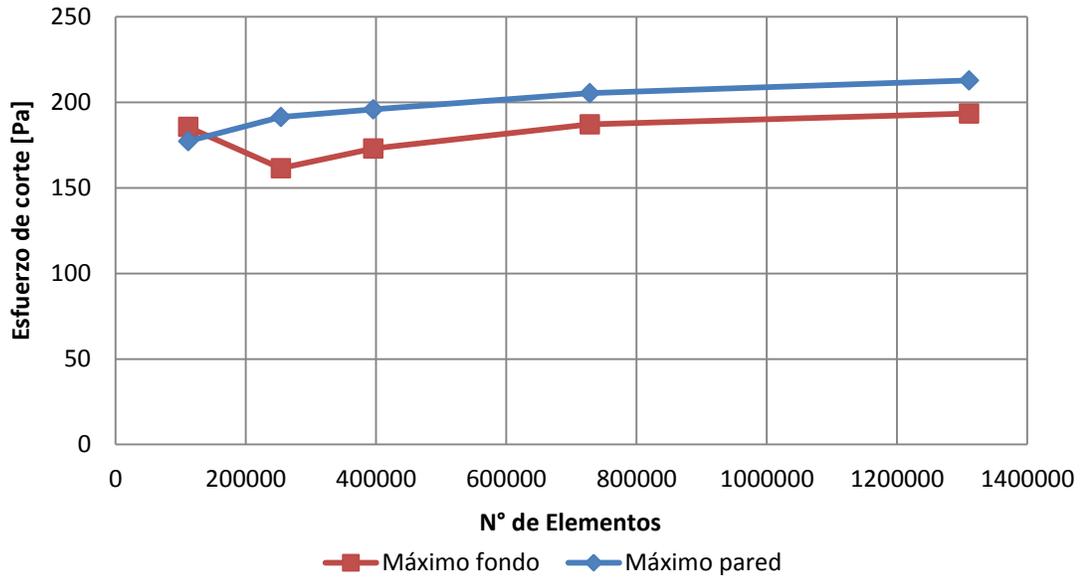


Figura 6.5. Esfuerzos de corte máximo en función del mallado.

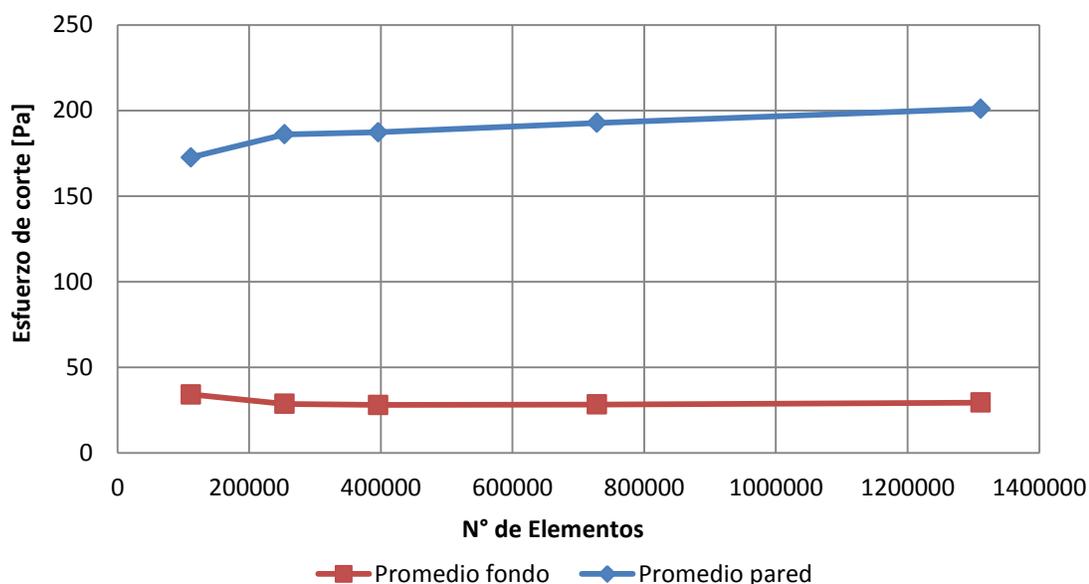


Figura 6.6. Esfuerzos de corte promedio en función del mallado.

Se aprecia claramente en todos los parámetros medidos que, a medida que se refina la malla, los resultados van tendiendo a un valor constante, variando cada vez menos entre un mallado y el siguiente. Se estableció como criterio de selección de mallado que, para cada parámetro medido, la diferencia entre el valor obtenido con la malla seleccionada y el valor obtenido con la malla siguiente fuera menor al 5%. Esto se cumple para mallas distintas según el parámetro medido, lo que se resume en la Tabla 6-7, a continuación.

Tabla 6-7. Resultados análisis de sensibilidad.

	Malla que cumple criterio
Caudal másico canaleta entrada	1
Caudal másico salida total	3
Presión canaleta entrada	1
Presión canaleta salida 1	4
Presión canaleta salida 2	4
Esfuerzo de corte máximo fondo	4
Esfuerzo de corte máximo pared	2
Esfuerzo de corte promedio fondo	2
Esfuerzo de corte promedio pared	2

En conclusión, se elige la malla 4 ya que cumple el criterio para todos los parámetros medidos.

6.3 MALLADO

El mallado considerado en este caso es el que se definió en la sección 6.2, correspondiente a la malla 4. Los detalles de la malla se muestran en la Tabla 6-8, a continuación.

Tabla 6-8. Detalles del mallado. Caso base.

Malla	Número de elementos	Tipo de elementos	Tamaño elementos cámara de disipación [m]
4	728172	Hexaédrico	0.1

6.4 DETALLES CONDICIONES DE BORDE

6.4.1 Entrada

Las condiciones de entrada, tanto para relave como para aire se detallan en la Tabla 6-9, a continuación.

Tabla 6-9. Detalles condiciones de entrada. Caso base.

	Caso base
Entrada de aire	
Tipo de condición de borde	Entrada (Inlet)
Definición de la condición	Velocidad normal a la entrada
Velocidad	0.1 [m/s]
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen de aire	1
Fracción en volumen de relave	0
Entrada de relave	
Tipo de condición de borde	Entrada (Inlet)
Definición de la condición	Velocidad normal a la entrada
Velocidad	3.96 [m/s] (Q= 9500 [m ³ /h]) 4.06 [m/s] (Q=10500 [m ³ /h]) 4.16 [m/s] (Q=11500 [m ³ /h]) 4.24 [m/s] (Q=12500 [m ³ /h])
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen de aire	0
Fracción en volumen de relave	1

6.4.2 Abertura (Atmósfera)

Las condiciones de abertura, que corresponden a las caras abiertas a la atmósfera, se detallan en la Tabla 6-10, a continuación.

Tabla 6-10. Detalles condiciones de abertura. Caso base.

	Caso base
Tipo de condición de borde	Abertura (Opening)
Definición de la condición	Presión normal a la abertura
Presión relativa de la abertura	0 [Pa]
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen de aire	1
Fracción en volumen de relave	0

6.4.3 Pared

Las condiciones de pared se detallan en la Tabla 6-11, a continuación.

Tabla 6-11. Detalles condiciones de abertura. Caso base.

	Caso base
Tipo de condición de borde	Pared (Wall)
Definición de la condición	Sin deslizamiento (No slip)
Rugosidad de la pared	0.15 [mm]

6.5 CONDICIONES INICIALES

Las condiciones iniciales del dominio son detalladas en la Tabla 6-12, a continuación.

Tabla 6-12. Condiciones iniciales del dominio. Caso base.

	Caso base
Condiciones globales	
Presión relativa	0 [Pa]
Energía cinética turbulenta	Automática
Disipación de energía cinética turbulenta	Automática
Condiciones de cada fluido	
Aire a 25°C	
Velocidad inicial	Cartesiana
U	0 [m/s]
V	0 [m/s]
W	0 [m/s]
Fracción de volumen inicial	Función escalón de altura $y - 0.72$ [m]
Relave	
Velocidad inicial	Cartesiana
U	0 [m/s]
V	0 [m/s]
W	0 [m/s]
Fracción de volumen inicial	1 – Fracción en volumen de aire

6.6 RESULTADOS

Los resultados del caso base se presentan en esta sección. La Figura 6.7 y Figura 6.8 muestran la fracción volumétrica de relave, donde se aprecia claramente el flujo cayendo dentro del cajón.

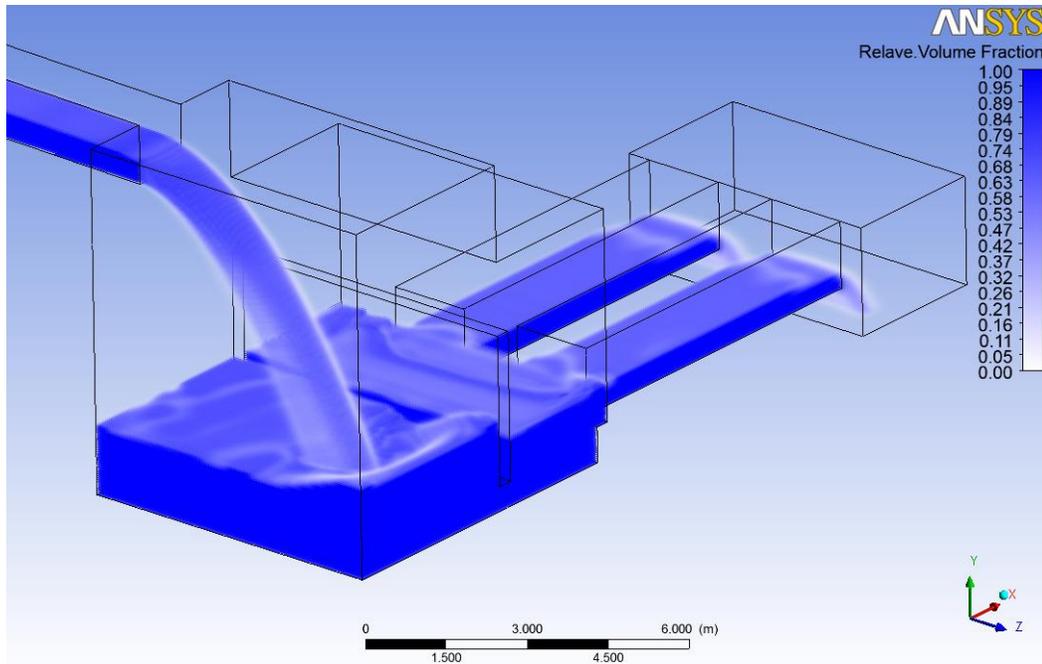


Figura 6.7. Fracción Volumétrica, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$. Vista isométrica anterior.

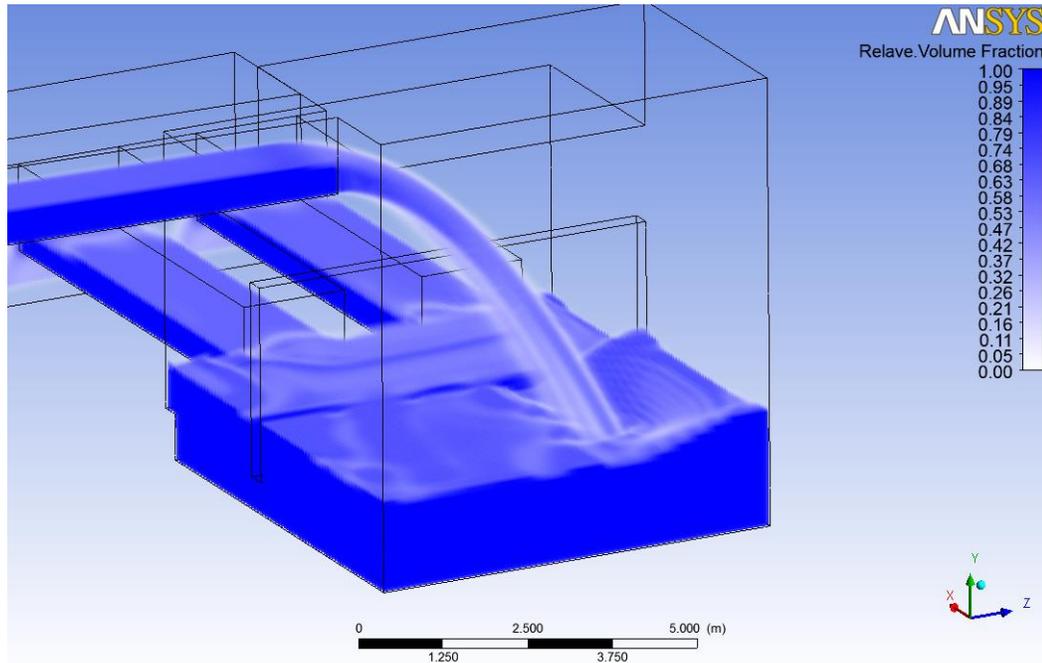


Figura 6.8. Fracción Volumétrica, $Q=9500$ [m^3/h]. Vista isométrica posterior.

6.6.1 Trayectoria y Velocidades del Chorro

Las siguientes Figura 6.9 a Figura 6.20 muestran la trayectoria y velocidades del relave a lo largo de su recorrido dentro del cajón, para cada uno de los caudales simulados. Los datos corresponden a la línea de corriente que presenta la mayor velocidad en cada caso. Se muestra también una comparación entre las velocidades obtenidas de la simulación y las velocidades calculadas con la ecuación 2.28.

$Q = 9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

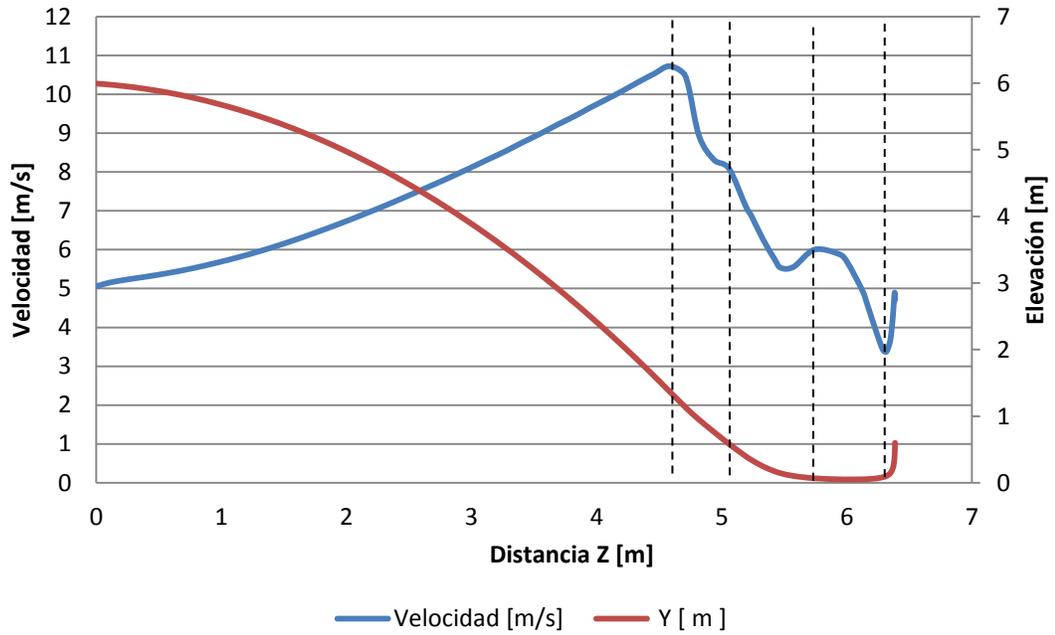


Figura 6.9. Trayectoria y velocidades del relave al caer en el cajón, $Q=9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base.

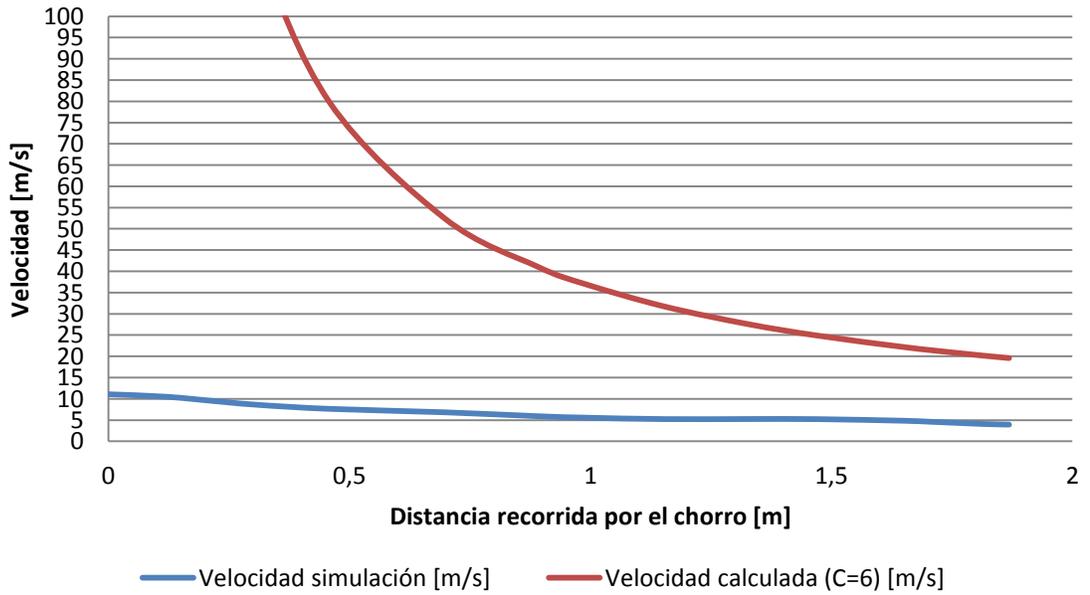


Figura 6.10. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base.

A partir de las velocidades obtenidas en la simulación, se calcula el valor del parámetro C a lo largo de la línea de corriente mostrada.

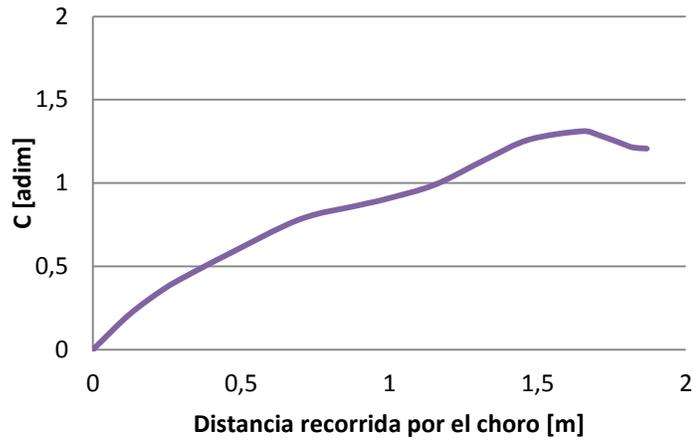


Figura 6.11. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base.

$Q = 10500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

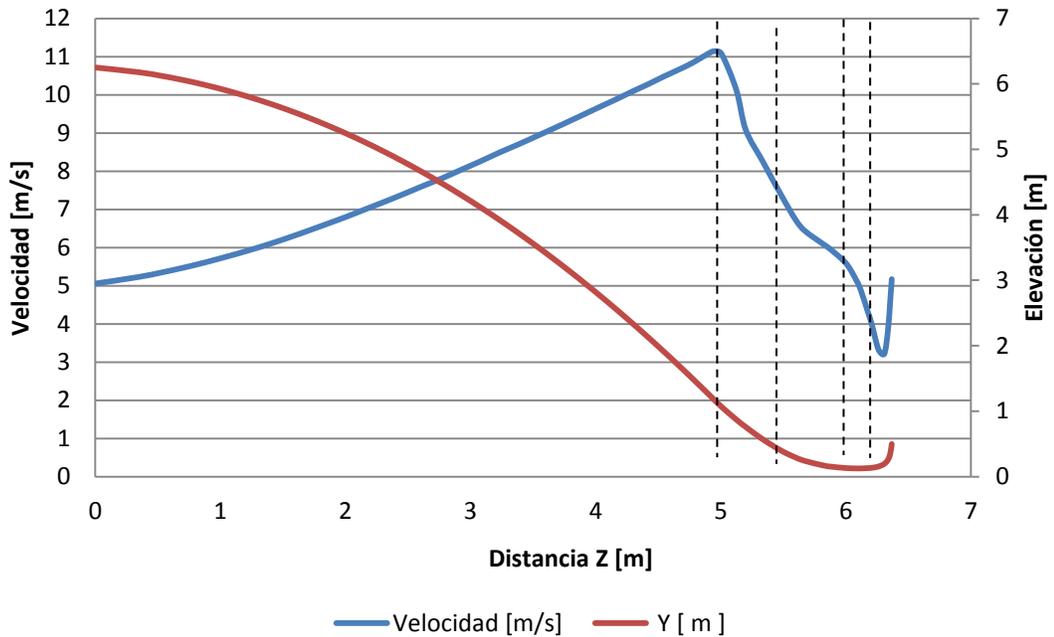


Figura 6.12. Trayectoria y velocidades del relave al caer en el cajón, $Q=10500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base.

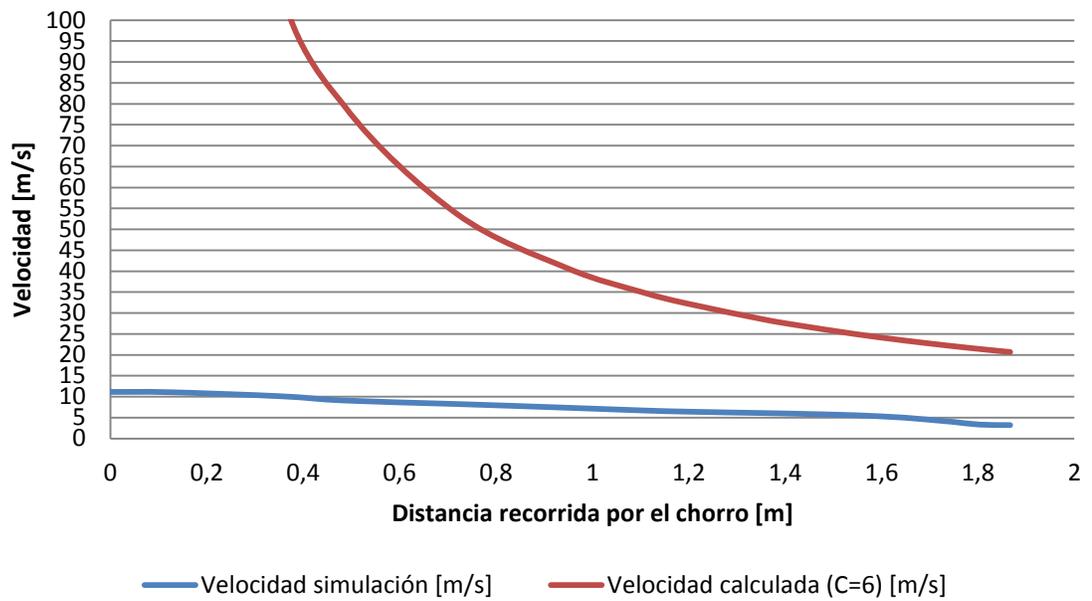


Figura 6.13. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=10500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base.

A partir de las velocidades obtenidas en la simulación, se calcula el valor del parámetro C a lo largo de la línea de corriente mostrada.

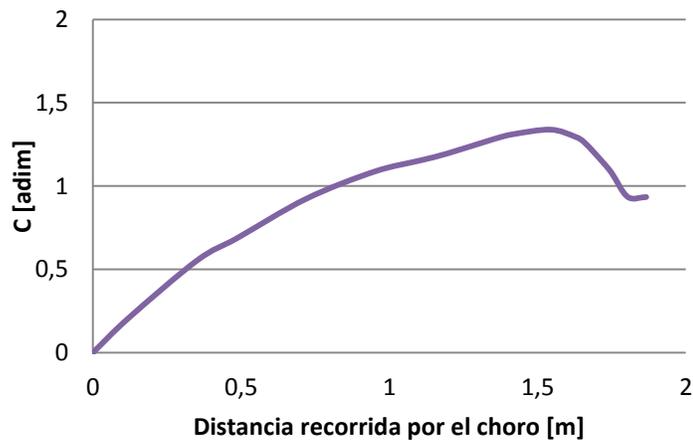


Figura 6.14. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=10500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base.

$Q = 11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

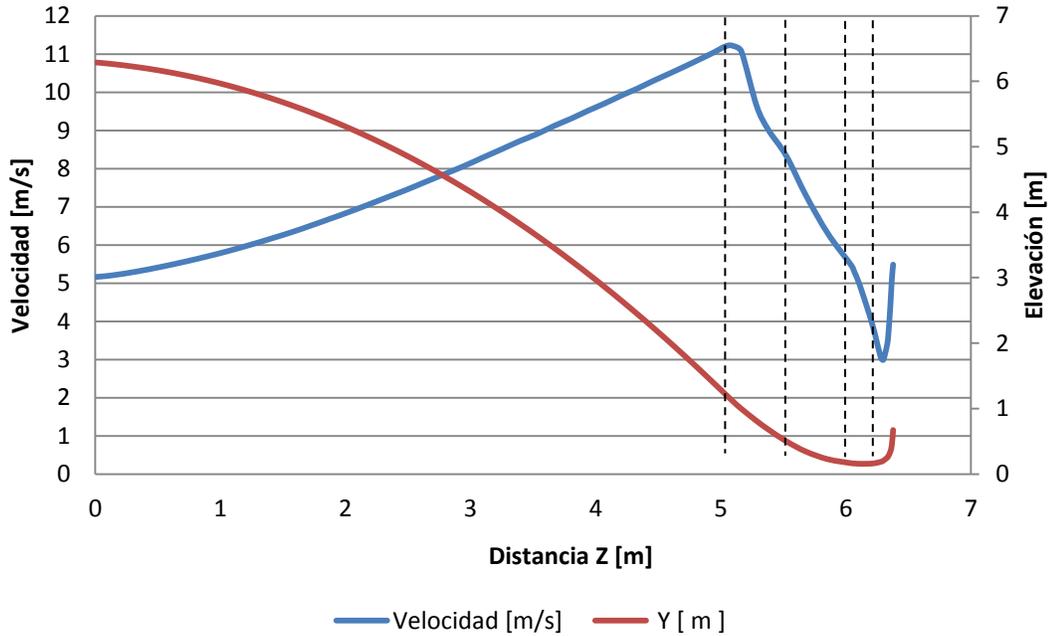


Figura 6.15. Trayectoria y velocidades del relave al caer en el cajón, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base.

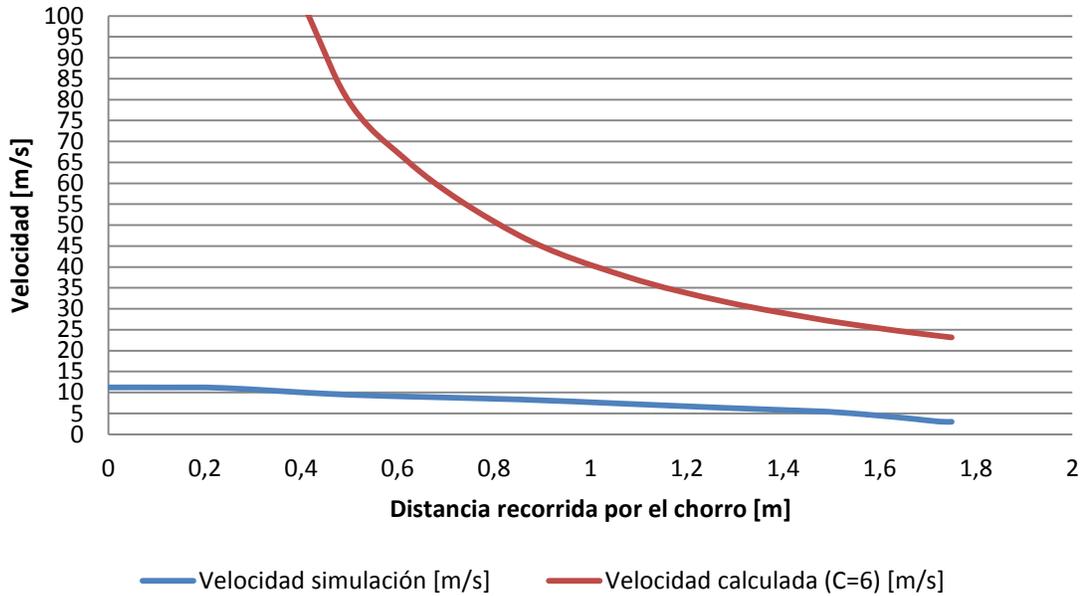


Figura 6.16. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base.

A partir de las velocidades obtenidas en la simulación, se calcula el valor del parámetro C a lo largo de la línea de corriente mostrada.

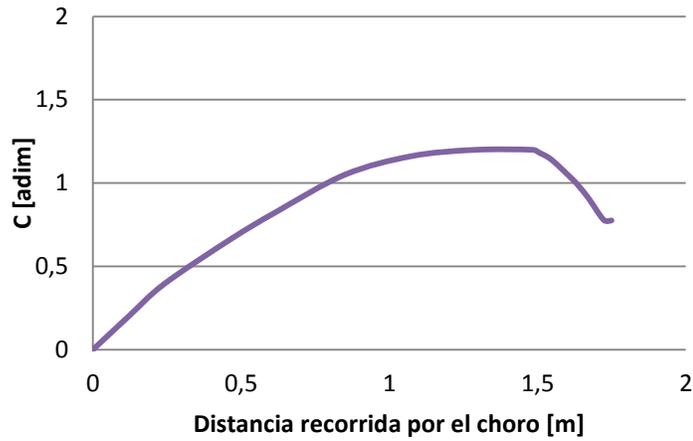


Figura 6.17. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base.

$Q = 12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

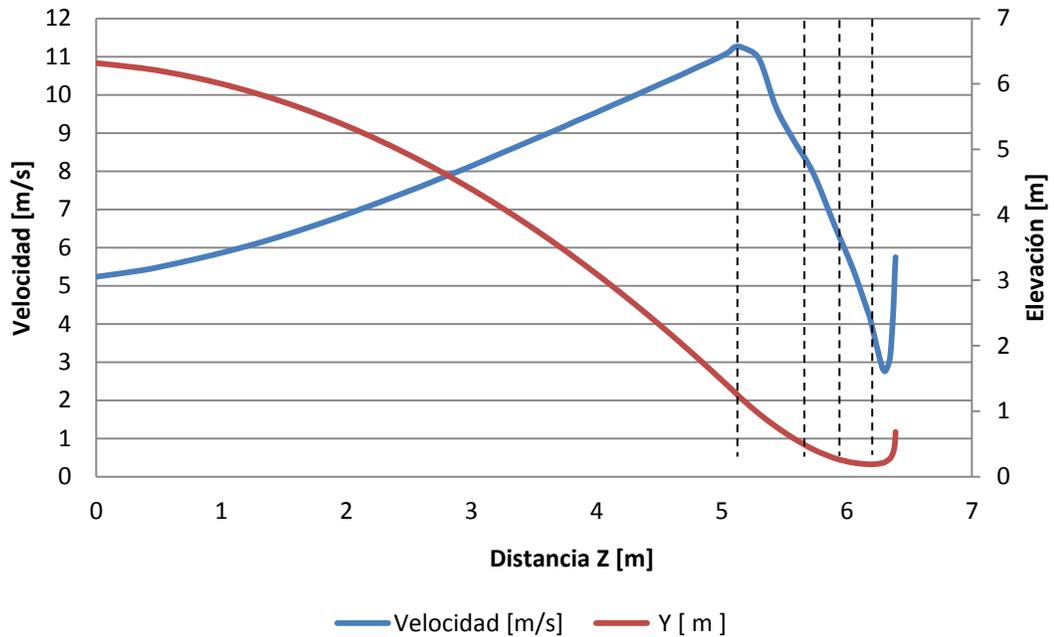


Figura 6.18. Trayectoria y velocidades del relave al caer en el cajón, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base.

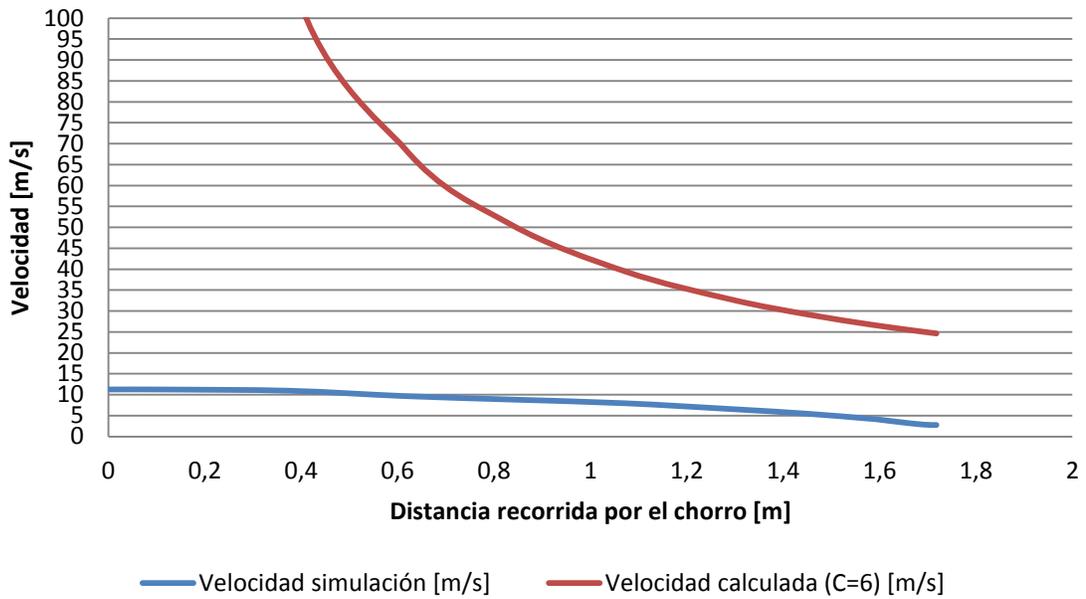


Figura 6.19. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base.

A partir de las velocidades obtenidas en la simulación, se calcula el valor del parámetro C a lo largo de la línea de corriente mostrada.

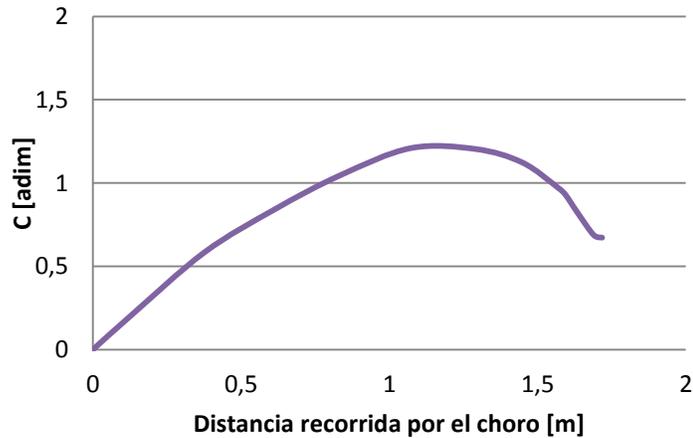


Figura 6.20. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base.

Se observa que mientras cae, el relave gana velocidad hasta llegar a un máximo, cuando siente la superficie del relave dentro del cajón. Luego comienza a desacelerar hasta llegar a una velocidad mínima cuando impacta la pared. A medida que aumenta el caudal, el alcance del relave es mayor, así como las velocidades, como lo muestran la Figura 6.21 y Figura 6.22.

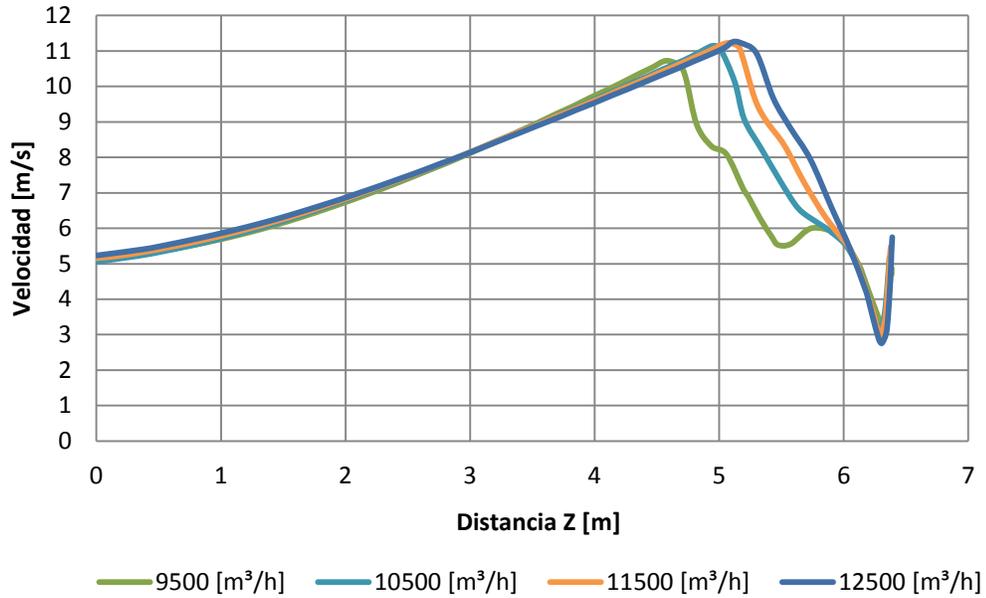


Figura 6.21. Velocidades del relave al caer en el cajón, caso base.

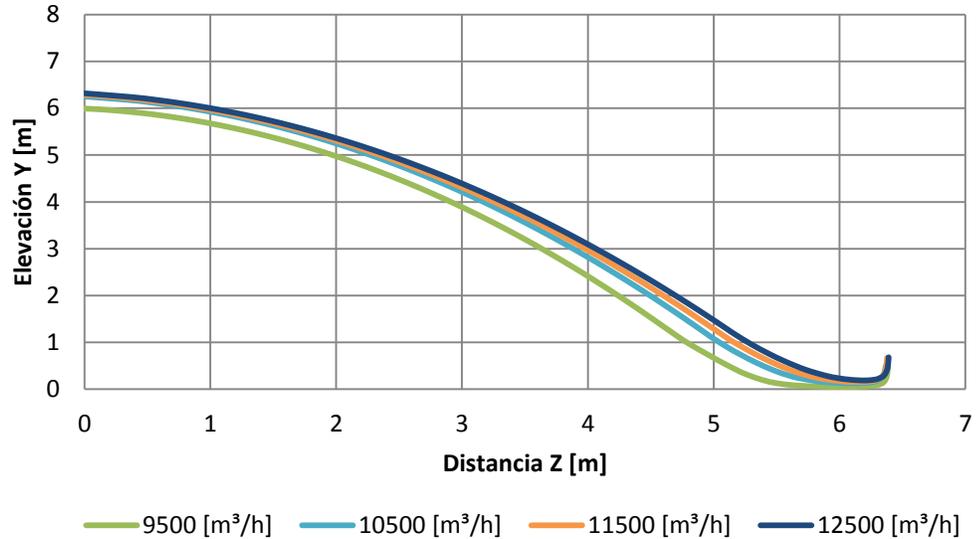


Figura 6.22. Perfiles de caída del en el cajón, caso base.

La siguiente Tabla 6-13, a continuación, resume los datos anteriormente presentados para cada uno de los caudales simulados.

Tabla 6-13. Resumen resultados trayectoria y velocidades, caso base.

Caudal	Velocidad caída [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Altura impacto [m]	Largo impacto [m]
9500	4.91	11.07	1.09	4.79
10500	5.06	11.14	1.17	4.95
11500	5.16	11.21	1.2	5.05
12500	5.23	11.25	1.28	5.11

6.6.2 Líneas de Corriente

Las siguientes Figura 6.23 a Figura 6.26 muestran las líneas de corriente para el caudal de 9500 [m³/h]. Las líneas de corriente para los demás caudales se pueden encontrar en los Anexos.

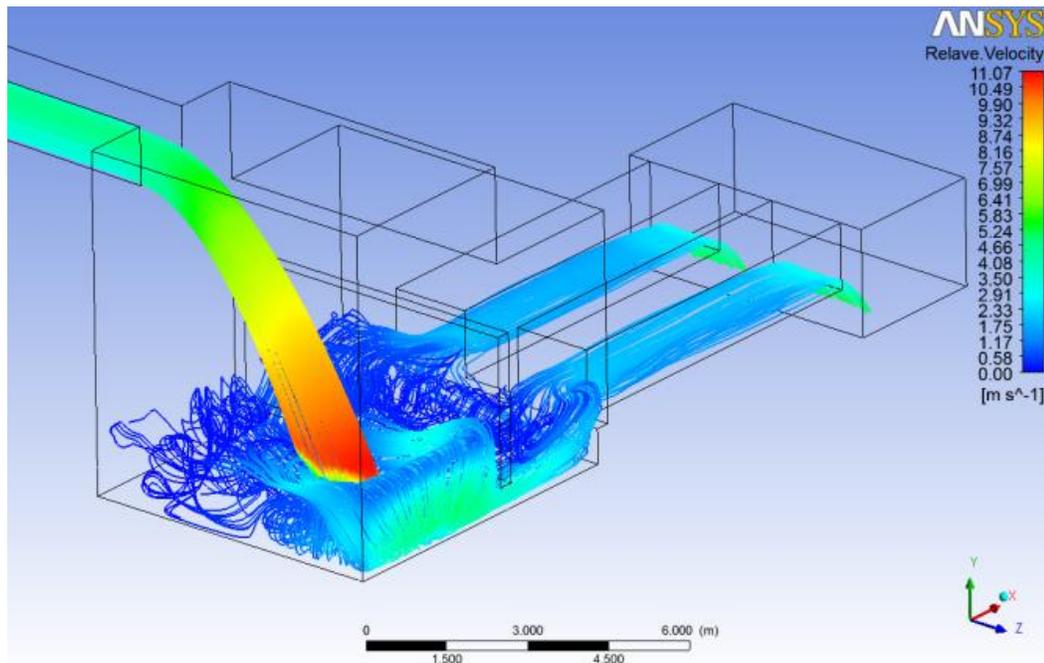


Figura 6.23. Líneas de corriente, Q=9500 [m³/h], caso base. Vista isométrica anterior.

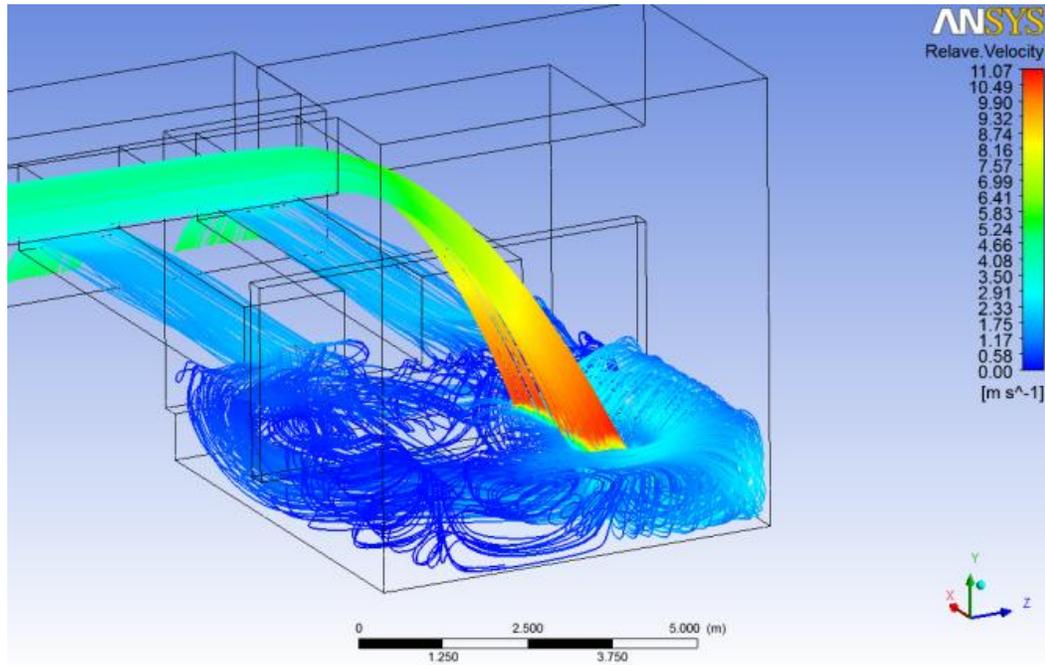


Figura 6.24. Líneas de corriente, $Q=9500$ [m^3/h], caso base. Vista isométrica posterior.

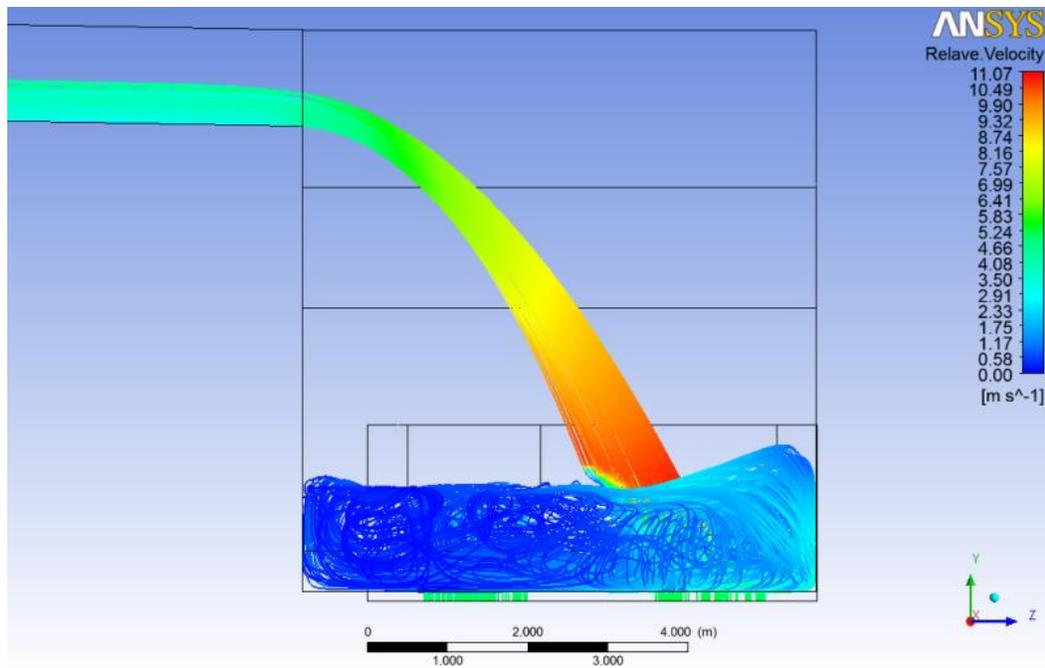


Figura 6.25. Líneas de corriente, $Q=9500$ [m^3/h], caso base. Vista lateral.

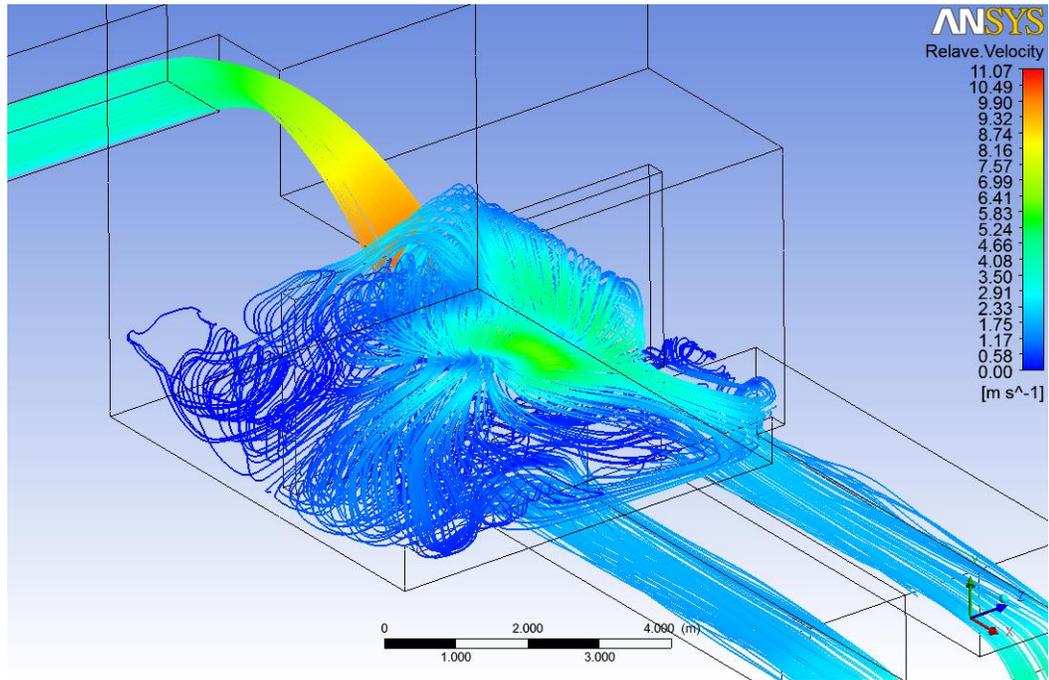


Figura 6.26. Líneas de corriente, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica inferior.

Si se limita el rango de colores para las velocidades, se aprecia mejor la zona donde se concentran las velocidades mayores a 6 [m/s] , como lo muestran las siguientes Figura 6.27 a Figura 6.30.

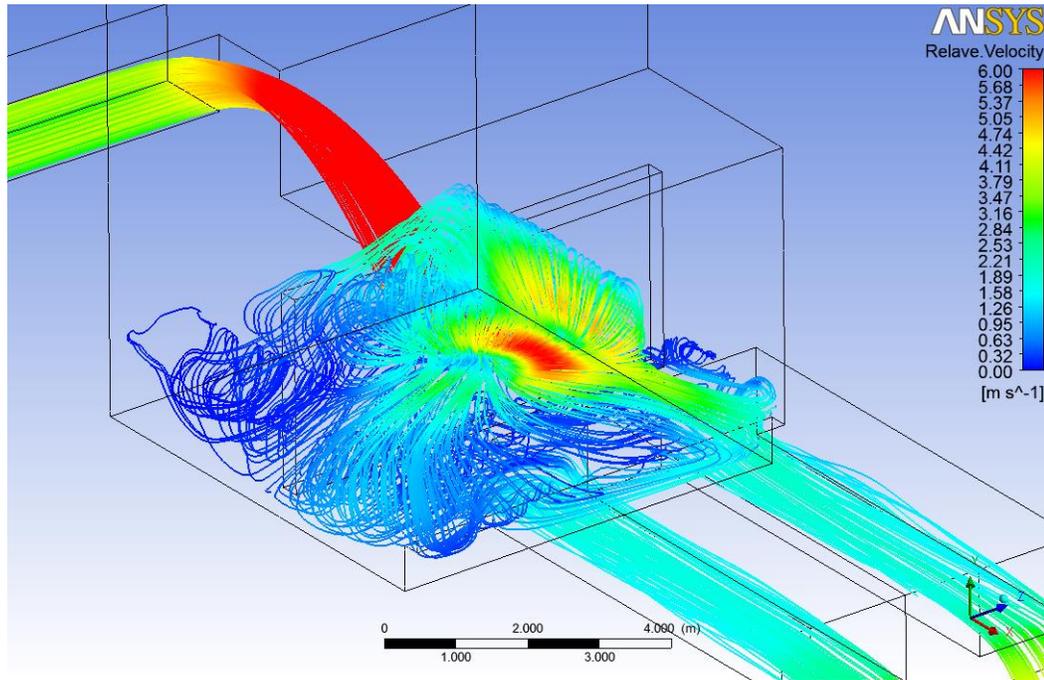


Figura 6.27. Líneas de corriente, $Q=9500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso base.
Vista isométrica inferior.

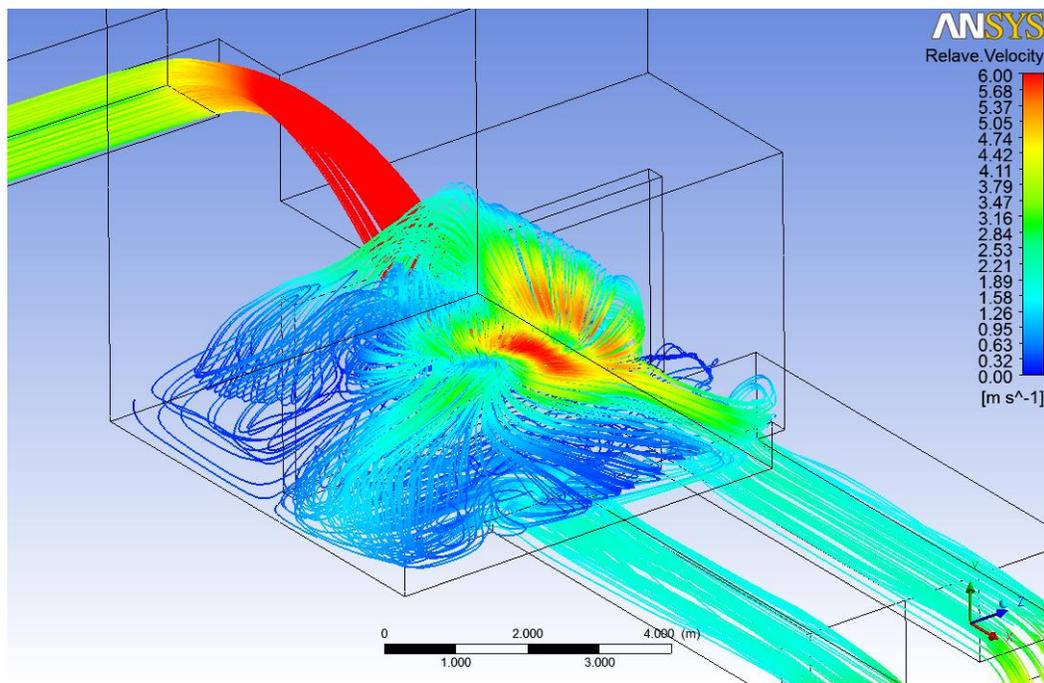


Figura 6.28. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso base.
Vista isométrica inferior.

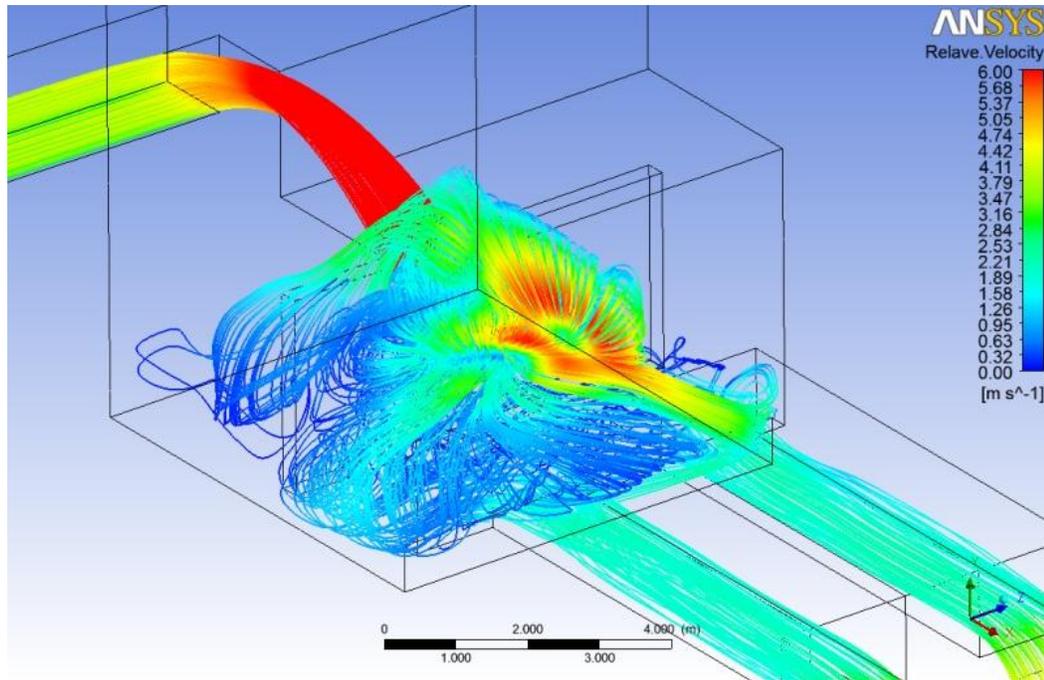


Figura 6.29. Líneas de corriente, $Q=11500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso base.
Vista isométrica inferior.

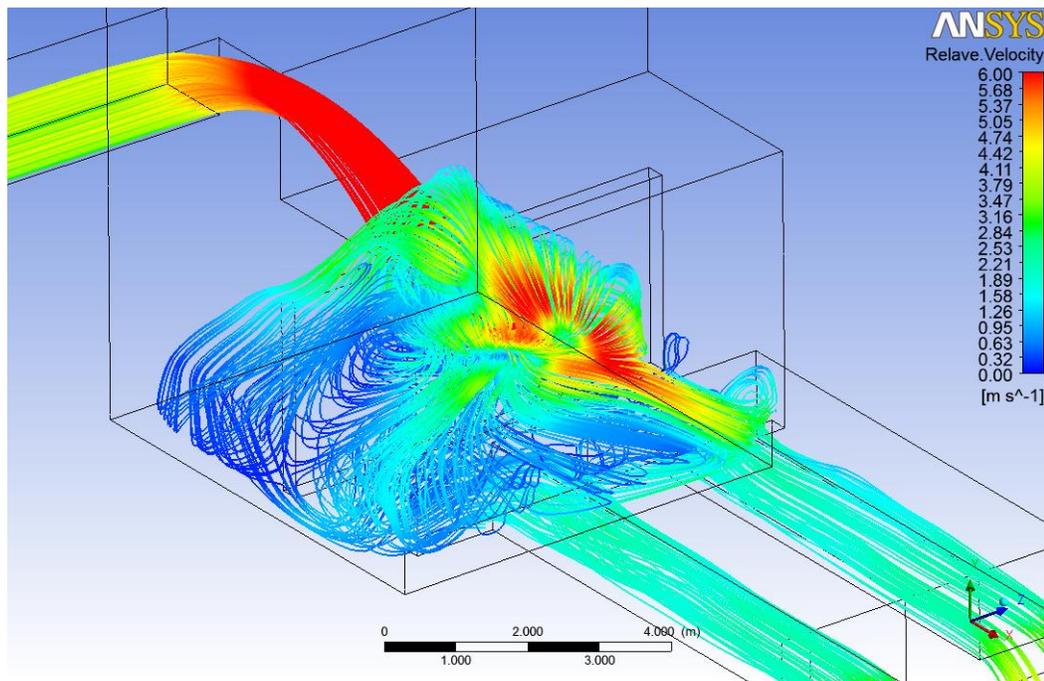


Figura 6.30. Líneas de corriente, $Q=12500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso base.
Vista isométrica inferior.

6.6.3 Velocidades de Fondo y Pared

Las siguientes Figura 6.31 a Figura 6.34 muestran los contornos de velocidad cercanos al fondo y pared del cajón con un rango de 0 a 6 [m/s]. Las velocidades mostradas son calculadas entre la condición de borde (pared con velocidad nula) y el primer nodo de la malla, por lo que dan una mejor idea del gradiente de velocidades que las líneas de corriente.

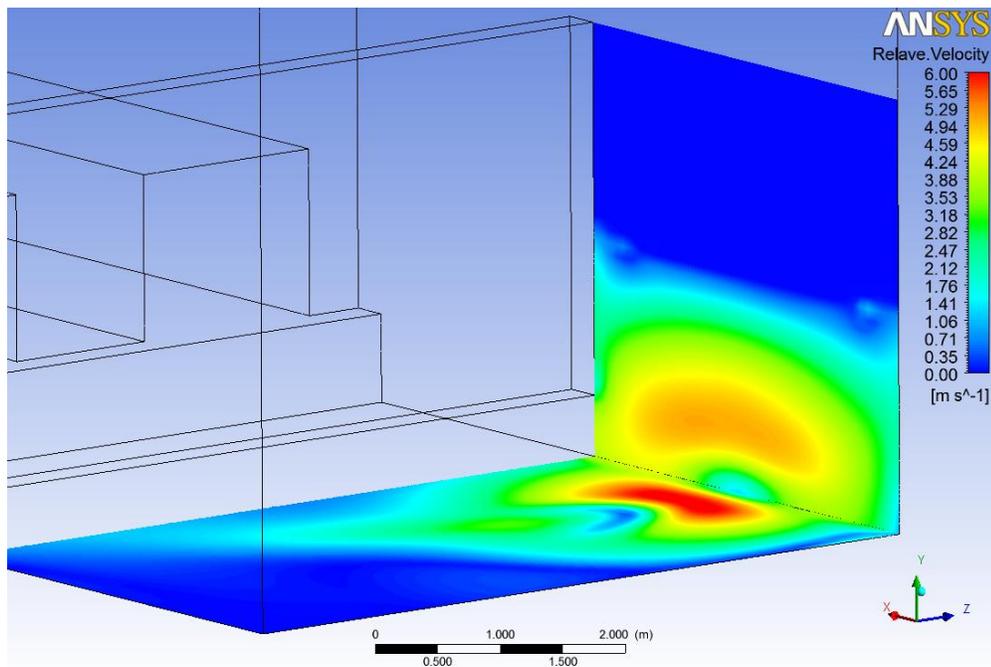


Figura 6.31. Contorno de velocidades en el fondo y pared, $Q=9500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso base. Vista isométrica posterior cerca.

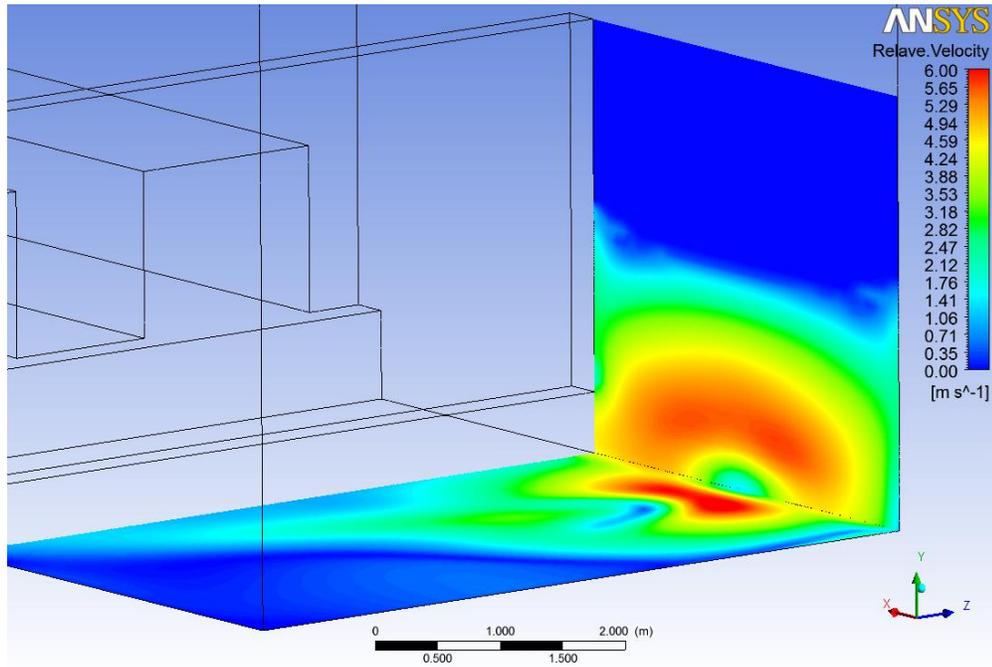


Figura 6.32. Contorno de velocidades en el fondo y pared, $Q=10500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, rango 0-6 [m/s], caso base. Vista isométrica posterior cerca.

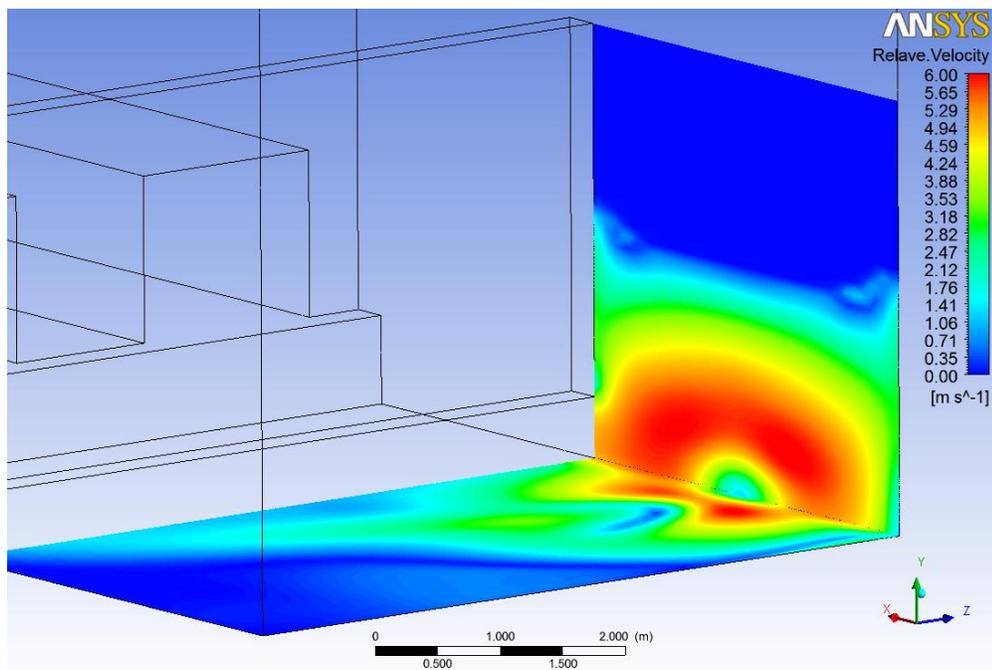


Figura 6.33. Contorno de velocidades en el fondo y pared, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, rango 0-6 [m/s], caso base. Vista isométrica posterior cerca.

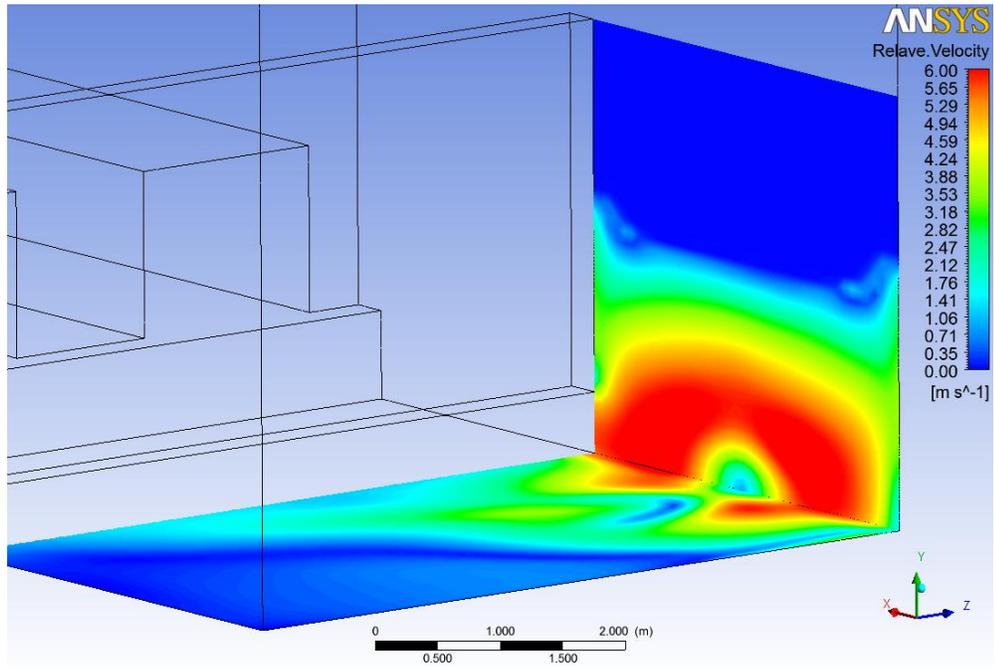


Figura 6.34. Contorno de velocidades en el fondo y pared, $Q=12500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso base. Vista isométrica posterior cerca.

6.6.4 Esfuerzos de Corte

Las siguientes Figura 6.35 y Figura 6.36 muestran los esfuerzos de corte promedio y máximos en el fondo y en la pared en función del caudal de entrada.

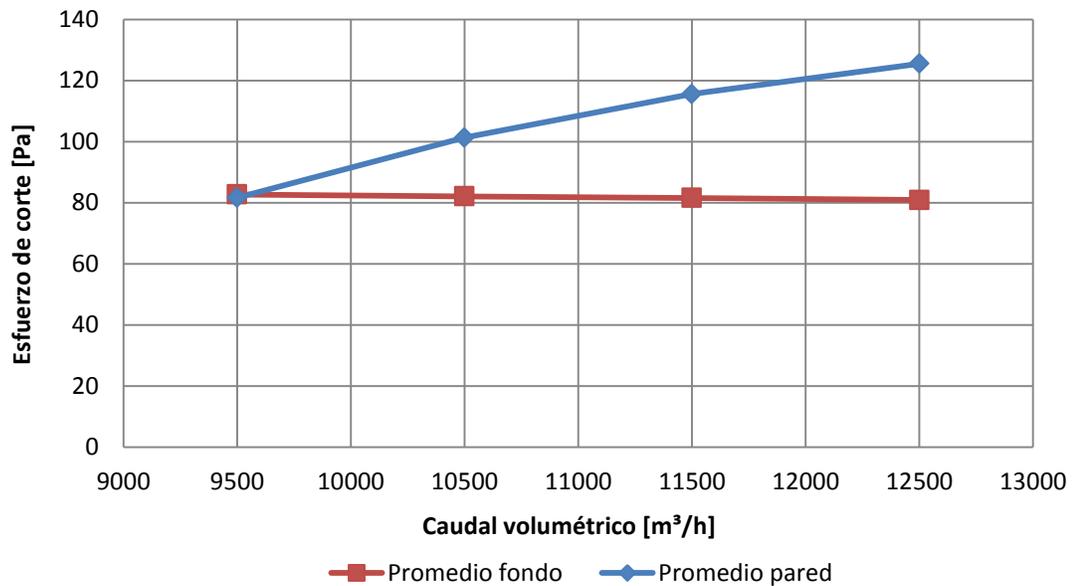


Figura 6.35. Esfuerzos de corte promedio en función del caudal volumétrico, caso base.

Los esfuerzos de corte promedio en la pared y en el fondo son prácticamente iguales para el menor caudal, con un valor cercano a los 82 [Pa]. El esfuerzo de corte promedio en la pared aumenta con el caudal, alcanzando los 125 [Pa], mientras que en el fondo se mantienen constantes con una leve tendencia a disminuir, llegando a 80 [Pa].

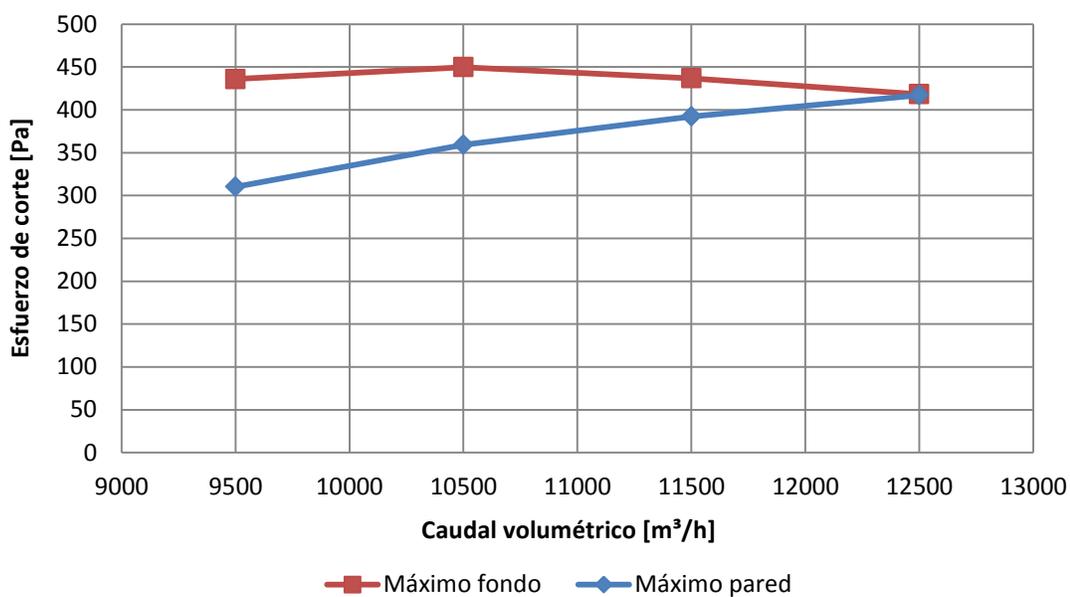


Figura 6.36. Esfuerzos de corte máximos en función del caudal volumétrico, caso base.

Los esfuerzos de corte máximos en la pared y en el fondo para el caso con caudal mínimo son 436 [Pa] y 310 [Pa] respectivamente. A medida que aumenta el caudal, el esfuerzo máximo en la pared aumenta hasta llegar a los 417 [Pa] mientras que en el fondo aumenta levemente hasta un máximo de 450 [Pa] para un caudal de 10500 [m³/h] y luego comienza a descender hasta llegar a los 418 [Pa] con el caudal máximo.

Las Figuras 6.37 a 6.44, a continuación, muestran los contornos de esfuerzos de corte en la pared y en el fondo para cada caudal simulado. Se agregan además las líneas de corriente del relave en blanco para mejor entendimiento.

$Q = 9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

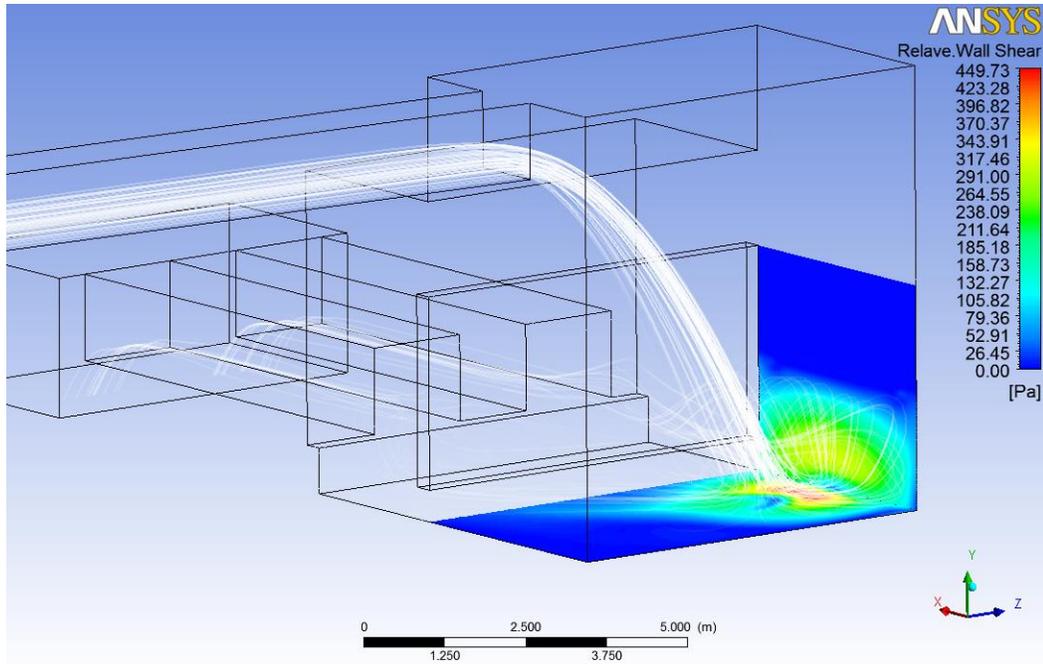


Figura 6.37. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior.

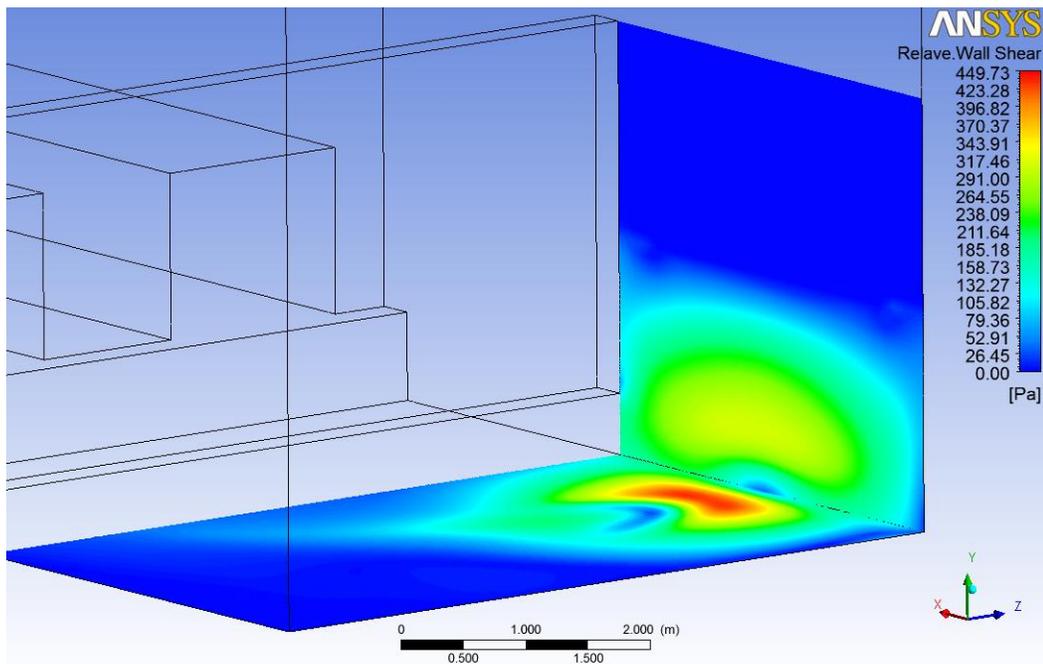


Figura 6.38. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 10500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

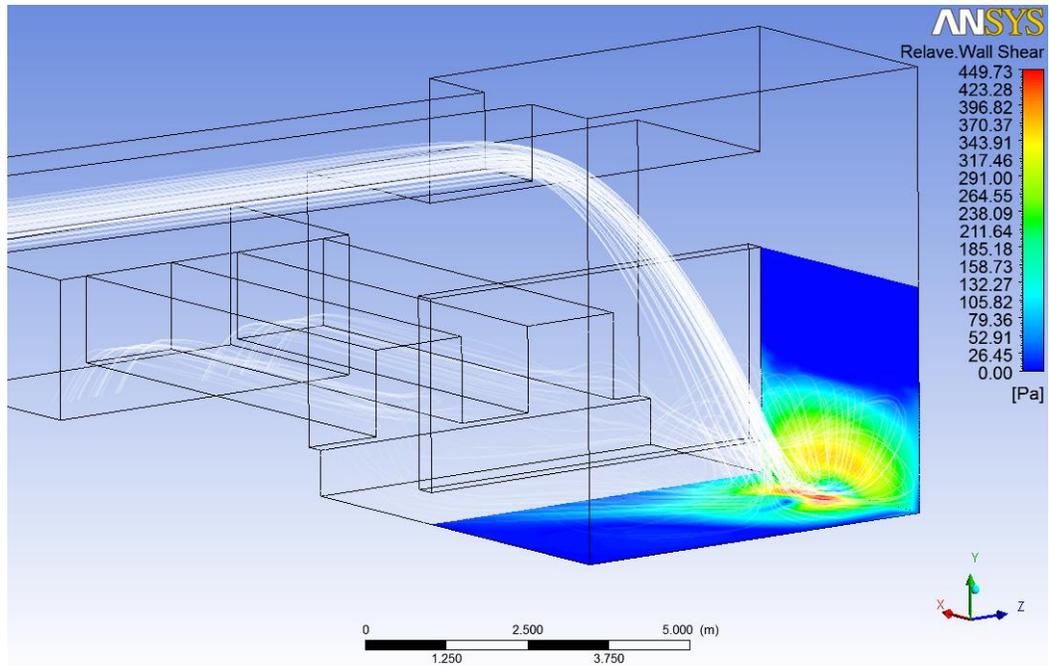


Figura 6.39. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=10500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica posterior.

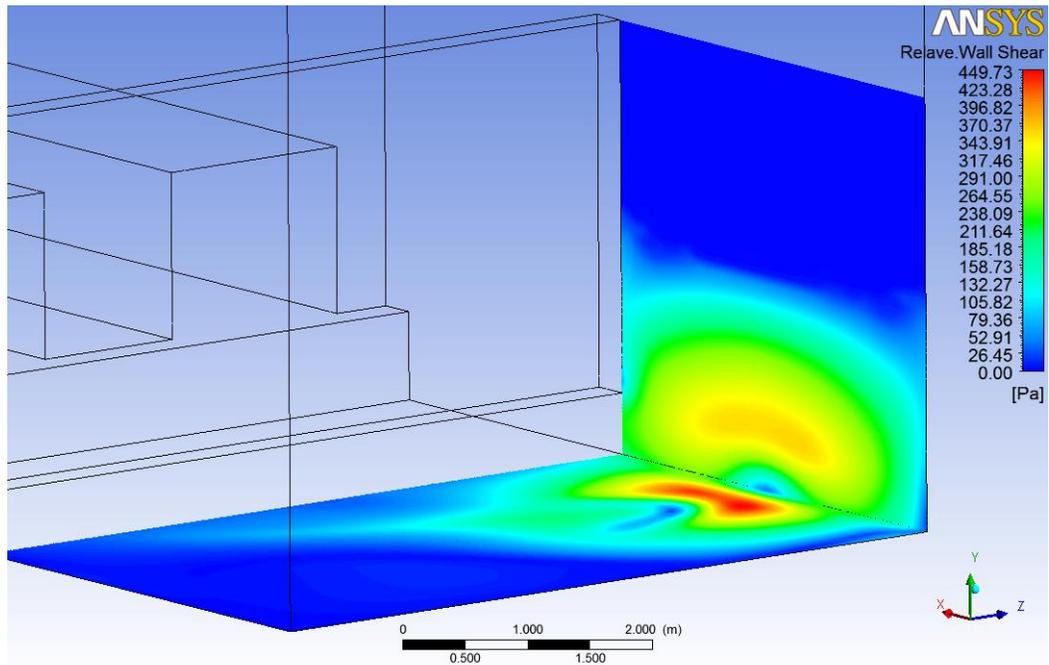


Figura 6.40. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=10500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 11500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

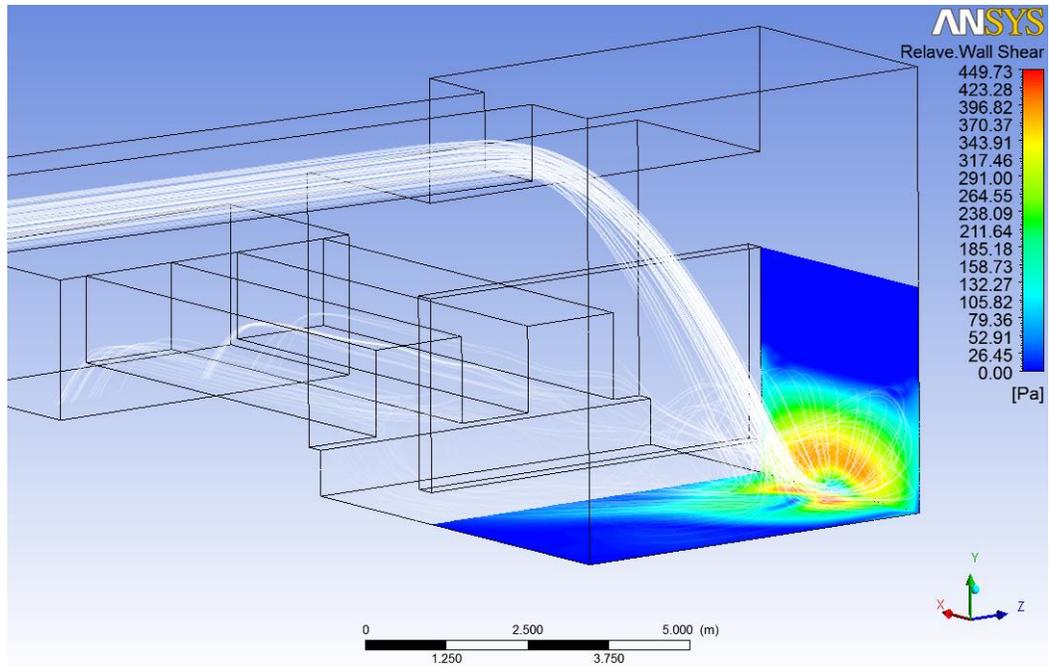


Figura 6.41. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=11500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior.

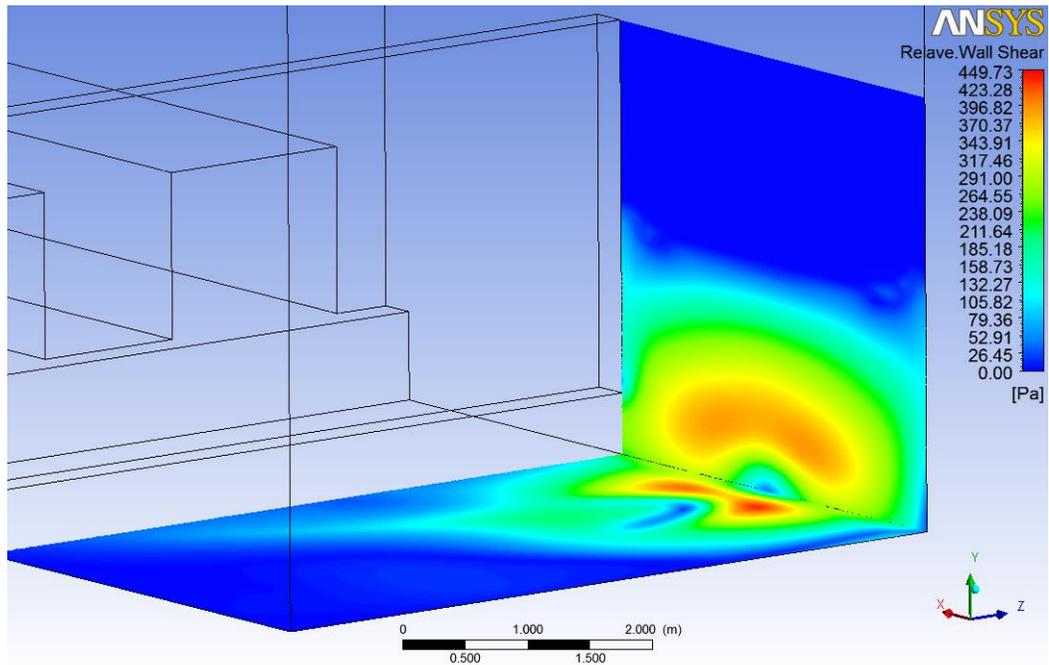


Figura 6.42. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=11500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 12500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

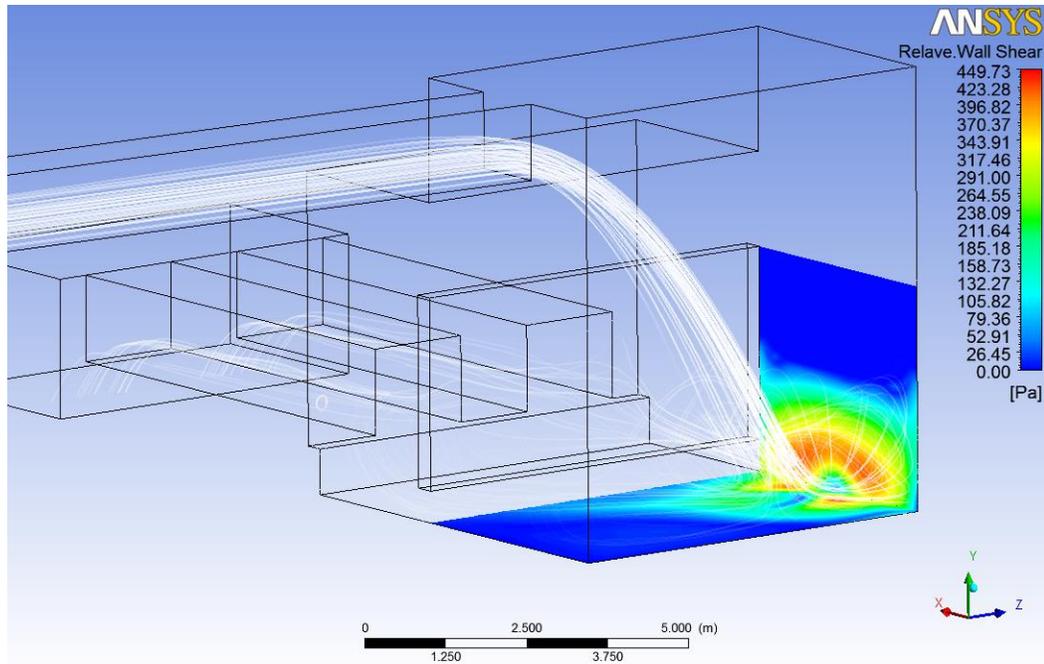


Figura 6.43. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=12500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior.

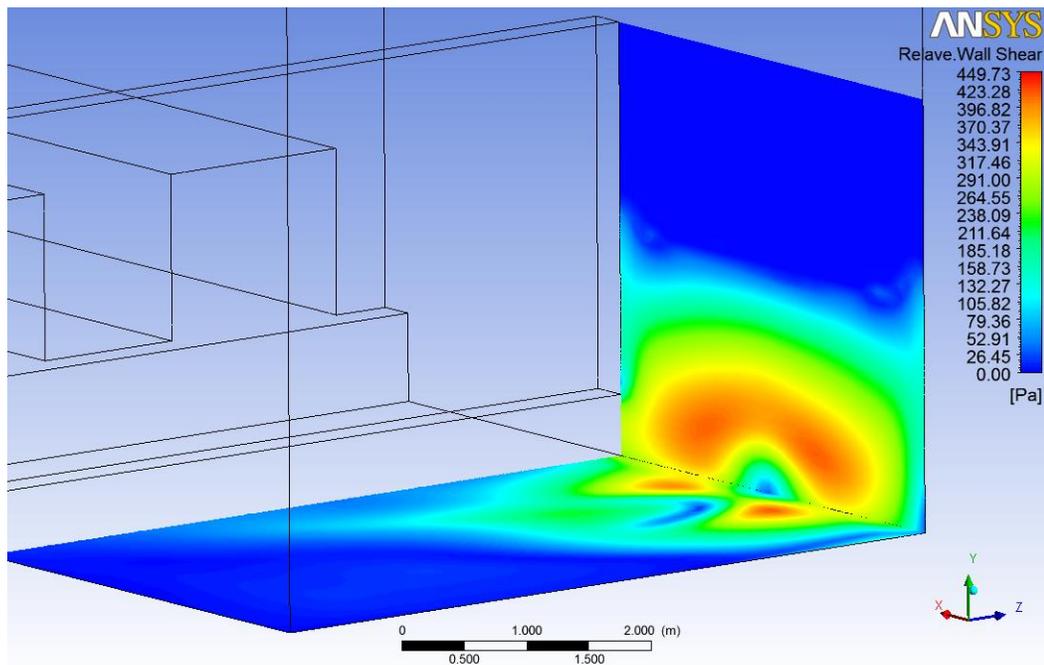


Figura 6.44. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=12500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior cerca.

6.6.5 Presiones

Las siguientes Figura 6.45 y Figura 6.46 muestran las presiones promedio y máximas en el fondo y en la pared en función del caudal de entrada.

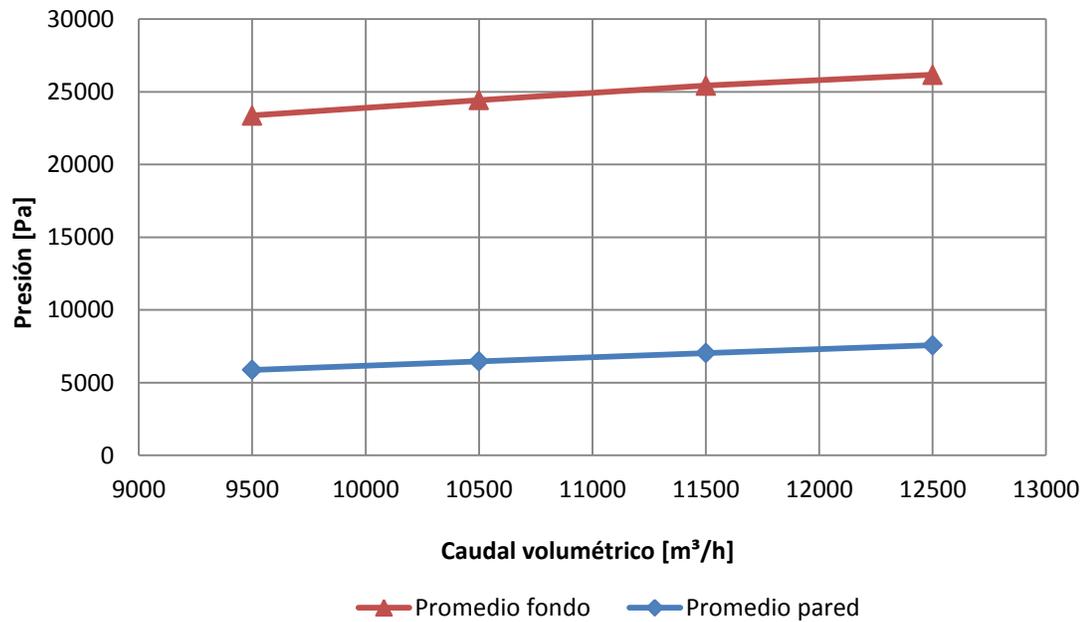


Figura 6.45. Presiones promedio en función del caudal volumétrico, caso base.

Las presiones promedio en la pared y en el fondo siguen la misma tendencia, aumentando con el caudal volumétrico en igual medida. En la pared se observa una presión de 5873 [Pa] para el caudal mínimo y de 7574 [Pa] para el caudal máximo. El fondo por su parte presenta presiones que van desde los 23371 [Pa] hasta los 26162 [Pa], para caudal mínimo y máximo respectivamente.

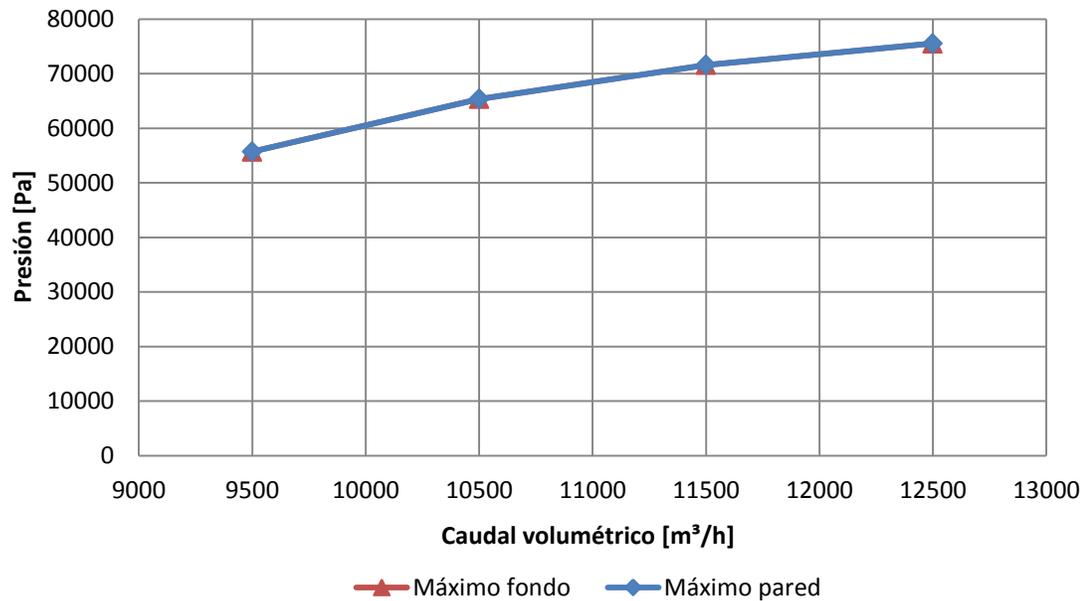


Figura 6.46. Presiones máximas en función del caudal volumétrico, caso base.

Las presiones máximas son idénticas tanto para el fondo como para la pared. Se puede apreciar claramente que aumentan con el caudal, registrando valores entre 55711 [Pa] para caudal mínimo y 75536 [Pa] para caudal máximo.

Las Figura 6.47 a Figura 6.54, a continuación, muestran los contornos de presiones en la pared y en el fondo para cada uno de los caudales simulados. Se agregan además las líneas de corriente del relave en blanco para mejor entendimiento.

$Q = 9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

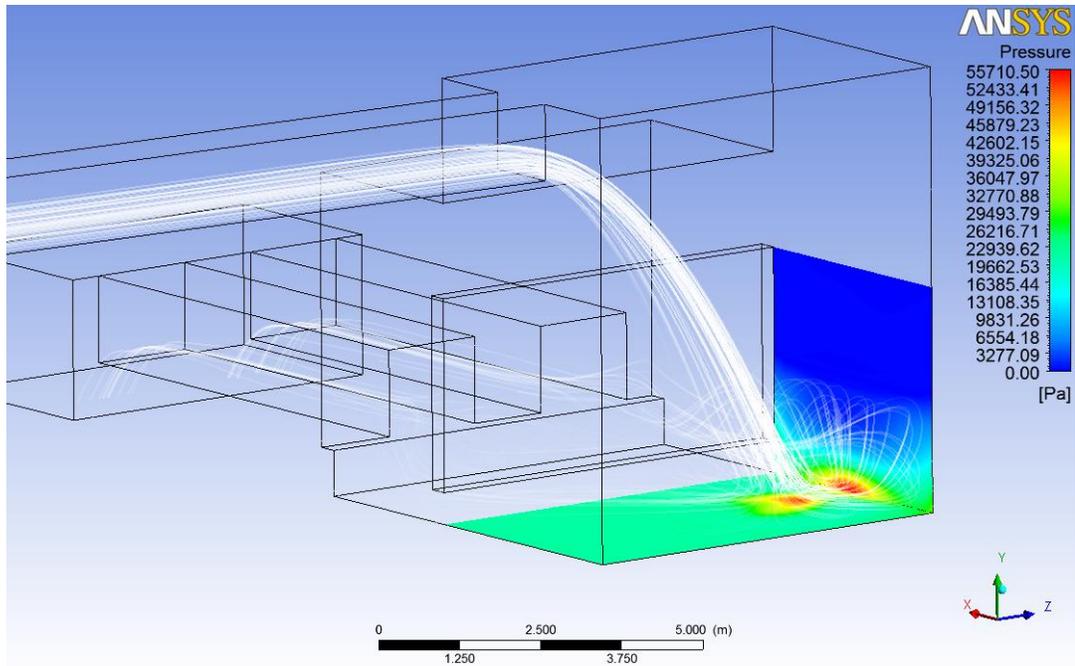


Figura 6.47. Contorno de presiones en el fondo y pared, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica posterior.

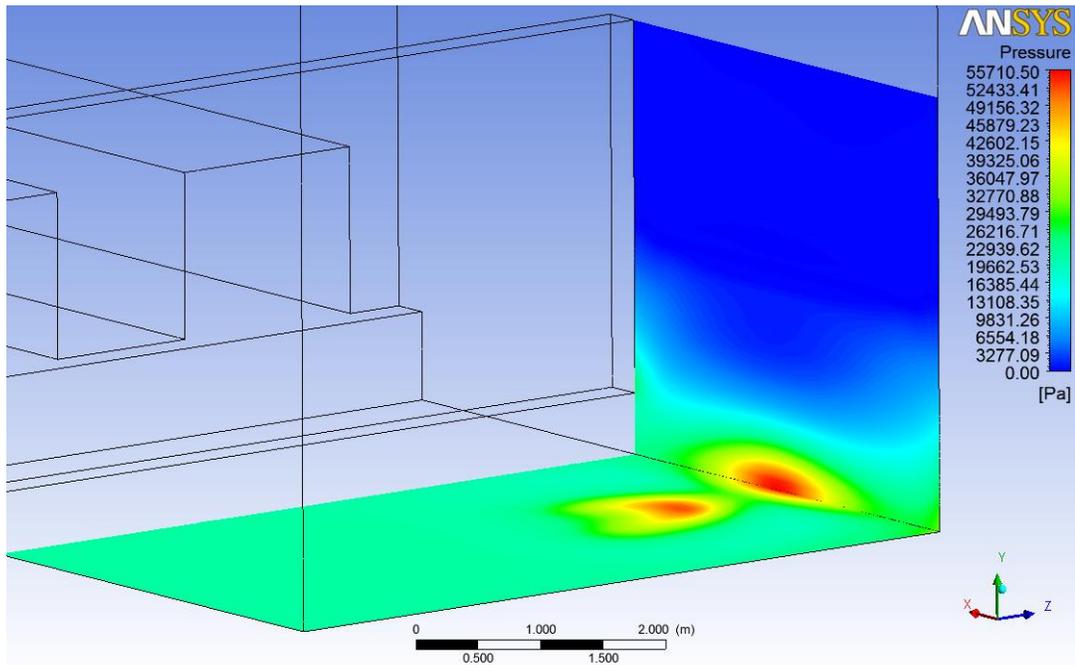


Figura 6.48. Contorno de presiones en el fondo y pared, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 10500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

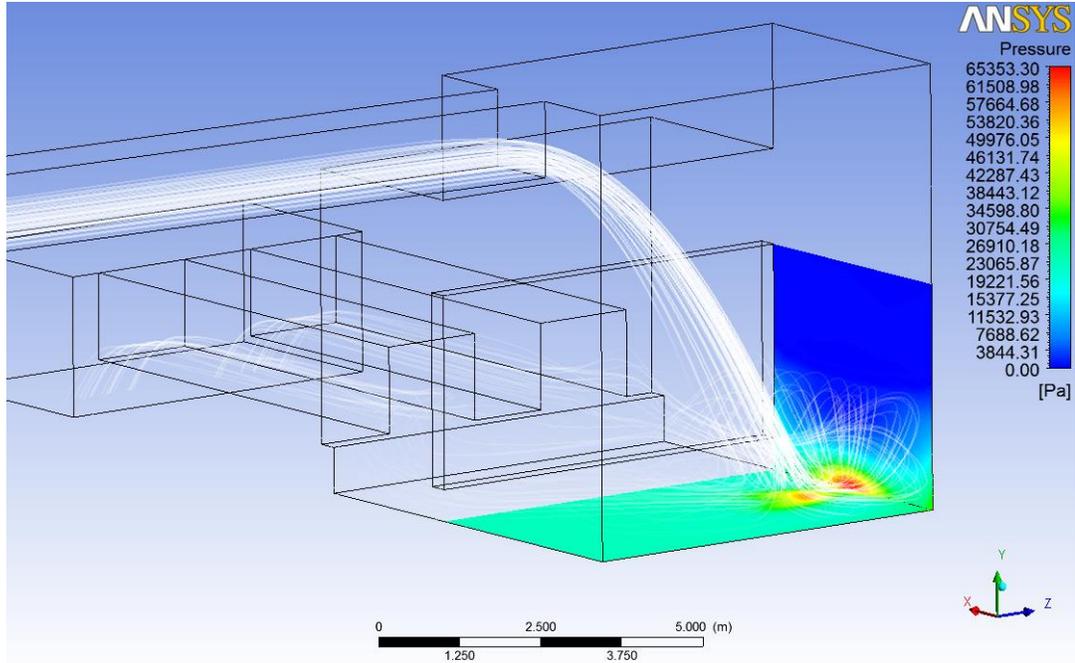


Figura 6.49. Contorno de presiones en el fondo y pared, $Q=10500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior.

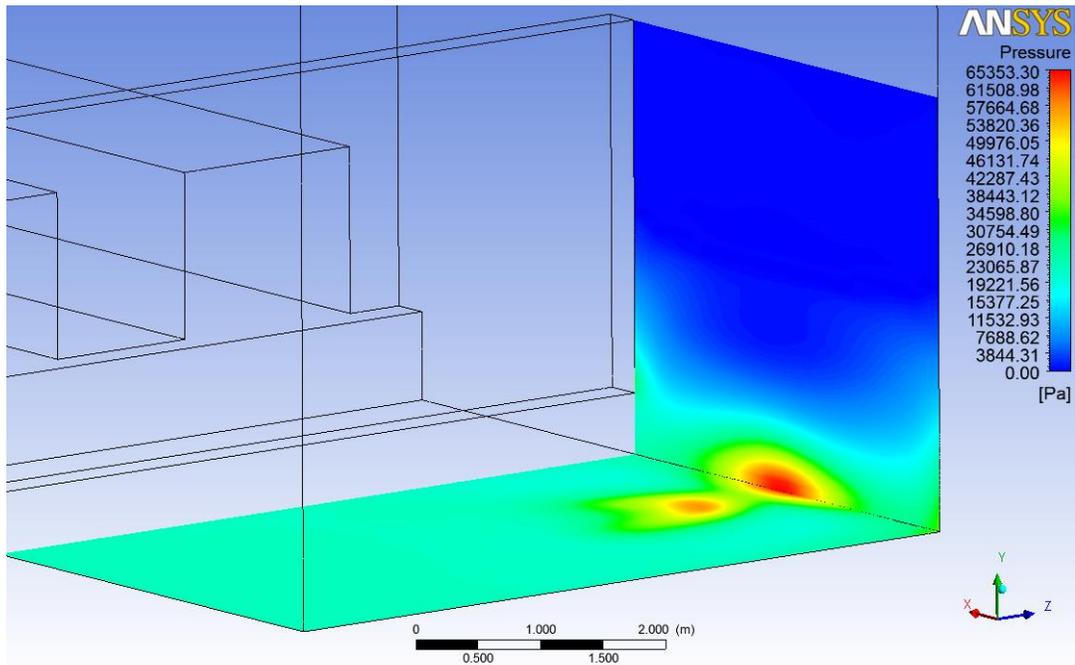


Figura 6.50. Contorno de presiones en el fondo y pared, $Q=10500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 11500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

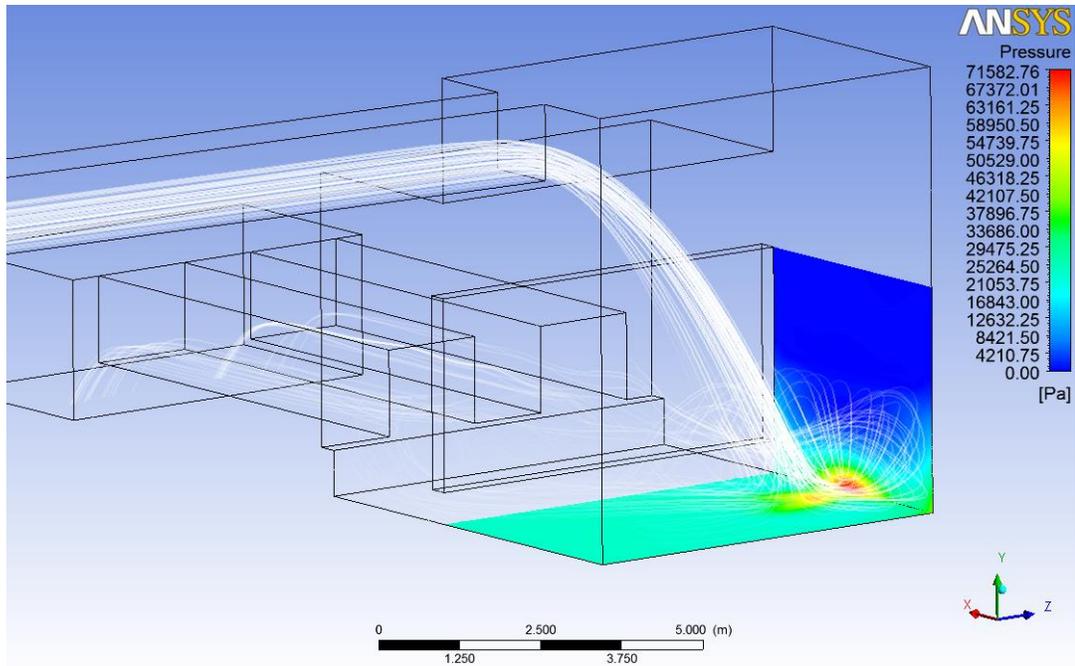


Figura 6.51. Contorno de presiones en el fondo y pared, $Q=11500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior.

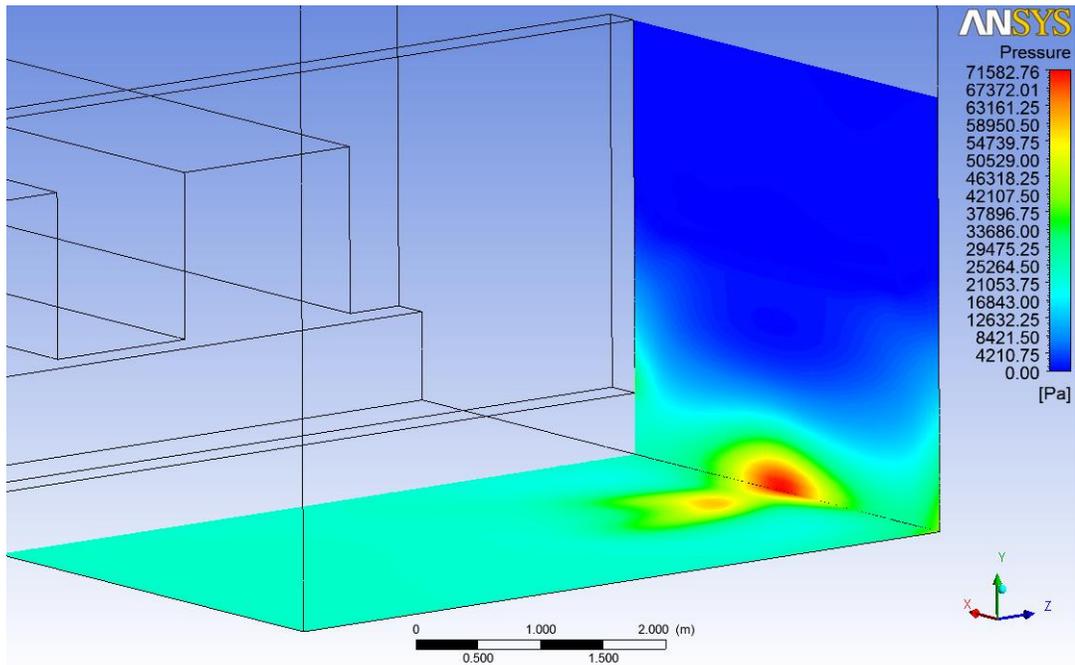


Figura 6.52. Contorno de presiones en el fondo y pared, $Q=11500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

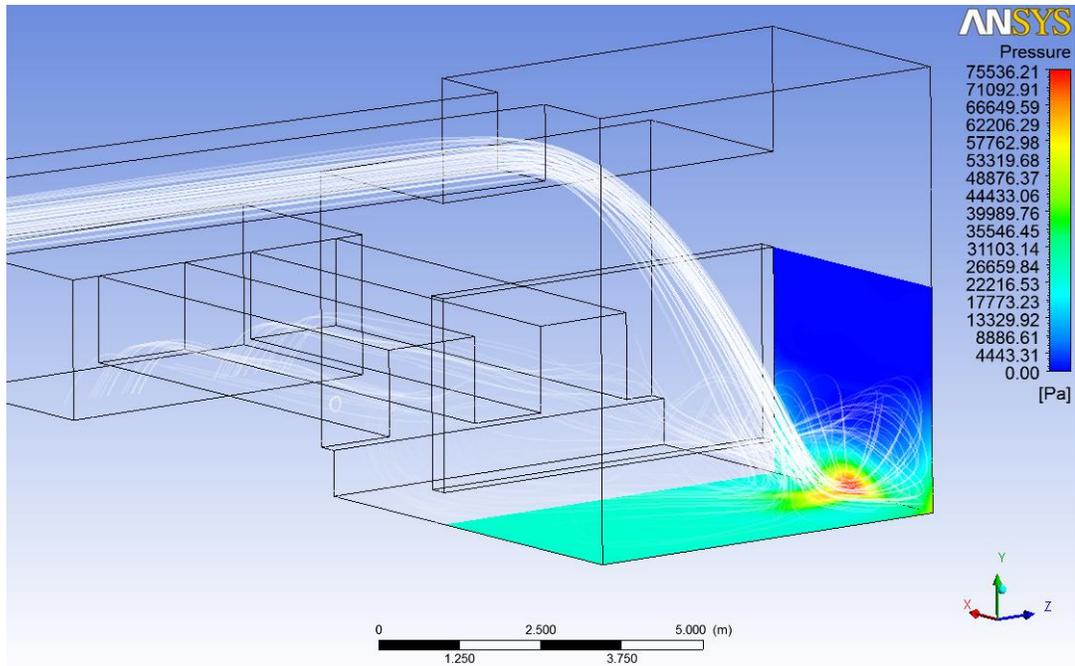


Figura 6.53. Contorno de presiones en el fondo y pared, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica posterior.

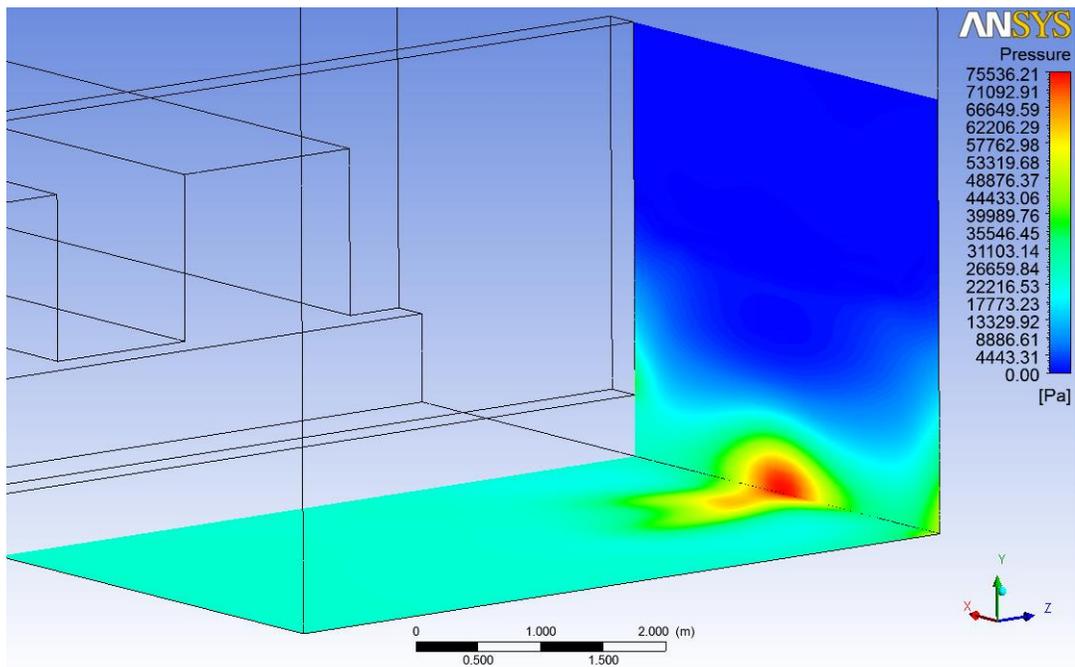


Figura 6.54. Contorno de presiones en el fondo y pared, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica posterior cerca.

6.7 ANALISIS DE RESULTADOS PRIMERA ETAPA

6.7.1 Trayectoria y Velocidad del Chorro

A medida que se aumenta el caudal ocurren dos fenómenos. En primer lugar, el flujo entra al cajón con una velocidad y altura de escurrimiento mayores, lo que en primera instancia debiera aumentar su alcance, tendiendo a impactar más cerca de la pared. Por otro lado, el nivel del cajón se eleva porque la altura crítica en la canaleta de salida aumenta, acortando la caída del chorro y ofreciendo mayor profundidad para que se disipe su energía. Ambos efectos se contraponen, pero en definitiva se aprecia que el aumento de nivel no es suficiente en comparación a la mayor energía de entrada del flujo, resultando en un chorro con mayor alcance y velocidad de impacto con la superficie del colchón a medida que aumenta el caudal.

Se pueden determinar cinco etapas relevantes a lo largo de la trayectoria del flujo. La primera, que se denominará de “caída”, se desarrolla desde que el flujo entra al cajón en caída libre, donde comienza a incrementar su velocidad debido a la gravedad, hasta que siente la superficie del colchón de pulpa llegando a su velocidad máxima. Desde este punto se aprecia una segunda etapa, que se denominará de “expansión”, donde el flujo comienza a perder velocidad debido a su expansión dentro del colchón. Luego se observa una tercera etapa de “transición”, donde el flujo siente la presencia del fondo del cajón y cambia de dirección, quedando paralelo al fondo. En la cuarta etapa de “deslizamiento” el flujo sigue disminuyendo su velocidad mientras desliza por el fondo del cajón para finalmente impactar la pared, alcanzando su velocidad mínima. En este punto el flujo cambia de dirección y acelera bruscamente mientras comienza a subir por la pared, etapa que se denominará de “ascensión”.

Las etapas descritas se aprecian más claramente para el caudal de 9500 [m³/h], donde hay cambios evidentes en la curva de velocidad, mientras que para los caudales de 10500 [m³/h] y 11500 [m³/h] la curva se va suavizando hasta presentar quiebres apenas apreciables para el caudal de 12500 [m³/h]. Hay que considerar que este análisis se realiza a partir de una línea de corriente en particular para cada caudal, pero es cualitativamente representativo del comportamiento general del chorro. Cuantitativamente no es completamente extrapolable debido a que no todas las líneas de corriente siguen la misma trayectoria y tienen distintas velocidades a lo largo de esta.

En cuanto a la disipación dentro del colchón, la curva de velocidad calculada con la ecuación 2.8 tiene una mala correlación con las velocidades obtenidas a partir de las simulaciones, sobre todo para el primer tramo donde diverge cuando la distancia recorrida por el chorro es cercana a cero. Al calcular el coeficiente C a partir de los datos de las simulaciones, se obtienen valores que están siempre bajo 1.4, lejos del valor recomendado de 6. Un mejor ajuste de la curva se obtiene para un valor de $C = 2$, más cercano al calculado a partir de los datos pero manteniendo un margen de seguridad. Esta curva se muestra en la Figura 6.55 para un caudal de 12500 [m³/h].

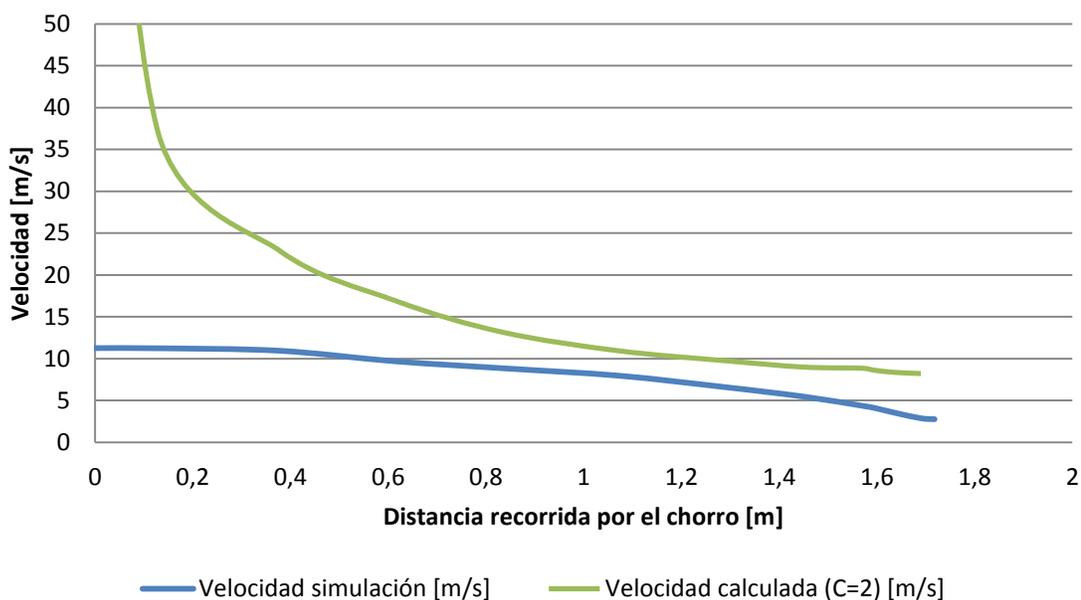


Figura 6.55. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=12500$ [m³/h], caso base.

6.7.2 Líneas de Corriente y Velocidades de Fondo y Pared

Las líneas de corriente muestran un chorro que se dispersa a medida que cae, tanto longitudinal como transversalmente. Este resultado refleja la efectividad del modelo de fluido disperso utilizado para el relave, que permite cierto grado de aireación del chorro mientras cae. Se aprecia que una vez que el flujo impacta el fondo y llega a la pared, las líneas de corriente forman un resalto, tal como se aprecia en la Figura 2.12 del cajón real en funcionamiento. Además, en las vistas isométricas inferiores se observa la trayectoria radial que siguen las líneas

de corriente una vez que llegan a la pared y comienzan a subir a lo largo de esta, siguiendo el mismo patrón que los daños encontrados en el cajón real, que se muestran en la Figura 2.13.

Cuando se analizan las velocidades en el fondo y pared del cajón, para un rango de 0 a 6 [m/s], se ve una correlación directa entre las velocidades cercanas y mayores a este valor y las zonas donde hay concentración de esfuerzos de corte, tanto en el fondo como en la pared, para cada caudal simulado. Esto demuestra la validez del criterio de diseño al fijar la velocidad máxima para evitar desgaste acelerado en 6 [m/s].

Lo anterior indica que el modelo logra reproducir de manera correcta el flujo dentro del cajón y que las líneas de corriente y velocidades en el fondo y pared del cajón son consistentes con el patrón de desgaste observado en el cajón real para la velocidad crítica de diseño de cajones.

6.7.3 Esfuerzos de Corte y Presiones

Los esfuerzos de corte sobre una superficie están en directa proporción con el gradiente de velocidad tangencial en la dirección normal a la superficie. En base a esto, y tomando en cuenta que el modelo tiene como condición de borde en las paredes que el deslizamiento sea nulo (velocidad igual a cero), mientras mayor sea la velocidad del flujo cerca de la pared, mayor será el gradiente en los nodos cercanos a la pared para que se cumpla la condición de borde, generando esfuerzos de corte más altos.

Como se discutió en la sección 6.7.1, para mayores caudales el chorro tiene mayor energía y alcance, impactando más cerca de la pared y provocando que las zonas de altos esfuerzos de corte y presión se muevan hacia la pared.

En la primera etapa de “transición”, la energía cinética de parte del chorro se transforma en presión estática, encontrándose la primera zona de concentración de presiones en el fondo. Se encuentran velocidades bajas cerca del fondo en esta zona, cumpliéndose el balance de la ecuación de Bernoulli.

Luego del impacto con el fondo, el chorro fluye en dirección a la pared dando paso a la etapa de “deslizamiento”. Debido a la alta velocidad que aún tiene parte del chorro, mayor a 6 [m/s], se observa una zona de altos esfuerzos de corte en el fondo, que se atenúa a medida que el

flujo va acercándose a la pared. El chorro impacta justo en la intersección entre la pared y el fondo del cajón, llegando a un mínimo de velocidad. Gran parte de la energía cinética que pierde el flujo en esta etapa se transforma en presión estática, la cual se ve claramente en los resultados mostrados en la sección 6.6.5. Para los caudales mayores, el chorro impacta el fondo del cajón tan cerca de la pared que se genera una única gran zona de concentración de presión en la intersección de ésta con el fondo, generando bajas velocidades y dividiendo la zona de concentración de esfuerzos de corte.

El hecho de que la máxima presión siempre se observe en este punto da cuenta de que el chorro siempre impacta la pared a alta velocidad, y que la energía no es disipada por el colchón sino por los elementos estructurales del cajón.

En la última etapa de “ascensión”, el flujo comienza a subir por la pared acelerando rápidamente, lo que provoca una segunda zona de concentración de esfuerzos de corte.

Según el análisis anterior, y para que se cumple la ecuación de conservación, donde existen altas presiones las velocidades son bajas. Es por esto que no hay esfuerzos de corte elevados en las zonas de impacto. Entonces, el daño en el cajón es producido por un efecto combinado de esfuerzos de corte elevados e impacto a una velocidad excesiva de las partículas que lleva el relave en las zonas donde se encuentran altas presiones. Según los antecedentes, los estudios sugieren que si el chorro llega al fondo con velocidades mayores a 6 [m/s] se produce desgaste acelerado. Si se asume que la energía cinética del chorro a esta velocidad se transforma en presión estática en el fondo se obtiene un valor de 18000 [Pa]. Este valor se considera como energía de impacto límite a partir de la cual se comienza a producir daño en el fondo y/o paredes. Tomando en cuenta esto, se puede comprobar que la presión en las zonas de impacto, restando la debida a la profundidad, es de 34180 [Pa] y 51930 [Pa] en el caso mínimo y máximo respectivamente, corroborando la aparición de daños en las zonas de impacto.

En cuanto a las magnitudes de los esfuerzos de corte, se puede ver que fuera de la zona dañada en el cajón real los resultados muestran valores inferiores a los 230 [Pa]. Por lo tanto, este valor puede considerarse como esfuerzo de corte mínimo a partir del cual se produce desgaste acelerado en el fondo y paredes del cajón.

7 SEGUNDA ETAPA: MODELACIÓN COMPUTACIONAL CASO MODIFICADO

7.1 GEOMETRÍA Y DIMENSIONES DEL DOMINIO COMPUTACIONAL

El dimensionamiento del caso modificado se hizo a partir del cajón real, pero tomando en cuenta la metodología de diseño explicada en la sección 2.6 e incorporando los resultados obtenidos de las simulaciones del caso base.

En un correcto diseño, la energía del chorro debe disiparse por la expansión dentro del colchón y no debido a su impacto con los elementos estructurales, siendo el nivel dentro del cajón un parámetro fundamental. Las condiciones a la salida controlan este nivel, por lo que basta con aumentar la altura de las canaletas de salida para que el nivel aumente dentro del cajón.

Considerando el caudal máximo de 12500 [m³/h] como caudal de diseño, el nivel del relave dentro del cajón se fijó para que el eje central del chorro impacte la superficie del colchón a una distancia igual a la mitad del largo de la cámara de disipación. Se utilizó la ecuación 2.28 para corroborar que las velocidades del chorro al llegar al fondo del cajón sean menores a 6 [m/s], utilizando un valor para $C = 2$ según los resultados de las simulaciones del caso base.

Además, se disminuyó el ancho de la cámara de disipación de acuerdo a los criterios de diseño y se acortó la cámara de salida con el fin de aumentar levemente las velocidades en esa zona, favoreciendo el arrastre de partículas y disminuyendo el riesgo de sedimentación, aunque no se tiene registro de problemas de este tipo durante su operación.

La geometría y dimensiones generales obtenidas para el dominio pueden observarse en la Figura 7.1 y Figura 7.2.

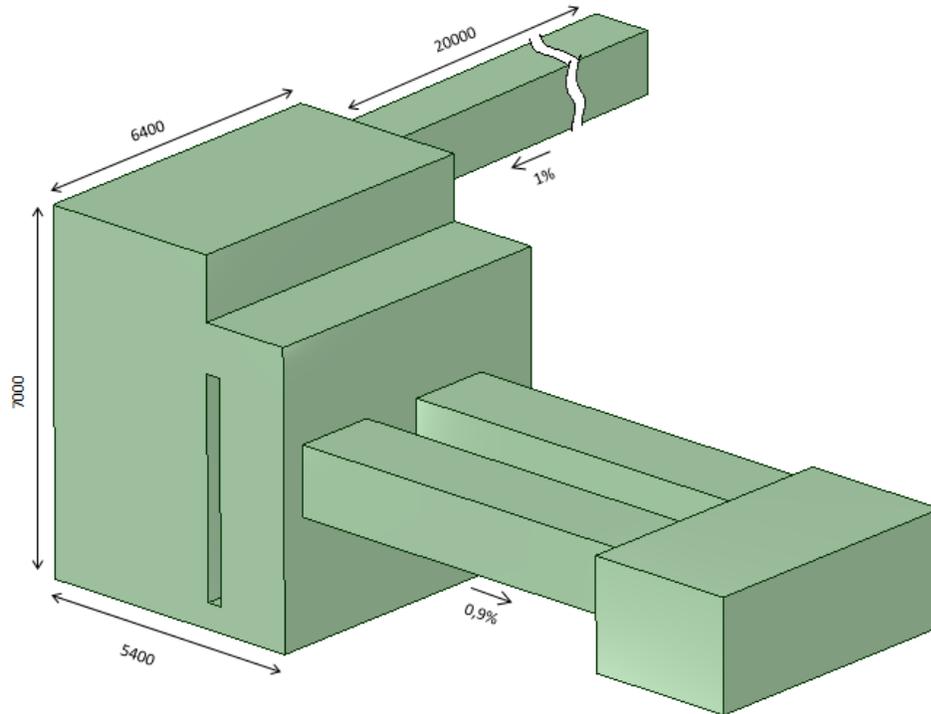


Figura 7.1. Dimensiones dominio computacional, caso modificado. Vista isométrica, dimensiones en milímetros.

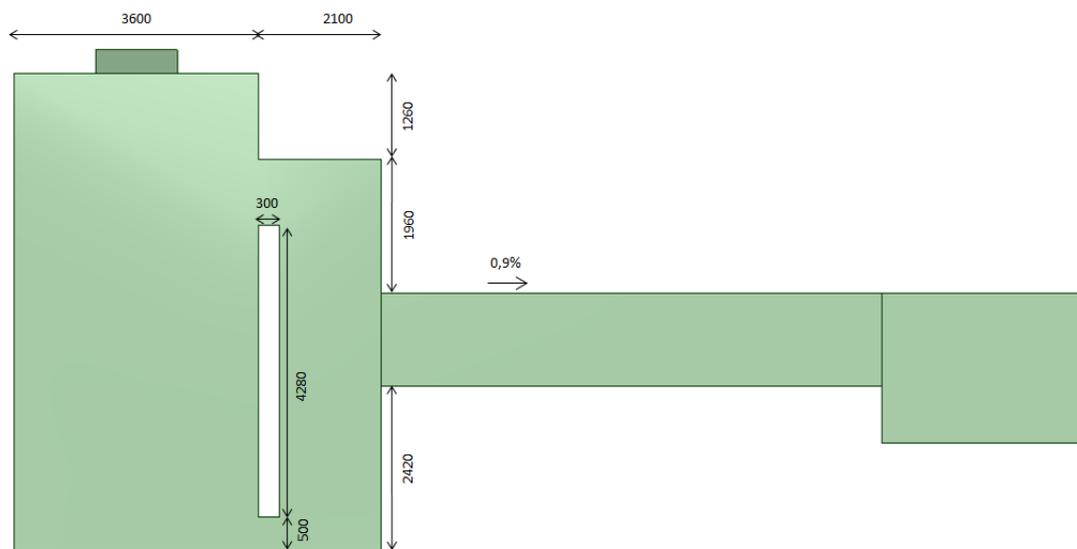


Figura 7.2. Dimensiones dominio computacional, caso modificado. Vista frontal, dimensiones en milímetros.

Los detalles del dominio computacional se presentan en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. Detalles del dominio, caso modificado.

	Caso modificado
Condiciones básicas	
Tipo de dominio	Dominio fluido
Lista de fluidos	Aire a 25°C, Relave
Modelos del dominio	
Presión de referencia	1 [atm]
Flotabilidad	
Opción	Boyante
Gravedad en x	0
Gravedad en y	-g
Gravedad en z	0
Densidad boyante de referencia	1.185 [kg/m ³]
Modelos de los fluidos	
Opción de multifase	Modelo inhomogéneo
Modelo de superficie libre	Standard
Transferencia de calor	Modelo isotérmico
Turbulencias	Modelo homogéneo
Modelo de turbulencias	k-omega SST
Detalles de los fluidos	
Aire a 25°C	
Morfología	Fluido continuo
Modelo boyante de fluidos	Diferencia de densidad
Relave	
Morfología	Fluido disperso
Diámetro medio	0.005 [m]
Modelo boyante de fluidos	Diferencia de densidad
Pares de fluidos	
Aire a 25°C - Relave	
Transferencia interfacial	Modelo de partículas
Transferencia de momentum	Coefficiente de arrastre
Coefficiente de arrastre	Schiller-Naumann

7.2 MALLADO

El mallado considerado en este caso mantuvo las características básicas de los elementos utilizados en el caso base. Los detalles de la malla se muestran en la Tabla 7-2, a continuación.

Tabla 7-2. Detalles del mallado, caso modificado.

Número de elementos	Tipo de elementos	Tamaño elementos cámara de disipación [m]
551278	Hexaédrico	0.1

7.3 DETALLES CONDICIONES DE BORDE

7.3.1 Entrada

Las condiciones de entrada, tanto para relave como para aire se detallan en la Tabla 7-3, a continuación.

Tabla 7-3. Detalles condiciones de entrada, caso modificado.

	Caso modificado
Entrada de aire	
Tipo de condición de borde	Entrada (Inlet)
Definición de la condición	Velocidad normal a la entrada
Velocidad	0.1 [m/s]
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen de aire	1
Fracción en volumen de relave	0
Entrada de relave	
Tipo de condición de borde	Entrada (Inlet)
Definición de la condición	Velocidad normal a la entrada
Velocidad	3.96 [m/s] (Q= 9500 [m ³ /h]) 4.06 [m/s] (Q=10500 [m ³ /h]) 4.16 [m/s] (Q=11500 [m ³ /h]) 4.24 [m/s] (Q=12500 [m ³ /h])
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen de aire	0
Fracción en volumen de relave	1

7.3.2 Abertura (Atmósfera)

Las condiciones de abertura, que corresponden a las caras abiertas a la atmósfera, se detallan en la Tabla 7-4, a continuación.

Tabla 7-4. Detalles condiciones de abertura, caso modificado.

	Caso modificado
Tipo de condición de borde	Abertura (Opening)
Definición de la condición	Presión normal a la abertura
Presión relativa de la abertura	0 [Pa]
Turbulencia	Intensidad media (5%)
Fracción en volumen de aire	1
Fracción en volumen de relave	0

7.3.3 Pared

Las condiciones de pared se detallan en la Tabla 7-5, a continuación.

Tabla 7-5. Detalles condiciones de abertura, caso modificado.

	Caso modificado
Tipo de condición de borde	Pared (Wall)
Definición de la condición	Sin deslizamiento (No slip)
Rugosidad de la pared	0.15 [mm]

7.4 CONDICIONES INICIALES

Las condiciones iniciales del dominio son detalladas en la Tabla 7-6, a continuación.

Tabla 7-6. Condiciones iniciales del dominio, caso modificado.

	Caso modificado
Condiciones globales	
Presión relativa	0 [Pa]
Energía cinética turbulenta	Automática
Disipación de energía cinética turbulenta	Automática
Condiciones de cada fluido	
Aire a 25°C	
Velocidad inicial	Cartesiana
U	0 [m/s]
V	0 [m/s]
W	0 [m/s]
Fracción de volumen inicial	Función escalón de altura $y - 2.42$ [m]
Relave	
Velocidad inicial	Cartesiana
U	0 [m/s]
V	0 [m/s]
W	0 [m/s]
Fracción de volumen inicial	1 – Fracción en volumen de aire

7.5 RESULTADOS

Los resultados del caso modificado se presentan en esta sección. La Figura 7.3 y Figura 7.4 muestran la fracción volumétrica de relave, donde se aprecia el nivel del relave dentro del cajón.

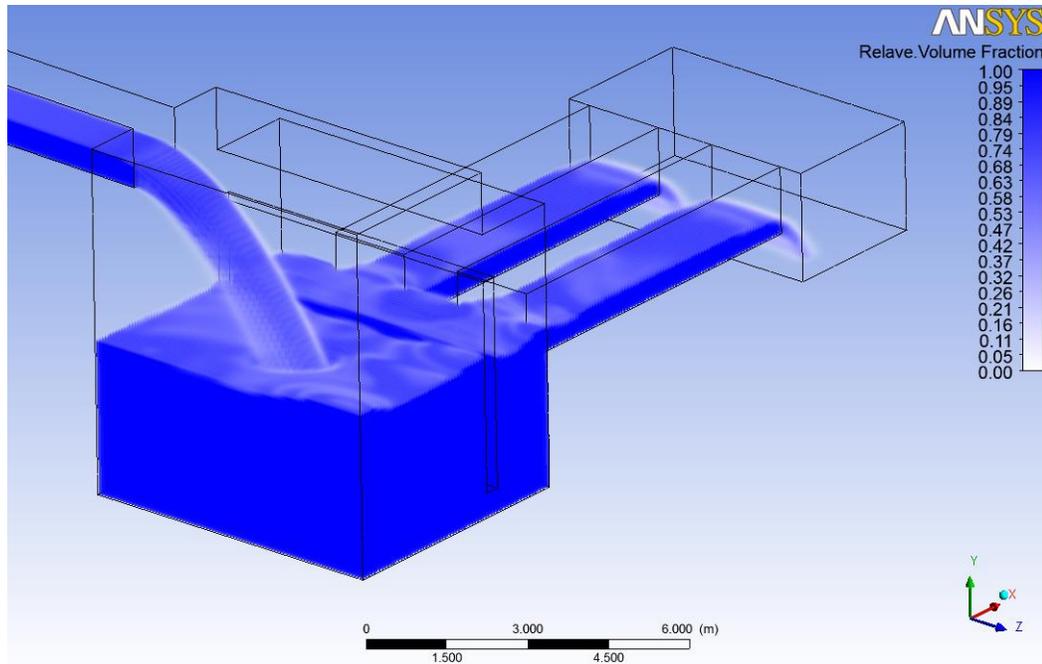


Figura 7.3. Fracción Volumétrica, $Q=9500$ [m^3/h], caso modificado. Vista isométrica anterior.

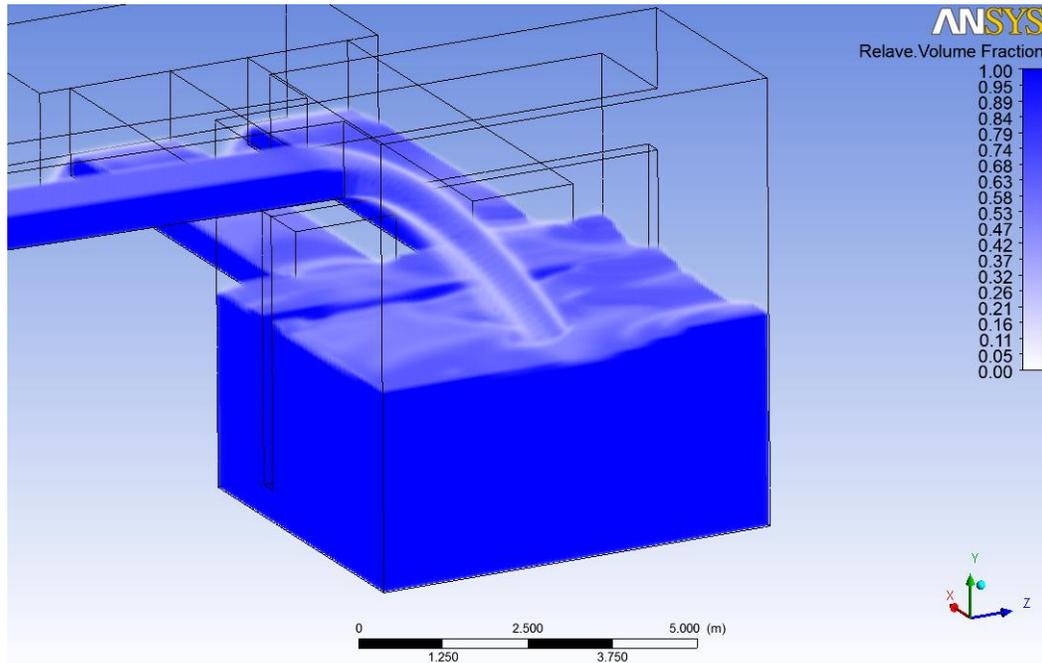


Figura 7.4. Fracción Volumétrica, $Q=9500$ [m^3/h], caso modificado. Vista isométrica posterior.

7.5.1 Trayectoria y Velocidades del Chorro

Las siguientes Figuras 7.5 a 7.16 muestran la trayectoria y velocidades del relave a lo largo de su recorrido dentro del cajón, para cada uno de los caudales simulados. Los datos corresponden a la línea de corriente que presenta la mayor velocidad en cada caso. Se muestra también una comparación entre las velocidades obtenidas de la simulación y las velocidades calculadas con la ecuación 2.28, utilizando el parámetro $C = 2$.

$Q = 9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

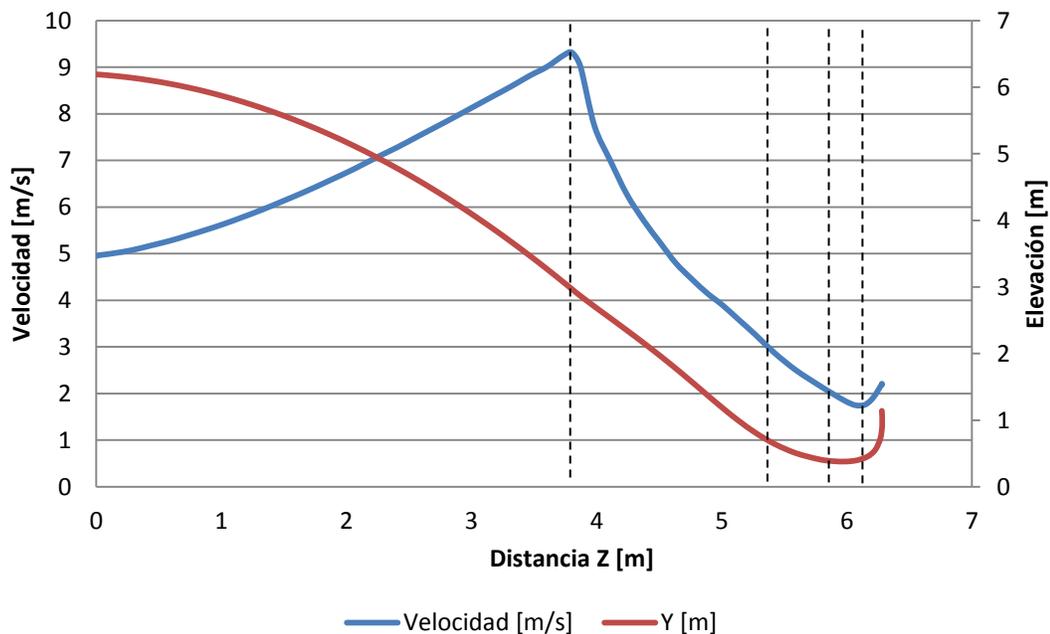


Figura 7.5. Trayectoria y velocidades del relave al caer en el cajón, $Q=9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado.

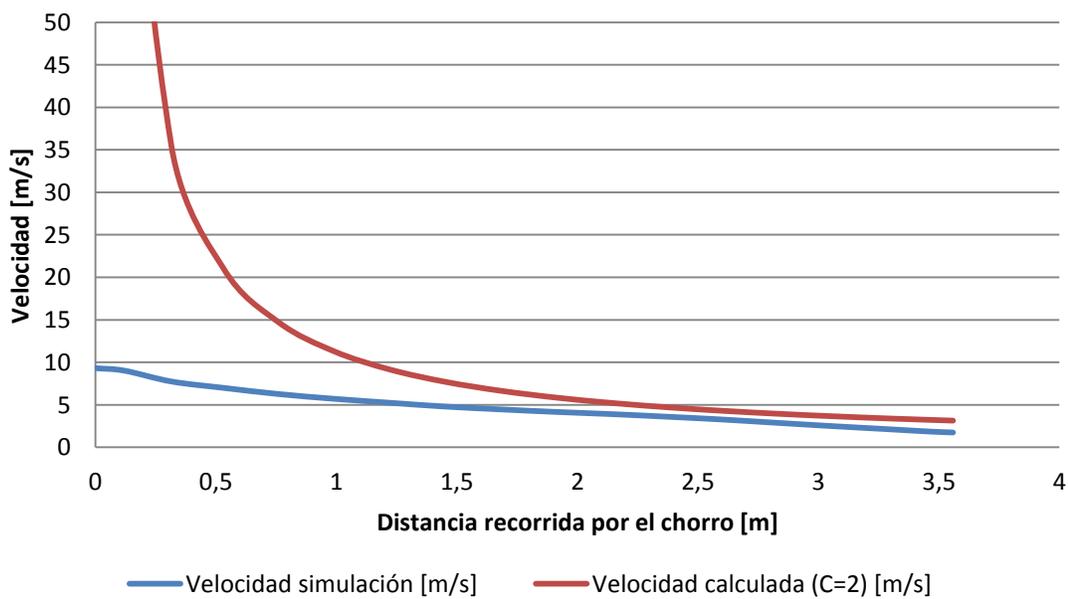


Figura 7.6. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado.

A partir de las velocidades obtenidas en la simulación, se calcula el valor del parámetro C a lo largo de la línea de corriente mostrada.

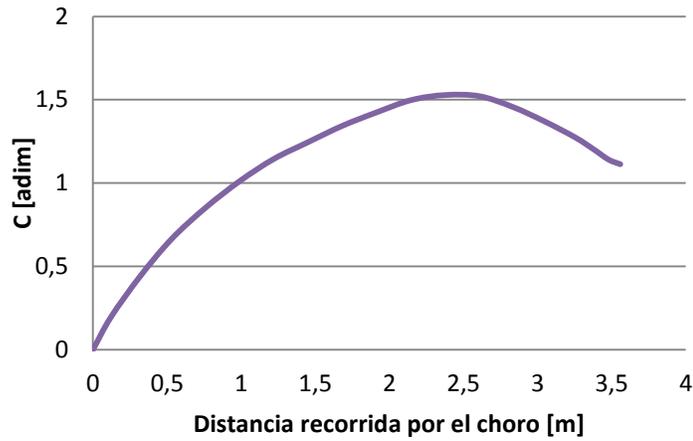


Figura 7.7. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h}]$, caso modificado.

$Q = 10500 \text{ [m}^3/\text{h}]$

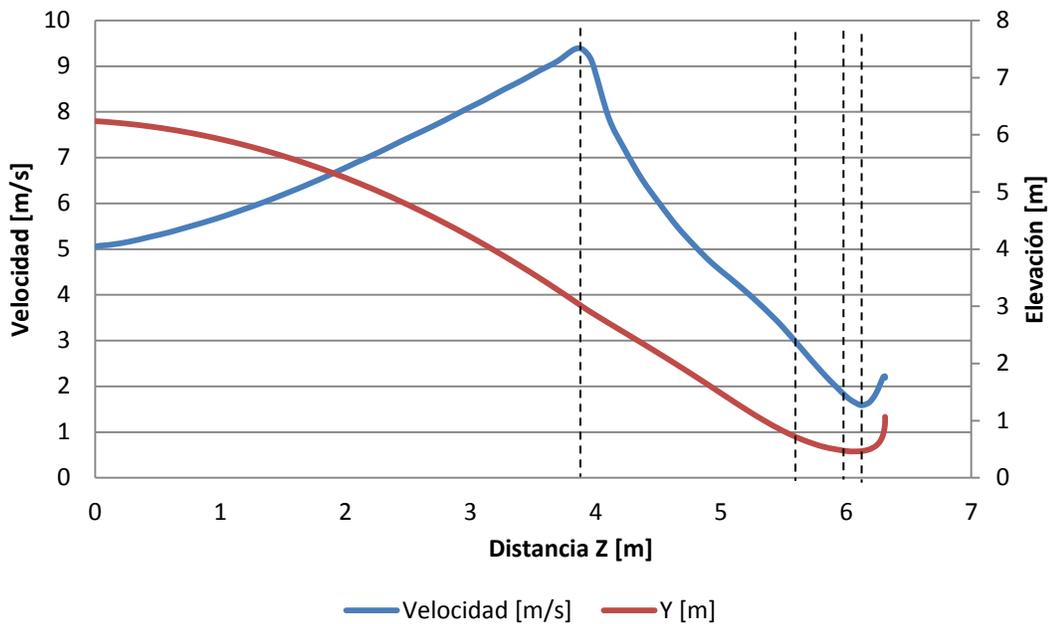


Figura 7.8. Trayectoria y velocidades del relave al caer en el cajón, $Q=10500 \text{ [m}^3/\text{h}]$, caso modificado.

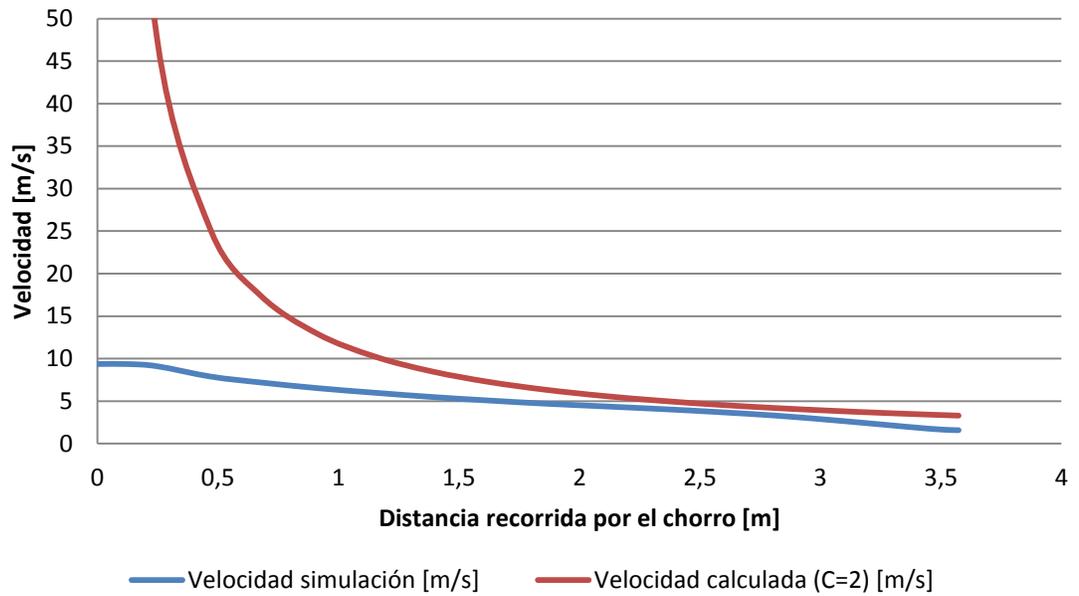


Figura 7.9. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=10500 \text{ [m}^3/\text{h}]$, caso modificado.

A partir de las velocidades obtenidas en la simulación, se calcula el valor del parámetro C a lo largo de la línea de corriente mostrada.

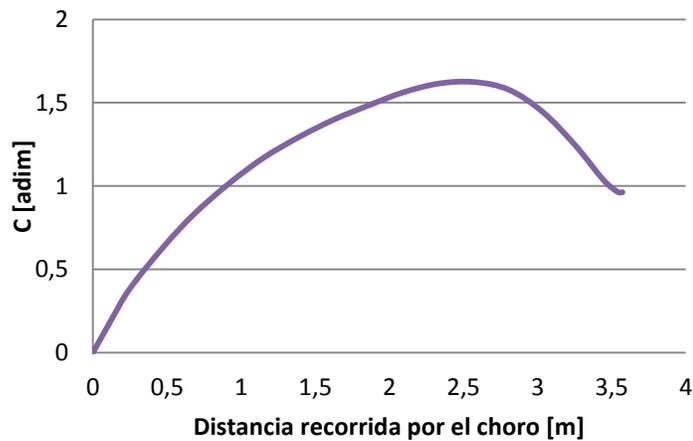


Figura 7.10. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=10500 \text{ [m}^3/\text{h}]$, caso modificado.

$Q = 11500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

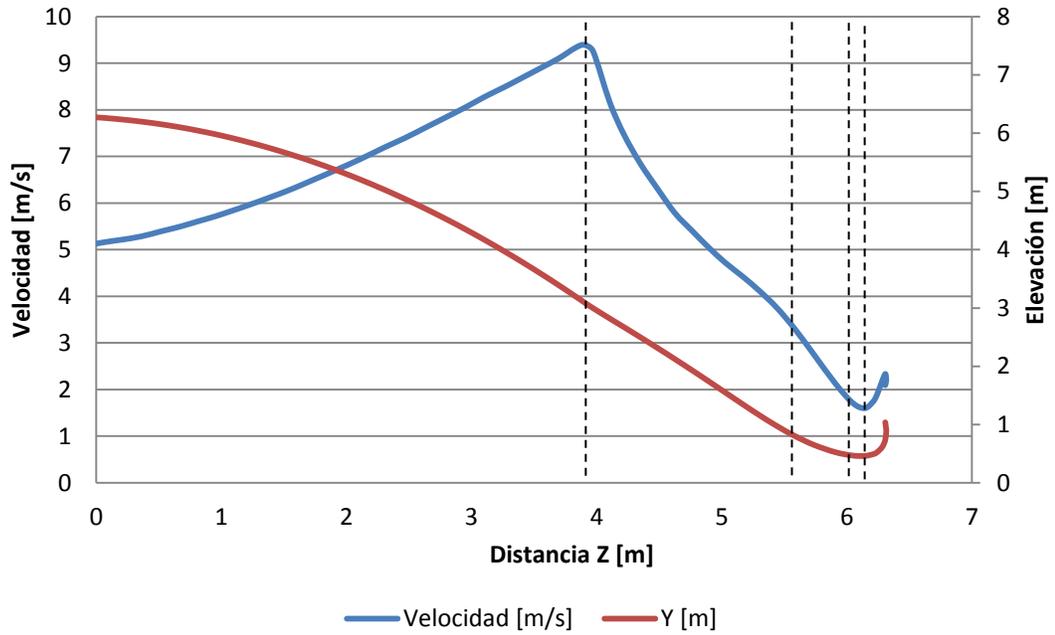


Figura 7.11. Trayectoria y velocidades del relave al caer en el cajón, $Q=11500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado.

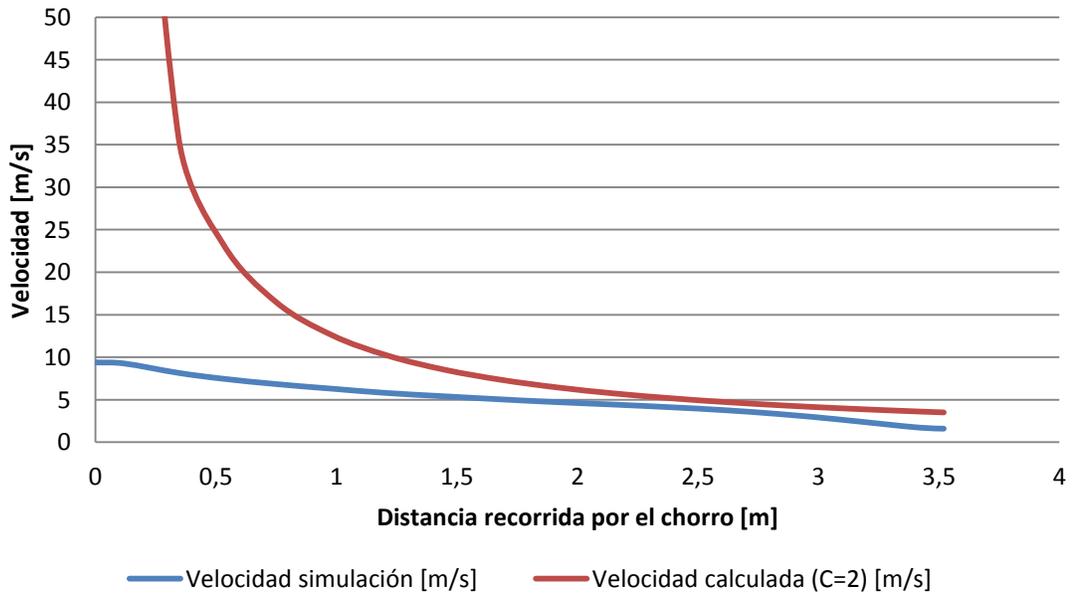


Figura 7.12. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=11500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado.

A partir de las velocidades obtenidas en la simulación, se calcula el valor del parámetro C a lo largo de la línea de corriente mostrada.

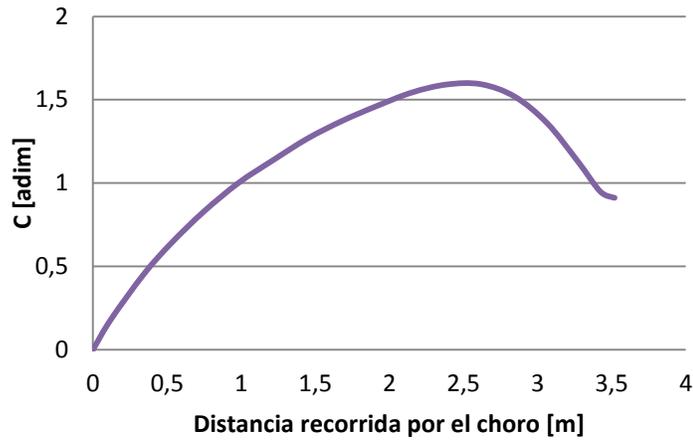


Figura 7.13. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado.

$Q = 12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

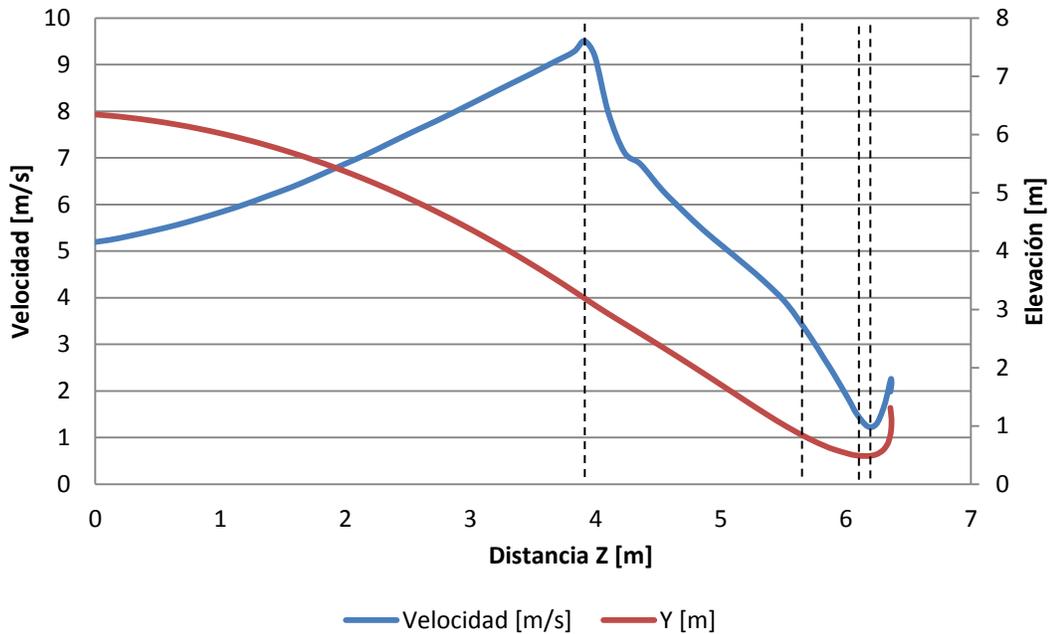


Figura 7.14. Trayectoria y velocidades del relave al caer en el cajón, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado.

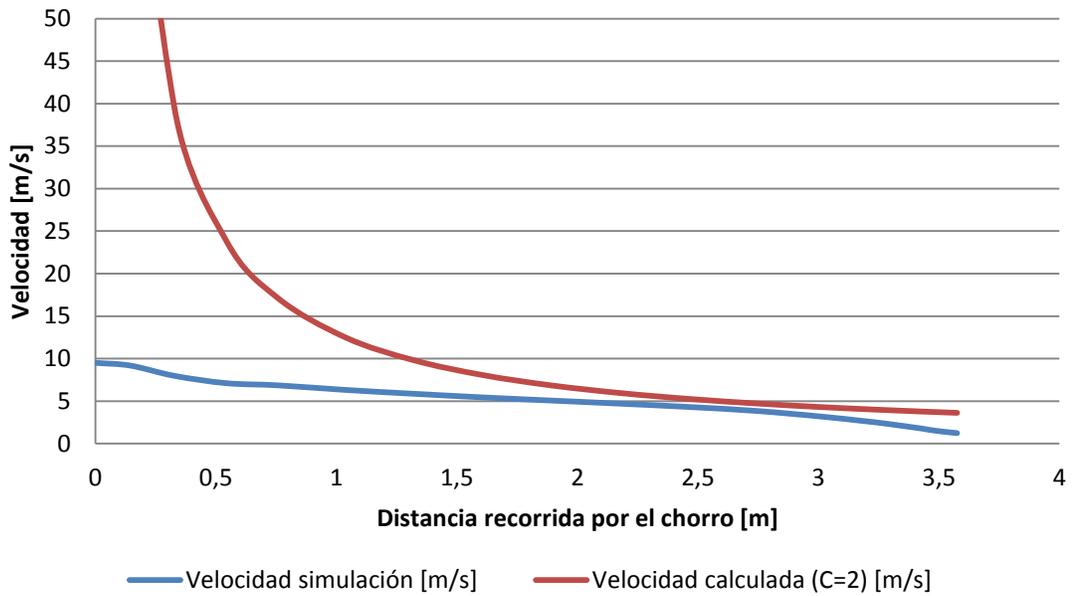


Figura 7.15. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado.

A partir de las velocidades obtenidas en la simulación, se calcula el valor del parámetro C a lo largo de la línea de corriente mostrada.

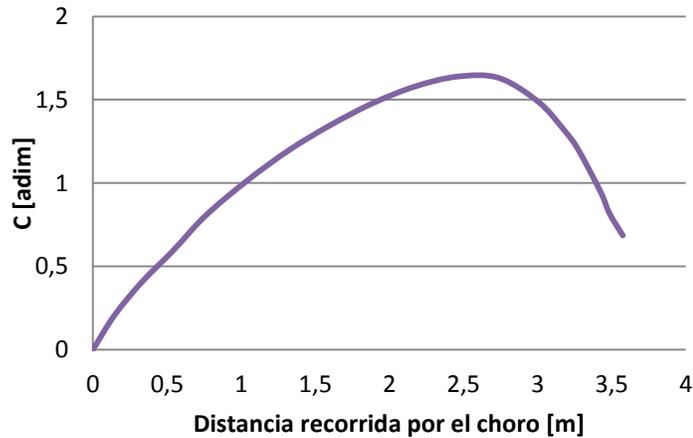


Figura 7.16. Velocidad dentro del colchón de pulpa, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado.

Se observa que mientras cae, el relave gana velocidad hasta llegar a un máximo, cuando siente la superficie del relave dentro del cajón. Luego comienza a desacelerar hasta llegar a una velocidad mínima cuando impacta la pared. A medida que aumenta el caudal, el alcance del relave es mayor, así como las velocidades, como lo muestran la Figura 7.17 y Figura 7.18.

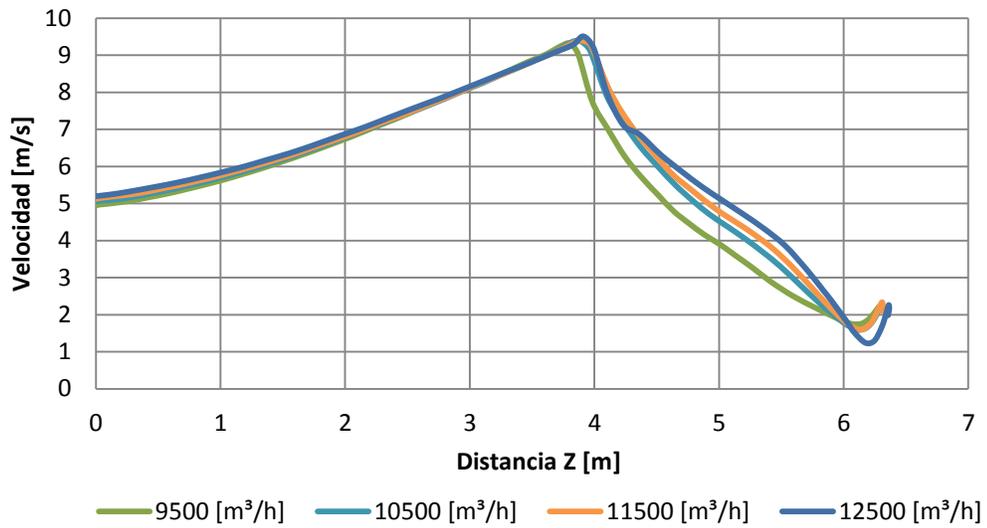


Figura 7.17. Velocidades del relave al caer en el cajón, caso modificado.

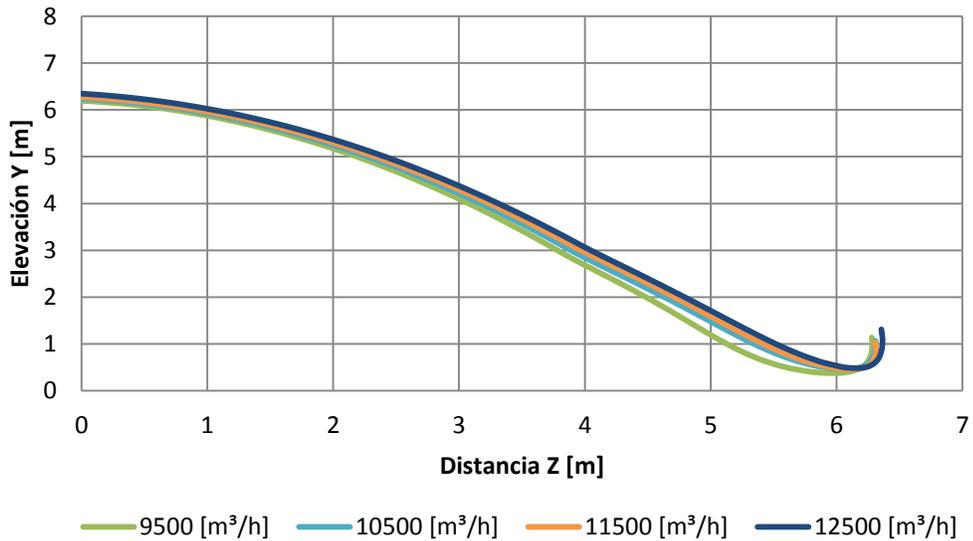


Figura 7.18. Perfiles de caída del en el cajón, caso modificado.

La siguiente Tabla 7-7, a continuación, resume los datos anteriormente presentados para cada uno de los caudales simulados.

Tabla 7-7. Resumen resultados trayectoria y velocidades, caso modificado.

Caudal	Velocidad caída [m/s]	Velocidad máxima [m/s]	Altura impacto [m]	Largo impacto [m]
9500	4.95	9.31	2.97	3.8
10500	5.06	9.37	3.09	3.83
11500	5.13	9.39	3.12	3.90
12500	5.20	9.51	3.19	9.93

7.5.2 Líneas de Corriente

Las siguientes Figura 7.19 a Figura 7.22 muestran las líneas de corriente para el caudal de 9500 [m³/h]. Las líneas de corriente para los demás caudales se pueden encontrar en los Anexos.

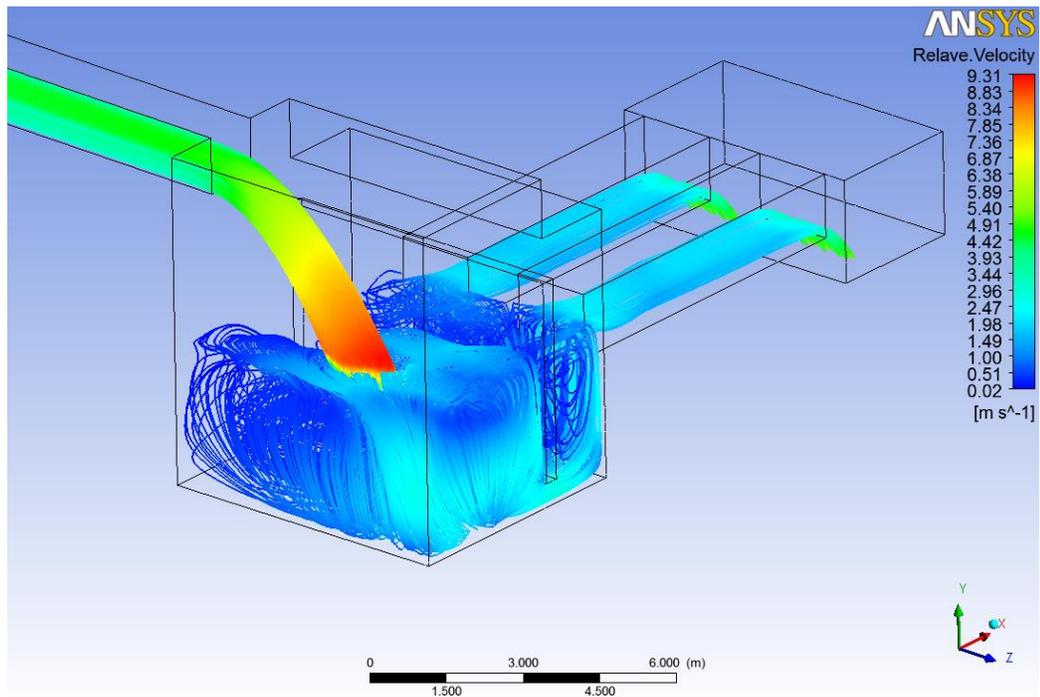


Figura 7.19. Líneas de corriente, Q=9500 [m³/h], caso modificado. Vista isométrica anterior.

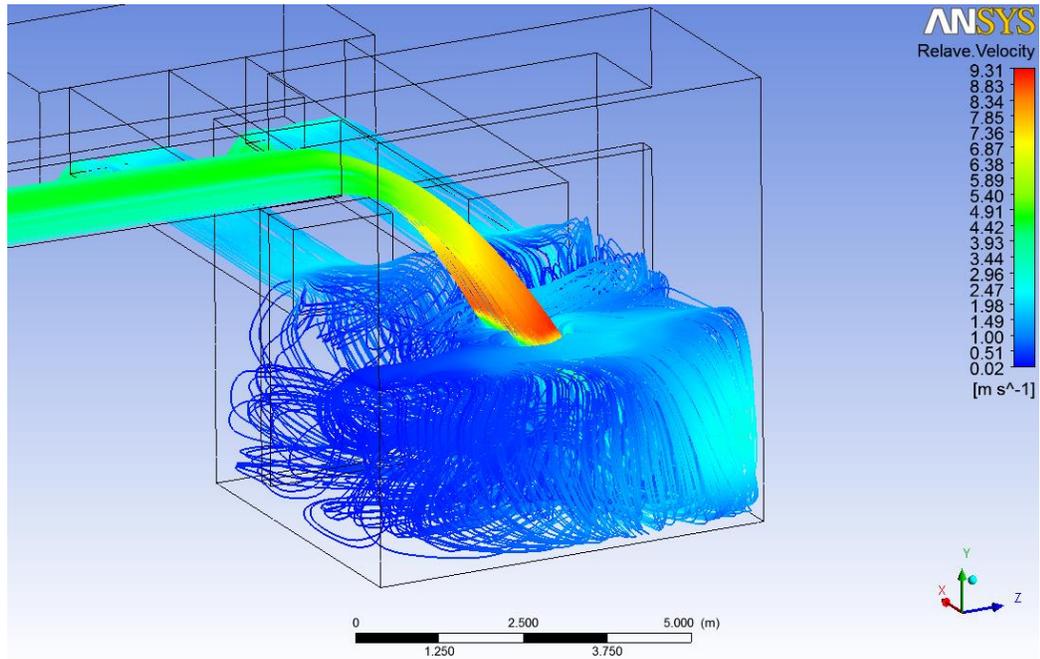


Figura 7.20. Líneas de corriente, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior.

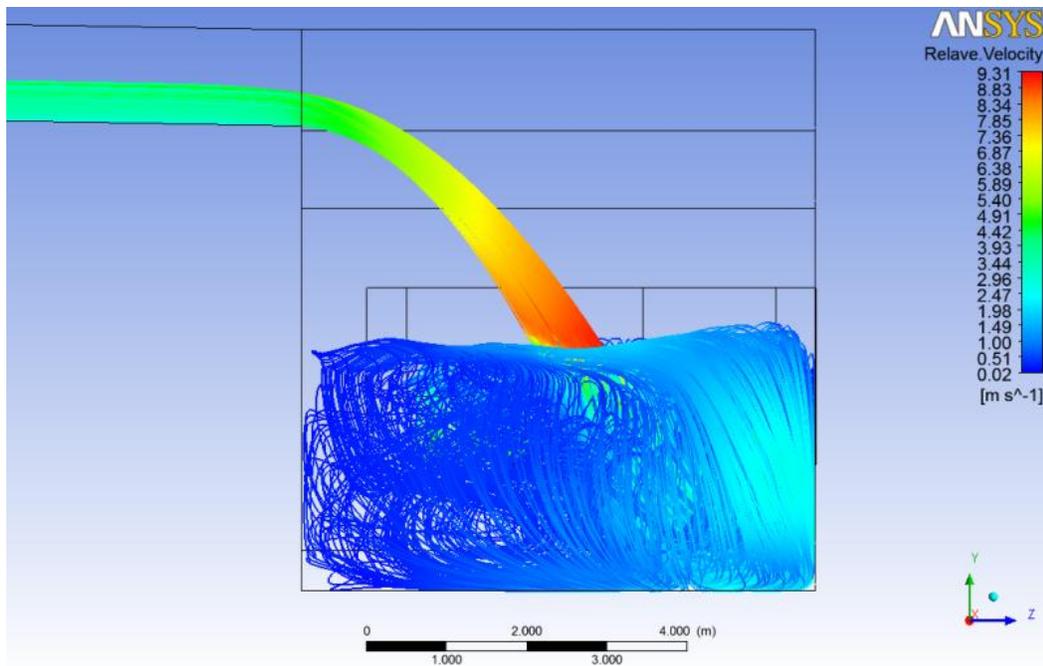


Figura 7.21. Líneas de corriente, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista lateral.

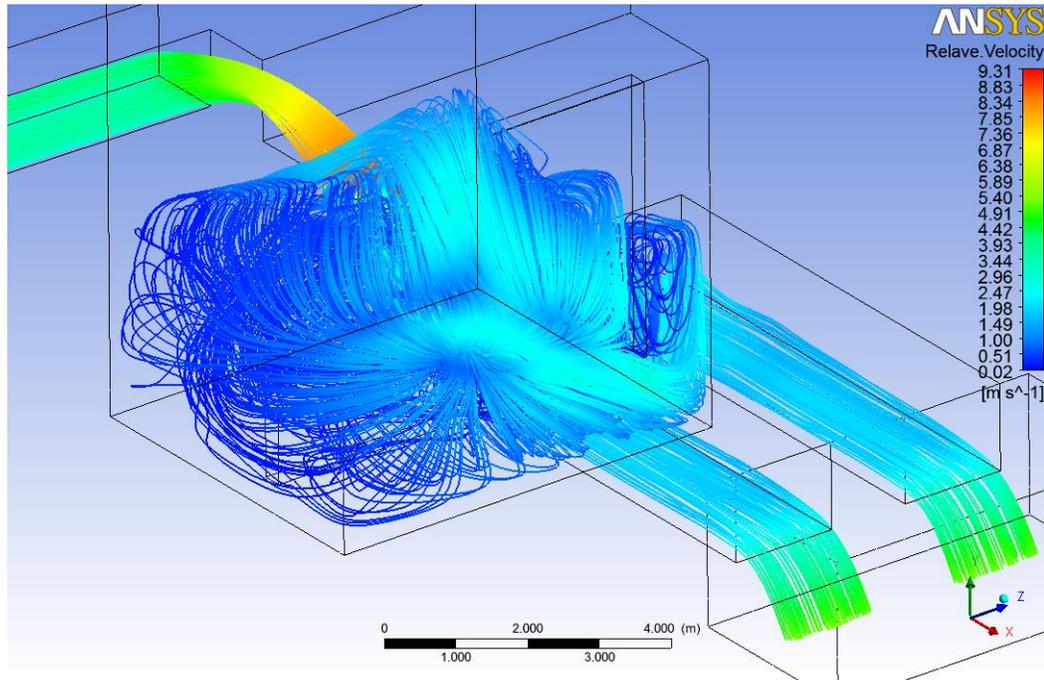


Figura 7.22. Líneas de corriente, $Q=9500\ [m^3/h]$, caso modificado. Vista isométrica inferior.

Para este caso, al limitar el rango de colores para las velocidades, no se aprecian zonas donde se concentren velocidades mayores a $6\ [m/s]$, como lo muestran las siguientes Figuras 7.23 a 7.26.

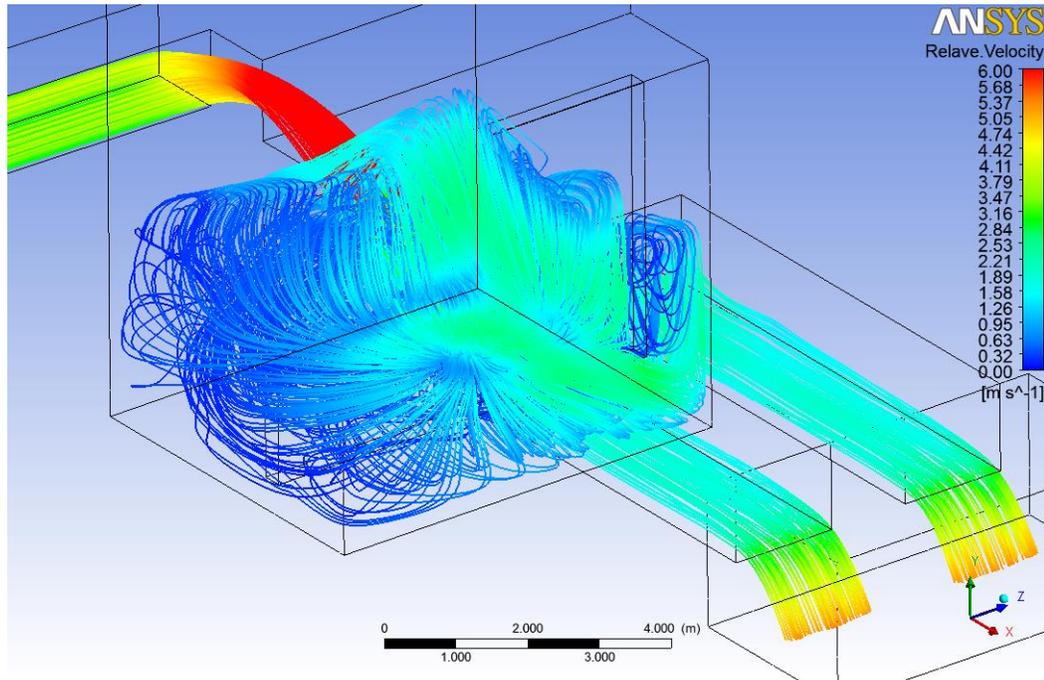


Figura 7.23. Líneas de corriente, $Q=9500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso modificado.
Vista isométrica inferior.

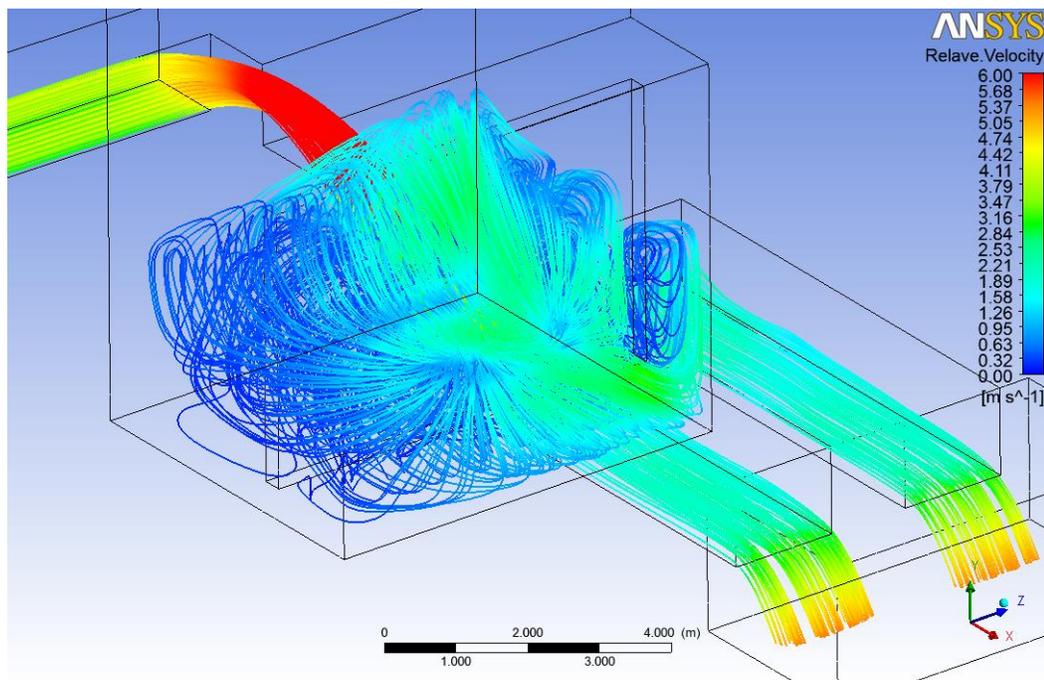


Figura 7.24. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso modificado.
Vista isométrica inferior.

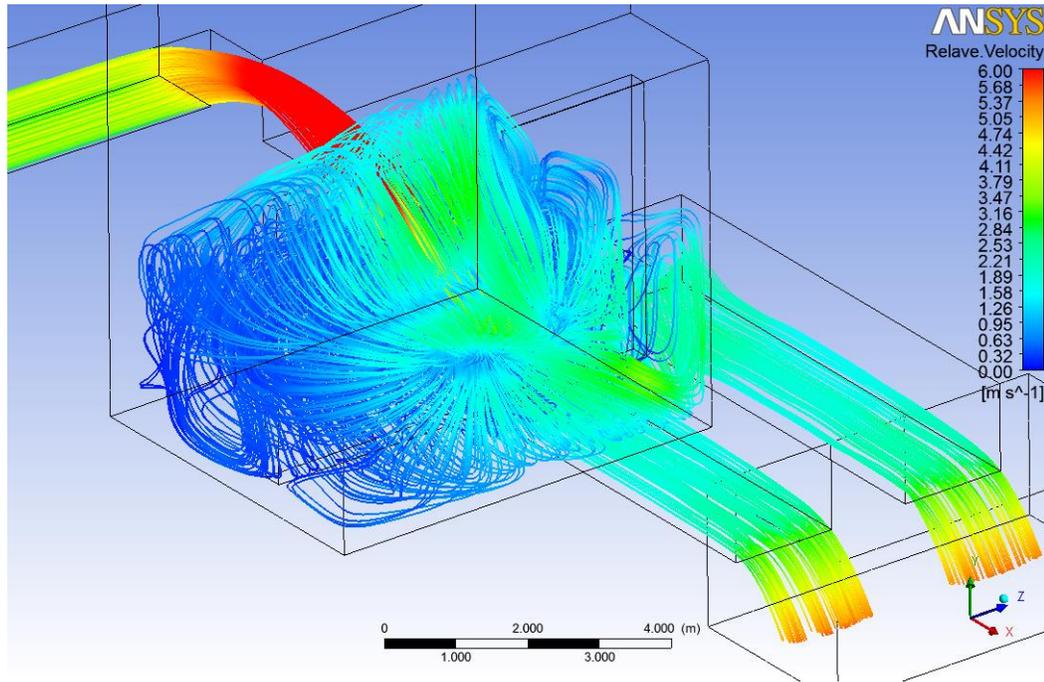


Figura 7.25. Líneas de corriente, $Q=11500$ [m^3/h], rango 0-6 [m/s], caso modificado.
Vista isométrica inferior.

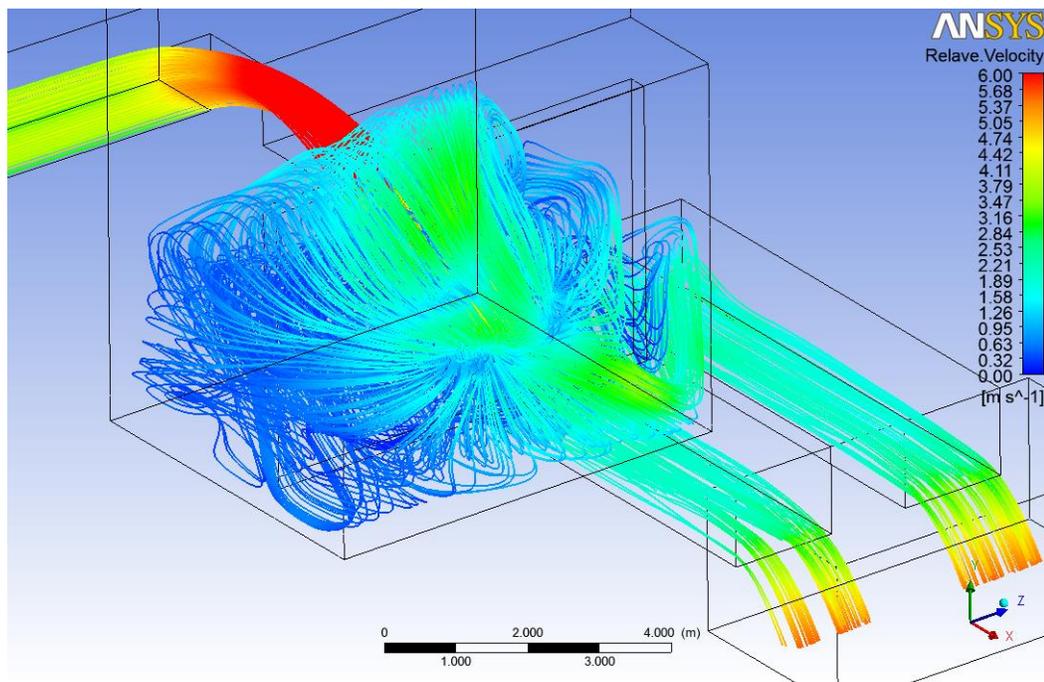


Figura 7.26. Líneas de corriente, $Q=12500$ [m^3/h], rango 0-6 [m/s], caso modificado.
Vista isométrica inferior.

7.5.3 Velocidades de Fondo y Pared

Las siguientes Figuras 7.27 a 7.30 muestran la velocidad cercanas el fondo y pared del cajón para los caudales simulados, con un rango de 0 a 6 [m/s].

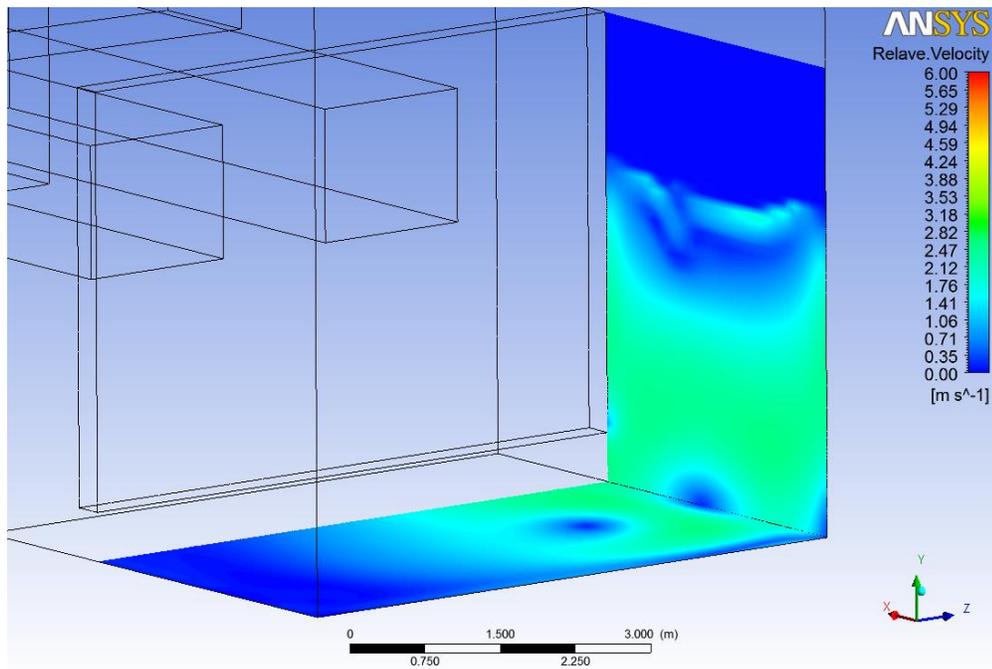


Figura 7.27. Contorno de velocidades en el fondo y pared, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, rango 0-6 [m/s], caso modificado. Vista isométrica posterior cerca.

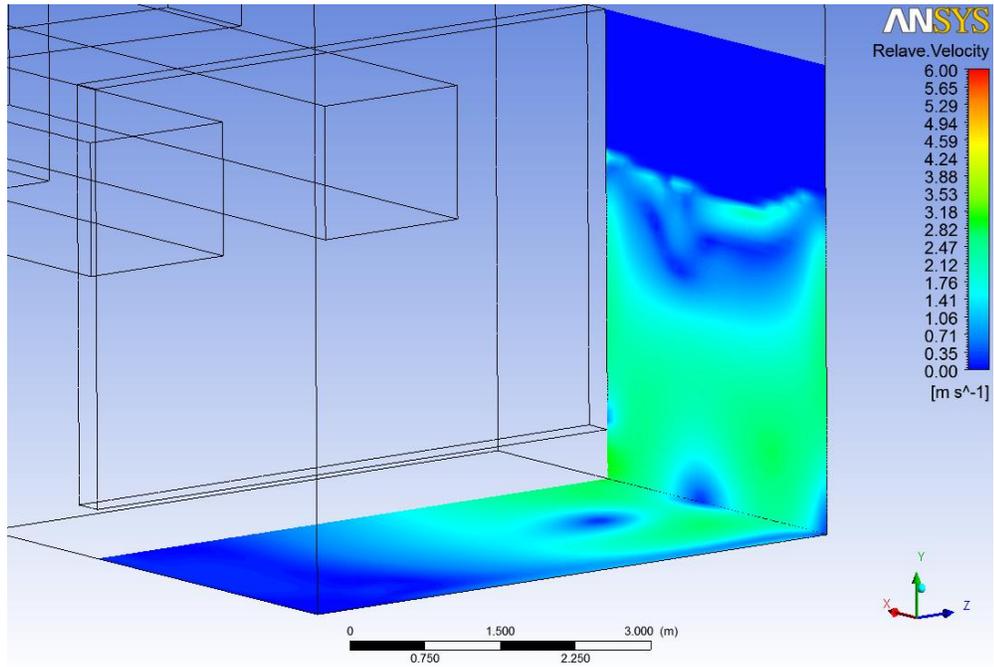


Figura 7.28. Contorno de velocidades en el fondo y pared, $Q=10500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, rango 0-6 $[\text{m/s}]$, caso modificado. Vista isométrica posterior cerca.

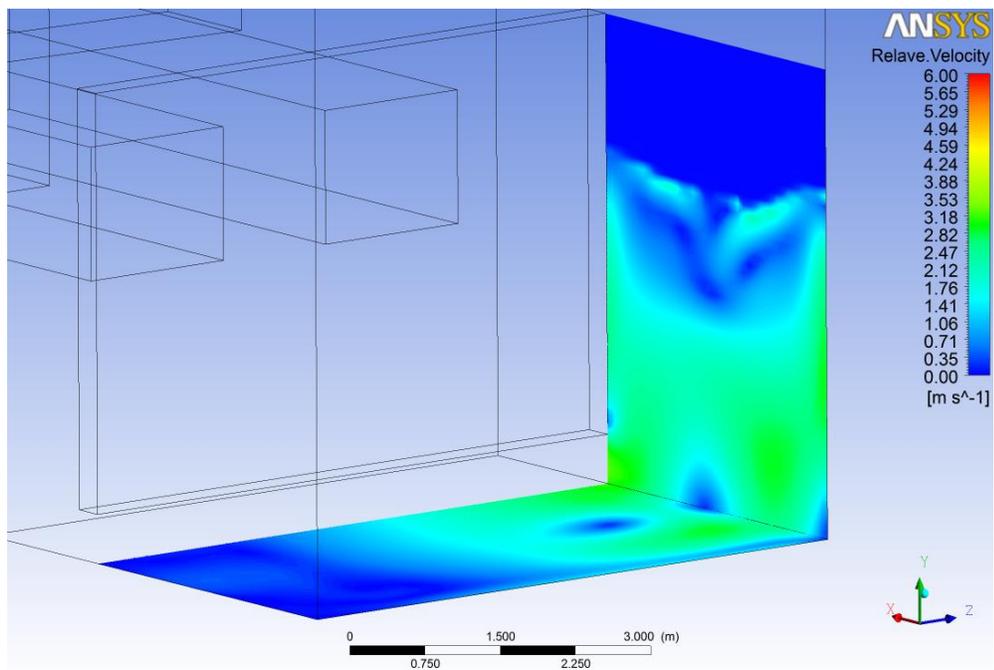


Figura 7.29. Contorno de velocidades en el fondo y pared, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, rango 0-6 $[\text{m/s}]$, caso modificado. Vista isométrica posterior cerca.

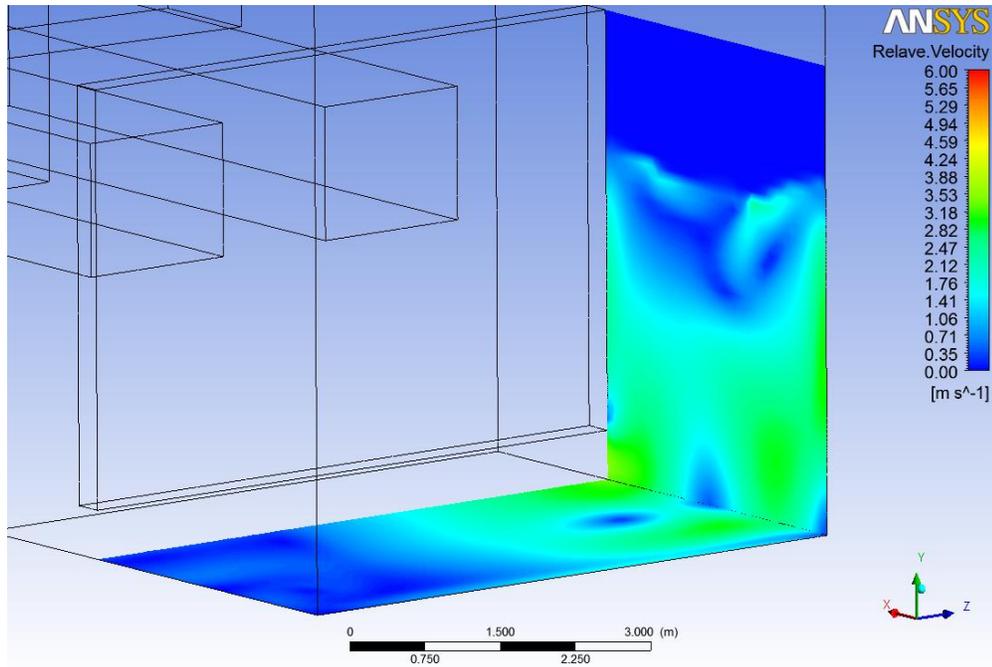


Figura 7.30. Contorno de velocidades en el fondo y pared, $Q=12500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso modificado. Vista isométrica posterior cerca.

7.5.4 Esfuerzos de Corte

Las siguientes Figuras 7.31 y 7.32 muestran los esfuerzos de corte promedio y máximos en el fondo y en la pared en función del caudal de entrada.

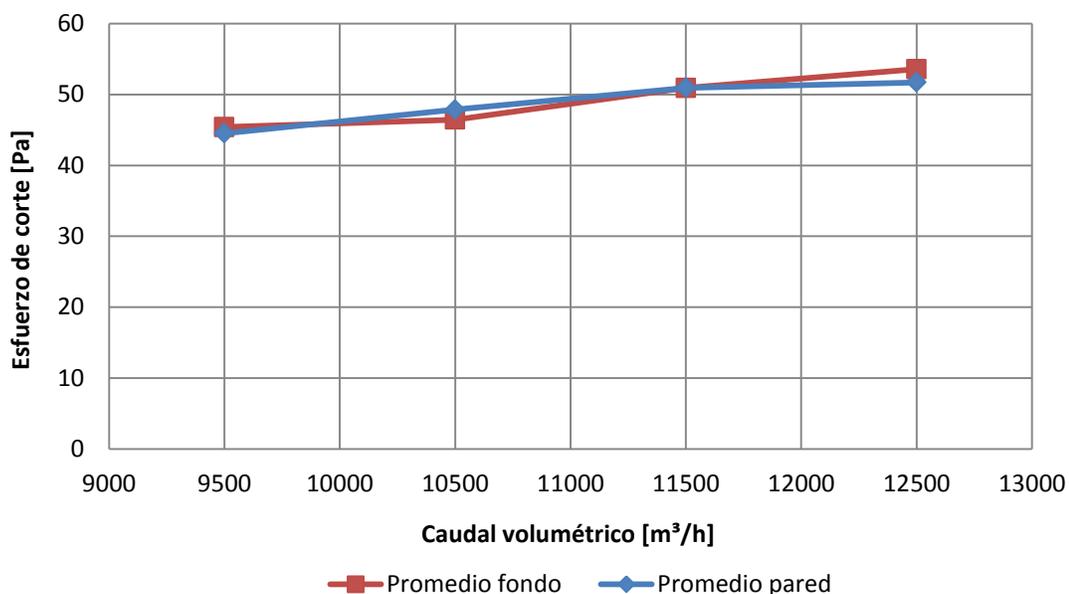


Figura 7.31. Esfuerzos de corte promedio en función del caudal volumétrico, caso modificado.

Los esfuerzos de corte promedio en la pared y en el fondo no presentan gran diferencia, aumentando en igual proporción desde un valor cercano a los 45 [Pa] hasta cerca de los 55 [Pa], a medida que aumenta el caudal.

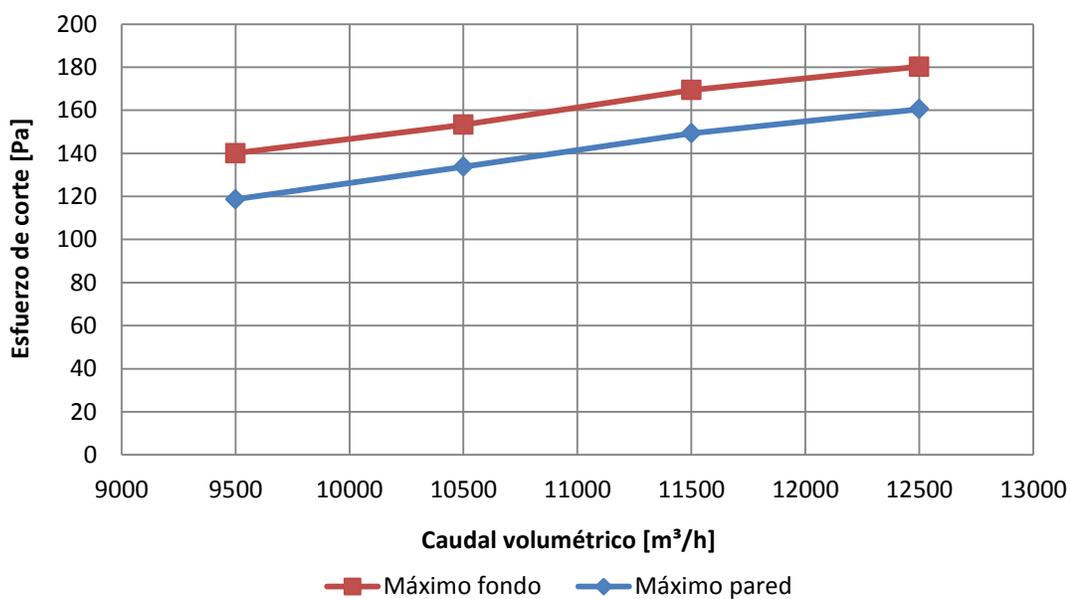


Figura 7.32. Esfuerzos de corte máximos en función del caudal volumétrico, caso modificado.

Los esfuerzos de corte máximos en la pared y en el fondo para el caso con caudal mínimo son 140 [Pa] y 120 [Pa] respectivamente. A medida que aumenta el caudal, tanto el esfuerzo máximo en la pared como en el fondo aumentan en igual proporción hasta llegar a los 180 [Pa] en el fondo y 160 [Pa] en la pared, con el caudal máximo.

Las Figuras 7.33 a 7.40, a continuación, muestran los contornos de esfuerzos de corte en la pared y en el fondo para cada uno de los caudales simulados. Se agregan además las líneas de corriente del relave en blanco para mejor entendimiento.

$Q = 9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

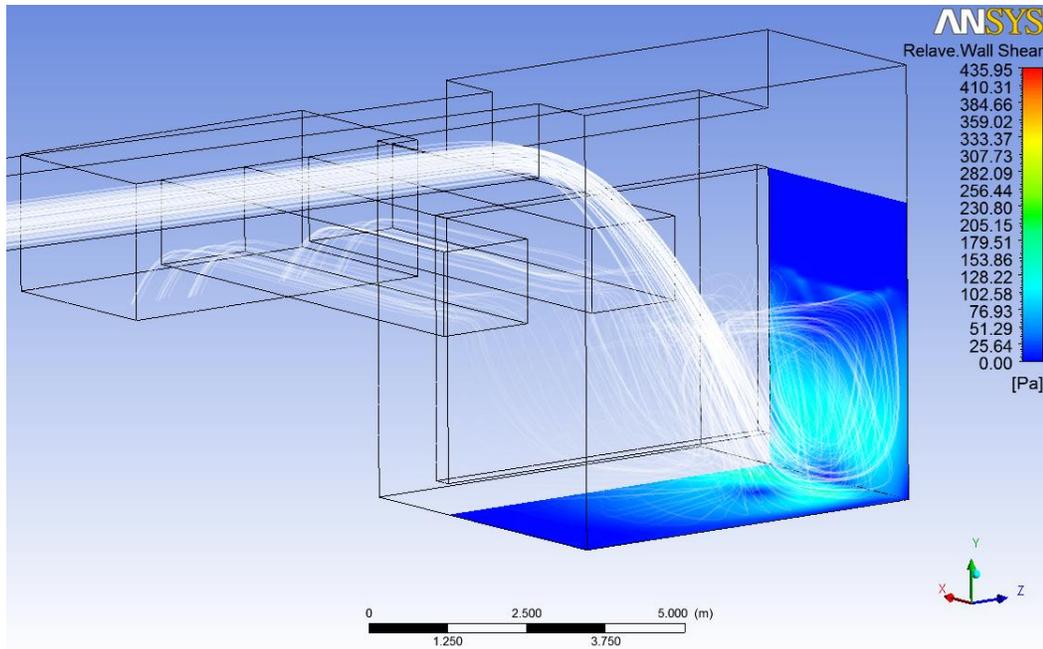


Figura 7.33. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior.

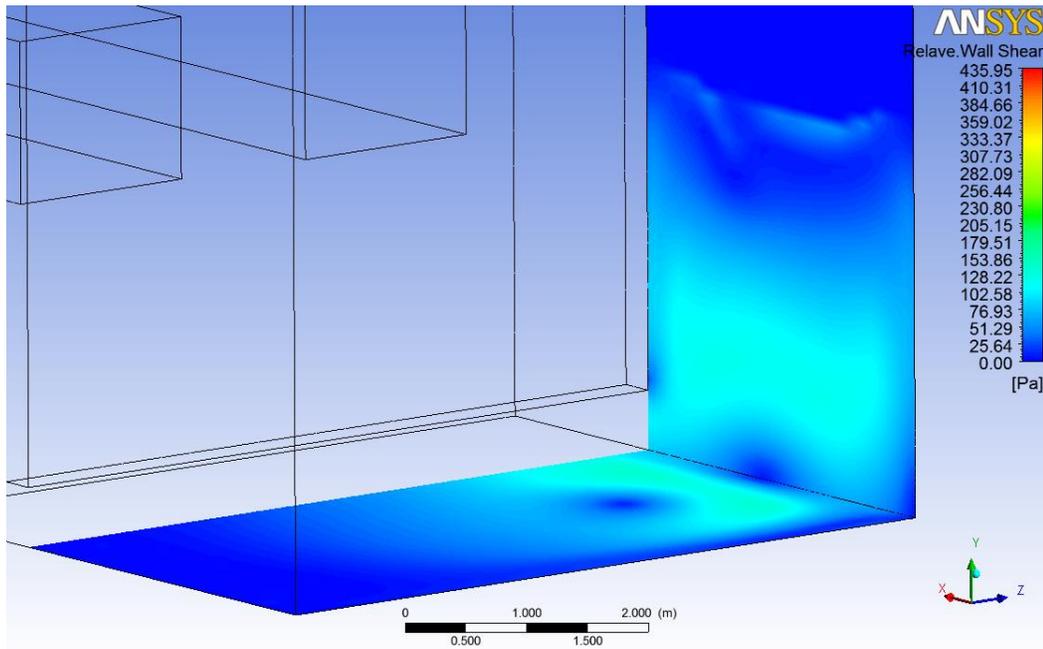


Figura 7.34. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 10500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

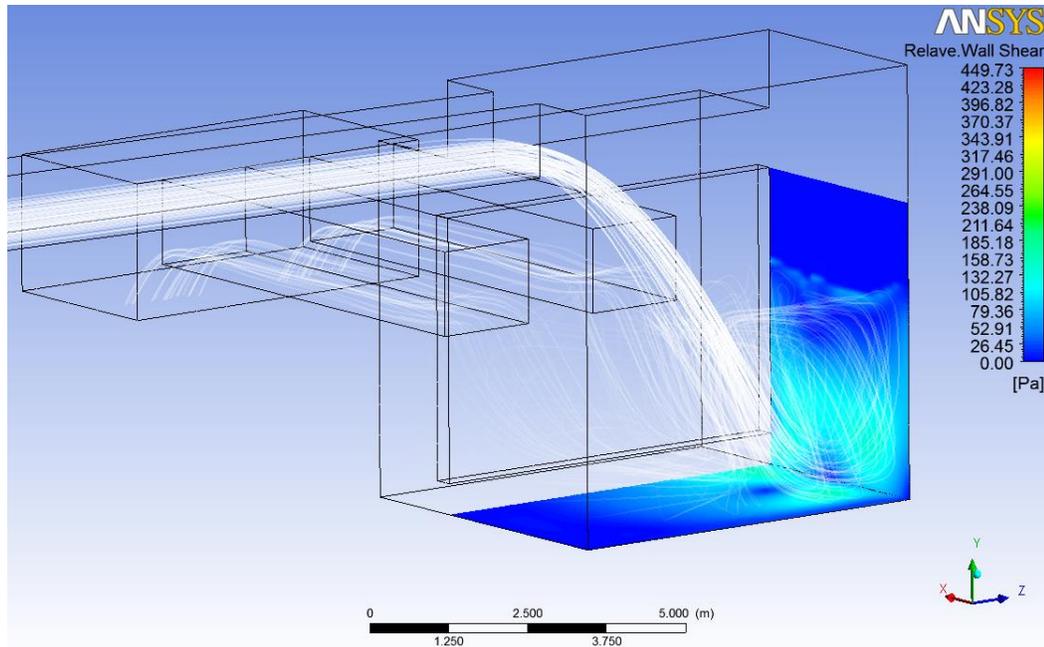


Figura 7.35. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=10500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior.

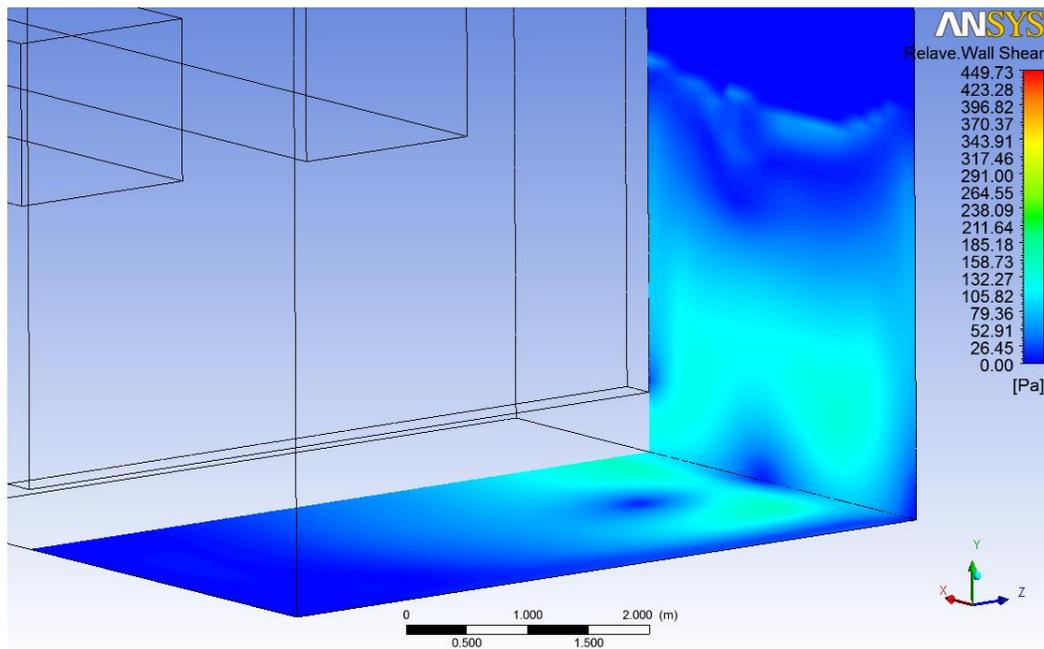


Figura 7.36. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=10500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

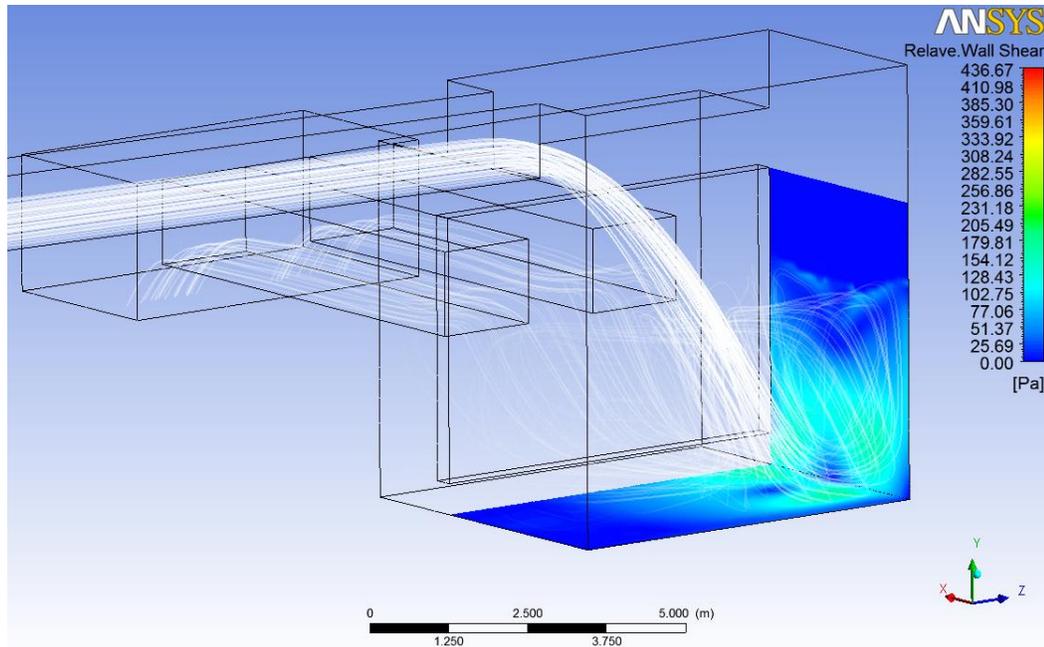


Figura 7.37. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior.

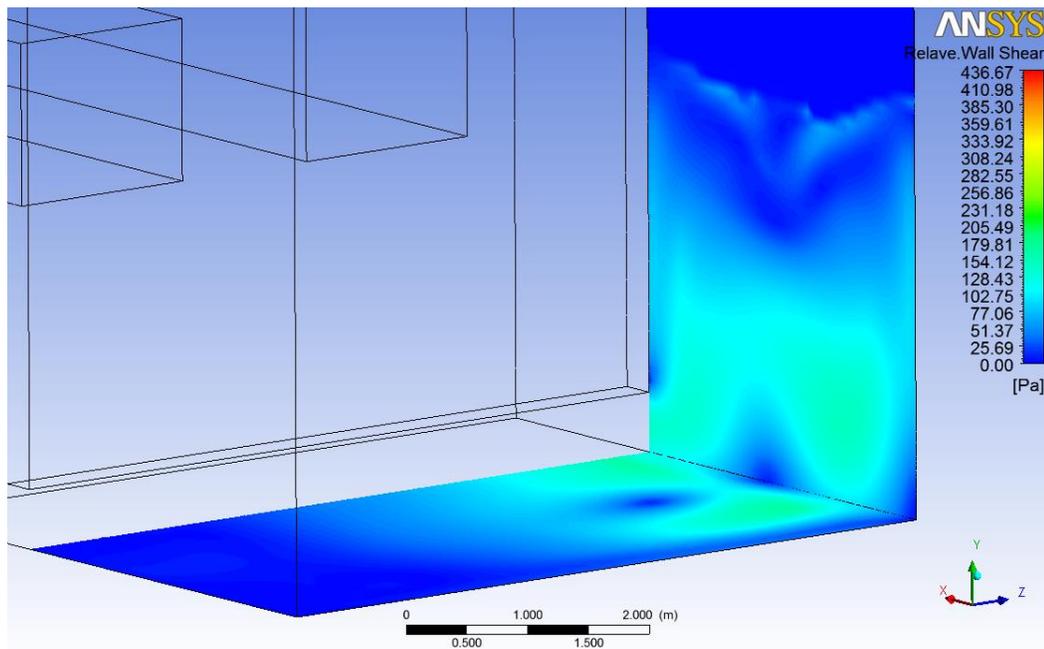


Figura 7.38. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

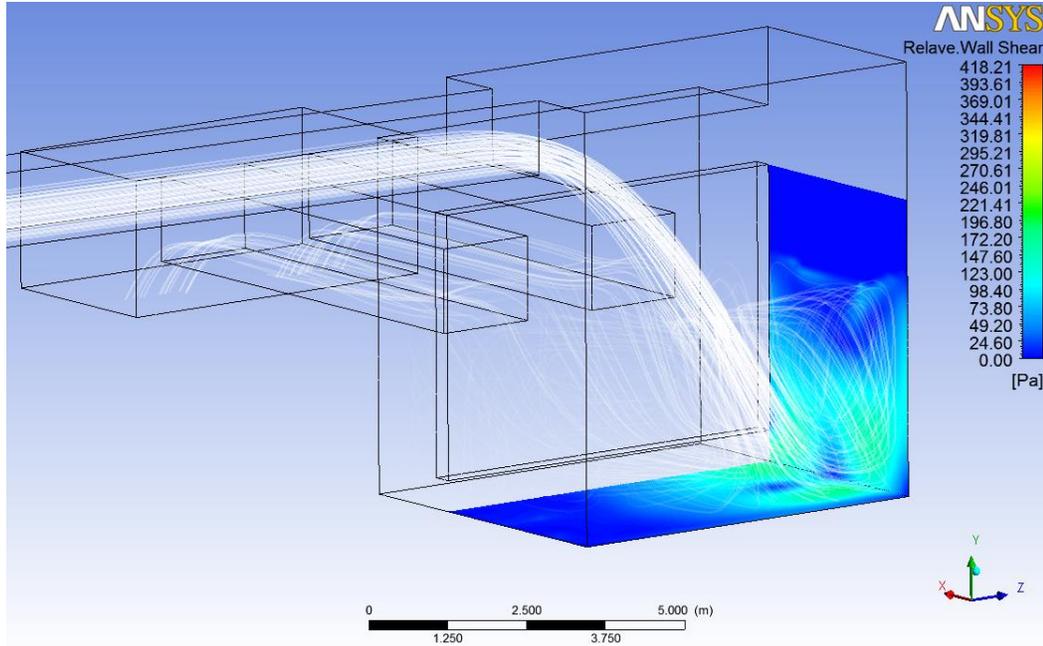


Figura 7.39. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior.

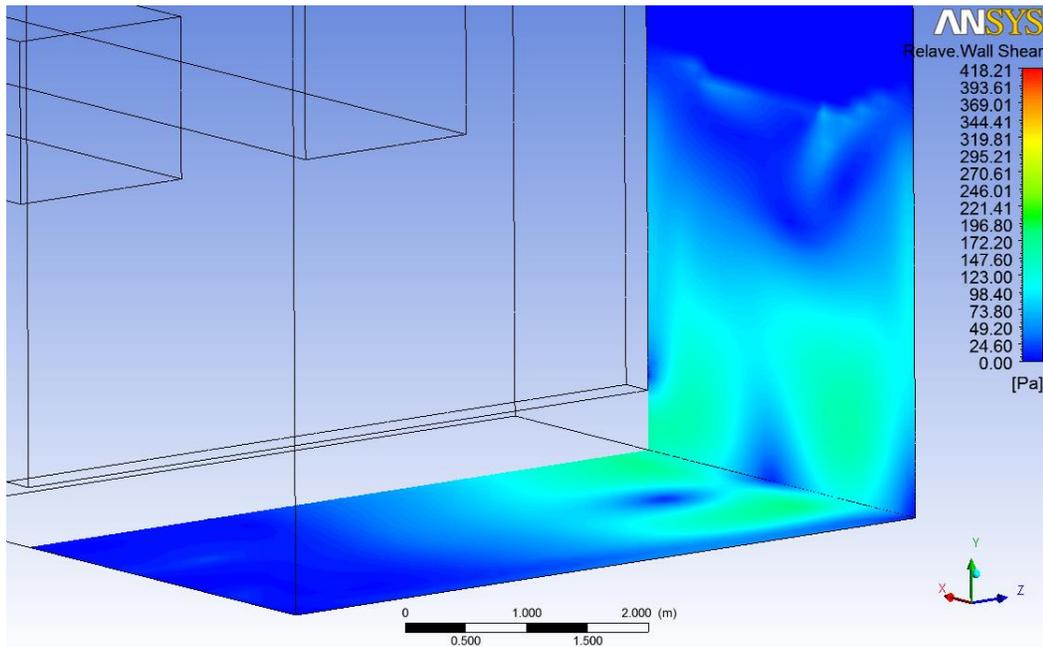


Figura 7.40. Contorno de esfuerzos de corte en el fondo y pared, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior cerca.

7.5.5 Presiones

Las siguientes Figuras 7.41 y 7.42 muestran las presiones promedio y máximas en el fondo y en la pared en función del caudal de entrada.

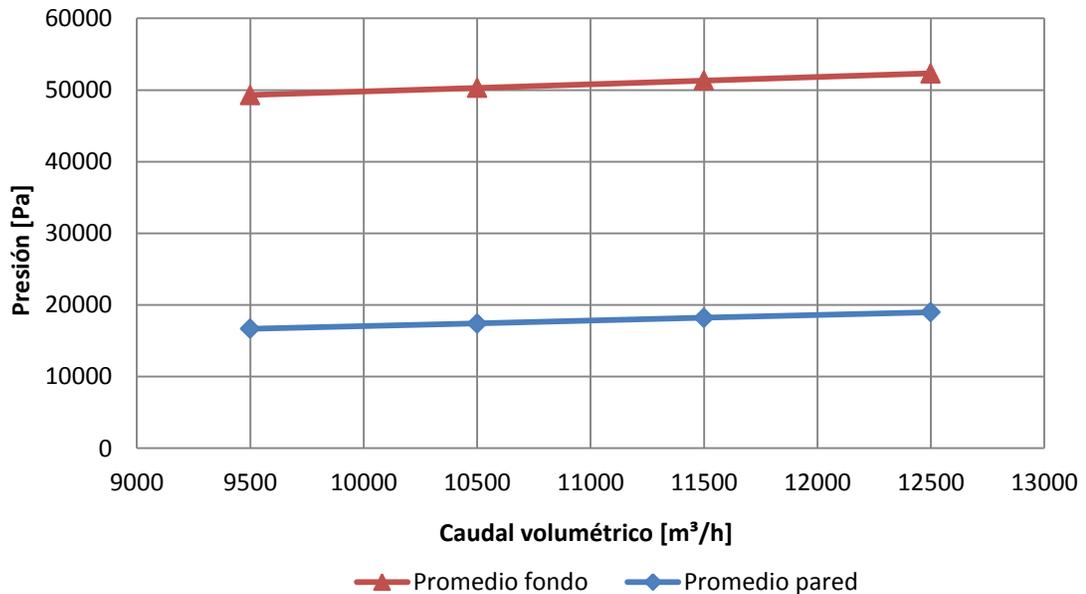


Figura 7.41. Presiones promedio en función del caudal volumétrico, caso modificado.

Las presiones promedio en la pared y en el fondo siguen la misma tendencia, aumentando con el caudal volumétrico en igual medida. En la pared se observa una presión de 16680 [Pa] para el caudal mínimo y de 19000 [Pa] para el caudal máximo. El fondo por su parte presenta presiones que van desde los 49300 [Pa] hasta los 52310 [Pa], para caudal mínimo y máximo respectivamente.

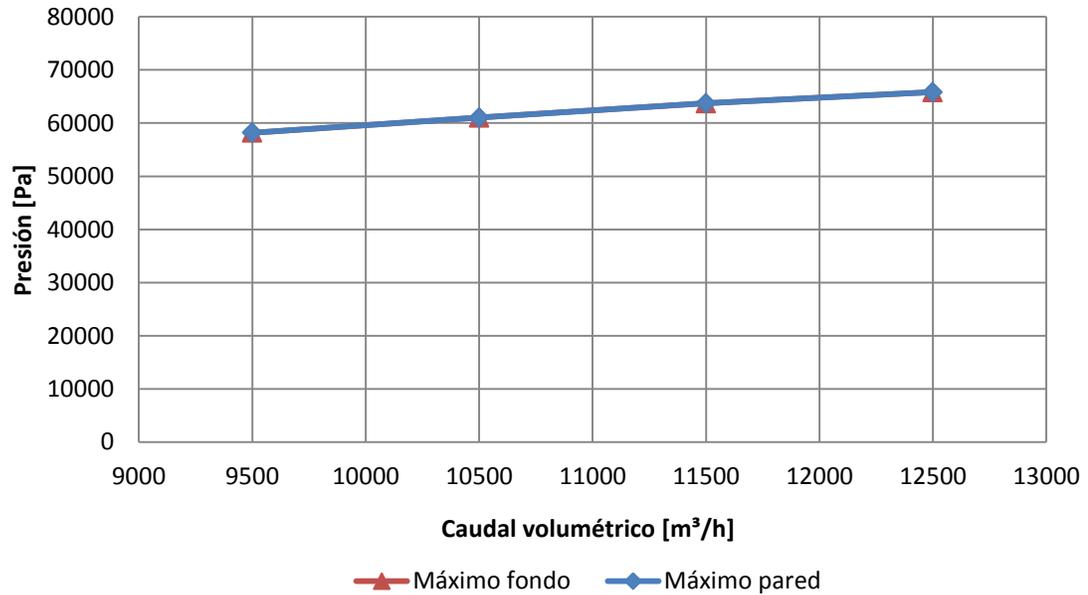


Figura 7.42. Presiones máximas en función del caudal volumétrico, caso modificado.

Las presiones máximas son idénticas tanto para el fondo como para la pared. Se puede apreciar claramente que aumentan con el caudal, registrando valores entre 58190 [Pa] para caudal mínimo y 65800 [Pa] para caudal máximo.

Las Figuras 7.43 a 7.50, a continuación, muestran los contornos de presiones en la pared y en el fondo para cada uno de los caudales simulados. Se agregan además las líneas de corriente del relave en blanco para mejor entendimiento.

$Q = 9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

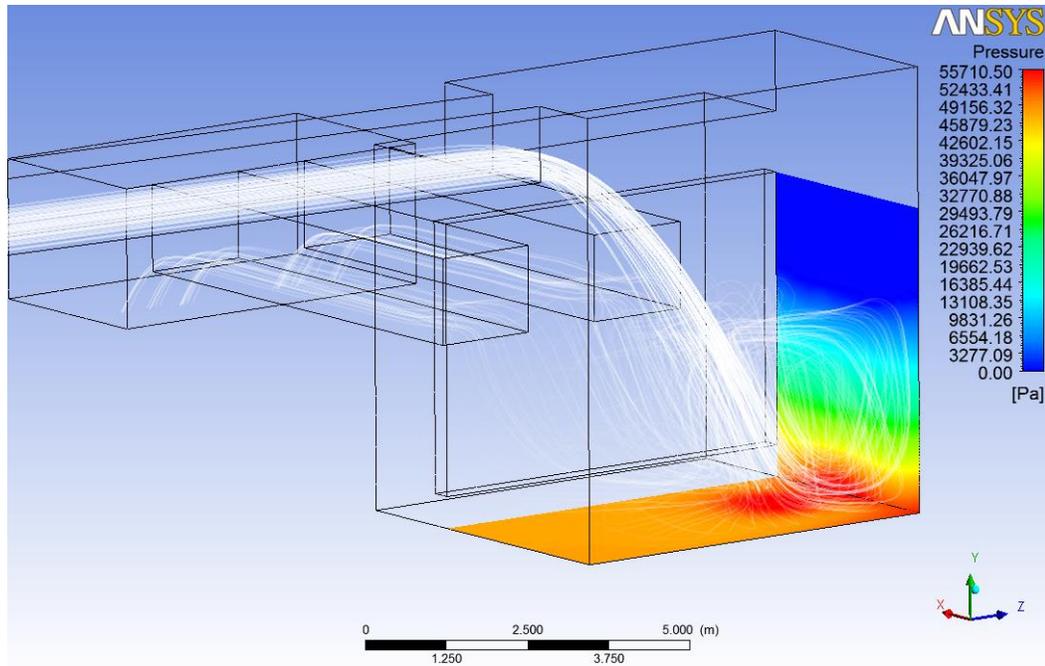


Figura 7.43. Contorno de presiones en el fondo, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior.

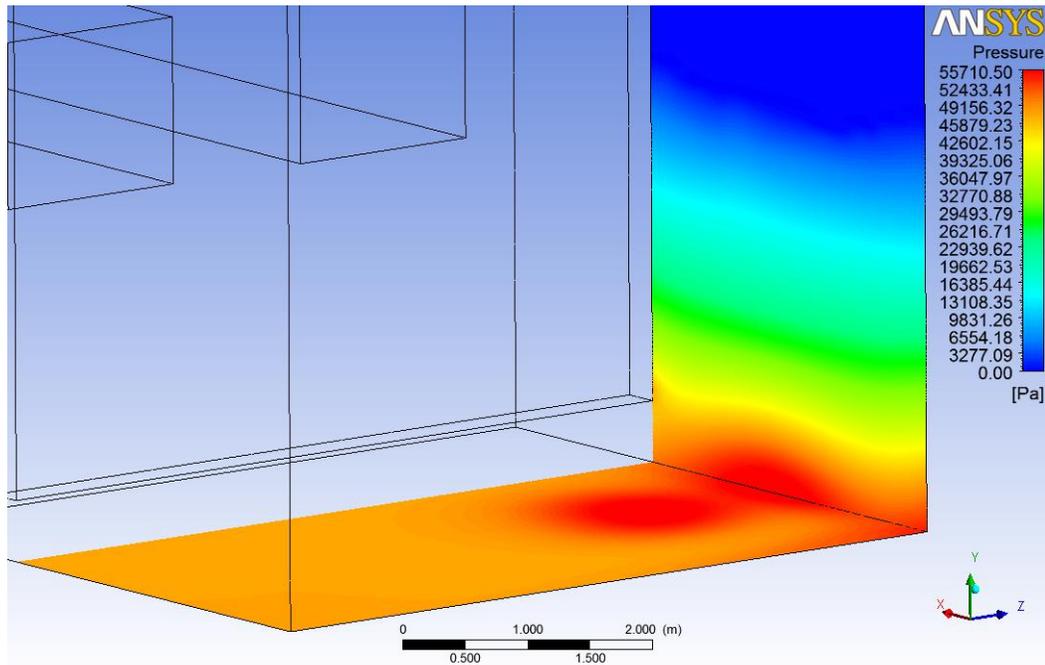


Figura 7.44. Contorno de presiones en el fondo, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 10500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

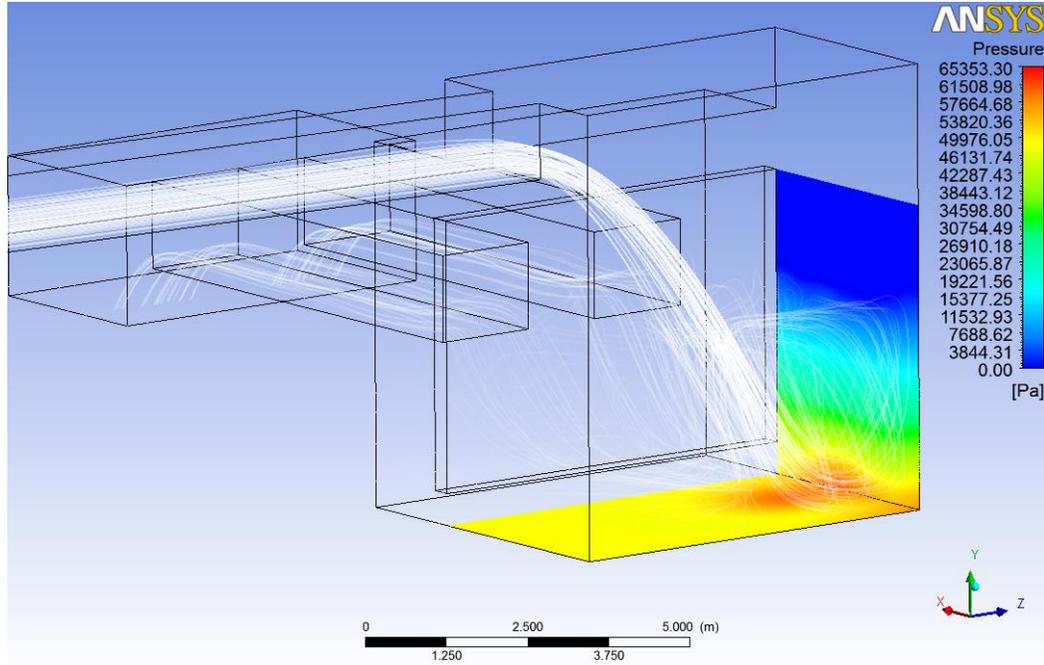


Figura 7.45. Contorno de presiones en el fondo, $Q=10500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado.
Vista isométrica posterior.

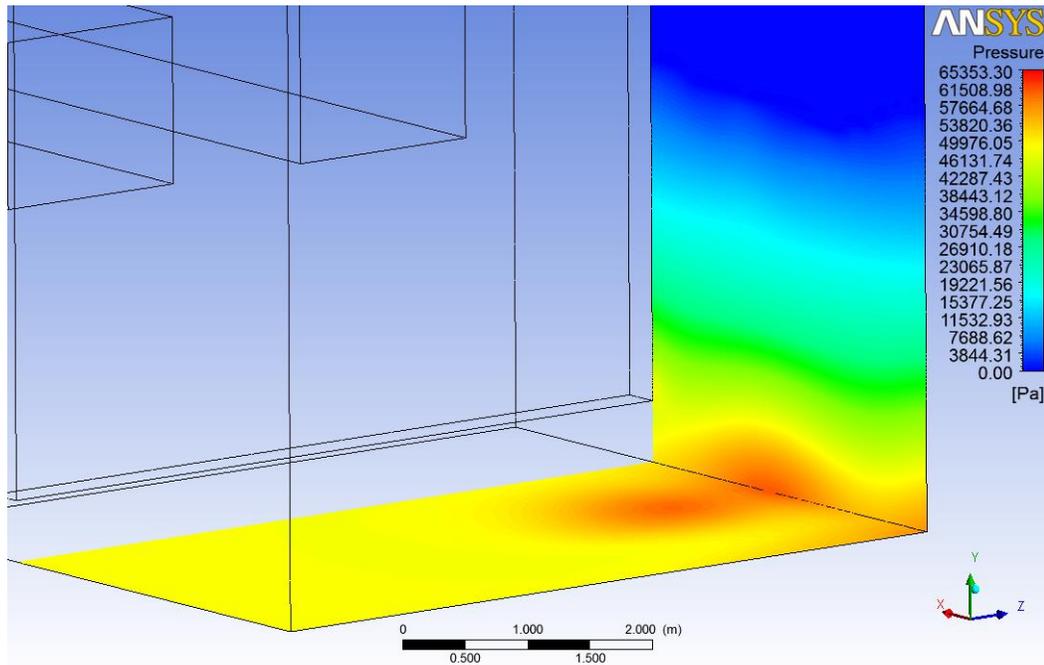


Figura 7.46. Contorno de presiones en el fondo, $Q=10500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado.
Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

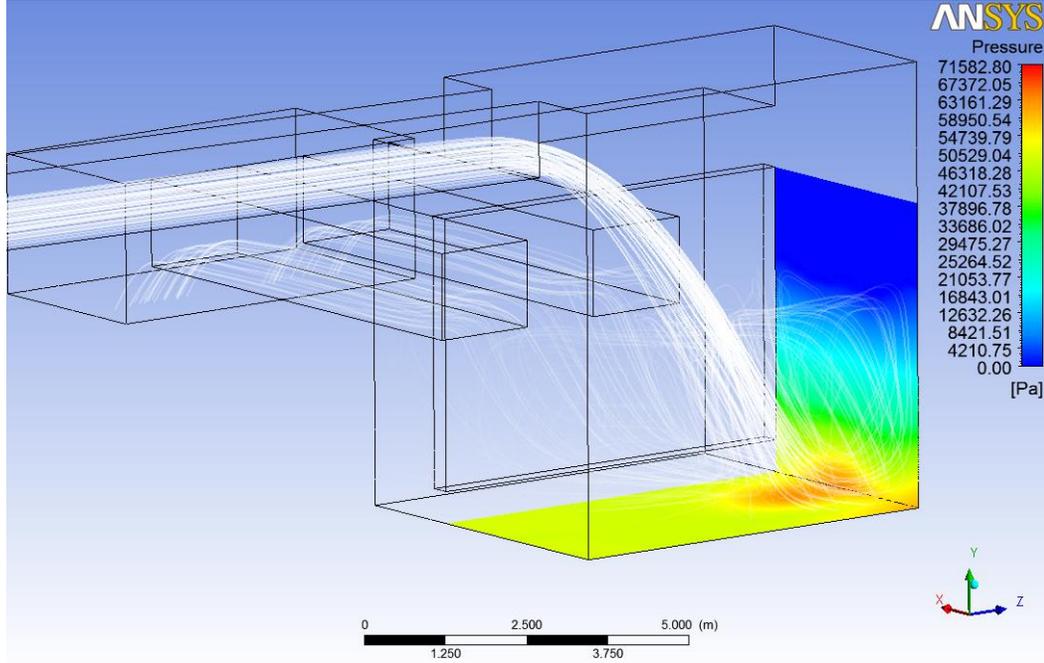


Figura 7.47. Contorno de presiones en el fondo, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado.
Vista isométrica posterior.

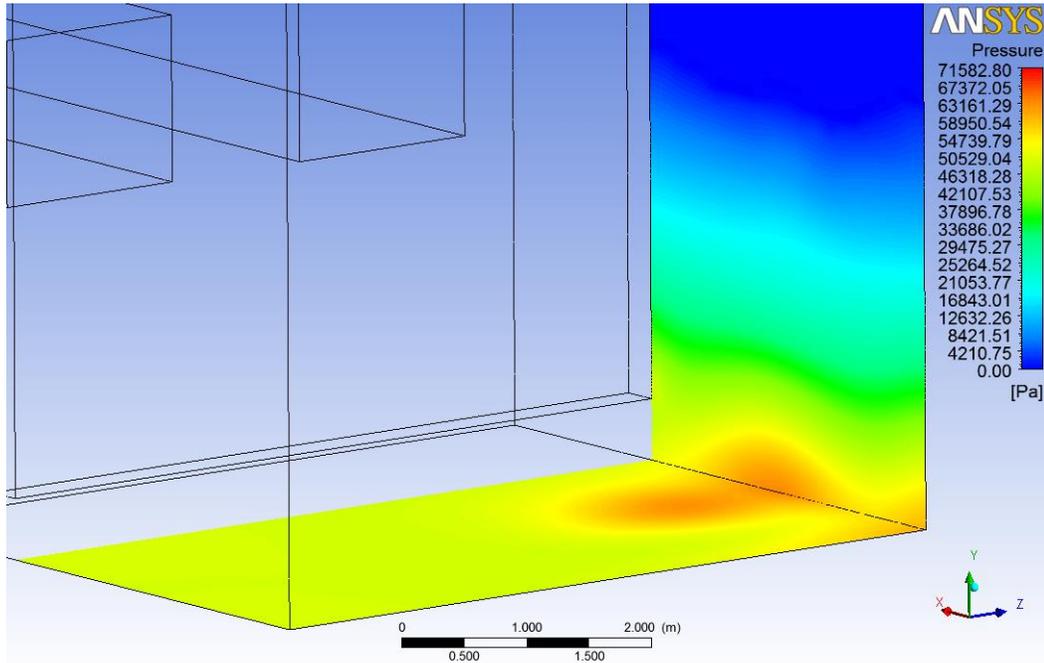


Figura 7.48. Contorno de presiones en el fondo, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado.
Vista isométrica posterior cerca.

$Q = 12500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

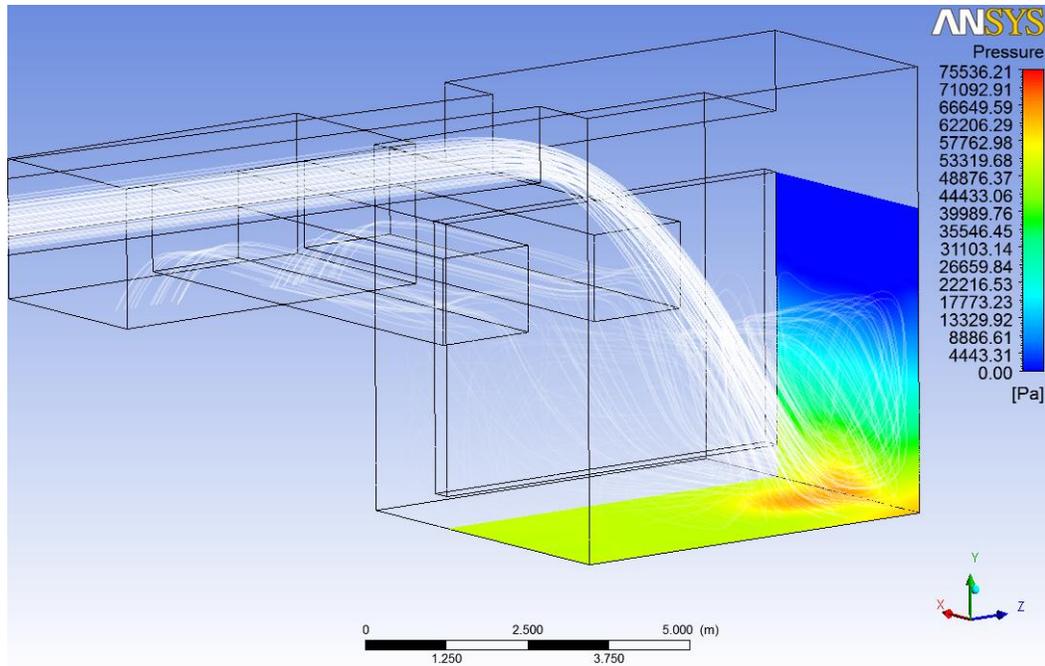


Figura 7.49. Contorno de presiones en el fondo, $Q=12500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado.
Vista isométrica posterior.

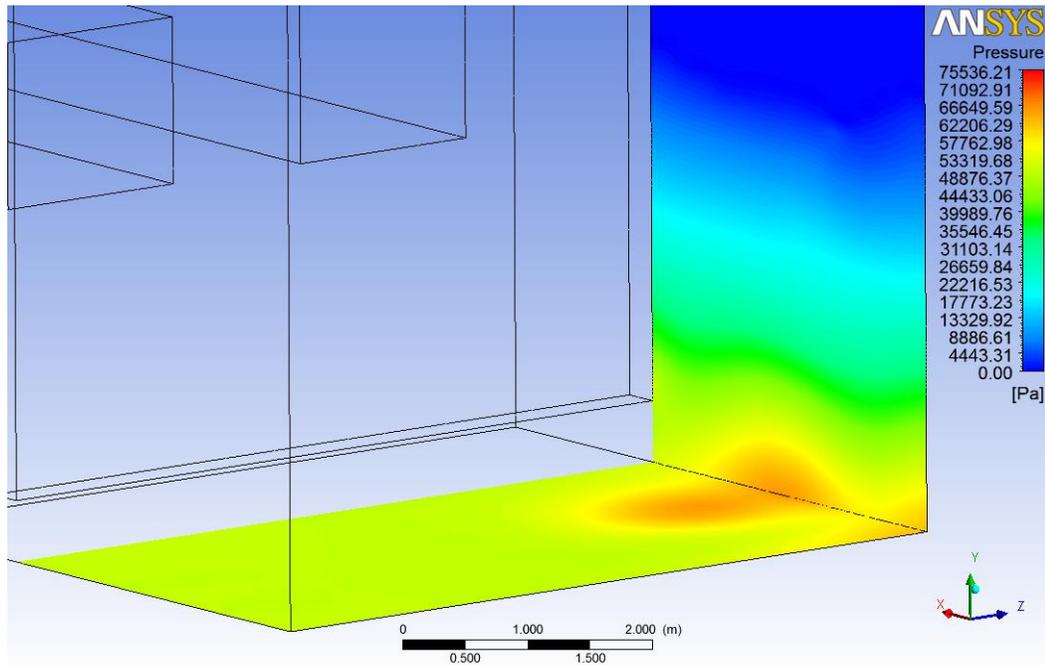


Figura 7.50. Contorno de presiones en el fondo, $Q=12500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso modificado.
Vista isométrica posterior cerca.

7.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS SEGUNDA ETAPA

7.6.1 Trayectoria y Velocidad del Chorro

Se observa que el chorro tiene una caída menor, debido al incremento en el nivel de relave dentro del cajón en comparación al caso base, lo que hace disminuir las velocidades de impacto con la superficie del colchón como era esperado.

Las etapas se distinguen de manera menos marcada, con una etapa de “caída” menor y una etapa de “expansión” más prolongada, siguiendo una trayectoria recta más notoria que en el caso anterior y llegando a velocidades inferiores. La etapa de “transición” ocurre a velocidades más bajas y de manera más suave, disipando la energía paulatinamente a medida que el chorro se acerca al fondo, lo que se aprecia por la menor pendiente de la curva de velocidad. La etapa de “deslizamiento” prácticamente no se percibe, disipando ya muy poco antes de llegar a la pared, lo que refleja la disminución en la energía recibida por la pared debido al impacto.

El ajuste realizado al parámetro C dio buenos resultados, logrando predecir las velocidades del chorro de buena manera a partir de los 2 [m] de recorrido dentro del colchón. Para casos donde la distancia recorrida por el chorro dentro del colchón sea menor la curva sigue teniendo una mala correlación con los datos.

7.6.2 Líneas de Corriente y Velocidades de Fondo y Pared

Las líneas de corriente para este caso mantienen las características del caso base, mostrando la misma dispersión del chorro al caer y las trayectorias radiales luego de impactar el fondo del cajón, pero a velocidades mucho menores. Además, se aprecia una distribución de velocidad más uniforme dentro del cajón, así como en la zona del orificio bajo el bafle, lo que ayuda a evitar la segregación de las partículas del relave.

Al analizar las velocidades en el fondo y pared del cajón se puede notar que las velocidades máximas son del orden de 3 [m/s], resultado altamente positivo en cuanto a los gradientes de velocidad en estas zonas que influyen directamente en los esfuerzos de corte.

Lo anterior es un reflejo de que la disipación la produce el mismo relave dentro del cajón y no los elementos estructurales.

7.6.3 Esfuerzos de Corte y Presiones

Los esfuerzos de corte en el fondo y la pared disminuyeron considerablemente, observándose un valor máximo en el fondo de 180 [Pa] para el caso de 12500 [m³/h]. Según lo discutido para el caso base, los esfuerzos de corte estarían dentro del rango seguro, bajo los 230 [Pa], donde el desgaste que se produce no se considera acelerado y permite una operación segura.

En cuanto a las presiones, si bien es cierto se observan valores más elevados en promedio, la presión de impacto es de 10800 [Pa] y 15800 [Pa] en el caso mínimo y máximo respectivamente. Estos valores son inferiores a los 18000 [Pa] considerados como valor límite a partir del cual se produce daño por impacto, por lo que se corrobora que las modificaciones producen mejoras en este aspecto, asegurando la vida útil del cajón.

8 CONCLUSIONES

El presente estudio realizado mediante simulación fluidodinámica computacional permite obtener las siguientes conclusiones:

- Se logró modelar el flujo de relaves en cajones disipadores en régimen permanente y obtener resultados coherentes, mostrando la validez de este tipo de análisis a pesar de la compleja fluidodinámica de estos sistemas.
- A partir del análisis de mallado se puede concluir que a partir de 730000 elementos los resultados son independientes del mallado.
- Se comprueba que hay una correlación entre las zonas de concentración de esfuerzos altos y las zonas de impacto (concentración de presión) con los daños observados en el fondo y paredes del cajón real.
- Se corrobora la importancia de la velocidad límite de diseño de cajones, igual a 6 [m/s], al encontrar una correlación directa entre las velocidades mayores a este valor cerca de las paredes y fondo del cajón y las zonas de desgaste observadas.
- La disipación dentro del colchón de pulpa resulta ser mayor a la considerada en la ecuación 2.28 utilizada para el diseño de los cajones. Se encontró un mejor ajuste para un valor de $C = 2$.
- Las modificaciones realizadas al cajón fueron efectivas, ya que se logró disminuir las velocidades del chorro al llegar al fondo del cajón y con esto obtener esfuerzos de corte y presiones de impacto menores que en el caso base, y dentro de los límites seguros de operación fijados en 230 [Pa] para los esfuerzos de corte y en 18000 [Pa] para la presión de impacto.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. B. Bird, R. C. Armstrong y O. Hassager, *Dynamics of Polymeric Liquids*, vol. 1, J. W. a. Sons, Ed., 1987.
- [2] J. Rayo, *Transporte Hidráulico de Sólidos. Curso de Perfeccionamiento.*, Instituto de Ingenieros en Minas de Chile, Junio 1982.
- [3] R. Fuentes, *Slurry Flow In Open Flumes Seminar*, Santiago, 2007.
- [4] B. E. Abulnaga, *Slurry Systems Handbook*, Ed. McGraw-Hill, 2002.
- [5] V. T. Chow, *Open-Channel Hydraulics*, Ed. McGraw-Hill, 1959.
- [6] R. Haldenwang, P. T. Slatter y R. P. Chhabra, «Laminar and transitional flow in open channels for non-Newtonian fluids,» de *15th International Conference on Hydrotransport, incorporating the 11th International Symposium of Freight Pipelines*, Banff, Canada, 3-5 de Junio, 2002.
- [7] L. Fernández, J. Martínez, A. González y R. Fuentes, «Flow of highly concentrated, extended particle size distribution slurries in open channels in laminar, transition and turbulent flow,» de *18th International Conference on Hydrotransport*, Rio de Janeiro, Brasil, 22-24 de Septiembre, 2010.
- [8] R. Durand, «Basic relationship of the transportation of solid in pipes - Experimental research,» de *Minnesota International Hydraulics Conference*, Minneapolis, Minnesota, 1953.
- [9] R. E. McElvain y I. Cave, «Transportation of tailings,» de *International Tailing Symposium*, Tucson, Arizona, USA, 1972.
- [10] J. Rayo, *Aplicación del transporte hidráulico de sólidos por tuberías a la industria minera, Memoria para optar al título de Ingeniero en Minas*, Universidad de Chile, 1974.
- [11] F. J. Dominguez, *Hydraulics*, 4th Edition, Santiago de Chile: Editorial Universitaria, 1974.
- [12] J. W. Daily y D. Harleman, *Fluid Dynamics*, Editorial Addison-Wesley, 1966.
- [13] ANSYS, Inc., *ANSYS CFX Release Notes for 14.0*.

- [14] G. J. Brown, «Erosion Prediction in Slurry pipeline tee-junctions.,» *Applied Mathematical Modelling* 26, pp. 155-170, 2002.
- [15] G. J. Brown, «Use of CFD to Predict and Reduce Erosion in an Industrial Slurry Piping System,» de *5th International Conference on CFD in the Process Industries*, Melbourne, Australia, Diciembre 2006.
- [16] F. Jalil, Modelamiento de Flujos de Pulpa de Cobre en Cajones de Distribución, Tesis de Magister en Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, Chile, Julio 2010.
- [17] L. G. Castillo y L. M. Carrillo, Numerical Simulation and Validation of Hydrodynamics Actions in Energy Dissipation Devices, Cartagena, Spain, 2011.
- [18] J. M. Carrillo, «Consideraciones del mallado aplicadas al cálculo de flujos bifásicos con las técnicas de dinámica de fluidos computacional,» de *IV Jornadas de Intruducción a la Investigación de la UPCT*, 2011.
- [19] F. R. Menter, «Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,» *AIAA-Journal*, vol. 32, nº 8, pp. 1598 - 1605, 1994.
- [20] J. E. Bardina, P. G. Huang y T. J. Coakley, Turbulence Modeling Validation Testing and Development, NASA Technical Memorandum 110446, 1997.
- [21] L. Schiller y A. Naumann, VDI Zeits, 77, p. 318, 1933.
- [22] F. R. Menter, M. Kuntz y R. Langtry, Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, Begell Huose, 2003.

ANEXOS – LÍNEAS DE CORRIENTE

Caso Base

$Q = 9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$

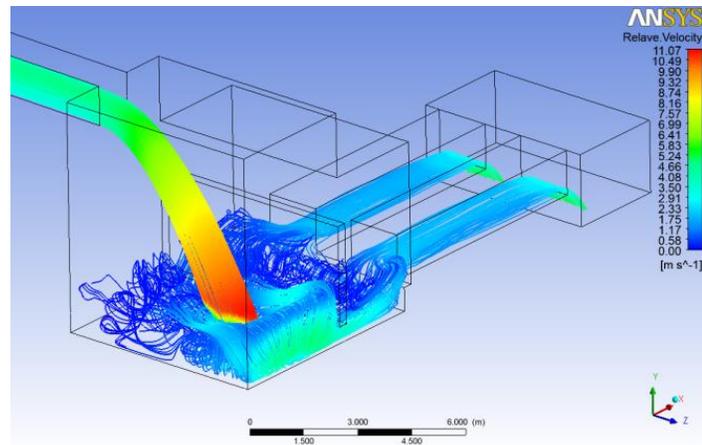


Figura I.1. Líneas de corriente, $Q=9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica anterior.

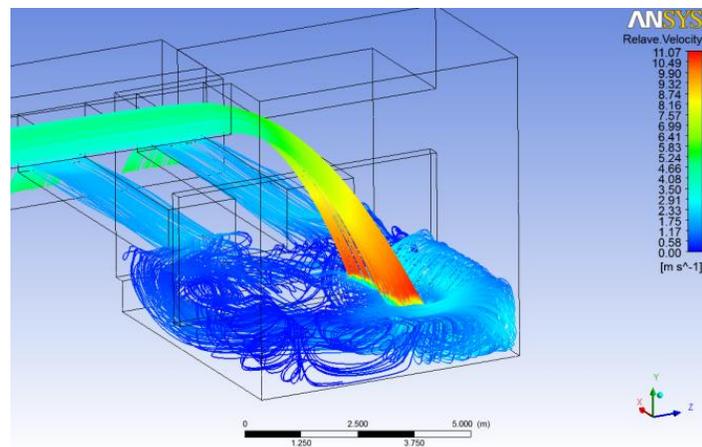


Figura I.2. Líneas de corriente, $Q=9500 \text{ [m}^3\text{/h]}$, caso base. Vista isométrica posterior.

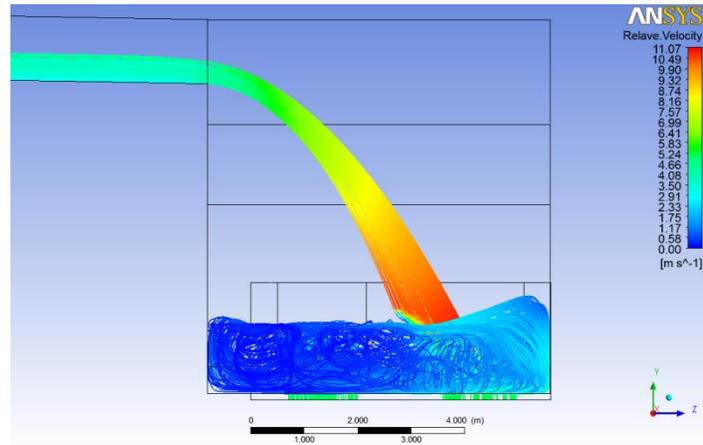


Figura I.3. Líneas de corriente, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista lateral.

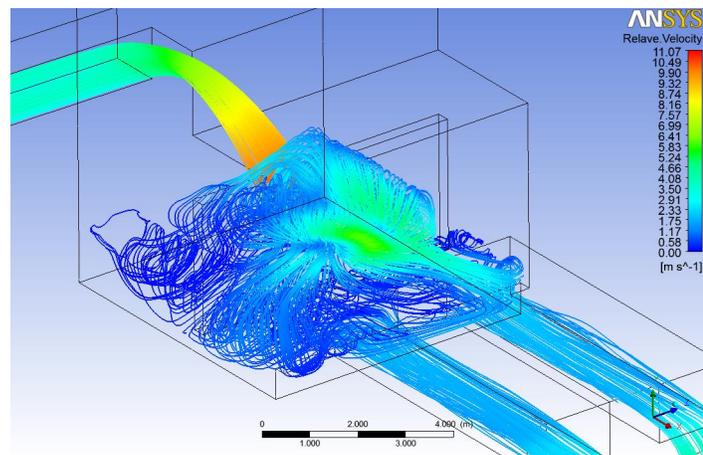


Figura I.4. Líneas de corriente, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica inferior.

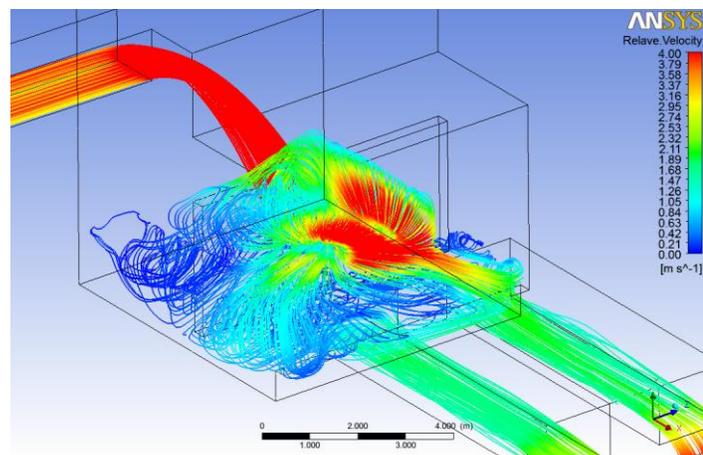


Figura I.5. Líneas de corriente, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, rango 0-4 [m/s], caso base. Vista isométrica inferior.

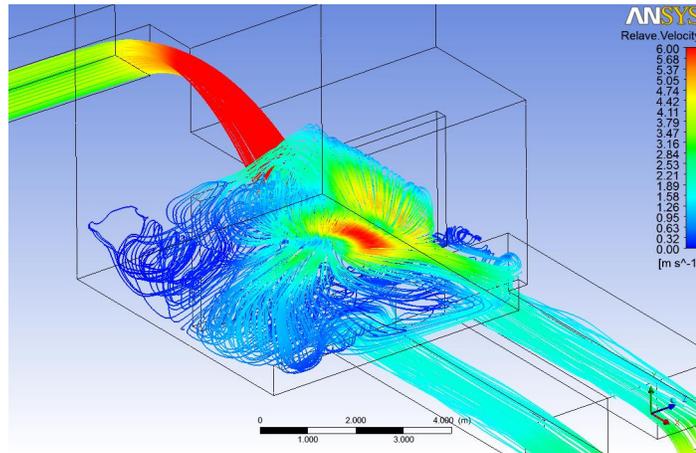


Figura I.6. Líneas de corriente, $Q=9500$ [m^3/h], rango 0-6 [m/s], caso base. Vista isométrica inferior.

$Q = 10500$ [m^3/h]

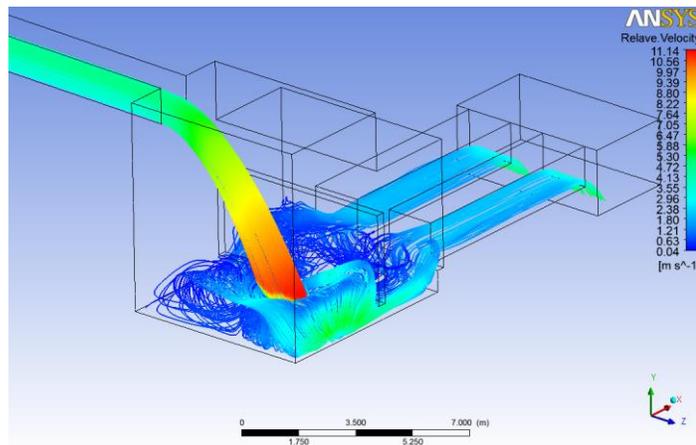


Figura I.7. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m^3/h], caso base. Vista isométrica anterior.

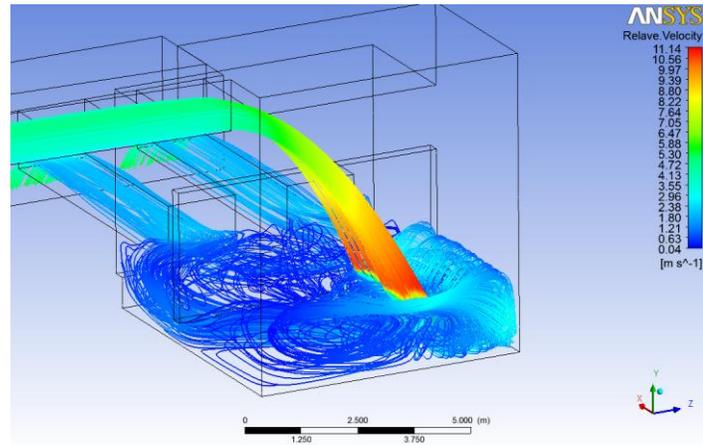


Figura I.8. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], caso base. Vista isométrica posterior.

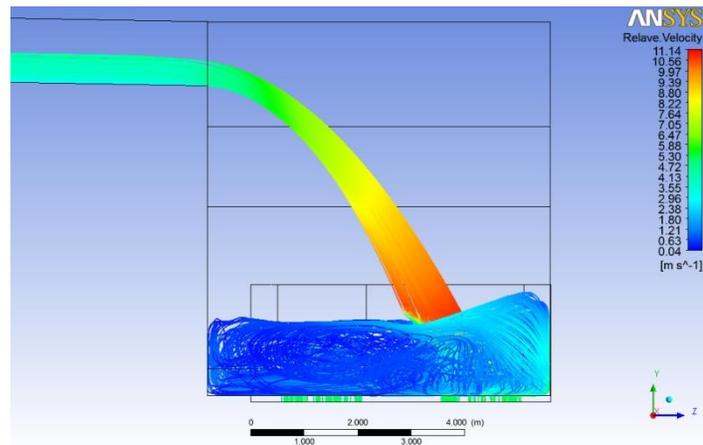


Figura I.9. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], caso base. Vista lateral.

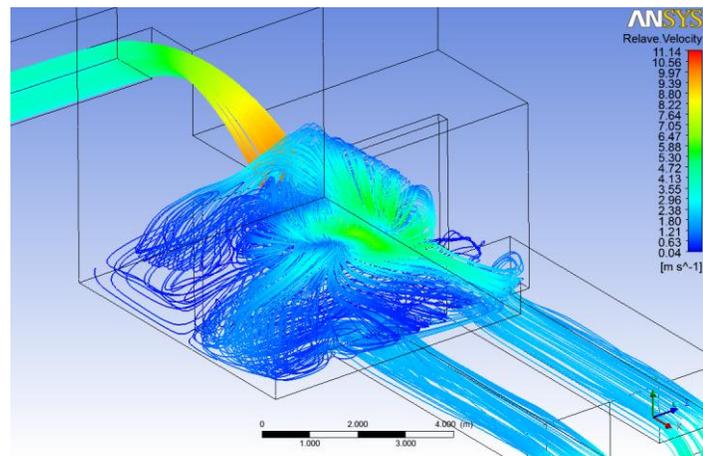


Figura I.10. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], caso base. Vista isométrica inferior.

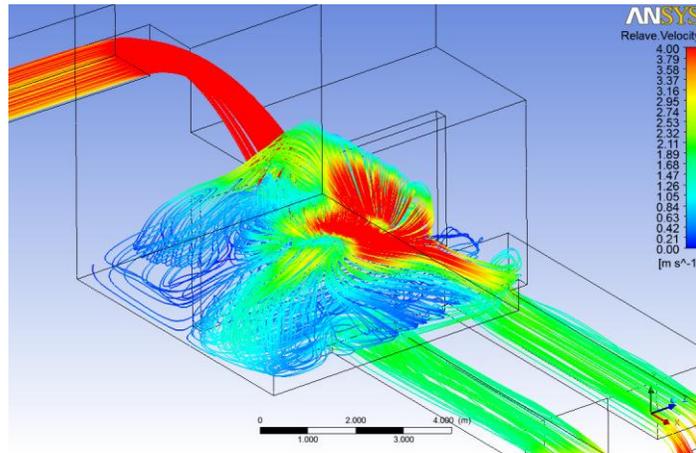


Figura I.11. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], rango 0-4 [m/s], caso base. Vista isométrica inferior.

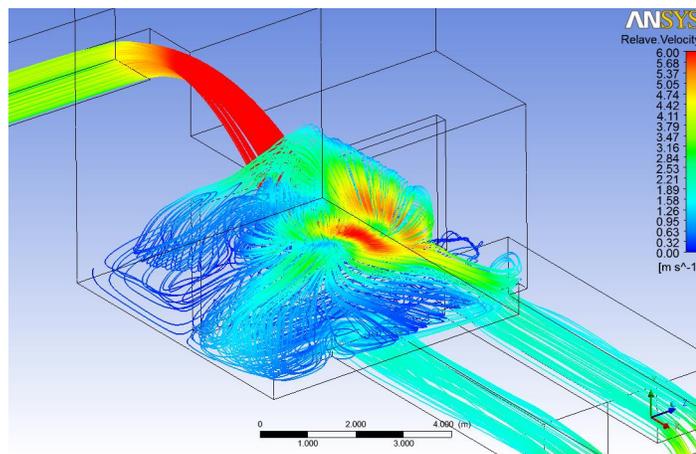


Figura I.12. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso base. Vista isométrica inferior.

Q = 11500 [m³/h]

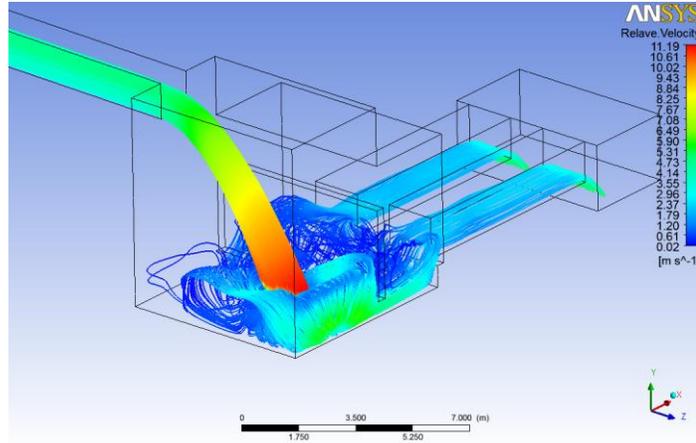


Figura I.13. Líneas de corriente, Q=11500 [m³/h], caso base. Vista isométrica anterior.

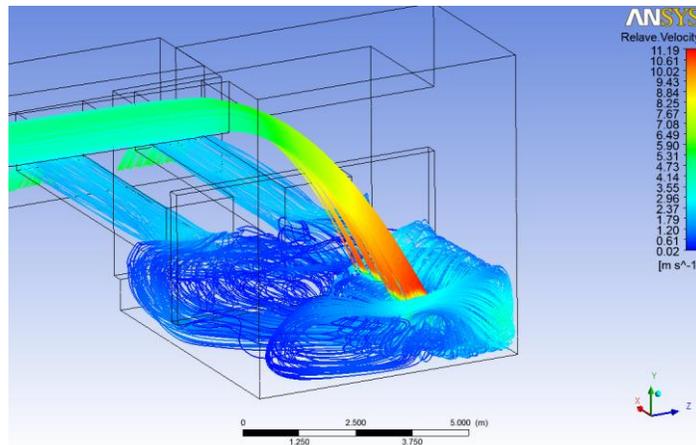


Figura I.14. Líneas de corriente, Q=11500 [m³/h], caso base. Vista isométrica posterior.

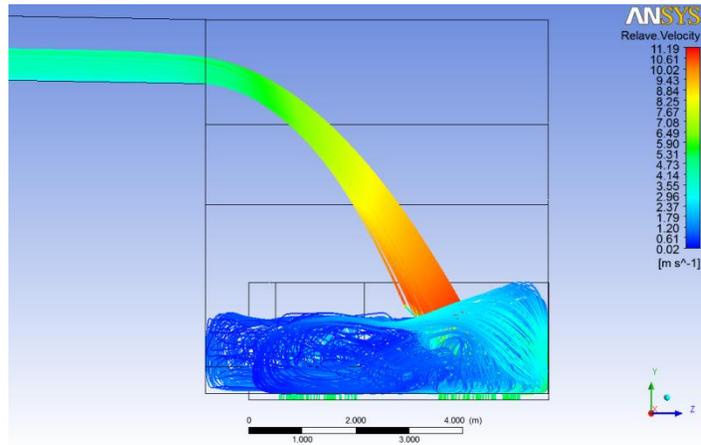


Figura I.15. Líneas de corriente, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista lateral.

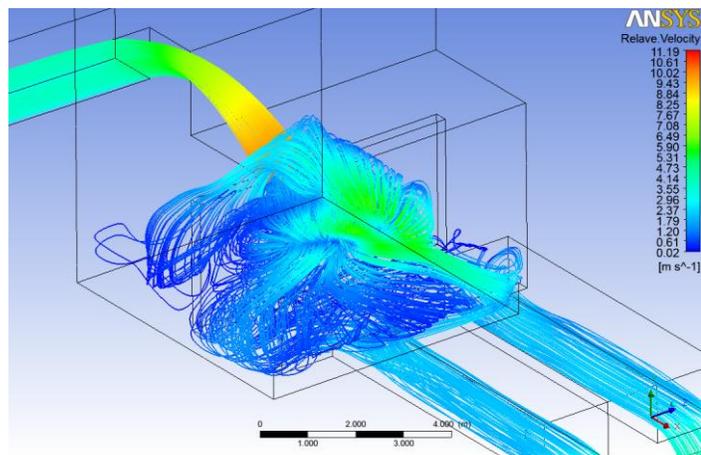


Figura I.16. Líneas de corriente, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica inferior.

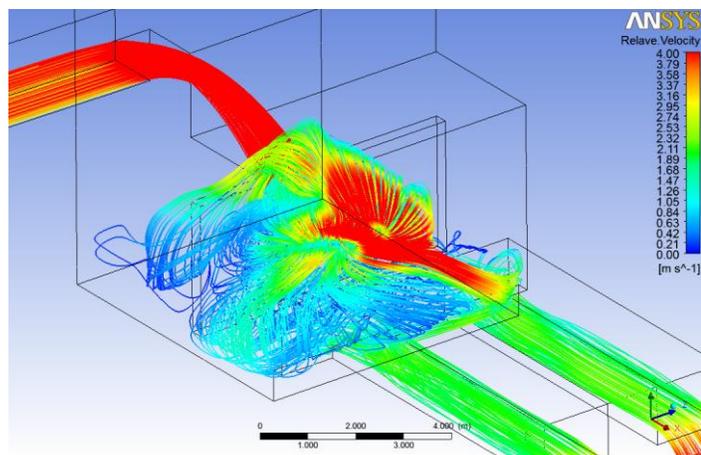


Figura I.17. Líneas de corriente, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, rango 0-4 [m/s], caso base. Vista isométrica inferior.

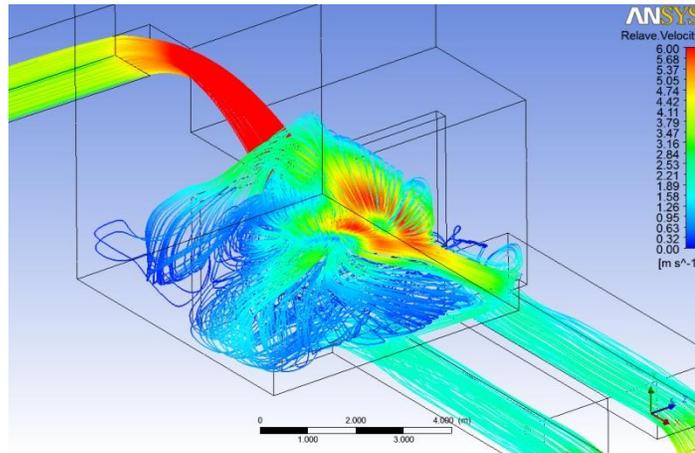


Figura I.18. Líneas de corriente, $Q=11500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso base. Vista isométrica inferior.

$Q = 12500$ [m³/h]

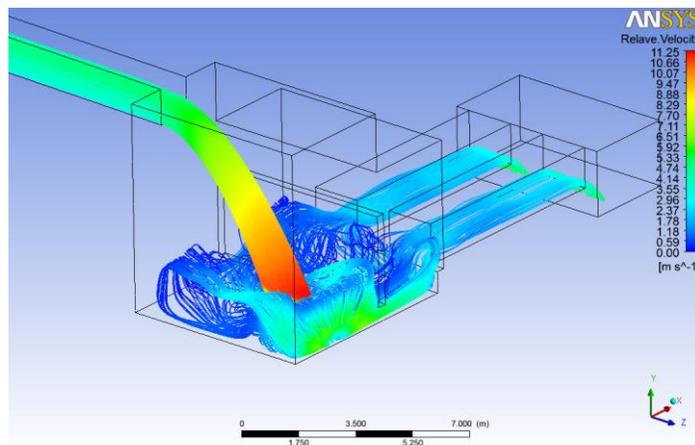


Figura I.19. Líneas de corriente, $Q=12500$ [m³/h], caso base. Vista isométrica anterior.

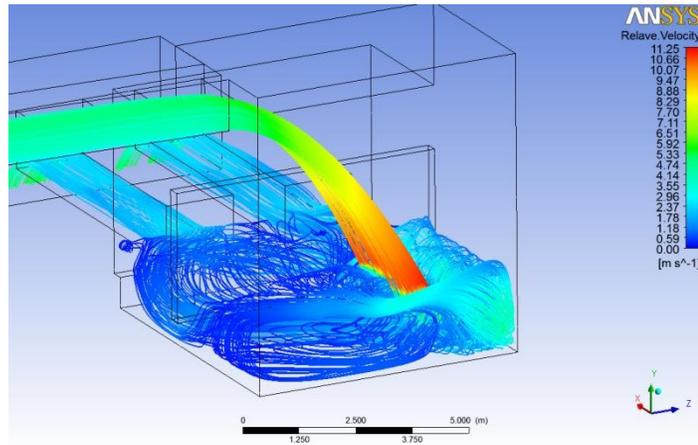


Figura I.20. Líneas de corriente, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica posterior.

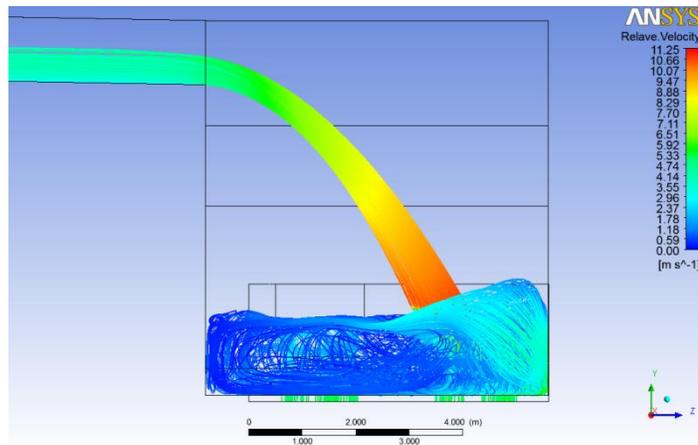


Figura I.21. Líneas de corriente, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista lateral.

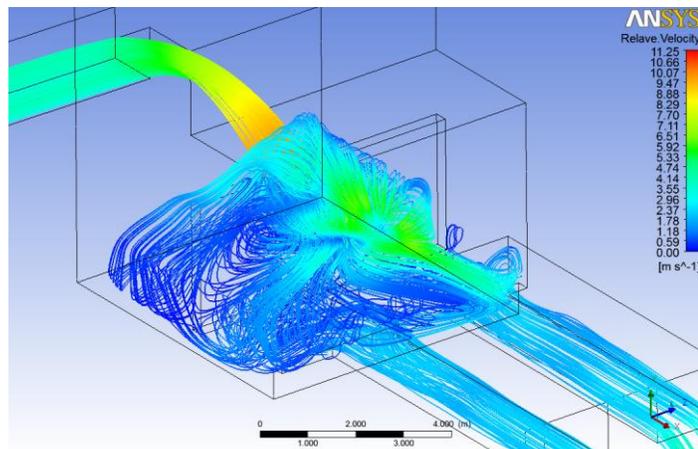


Figura I.22. Líneas de corriente, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso base. Vista isométrica inferior.

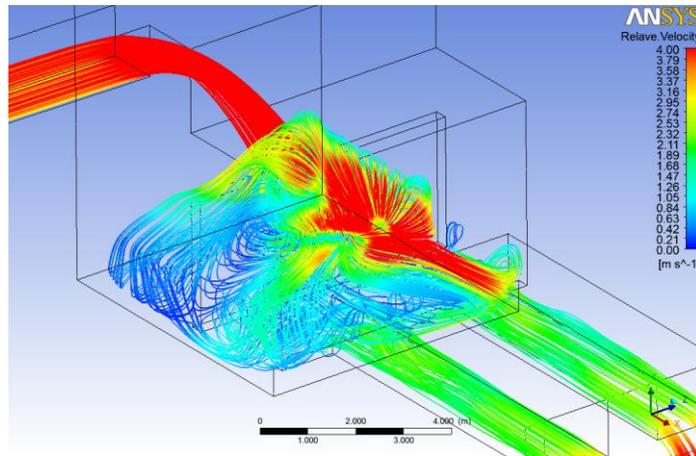


Figura I.23. Líneas de corriente, $Q=12500$ [m³/h], rango 0-4 [m/s], caso base. Vista isométrica inferior.

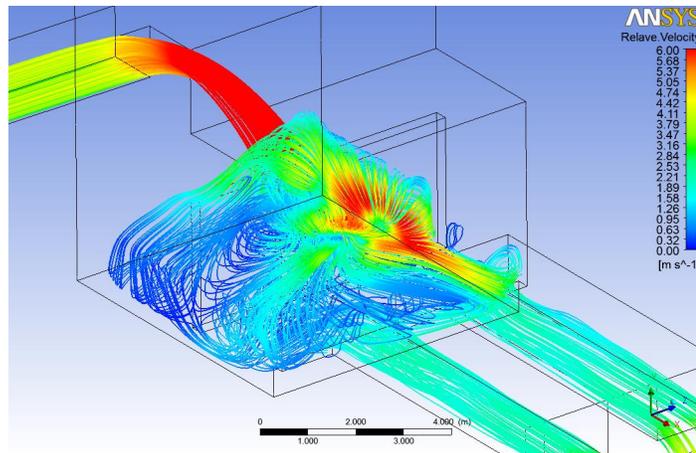


Figura I.24. Líneas de corriente, $Q=12500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso base. Vista isométrica inferior.

Caso Modificado

$Q = 9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

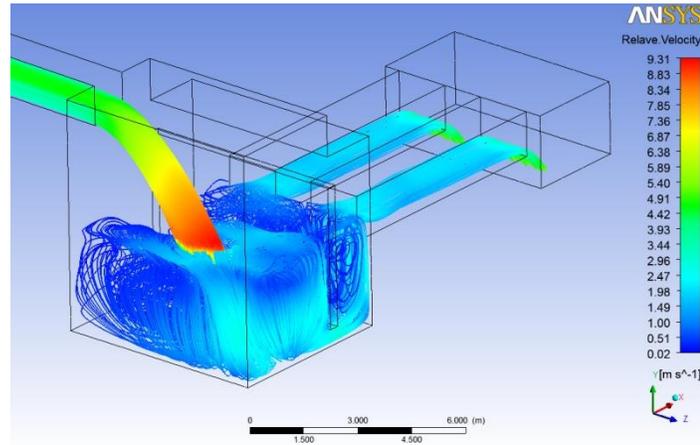


Figura I.25. Líneas de corriente, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica anterior.

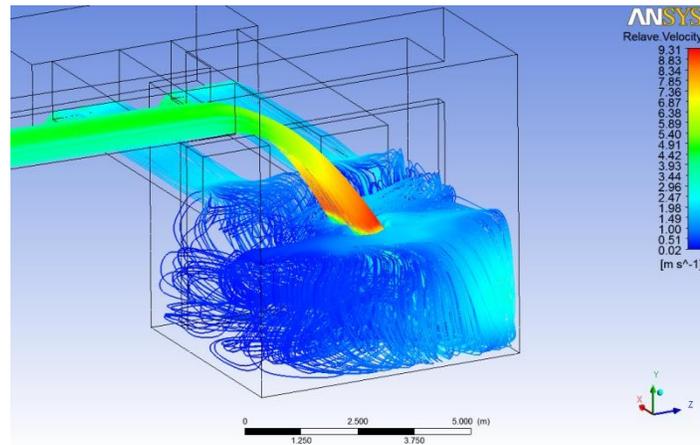


Figura I.26. Líneas de corriente, $Q=9500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior.

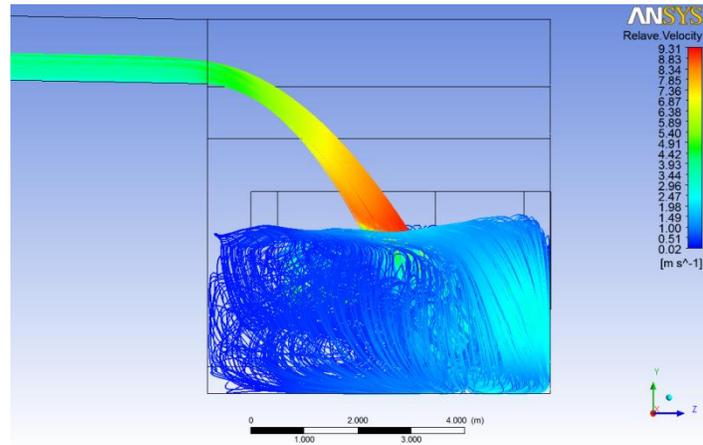


Figura I.27. Líneas de corriente, $Q=9500$ [m³/h], caso modificado. Vista lateral.

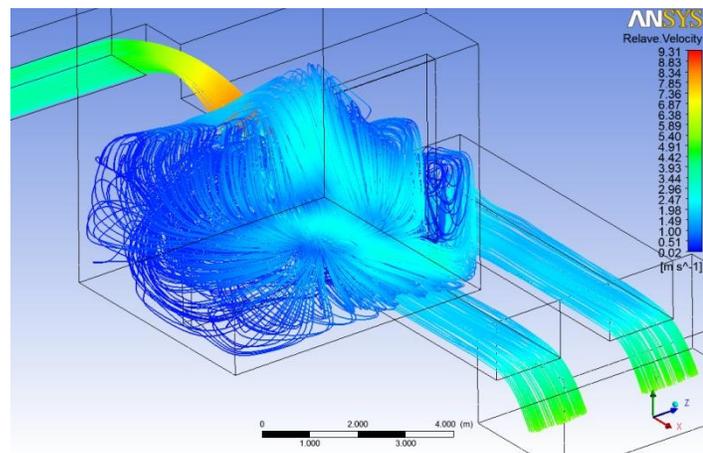


Figura I.28. Líneas de corriente, $Q=9500$ [m³/h], caso modificado. Vista isométrica inferior.

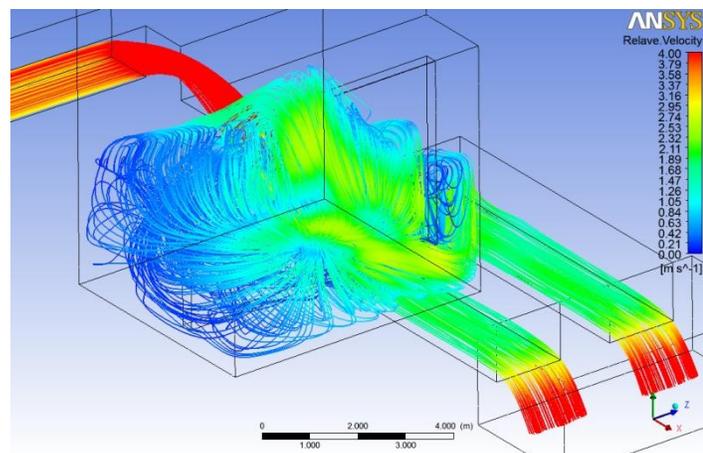


Figura I.29. Líneas de corriente, $Q=9500$ [m³/h], rango 0-4 [m/s], caso modificado. Vista isométrica inferior.

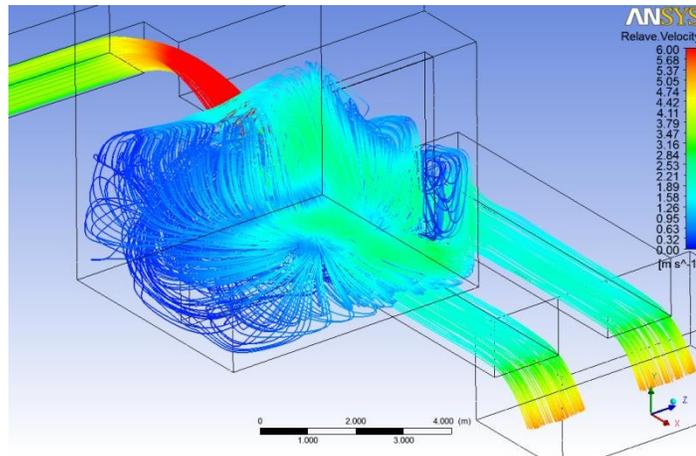


Figura I.30. Líneas de corriente, $Q=9500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso modificado. Vista isométrica inferior.

$Q = 10500$ [m³/h]

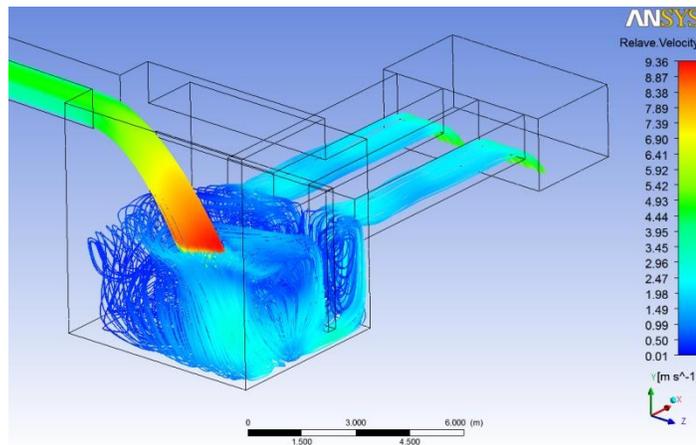


Figura I.31. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], caso modificado. Vista isométrica anterior.

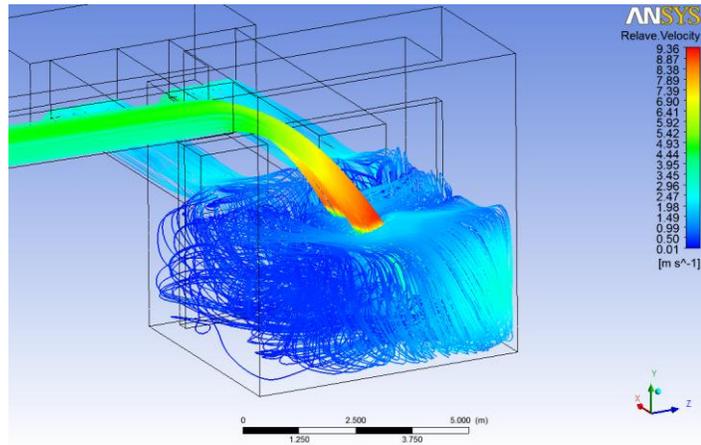


Figura I.32. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], caso modificado. Vista isométrica posterior.

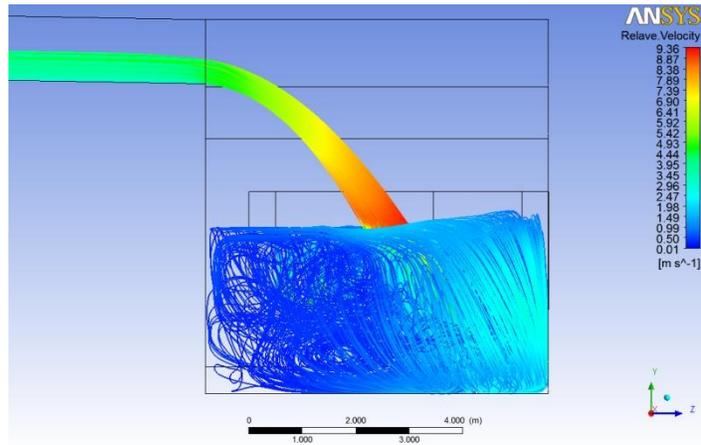


Figura I.33. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], caso modificado. Vista lateral.

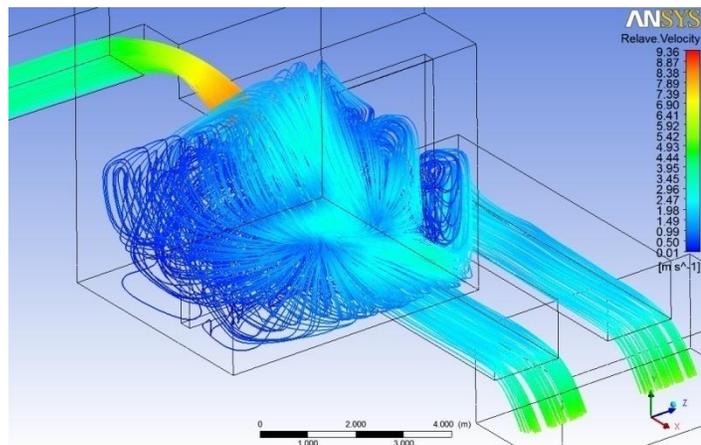


Figura I.34. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], caso modificado. Vista isométrica inferior.

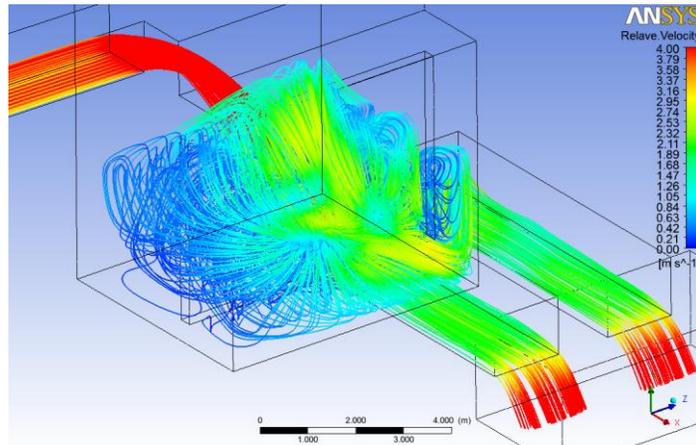


Figura I.35. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], rango 0-4 [m/s], caso modificado. Vista isométrica inferior.

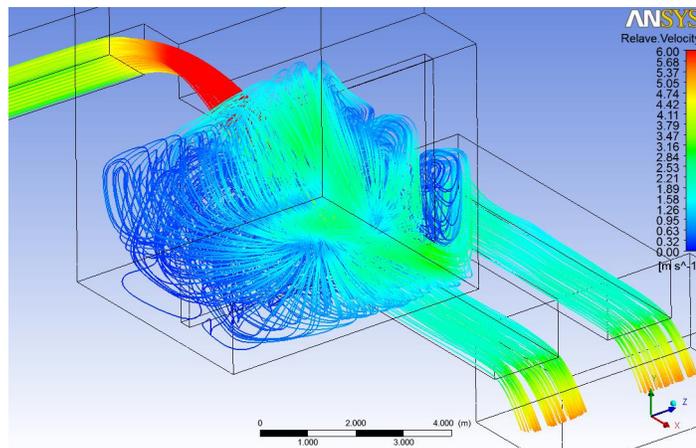


Figura I.36. Líneas de corriente, $Q=10500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso modificado. Vista isométrica inferior.

Q = 11500 [m³/h]

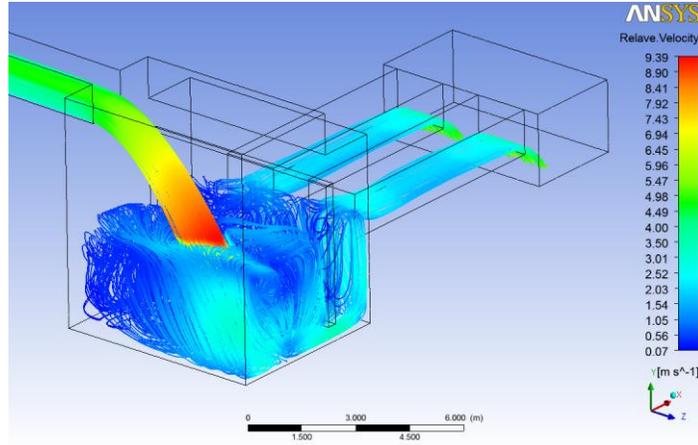


Figura I.37. Líneas de corriente, Q=11500 [m³/h], caso modificado. Vista isométrica anterior.

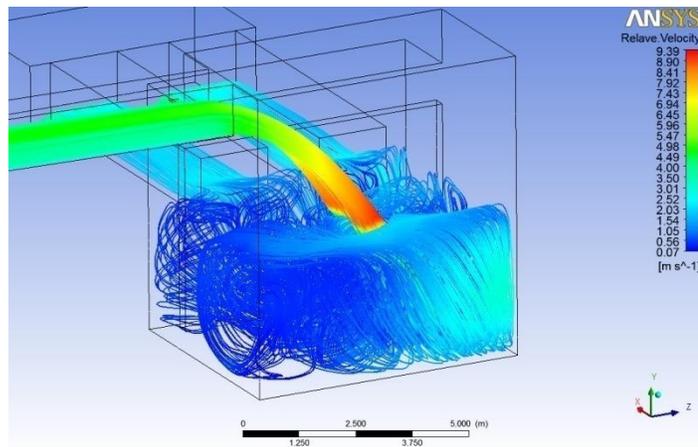


Figura I.38. Líneas de corriente, Q=11500 [m³/h], caso modificado. Vista isométrica posterior.

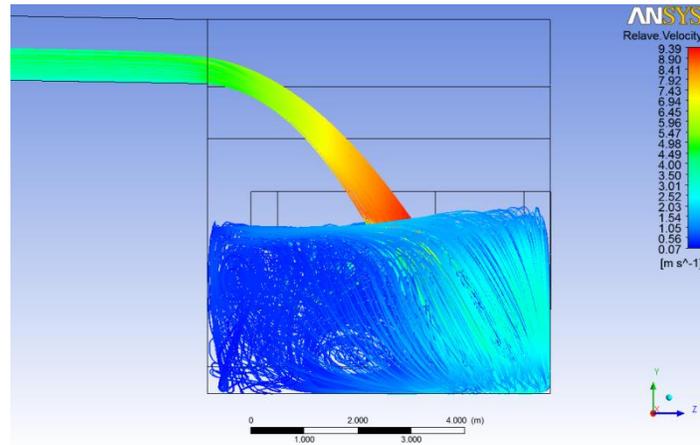


Figura I.39. Líneas de corriente, $Q=11500$ [m³/h], caso modificado. Vista lateral.

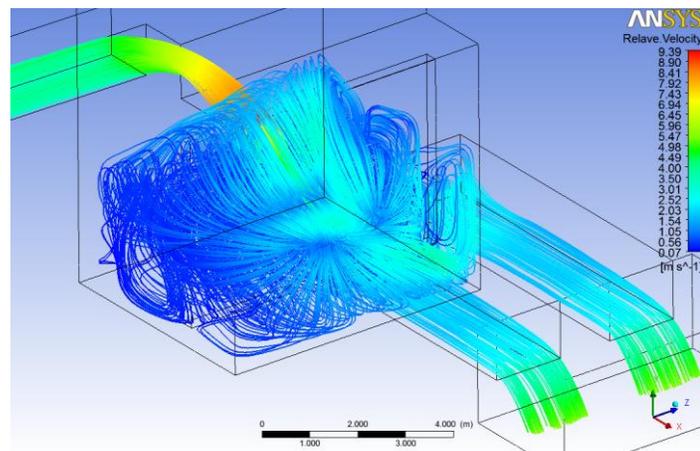


Figura I.40. Líneas de corriente, $Q=11500$ [m³/h], caso modificado. Vista isométrica inferior.

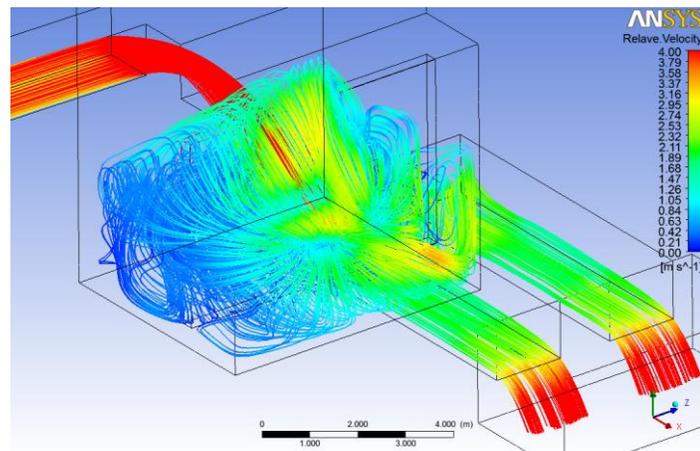


Figura I.41. Líneas de corriente, $Q=11500$ [m³/h], rango 0-4 [m/s], caso modificado. Vista isométrica inferior.

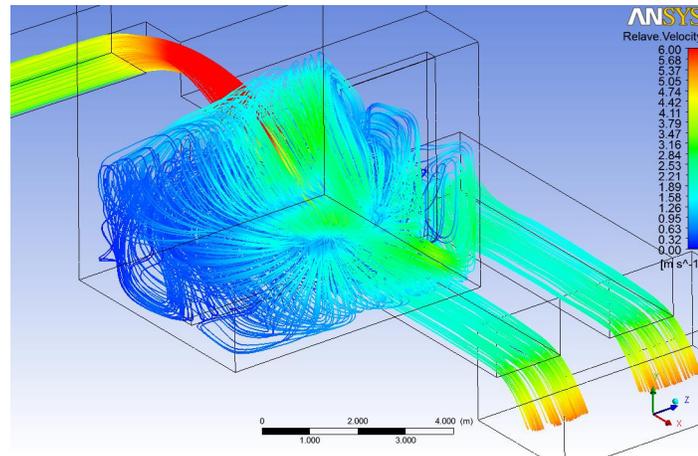


Figura I.42. Líneas de corriente, $Q=11500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, rango 0-6 [m/s], caso modificado. Vista isométrica inferior.

$Q = 12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$

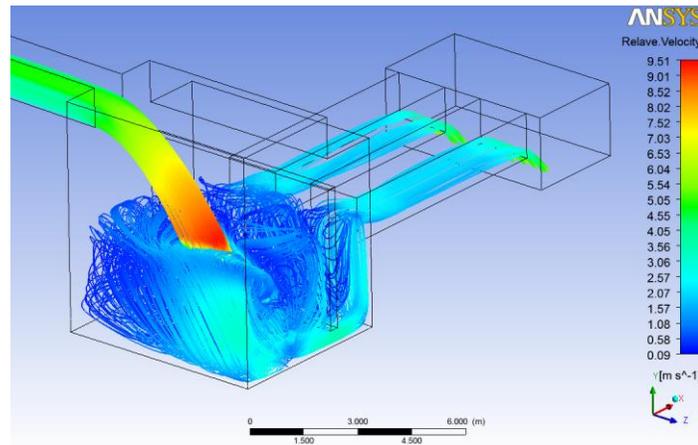


Figura I.43. Líneas de corriente, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica anterior.

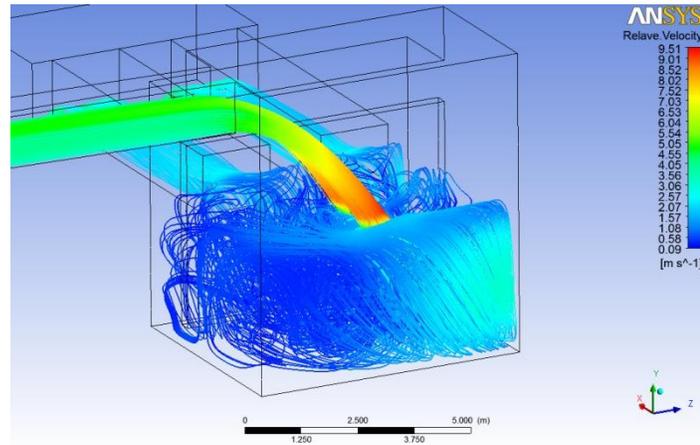


Figura I.44. Líneas de corriente, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica posterior.

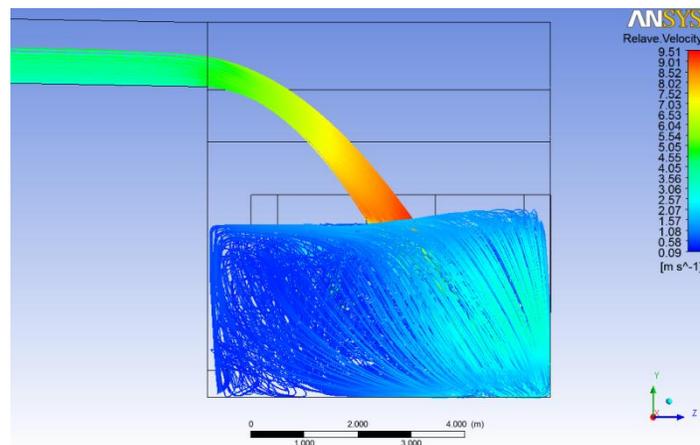


Figura I.45. Líneas de corriente, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista lateral.

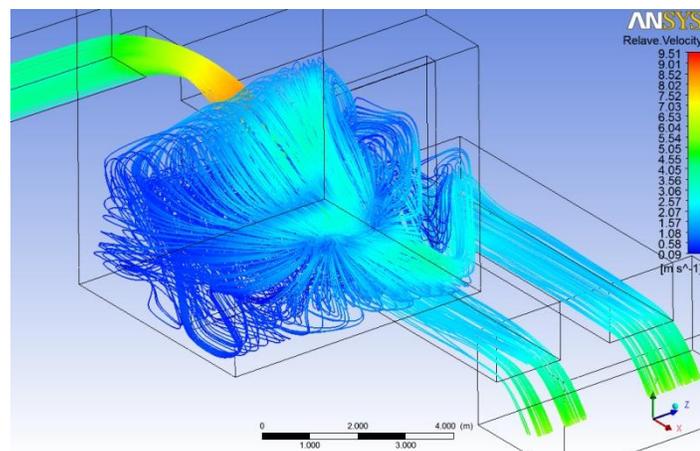


Figura I.46. Líneas de corriente, $Q=12500 \text{ [m}^3/\text{h]}$, caso modificado. Vista isométrica inferior.

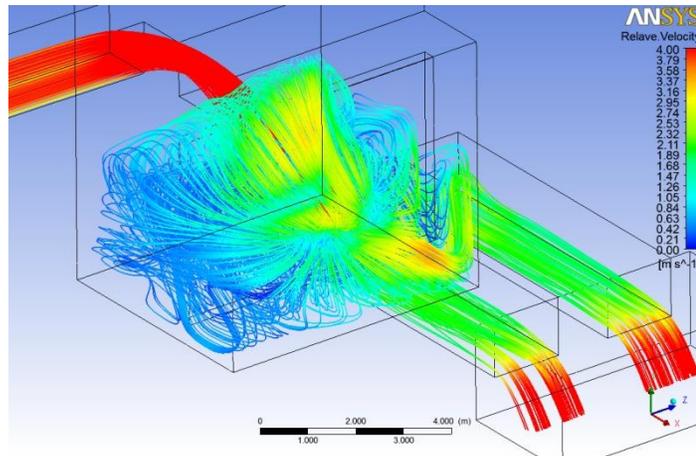


Figura I.47. Líneas de corriente, $Q=12500$ [m³/h], rango 0-4 [m/s], caso modificado. Vista isométrica inferior.

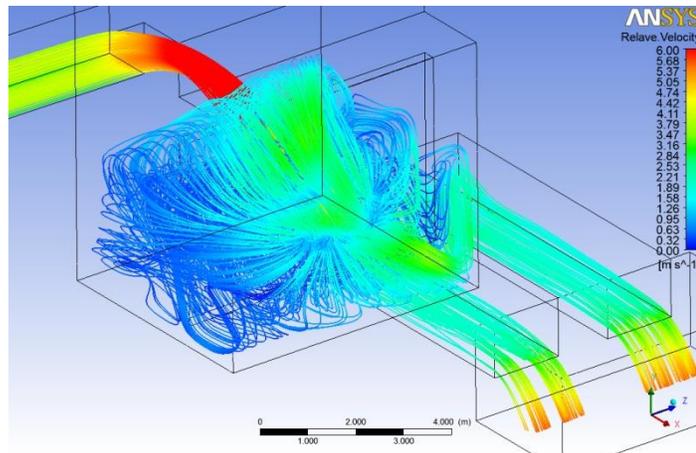


Figura I.48. Líneas de corriente, $Q=12500$ [m³/h], rango 0-6 [m/s], caso modificado. Vista isométrica inferior.