



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

**ANÁLISIS DE ADHESIÓN DE PULPA A PARED DE CAJONES DE  
TRANSPORTE MEDIANTE CFD**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

**MATÍAS ALBERTO PERALTA ÁLVAREZ**

PROFESOR GUÍA:  
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ  
JORGE RIVERA TORRES  
JUAN ROJAS OLMEDO

SANTIAGO DE CHILE  
2021

## ANÁLISIS DE ADHESIÓN DE PULPA A PARED DE CAJONES DE TRANSPORTE MEDIANTE CFD

En la industria minera, la optimización del transporte de pulpa es fundamental para dar continuidad a las etapas de procesamientos de minerales. El uso de canaletas y cajones para el transporte de pulpa es tópicos de estudio importante para los ingenieros, los cuales buscan optimizar los procesos y evitar daños estructurales de los sistemas.

Uno de los problemas habituales en este tipo de transporte de flujo, es el desgaste abrasivo producido por la pulpa que fluye en las paredes de los sistemas, siendo relevante la comprensión de los parámetros que influyen en la adhesión del flujo a una pared, como condición de diseño.

El objetivo del presente trabajo de título es analizar el efecto de distintas variables físicas que afectan en la adhesión de un flujo de pulpa a la pared de un cajón, mediante simulaciones fluidodinámicas, generando para ello, un análisis de sensibilidad de la velocidad de flujo, la concentración en peso para una pulpa de cobre y el redondeo del borde de la canaleta previa a la caída del cajón.

Los antecedentes investigados se dividen en cuatro tópicos, estos son: los fundamentos de fluidos, que comprende la caracterización de la pulpa y sus regímenes de transporte, fundamentos de canal abierto, que comprende teoría para cálculo de altura y velocidad de transporte de pulpa, fundamentos computacionales, que comprende breve explicación de modelos multifásicos disponibles en ANSYS, y finalmente, teoría de adhesión de flujo, que comprende referencias de autores que han investigado dicho fenómeno.

La metodología de trabajo corresponde a la definición de variables a estudiar, selección de modelos computacionales, validación de estos modelos, validación del comportamiento de flujo en canaletas, y simulación de todos los casos de estudio, para su posterior análisis.

Tras la modelación del problema, se concluye que la velocidad del flujo corresponde a la variable más influyente del fenómeno investigado. Mientras mayor sea la velocidad del flujo, mayor es la tendencia a desprenderse de la superficie, contrario al efecto que produce el aumento del redondeo del borde, que favorece a que la pulpa se mantenga adherida a la superficie.

Finalmente, se obtienen ecuaciones que permiten relacionar las variables estudiadas respecto al fenómeno de adhesión y una función que se condensa los resultados obtenidos en el estudio, la cual permite diferenciar los estados posibles del fenómeno analizado dependiendo de la velocidad y redondeo, para un  $C_p$  entre 15 y 60 %.



*A mis abuelos Julio Peralta y Mariela Araya por su amor incondicional*

***Gracias***

# Agradecimientos

Agradecer a mi familia, a mis amigos Joaquín y Héctor, a mi polola Camila y a todas las personas que me han acompañado durante este proceso.

Al equipo SYNTEC Ingeniería, en especial a Juan, Jorge y Cristian, por la oportunidad de poder de realizar este trabajo y ser parte de mi desarrollo profesional.

Y finalmente, a los profesores Álvaro y Williams por su tiempo y apoyo en el desarrollo del trabajo de título.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Objetivos . . . . .	2
1.2.1. Objetivo General . . . . .	2
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.3. Alcances . . . . .	2
1.4. Estructura del trabajo de título . . . . .	3
<b>2. Antecedentes específicos</b>	<b>4</b>
2.1. Fundamentos de fluidos . . . . .	4
2.1.1. Concentración de sólidos . . . . .	4
2.1.2. Densidad . . . . .	4
2.1.3. Viscosidad . . . . .	5
2.1.4. Caudal . . . . .	5
2.2. Clasificación de fluidos . . . . .	5
2.2.1. Fluidos newtonianos . . . . .	5
2.2.2. Fluidos no newtonianos . . . . .	6
2.2.3. Caracterización de flujos y tamaño de partículas . . . . .	7
2.3. Fundamentos de canal abierto . . . . .	8
2.3.1. Altura de flujo . . . . .	8
2.3.2. Tipos de flujo . . . . .	9
2.3.3. Estados de flujo . . . . .	10
2.3.3.1. Turbulencia del flujo . . . . .	10
2.3.3.2. Inestabilidad del flujo . . . . .	11
2.4. Fundamentos computacionales . . . . .	11
2.4.1. Modelo multifásico . . . . .	11
2.4.1.1. Modelo Euleriano-Euleriano . . . . .	11
2.4.1.2. Modelo Lagrangiano . . . . .	12
2.4.2. Modelos de turbulencia . . . . .	12
2.4.3. Mallado de dominio . . . . .	13
2.5. Teoría de adhesión en líquidos . . . . .	13
<b>3. Descripción del Problema</b>	<b>15</b>
<b>4. Metodología</b>	<b>16</b>
4.1. Metodología general . . . . .	16
4.2. Modelamiento fluidodinámico . . . . .	16
4.3. Características de hardware y software . . . . .	17

<b>5. Validación de comportamientos de flujo y modelos computacionales</b>	<b>18</b>
5.1. Perfil de velocidad . . . . .	18
5.1.1. Consideraciones de la simulación . . . . .	19
5.1.2. Dominio de estudio . . . . .	20
5.1.3. Discretización espacial . . . . .	20
5.1.4. Condiciones de borde . . . . .	21
5.1.5. Escenarios de análisis . . . . .	22
5.1.6. Resultados . . . . .	22
5.2. Fenómeno de adhesión . . . . .	25
5.2.1. Consideraciones de la simulación . . . . .	25
5.2.2. Dominio de estudio . . . . .	26
5.2.3. Discretización espacial . . . . .	26
5.2.4. Condiciones de borde . . . . .	27
5.2.5. Escenarios de análisis . . . . .	28
5.2.6. Resultados . . . . .	28
5.3. Comportamiento de flujo . . . . .	32
5.3.1. Consideraciones . . . . .	33
5.3.2. Altura de flujo en canal recto . . . . .	34
5.3.2.1. Dominio de estudio . . . . .	34
5.3.2.2. Discretización espacial . . . . .	34
5.3.2.3. Condiciones de borde . . . . .	36
5.3.2.4. Resultados . . . . .	36
5.3.3. Régimen de flujo en canal escalonado . . . . .	38
5.3.3.1. Dominio de estudio . . . . .	38
5.3.3.2. Discretización espacial . . . . .	38
5.3.3.3. Resultados . . . . .	39
<b>6. Esquema de trabajo</b>	<b>41</b>
6.1. Variables de análisis . . . . .	41
6.2. Casos de estudio . . . . .	42
6.3. Workbench paramétrico . . . . .	43
<b>7. Resultados y Análisis</b>	<b>47</b>
7.1. Simulación de caso base . . . . .	47
7.1.1. Consideraciones de la simulación . . . . .	47
7.1.2. Dominio de estudio . . . . .	48
7.1.3. Condiciones de borde . . . . .	48
7.1.4. Independencia de malla . . . . .	49
7.2. Barrido inicial de casos de estudio . . . . .	51
7.3. Refinamiento de casos de estudio . . . . .	57
7.3.1. Función resumen . . . . .	60
<b>8. Conclusiones</b>	<b>62</b>
8.1. Propuesta de mejora y posibles desafíos futuros . . . . .	63
<b>Bibliografía</b>	<b>64</b>



# Índice de Tablas

2.1.	Coefficiente de Manning ( $n$ ) [6] [5] . . . . .	9
5.1.	Parámetros del modelo . . . . .	19
5.2.	Variables geométricas del canal experimental [8] . . . . .	19
5.3.	Parámetros de malla . . . . .	21
5.4.	Resultados de altura según modelo de turbulencia, simulación de de perfil de velocidad . . . . .	24
5.5.	Parámetros del modelo . . . . .	25
5.6.	Valores de calidad de malla . . . . .	27
5.7.	Resumen de resultados . . . . .	30
5.8.	Parámetros del modelo . . . . .	33
5.9.	Escenarios de análisis, regímenes de flujo experimentales [15] . . . . .	33
5.10.	Parámetros de malla . . . . .	35
5.11.	Escenarios de análisis considerados . . . . .	37
5.12.	Valores de calidad de malla . . . . .	39
6.1.	Parámetros fijos del problema . . . . .	41
6.2.	Valores de velocidad e inclinación en barrido inicial . . . . .	42
6.3.	Valores de $C_p$ , densidad y viscosidad dinámica en barrido inicial . . . . .	43
6.4.	Valores de redondeo barrido inicial . . . . .	43
7.1.	Parámetros de flujo del modelo . . . . .	47
7.2.	Parámetros geométricos del caso base . . . . .	48
7.3.	Consideraciones de las 6 mallas probadas . . . . .	50
7.4.	Consideraciones de las 6 mallas probadas . . . . .	50
7.5.	Parámetros de malla número 5 . . . . .	51
7.6.	Resultados de refinamiento de casos con $C_p = 15\%$ . . . . .	57
7.7.	Resultados de refinamiento de casos con $C_p = 30\%$ . . . . .	57
7.8.	Resultados de refinamiento de casos con $C_p = 45\%$ . . . . .	58
7.9.	Resultados de refinamiento de casos con $C_p = 60\%$ . . . . .	58
7.10.	Coefficientes de ecuación 7.13 . . . . .	61

# Índice de Ilustraciones

1.1.	Canal de sección trapezoidal, Chuquicamata [2]	1
2.1.	Comportamiento reológico de fluidos [3]	6
2.2.	Regímenes de flujos newtonianos para pulpas [3]	7
2.3.	Combinación de los modelos $\kappa - \varepsilon$ y $\kappa - \omega$	13
2.4.	Métrica de calidad de malla	13
2.5.	Teapot effect [12]	14
3.1.	Flujo de pulpa real simulado. Fuente: SYNTEC	15
5.1.	Esquema de la configuración utilizada para la realización del experimento sobre el canal rectangular inclinado [8]	18
5.2.	Perfil de velocidad, flujo CMC con 5,26% $[w/w]$ y un caudal de 6,79 $[l/s]$	19
5.3.	Dominio de estudio del perfil de velocidad de flujo no newtoniano	20
5.4.	Discretización espacial del dominio	21
5.5.	Valores de calidad ortogonal y asimetría de la malla	21
5.6.	Condiciones de borde impuestas en el modelo	22
5.7.	Perfil de velocidad a los 5 $[m]$ con modelo de turbulencia $\kappa - \varepsilon$	23
5.8.	Perfil de velocidad a los 5 $[m]$ con modelo de turbulencia $\kappa - \omega$ SST	23
5.9.	Perfil de velocidad a los 5 $[m]$ con modelo de turbulencia $\kappa - \omega$ BSL	23
5.10.	Perfil de velocidad a los 5 $[m]$ con modelo de turbulencia SSG	24
5.11.	Flujo en superficie cilíndrica [14]	25
5.12.	Dominio del estudio del fenómeno de adhesión	26
5.13.	Discretización espacial del dominio y detalle de esta misma	26
5.14.	Valores de calidad ortogonal y asimetría de la malla	27
5.15.	Condiciones de borde impuestas en el modelo	28
5.16.	Fración volumétrica de agua para el caso con velocidad = 0,5 $[m/s]$ y altura = 1 $[mm]$	29
5.17.	Punto de separación, velocidad = 0,5 $[m/s]$	29
5.18.	Punto de separación, velocidad = 0,7 $[m/s]$	30
5.19.	Efecto de altura en ángulo de separación, velocidad = 0,5 $[m/s]$	31
5.20.	Efecto de altura en ángulo de separación, velocidad = 0,7 $[m/s]$	31
5.21.	Diferenciación de Nappe flow y Skimming flow [15]	32
5.22.	Configuración experimental de canal escalonado [15]	33
5.23.	Dominio de estudio correspondiente a estanque y canal recto	34
5.24.	Discretización espacial del dominio y detalle de esta misma	35
5.25.	Valores de calidad de malla	35
5.26.	Condiciones de borde impuestas en el modelo	36
5.27.	Velocidad de agua, vista lateral	37
5.28.	Superficie libre de agua	37
5.29.	Dominio de estudio correspondiente a canal escalonado	38

5.30.	Discretización espacial del dominio y detalle de esta misma . . . . .	38
5.31.	Valores de calidad ortogonal y asimetría de la malla . . . . .	39
5.32.	Contorno de velocidad, caudal de 10 [l/s] . . . . .	39
5.33.	Contorno de velocidad, caudal de 20 [l/s] . . . . .	40
5.34.	Contorno de velocidad, caudal de 40 [l/s] . . . . .	40
5.35.	Contorno de velocidad, caudal de 50 [l/s] . . . . .	40
6.1.	Pestaña Parámetros de ANSYS Workbench . . . . .	44
6.2.	Zona de medición de altura de flujo . . . . .	44
6.3.	Zona de medición de velocidad de flujo . . . . .	45
6.4.	Puntos de medición de fracción volumétrica de pulpa en la pared de caída . . .	45
6.5.	Visualización de 2 figuras reportadas en la pestaña Parámetros de ANSYS Workbench . . . . .	46
7.1.	Dominio del estudio del trabajo de investigación. . . . .	48
7.2.	Condiciones de borde impuestas en el modelo . . . . .	49
7.3.	Discretización espacial del dominio y detalle de esta misma . . . . .	49
7.4.	Análisis de independencia de malla . . . . .	50
7.5.	Valores de calidad ortogonal y asimetría de la malla . . . . .	51
7.6.	Rango de velocidad donde ocurre el despegue de flujo con redondeo de 0 [mm]; a) Velocidad de 0,578 [m/s], b) Velocidad de 1,093 [m/s] . . . . .	52
7.7.	Rango de velocidad donde ocurre el despegue de flujo con redondeo de 25 [mm]; a) Velocidad de 1,582 [m/s], b) Velocidad de 2,075 [m/s] . . . . .	52
7.8.	Rango de velocidad donde ocurre el despegue de flujo con redondeo de 50 [mm]; a) Velocidad de 2,566 [m/s], b) Velocidad de 3,046 [m/s] . . . . .	53
7.9.	Rango de velocidad donde ocurre el despegue de flujo con redondeo de 75 [mm]; a) Velocidad de 3,046 [m/s], b) Velocidad de 3,498 [m/s] . . . . .	53
7.10.	Rango de velocidad donde ocurre el despegue de flujo con redondeo de 100 [mm]; a) Velocidad de 3,498 [m/s], b) Velocidad de 3,976 [m/s] . . . . .	54
7.11.	Barrido inicial, azul representa flujo pegado a la pared de caída y rojo representa el escenario cuando se despegla pulpa de la superficie . . . . .	54
7.12.	Barrido inicial considerando curvas de ajustes . . . . .	55
7.13.	Barrido inicial, azul representa flujo pegado a la pared de caída y rojo representa el escenario cuando se despegla pulpa de la superficie . . . . .	56
7.14.	Barrido inicial considerando curvas de ajustes . . . . .	56
7.15.	Curvas de ajustes obtenidas del refinamiento de casos sobre el barrido inicial .	59
7.16.	Curvas de ajustes obtenidas del refinamiento de casos sobre el barrido inicial .	60

# Capítulo 1

## Introducción

La minería es una de las actividades económicas más importantes de Chile, siendo este el mayor productor y exportador de cobre a nivel global, con una participación del 29 % de la producción [1]. A raíz de esto, es de gran interés comprender la física de los procesos involucrados en la industria minera, como lo es el manejo del mineral para desarrollar tecnologías que permitan optimizar los procesos.

La mayoría de las operaciones de transporte de mineral se realiza formando pulpas, definidas como una mezcla de partículas sólidas con agua. El transporte de pulpas es de vital importancia en los procesos de una planta, siendo fundamental para dar continuidad a las etapas de procesamiento de minerales. En Chile, es típico el uso del transporte hidráulico gravitacional, como canaletas abiertas (ver figura 1.1), debido a las condiciones topográficas favorables.



Figura 1.1: Canal de sección trapezoidal, Chuquicamata [2]

El trabajo realizado en esta memoria comprende un análisis de sensibilidad de las variables que afectan en que un flujo de pulpa se adhiera a la pared de un cajón minero cuando es transportado desde una canaleta rectangular. Para efectuar el análisis se realizarán simulaciones fluidodinámicas de pulpa transportada a través de una canaleta con el software ANSYS-CFX.

## 1.1. Motivación

Diseñar sistemas de transporte para la minería requiere conocimiento de las variables físicas de un fluido. Un fenómeno típico en esta industria es el desgaste de una superficie por la abrasión que generan las partículas transportadas en una pulpa, cuyo análisis comprende un conjunto de estudios teóricos y empíricos del comportamiento de los fluidos, las partículas y su interacción con los sólidos.

Hoy en día, la ingeniería asistida por computadora permite el desarrollo de proyectos basados en simulación. La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD por su sigla en inglés, es una herramienta que ayuda a analizar y entender el comportamiento de los fluidos, combinando la teoría de la mecánica de fluidos y el cálculo numérico. En este trabajo, se usa para simular varios escenarios con el fin de analizar el fenómeno de adhesión de flujo, optimizando tiempo y costo requerido en el estudio.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Analizar el efecto de la velocidad de flujo, concentración de sólidos en peso y el redondeo del borde de una canaleta sobre el fenómeno de adhesión de flujo de pulpa a una pared.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Simular la caída de un flujo de pulpa desde una canaleta a un cajón.
- Validar el comportamiento esperado de flujo con simulaciones con agua y fluido no newtoniano.
- Analizar la influencia de las variables estudiadas en el fenómeno de adhesión.
- Desarrollar un ajuste matemático que permita relacionar los parámetros estudiados con el fenómeno de adhesión de pulpa a la pared.

## 1.3. Alcances

El trabajo principal contempla 340 simulaciones en estado estacionario de una pulpa a través de una canaleta rectangular, donde se varía la velocidad de flujo, concentración de sólidos en peso y el redondeo del borde de la canaleta.

El flujo multifásico considerado corresponde a un modelo de fases continuas (Euleriano-Euleriano) sin partículas. Además, los casos de estudio seleccionados para el análisis son en base a datos operacionales y antecedentes bibliográficos. No considera ensayos experimentales.

## 1.4. Estructura del trabajo de título

Este trabajo se divide en los siguientes 6 capítulos:

- **Capítulo 2: Antecedentes específicos.** Incluye los fundamentos de flujos, caracterización de fluidos, fundamentos de flujo en canal abierto, modelos computacionales y teoría sobre adhesión de líquidos a superficies.
- **Capítulo 3: Descripción del problema.** Se presenta la problemática a resolver.
- **Capítulo 4: Metodología.** Incluye la metodología general y particular de los distintos modelos de estudio.
- **Capítulo 5: Validación de modelos.** Comprende 3 modelos estudiados para validar la correcta representación de la adhesión de flujo y el comportamiento de este en una canaleta.
- **Capítulo 6: Resultados y Análisis.** Se resuelve el objetivo principal del trabajo analizando los resultados obtenidos.
- **Capítulo 7: Conclusiones.** Se presenta un resumen de los principales resultados del trabajo y puntos de inicio a futuras investigaciones.

# Capítulo 2

## Antecedentes específicos

### 2.1. Fundamentos de fluidos

Una pulpa corresponde a una mezcla de partículas sólidas en un fluido portador, por lo general, agua. Las características de una pulpa están ligadas a varios factores, siendo éstas, la cantidad de partículas, su distribución, la concentración de sólidos en la fase líquida y el tamaño de las partículas, así como los regímenes de flujo también dependen de características asociadas al nivel de turbulencia y viscosidad del fluido, entre otras variables.

A continuación se detallan las propiedades relevantes del fluido que caracterizan una pulpa.

#### 2.1.1. Concentración de sólidos

La concentración de sólidos se puede expresar en términos de peso o volumen. Las ecuaciones 2.1 y 2.2 muestran las fórmulas respectivas para su cálculo.

$$C_v = \frac{C_p \cdot \rho_m}{\rho_s} \quad (2.1)$$

$$C_p = \frac{C_v \cdot \rho_s}{\rho_m} \quad (2.2)$$

Donde:

- $C_p$  = Concentración de sólidos en peso.
- $C_v$  = Concentración de sólidos en volumen.
- $\rho_m$  = Densidad de mezcla.
- $\rho_s$  = Densidad de fase sólida.

#### 2.1.2. Densidad

La densidad de la pulpa es una función de la densidad del fluido, densidad de las partículas sólidas y la concentración de sólidos en peso [3]. Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\rho_m = \frac{100}{\frac{C_p}{\rho_s} + \frac{100-C_p}{\rho_l}} \quad (2.3)$$

Donde:

- $\rho_l$  = Densidad de fase líquida.

### 2.1.3. Viscosidad

La viscosidad corresponde a la resistencia que opone un fluido a la deformación por un esfuerzo de corte. A continuación, se presentan modelos para el cálculo de la viscosidad en función de la concentración de sólido en volumen y la viscosidad del líquido. La ecuación de Thomas (2.4) no posee restricción para  $C_v$  [4] y la ecuación de Wellmann (2.5), que fue obtenida con experiencias en relaves chilenos [5].

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = 1 + 2,5 \cdot C_v + 10,05 \cdot C_v^2 + 0,00273 \cdot e^{16,16 \cdot C_v} \quad (2.4)$$

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = \frac{e^{-10,4 \cdot C_v}}{\left(1 - \frac{C_v}{0,62}\right)^8} \quad (2.5)$$

Donde:

- $\mu_m$  = Viscosidad de mezcla.
- $\mu_l$  = Viscosidad de fase líquida.

### 2.1.4. Caudal

El caudal determina la cantidad de volumen o masa que atraviesa una sección transversal, se calcula a partir de las ecuaciones 2.6 y 2.7 respectivamente.

$$Q_v = A_t \cdot v_m \quad (2.6)$$

$$Q_m = Q_v \cdot \rho_m \quad (2.7)$$

Donde:

- $Q_v$  = Caudal volumétrico.
- $Q_m$  = Caudal másico.

## 2.2. Clasificación de fluidos

Según el comportamiento reológico, un fluido puede ser clasificado como:

### 2.2.1. Fluidos newtonianos

Los fluidos newtonianos se caracterizan por tener una viscosidad constante respecto al esfuerzo de corte, la cual se representa mediante la ecuación 2.8.

$$\tau = \mu \cdot \gamma \quad (2.8)$$

Donde:



- $\tau$  = Esfuerzo de corte.
- $\mu$  = Viscosidad.
- $\gamma$  = Gradiente de velocidad ( $\gamma = dv/dy$ ).

### 2.2.2. Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos son aquellos cuya viscosidad no es contante, varía con la velocidad de deformación. Estos pueden clasificarse en plástico de Bingham, pseudoplástico, dilatante y pseudoplástico con tensión de fluencia como se observa en la figura 2.1.

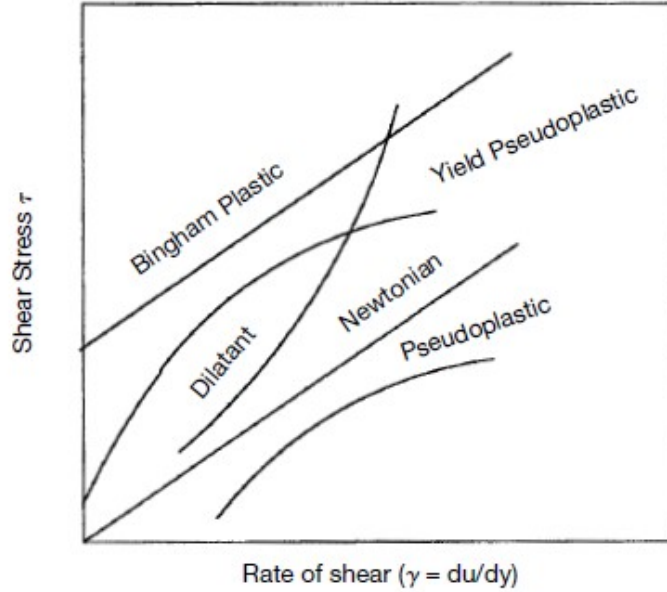


Figura 2.1: Comportamiento reológico de fluidos [3]

- **Plástico de Bingham:** Este fluido debe superar un esfuerzo de fluencia mínimo para ponerse en movimiento, una vez alcanzado dicho estado tiene un comportamiento similar a un fluido newtoniano. La ecuación 2.9 describe el modelo:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.9)$$

Donde:

- $\eta$  = Coeficiente de viscosidad no newtoniana
- $\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$
- **Pseudoplásticos:** Este tipo de fluido requiere un esfuerzo de corte infinitesimal para iniciar su movimiento y su viscosidad disminuye a medida que aumenta la velocidad de corte. La ecuación 2.10 describe el comportamiento de este fluido mediante una ley de potencia:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.10)$$

Donde:

- $k$  = Factor de consistencia de ley de potencia.
  - $n$  = Índice de comportamiento ( $n < 1$ ).
- **Dilatante:** La viscosidad aumenta a medida que aumenta la velocidad de corte. Se describe su comportamiento mediante ley de potencia con la ecuación 2.10, pero se diferencia de los fluidos pseudoplásticos en que su índice es mayor a 1.
  - **Pseudoplástico con tensión de fluencia:** Este fluido posee un comportamiento similar al fluido pseudoplástico, pero se diferencia en que debe superar un esfuerzo mínimo para iniciar el movimiento. Se describe su comportamiento mediante la ecuación conocida como Herschel-Bulkley (2.11):

$$\tau = \tau_0 + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.11)$$

### 2.2.3. Caracterización de flujos y tamaño de partículas

Se diferencian cuatro regímenes de transporte de partículas en un fluido, los cuales dependen del tamaño de partículas, velocidad de flujo y concentración de sólidos. En la figura 2.2 se observan estos cuatro regímenes de flujo.

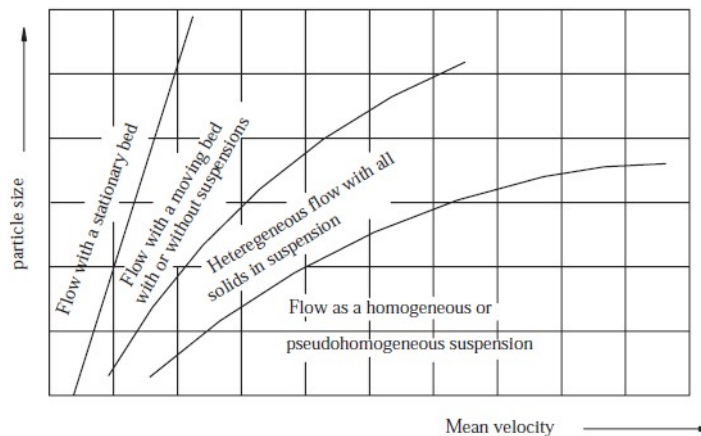


Figura 2.2: Regímenes de flujos newtonianos para pulpas [3]

- **Flujo con lecho estacionario:** A bajas velocidades se forma un lecho espeso de partículas inmóviles en el fondo del canal o tubería. Las partículas con baja sedimentación se mueven en suspensión asimétrica y las partículas gruesas forman el lecho.
- **Flujo con lecho móvil:** Las partículas densas y pesadas se depositan en el fondo, generando un lecho que se mueve a baja velocidad mientras que las partículas de la parte superior son arrastradas con el flujo que pasa por sobre el lecho, en consecuencia, las capas superiores se mueven más rápido que la capa inferior. Las partículas con moderada velocidad de sedimentación se mantienen en suspensión asimétrica, mientras que la mayoría de las partículas se encuentran concentradas en la parte inferior.

- **Flujo heterogéneo:** El aumento de la velocidad provoca un incremento en las turbulencias, lo que permite levantar más sólidos. Las partículas siguen un patrón asimétrico a lo largo de la altura de un canal o tubería. Desde el punto de vista energético, es el más económico en la industria.
- **Flujo homogéneo:** Todos los sólidos se encuentran en suspensión y distribuidos uniformemente en el fluido, por lo que no se presenta un gradiente de concentración ni granulometría en la mezcla. Mientras más finas son las partículas transportadas, menor es la velocidad requerida para este régimen. Generalmente, se obtienen flujos homogéneos hasta concentraciones cercanas al 50% si las partículas son finas (menores a 70  $\mu m$ ).

Los tamaños de partículas se pueden agrupar en los siguientes grupos según el diámetro de partícula (dp) [3]:

- Partículas **ultrafinas:**  $dp < 10 \mu m$ , las fuerzas gravitacionales no son relevantes.
- Partículas **finas:**  $10 \mu m < dp < 100 \mu m$ , transportadas en suspensión con gradientes de concentración.
- Partículas **medianas:**  $100 \mu m < dp < 1.000 \mu m$ , partículas se moverán con un depósito en el fondo con un gradiente de concentración.
- Partículas **gruesas:**  $1.000 \mu m < dp < 10.000 \mu m$ , rara vez en suspensión, y forman depósitos en el fondo.

## 2.3. Fundamentos de canal abierto

A continuación, se presentan conceptos necesarios para el diseño de flujos en canales abiertos:

### 2.3.1. Altura de flujo

La altura normal de escurrimiento en un sistema de transporte hidráulico abierto se obtiene mediante la ecuación de Manning, expresada en la ecuación 2.12, la cual relaciona la velocidad media de flujo con características del canal [6].

$$v = \frac{Q_v}{A} = \frac{1}{n} \cdot R_H^{2/3} \cdot i^{1/2} \quad (2.12)$$

$$R_H = \frac{A}{P_w} \quad (2.13)$$

Donde:

- $n$  = Coeficiente de rugosidad de Manning.
- $i$  = Pendiente de la canaleta [%].
- $R_H$  = Radio hidráulico.
- $A$  = Área de flujo.

- $P_w$  = Perímetro mojado.

En la tabla 2.1 se observan los coeficientes de Manning típicos requeridos en la industria minera. Se debe tener en cuenta que  $n_{pulpa} = 1,05 \cdot n$  [5].

Tabla 2.1: Coeficiente de Manning (n) [6] [5]

Material	n
Acero	0,010 - 0,012
Goma	0,011 - 0,012
HDPE	0,009 - 0,011
Hormigón	0,011 - 0,014

El coeficiente de Manning se ve afectado por las condiciones de flujo, siendo relevante [7]:

- **Rugosidad superficial:** En general, granos finos implican bajo coeficiente de Manning y granos gruesos alto coeficiente de Manning.
- **Irregularidad del canal:** Irregularidades de perímetro mojado y variaciones de sección transversal, tamaño y forma.
- **Alineamiento del canal:** Curvas suaves implican bajo coeficiente de Manning y curvas bruscas altos coeficiente de Manning.
- **Sedimentación y socavación:** La sedimentación puede cambiar la irregularidad de canal a uno relativamente uniforme y disminuir el coeficiente de Manning. La socavación puede generar el efecto contrario, aumentando el coeficiente de Manning.
- **Obstrucción:** Presencia de estructuras en el canal aumenta el coeficiente de Manning.
- **Tamaño y forma del canal:** Incremento de radio hidráulico puede aumentar o disminuir coeficiente de Manning, según condición del canal.
- **Nivel y caudal:** Para la mayoría, el coeficiente de Manning disminuye con el aumento del caudal.

### 2.3.2. Tipos de flujo

La complejidad de resolver problemas de flujo en canales abiertos se debe al cambio de posición de la superficie libre, la cual varía con el tiempo, espacio, y por el hecho de que la profundidad de flujo, caudal, pendientes del fondo del canal y de la superficie libre son interdependientes. Estos se pueden dividir en 2 tipos de flujo:

- **Flujo permanente:** Se dice permanente si la profundidad no cambia con el tiempo.
- **Flujo no permanente:** Se dice no permanente si la profundidad cambia con el tiempo.

Además, teniendo el tiempo como criterio para flujo permanente o no permanente, se tiene los siguientes flujos:

- **Flujo uniforme:** El flujo se dice uniforme si la profundidad es la misma en cada sección (puede ser permanente o no permanente).

El flujo uniforme permanente es el fundamental para la hidráulica de canales abiertos. Para tener flujo uniforme no permanente se necesita que la superficie del agua fluctúe en el tiempo, pero permaneciendo paralela al fondo del canal, lo que es prácticamente imposible.

- **Flujo variado:** El flujo se dice variado si la profundidad de flujo cambia a lo largo del canal. Puede ser permanente o no permanente, diferenciando los flujos entre gradualmente variado y flujo rápidamente variado.

### 2.3.3. Estados de flujo

El estado o comportamiento de un flujo está gobernado por la viscosidad y gravedad, en relación a las fuerzas inerciales de flujo.

#### 2.3.3.1. Turbulencia del flujo

El flujo puede ser laminar, turbulento o de transición, según el efecto de viscosidad en relación con la inercia, lo cual se puede evaluar con el número adimensional de Reynolds. En las ecuaciones 2.14 y 2.15 se muestran las ecuaciones que permiten el cálculo si se considera un flujo newtoniano y un flujo no newtoniano, con parámetros del modelo Herschel Bulkley [8].

$$Re_n = \frac{v \cdot D_H}{\mu} \quad (2.14)$$

Donde:

- $Re_n$  = Número de Reynolds para flujo newtoniano.
- $v$  = Velocidad característica del fluido.
- $D_H$  = Diámetro hidráulico correspondiente a  $4 \cdot R_H$  para canaletas.
- $\mu$  = Viscosidad dinámica.

$$Re_{nn} = \frac{8 \cdot \rho \cdot v^2}{\tau_y + K \cdot \left(\frac{2 \cdot v}{R_H}\right)^n} \quad (2.15)$$

Donde:

- $Re_{nn}$  = Número de Reynolds para flujo no newtoniano.
- $v$  = Velocidad característica del fluido.
- $R_H$  = Radio hidráulico.
- $\rho$  = Densidad del flujo.
- $\tau_y, K$  y  $n$  = Parámetros de modelo Herschel Bulkley.

### 2.3.3.2. Inestabilidad del flujo

Una forma de medir la estabilidad de flujo es mediante el número de Froude, que se define mediante la ecuación 2.16 que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas gravitacionales.

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot H}} \quad (2.16)$$

Donde:

- $F_r$  = Número de Froude.
- $g$  = Aceleración de gravedad.
- $H$  = Altura de flujo.

Acorde al valor de número de Froude se diferencian los siguientes tipos de flujos:

- Si  $F_r < 1$  se considera flujo subcrítico donde dominan las fuerzas gravitacionales.
- Si  $F_r = 1$  se considera flujo crítico.
- Si  $F_r > 1$  se considera flujo supercrítico donde dominan las fuerzas inerciales.

Para el transporte de pulpa se considera un flujo supercrítico, para evitar inestabilidades en el flujo.

## 2.4. Fundamentos computacionales

### 2.4.1. Modelo multifásico

Se considera un modelo multifásico aquel que esta compuesto por 2 o más fases. Estos modelos resuelven las ecuaciones de continuidad y conservación de moméntum de todas las fases, las cuales se clasifican según estado físico o morfología de las fases [9].

A continuación, se detallará dos enfoques para flujos multifásicos.

#### 2.4.1.1. Modelo Euleriano-Euleriano

Este modelo, también conocido como modelo continuo, trata a las partículas como una fase continua. Cada fase dispersa es caracterizada por un único diámetro, por lo que no se tiene una morfología real, solo se obtiene una información global de las fases. Esta formulación tiene como limitación los sistemas con una distribución granulométrica, ya que por cada partícula es necesario incluir un set de ecuaciones de conservación, aumentando el costo computacional.

En los modelos Eulerianos, cada fluido posee su propio campo de flujos, clasificándolos en dos tipos según la transferencia en la interfaz:

- **Modelo homogéneo:** Los campos de velocidad, turbulencia y temperaturas son compartidos por las fases, permitiendo simplificar las ecuaciones. Este modelo es aplicable para flujos donde las fases están separadas notoriamente.
- **Modelo inhomogéneo:** La transferencia de moméntum, calor y masa depende del área de superficie en contacto entre las fases.

### 2.4.1.2. Modelo Lagrangiano

En el modelo Lagrangiano, cada partícula tiene su sistema de referencia, y se resuelven por separado, permitiendo modelar las trayectorias de una distribución de partículas. El movimiento de las partículas está dado por la segunda ley de Newton. Se debe tener en cuenta que la fracción volumétrica debe ser inferior a 10 %, ojalá menor a 1 %, y que las partículas no ocupan volumen en el dominio.

### 2.4.2. Modelos de turbulencia

Existen distintos enfoques de turbulencia, uno de los más típicos es el modelo DNS (Direct Numerical Simulation), que corresponde a la resolución directa de todas las escalas turbulentas mediante Navier-Stokes, lo cual es complejo y requiere una malla muy fina para captar las pequeñas turbulencias. Otro enfoque corresponde al SRS (Scale Resolving Simulation), donde se resuelven ciertas escalas turbulentas, se resuelven las grandes turbulencias y se modelan las pequeñas como isotrópicas (presentan intensidad igual en las 3 direcciones). Por último, se encuentra el enfoque RANS (Reynolds Averaged N-S simulation), que corresponde al más sencillo, donde se modelan todas las escalas turbulentas empleando promedios temporales de las variables fluidodinámicas dependientes a resolver, lo cual es más rápido, pero se pierde información de los detalles.

Los modelos típicamente utilizados en la industria corresponden a los modelos de turbulencia  $\kappa - \varepsilon$  y  $\kappa - \omega$ , que están dentro del enfoque RANS, e incorporan 2 ecuaciones al sistema que permiten representar las propiedades turbulentas del flujo. Las variables corresponden a la energía cinética turbulenta ( $\kappa$ ), disipación turbulenta ( $\varepsilon$ ) y tasa específica de disipación ( $\omega$ ).

El modelo  $\kappa - \varepsilon$  permite obtener escalas de longitud y velocidad de turbulencia, teniendo así la ventaja de obtener resultados convergentes para distintos regímenes de flujo, pero con dificultades en flujos rotativos. Su diferencia principal con el  $\kappa - \omega$  es que este último se ha desarrollado para captar mejor el efecto de capa límite, siendo efectivo para modelar los flujos en las superficies.

Además, existen dos modelos que combinan los modelos previamente mencionados llamado  $\kappa - \omega$  BSL (Baseline) y  $\kappa - \omega$  SST (Shear Stress Transport), considerando el modelo  $\kappa - \omega$  para modelar las turbulencias en las zonas cercanas a la pared y el modelo  $\kappa - \varepsilon$  para modelar las turbulencias en la zona media del flujo (Ver figura 2.3) [10]. La diferencia entre estos modelos corresponde a las constantes internas del modelo y la definición de la viscosidad de remolino en las ecuaciones [11].

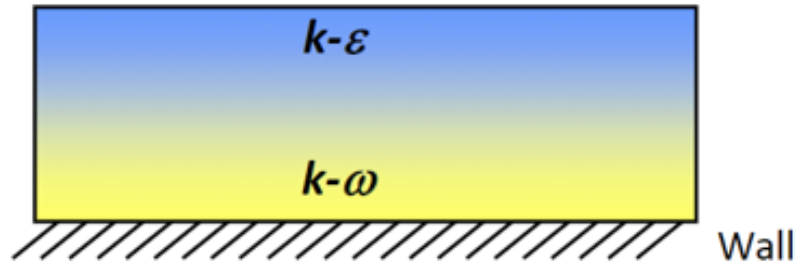


Figura 2.3: Combinación de los modelos  $\kappa - \varepsilon$  y  $\kappa - \omega$

Por último, el modelo SSG corresponde a un RSM (Reynolds Stress Model), que resuelve las ecuaciones de transporte basadas en las ecuaciones de disipación turbulenta ( $\varepsilon$ ). Este enfoque evita la viscosidad de remolinos y calcula directamente las componentes del tensor de esfuerzos de Reynolds [10].

### 2.4.3. Mallado de dominio

El set de ecuaciones a resolver para obtener el comportamiento de un fluido se realiza sobre un dominio discretizado en volúmenes finitos, específicamente en el centroide de estos elementos, por lo cual es fundamental medir la calidad de los elementos del dominio. A continuación, se presentan dos métricas para evaluar la calidad de malla:

- **Skewness:** Corresponde a una medida que determina que tan ideal es un elemento, es decir, equilateral.
- **Orthogonal Quality:** Corresponde a una medida de perpendicularidad de un elemento con los elementos adyacentes.

En la figura 2.4 se observan los valores aceptables de calidad para cada una de las métricas recién mencionadas.

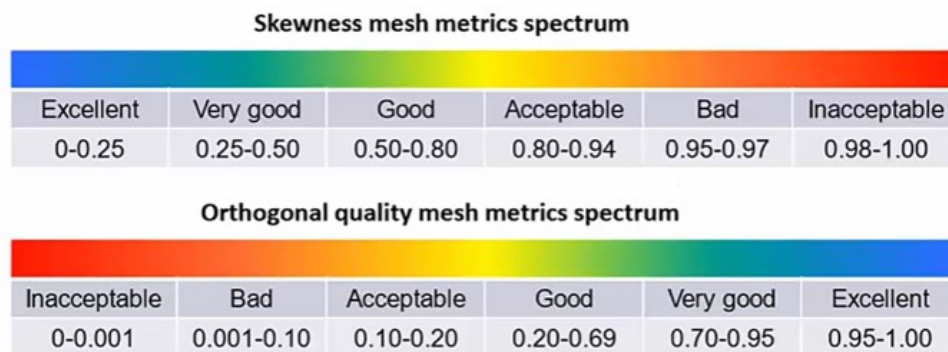


Figura 2.4: Métrica de calidad de malla

## 2.5. Teoría de adhesión en líquidos

”Teapot effect” o ”efecto de tetera” es el nombre común que tiene la tendencia al goteo sobre una superficie cuando se vierte líquido, como se muestra en la figura 2.5.



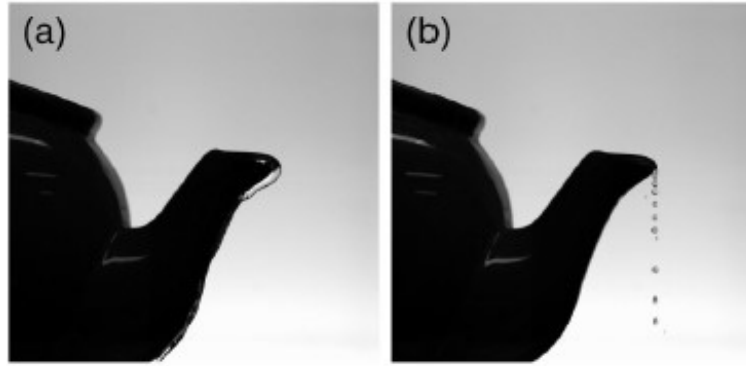


Figura 2.5: Teapot effect [12]

Este fenómeno tiene ocurrencia debido a factores variados como la geometría del sólido, el material y las propiedades del fluido. Un material superhidrofóbico, es decir, con un ángulo de contacto mayor a  $90^\circ$ , facilitaría el despegue del flujo de la superficie, como se observa en la figura 2.5 [12].

Dentro de los factores del flujo, la velocidad corresponde a un parámetro de interés debido a que la inercia afecta la adhesión, facilitando el despegue mientras mayor sea esta [12], [13]. Otro parámetro importante, que está relacionado con la geometría, es que un borde agudo facilita el despegue del flujo de la superficie [13]

Isshiki [14], mediante un análisis experimental y numérico, calcula el ángulo de separación de una delgada lámina de agua sobre una superficie cilíndrica, determina que la forma de la superficie, ángulo de contacto de agua con superficie, altura de flujo y velocidad afectan en el ángulo de separación de flujo.

Junto con ello, se deben tener en consideración todos los parámetros que afecten en algunas de las variables mencionadas por los autores, como lo es la inclinación de canaleta, ancho de canaleta, rugosidad de pared, curvatura de borde, densidad y viscosidad.

# Capítulo 3

## Descripción del Problema

La figura 3.1 muestra un caso real de pulpa en ductos de transporte, simulado mediante CFD. Se observa, en la zona marcada con rojo, que la pulpa se encuentra pegada a la pared, lo cual genera un desgaste acelerado.

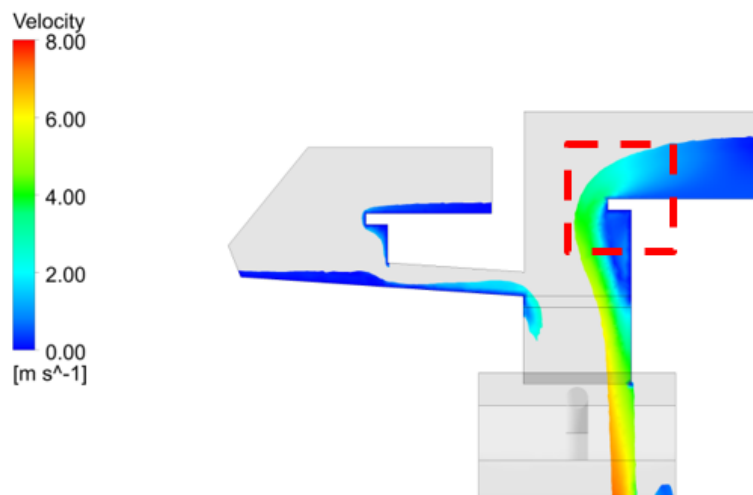


Figura 3.1: Flujo de pulpa real simulado. Fuente: SYNTEC

A raíz de esto nace la problemática: ¿de qué variables depende?, ¿hay alguna variable más influyente que otra?, ¿se puede controlar?.

El objetivo de este trabajo es responder estas preguntas, para lo cual se dispone a realizar un esquema de casos de estudio, seleccionando las variables influyentes a partir de la literatura consultada, para luego generar un rango de variación de estos parámetros y realizar un análisis de sensibilidad con estas.

Específicamente, se evalúa un rango de velocidades de flujo entre 0,5 y 4  $[m/s]$  para 4 concentraciones de sólidos en peso y 5 redondeos distintos en el borde de una canaleta, para luego refinar los casos de estudio en el rango donde el flujo de pulpa pasa de estar pegado a la pared a despegado, obteniendo una relación entre las variables estudiadas y el fenómeno de adhesión de flujo. Cabe destacar que las otras variables de estudio, como la geometría de la canaleta, rugosidad y altura de flujo, se mantienen constantes para los casos evaluados.

# Capítulo 4

## Metodología

### 4.1. Metodología general

A continuación, se detalla la metodología para la realización del trabajo de título.

1. Revisión bibliográfica respecto a la caracterización de flujo de pulpas, fenómeno de adhesión y modelos computacionales para la realización de la simulación.
2. Validación del comportamiento de flujo requerido para el trabajo de investigación, mediante simulaciones de trabajos experimentales realizados por otros autores.
3. Definición de los casos de estudio: Variables de interés y rangos de operación.
4. Simulación fluidodinámica del caso base, que incluye el modelamiento geométrico generado con la herramienta ANSYS Spaceclaim.
5. Simulación de casos a estudiar. Para realizar un análisis de sensibilidad de las variables de interés se usa la herramienta parámetros en ANSYS Workbench, evaluando todos los casos de estudio mediante la tabla de puntos de diseño.
6. Análisis de resultados obtenidos de los distintos casos estudiados, resumiendo información mediante gráficos realizados en Python y ajuste de curva que relacione los parámetros estudiados.

### 4.2. Modelamiento fluidodinámico

La resolución de los problemas se realiza mediante el método de volúmenes finitos, el cual permite discretizar el dominio y resolver numéricamente las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento de los fluidos sobre esta discretización.

Para la correcta ejecución, se consideran las siguientes etapas para las simulaciones realizadas:

1. Recopilación de información relevante para la simulación.
2. Generación del dominio. Corresponde al modelo CAD.
3. Discretización espacial. Corresponde al mallado del dominio.

4. Establecer las condiciones de borde para recrear el fenómeno.
5. Definir los criterios de convergencia, considerando los residuos y/o el análisis sobre alguna variable de interés.
6. Generar independencia de malla. Corresponde a refinar la malla a partir del caso base hasta que los resultados obtenidos sean independientes del tamaño de los elementos.
7. Resolver el problema con los criterios seleccionados y post-procesar para obtener los resultados.

### 4.3. Características de hardware y software

Para la realización del trabajo de investigación se utilizan las siguientes herramientas y recursos:

- Notebook personal. Procesador i7-9750H 2.6 GHz. Memoria RAM 8 GB DDR4. SSD. Uso: Documentos y código Python.
- Computador de escritorio. Procesador i7-9700KF 3.6 GHz. Memoria RAM 32 GB DDR4. SSD. Tarjeta gráfica GTX 1650. Uso: Ansys CFX 2019 R1.
- ANSYS. v19.1. Uso: Simulaciones con modulo CFX.
- Python. v3.8. Uso: Manejo de resultados mediante gráficas y ajustes matemáticos.

# Capítulo 5

## Validación de comportamientos de flujo y modelos computacionales

### 5.1. Perfil de velocidad

A continuación, se desarrolla la simulación de un modelo experimental de flujo no newtoniano a través de un canal rectangular abierto, con el fin del estudiar el perfil de velocidad del flujo y la influencia del comportamiento viscoso [8]. Con este trabajo se pretende comparar distintos modelos de turbulencia, con tal de justificar el modelo que permita captar con menor error el perfil de velocidad de un flujo sobre una canaleta rectangular, el cual sería utilizado en el trabajo principal. En la figura 5.1 se muestra la configuración del canal rectangular inclinado utilizado por el autor para la realización del experimento.

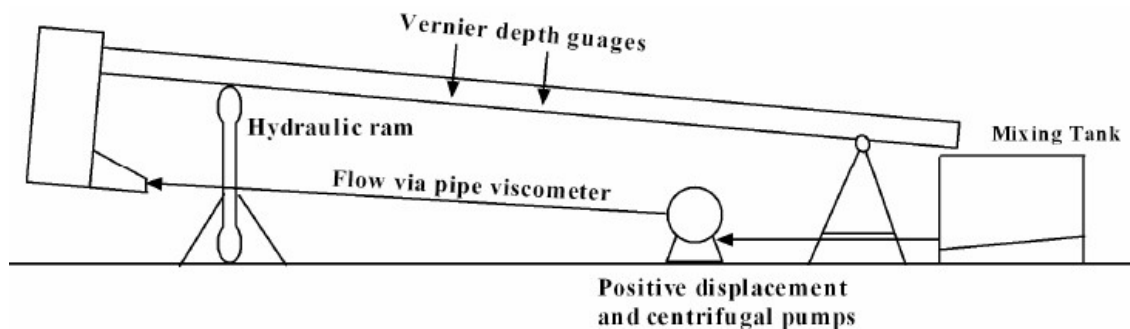


Figura 5.1: Esquema de la configuración utilizada para la realización del experimento sobre el canal rectangular inclinado [8]

El fluido utilizado corresponde a aqueous carboxymethyl cellulose (CMC), el cual es un fluido no newtoniano cuyas propiedades reológicas son modeladas mediante un plástico de Bingham (ver tabla 5.1).

Tabla 5.1: Parámetros del modelo

Parámetro	Valor	Unidad
$\rho$	1.030	$[kg/m^3]$
$C_p$	5,26	$[w/w]$
$n$	0,92	-
$\tau_y$	0	$[Pa]$
$K$	0,69	$[Pa s^n]$
$Q$	6,99	$[kg/s]$

La configuración experimental consta de un canal rectangular cuyas dimensiones se presentan en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Variables geométricas del canal experimental [8]

Parámetro	Valor	Unidad
Largo canal	10	$[m]$
Ancho canal	0,3	$[m]$
Inclinación	1	$[^\circ]$

El perfil de velocidad obtenido por el autor para un flujo de CMC con 5,26 %  $[w/w]$  y un caudal de 6,79  $[l/s]$  corresponde al mostrado en la figura 5.2. En este se observa un gradiente de velocidad marcado desde las paredes laterales e inferior del canal hacia el centro del flujo en la zona de superficie libre, efecto dado por la viscosidad del fluido de trabajo. Cabe mencionar que este perfil de velocidad se obtiene a una distancia de 5  $[m]$  medidos desde el ingreso de fluido al canal rectangular.

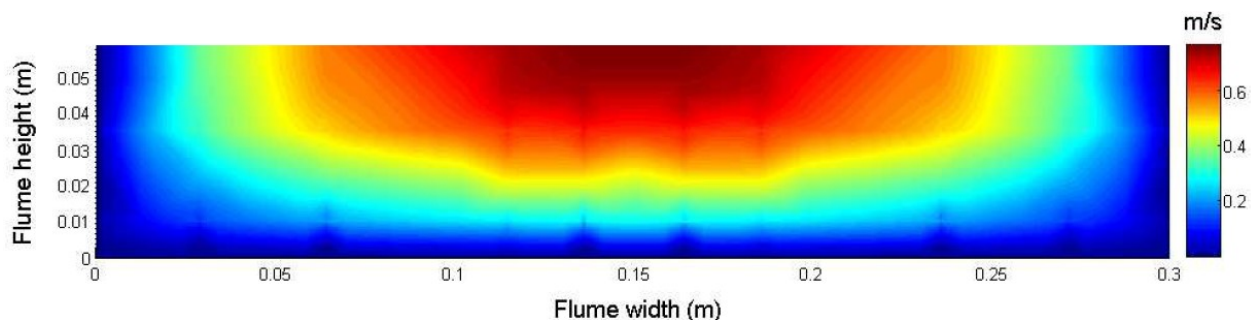


Figura 5.2: Perfil de velocidad, flujo CMC con 5,26 %  $[w/w]$  y un caudal de 6,79  $[l/s]$

### 5.1.1. Consideraciones de la simulación

- Se considera un esquema multifásico homogéneo de fluido no newtoniano y aire, consideradas como fases continuas.
- Se utiliza un régimen temporal estacionario.
- Flujo no newtoniano modelado como plástico de Bingham.

- Modelo en 3 dimensiones correspondiente a la mitad del canal debido a condición de simetría.
- Los resultados del modelo son comparados en términos de la altura del flujo.
- Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes a través del método de volúmenes finitos.
- Resolución de las ecuaciones de moméntum y masa, sin considerar el balance térmico.

### 5.1.2. Dominio de estudio

En base a los datos proporcionados por el autor, se crea un volumen de control en 3 dimensiones, correspondiente a un canal rectangular con un ancho de  $150 [mm]$ , el cual representa la mitad del ancho original debido a la configuración de simetría que se impone en el modelo computacional. El canal presenta una inclinación de  $1^\circ$  y una altura de  $150 [mm]$ . Además, se realiza una división de la cara de entrada del flujo a una altura de  $0,059 [m]$ , la cual permite dar una condición de altura de flujo en la entrada del canal. Esto se observa en la figura 5.3, que corresponde al dominio considerado donde, además, se indica la zona de entrada y salida de flujo.

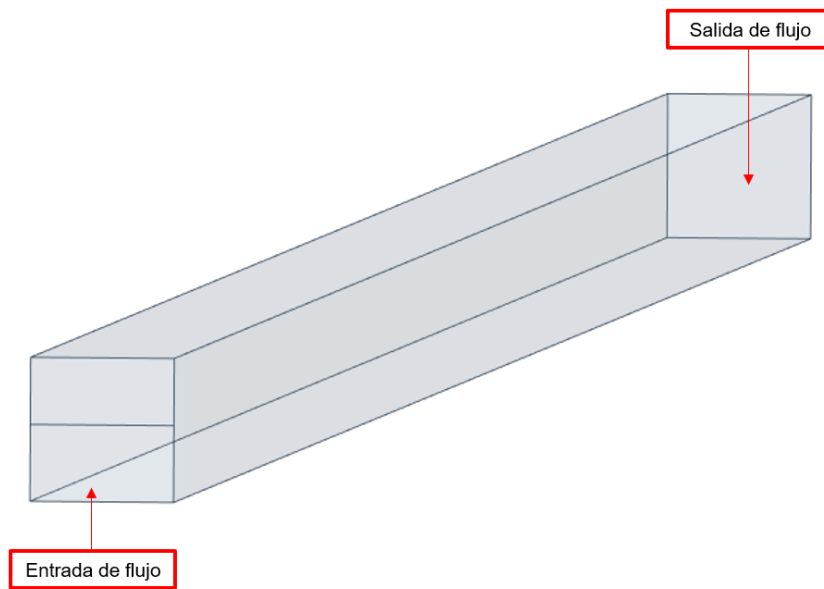


Figura 5.3: Dominio de estudio del perfil de velocidad de flujo no newtoniano

### 5.1.3. Discretización espacial

Se genera una malla con elementos hexaédricos con un tamaño máximo de  $0,8 [mm]$ , con un refinamiento en la cara inferior de la geometría (suelo) de  $0,2 [mm]$ , inflation de 7 capas y una tasa de crecimiento de 1,2 puesto en la pared izquierda e inferior. En la figura 5.4 se puede observar la malla utilizada.

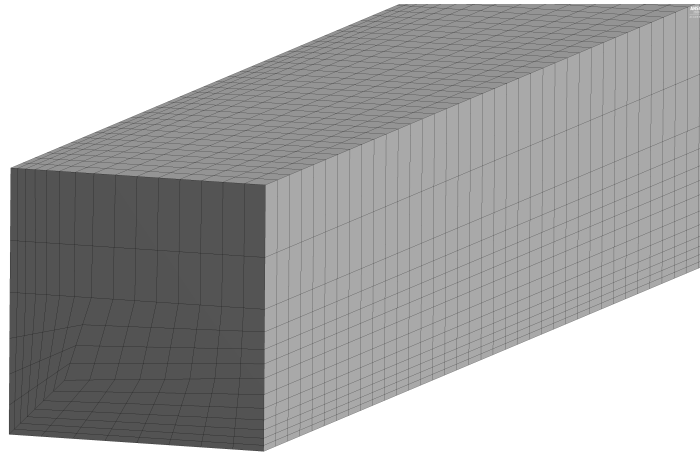


Figura 5.4: Discretización espacial del dominio

En la tabla 5.3 se presentan la cantidad de nodos y elementos de la malla, además de los promedios de calidad ortogonal y skewness. En la figura 5.5 se presentan los gráficos con la distribución de la calidad de los elementos de las métricas mencionadas.

Tabla 5.3: Parámetros de malla

<b>Cantidad de nodos</b>	84.169
<b>Cantidad de elementos</b>	73.000
<b>Promedio calidad ortogonal</b>	0,897
<b>Promedio skewness</b>	0,234

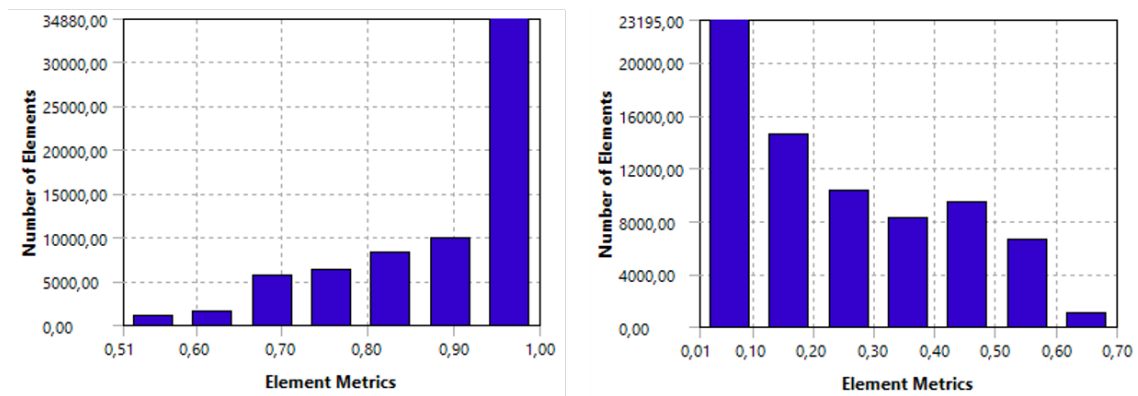


Figura 5.5: Valores de calidad ortogonal y asimetría de la malla

#### 5.1.4. Condiciones de borde

- **Entrada (verde):** Condición de entrada del flujo no newtoniano.
- **Pared (azul):** Define la velocidad del fluido igual a cero e impide el paso a través de esta. Se considera sin desplazamiento ni rugosidad.
- **Apertura (rojo):** Permite el paso bidireccional de ambas fases. Se define con una presión relativa cero.



- **Salida (amarillo):** Permite el paso de fluido no newtoniano o aire solo en la dirección de salida. Se define con una presión relativa cero.
- **Simetría (gris con transparencia):** Modelo idéntico (espejo) a cada lado del plano divisorio. Permite analizar la parte representativa del sistema y disminuir el coste computacional.

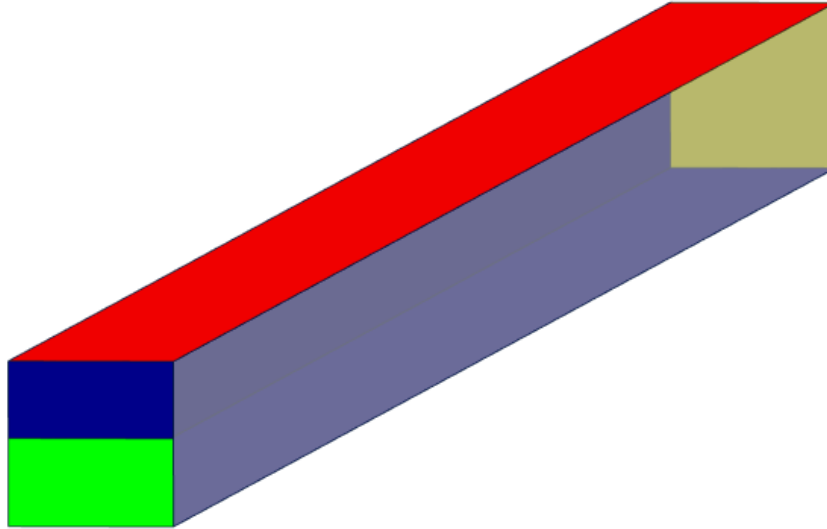


Figura 5.6: Condiciones de borde impuestas en el modelo

### 5.1.5. Escenarios de análisis

El análisis se realiza bajo los mismos parámetros geométricos y computacionales, variando entre 4 modelos turbulentos mencionados a continuación:

- $\kappa - \varepsilon$ .
- $\kappa - \omega$  SST (Shear Stress Transport).
- $\kappa - \omega$  BSL (Baseline).
- SSG, Reynolds Stress Model.

### 5.1.6. Resultados

Las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 muestran los perfiles de velocidad obtenidos a 5 metros de la entrada de flujo, distancia a la cual fue medido el perfil de velocidad en el experimento, para los distintos modelos de turbulencia, bajo las mismas condiciones. Se observa que los modelos SST y BSL son aquellos que presentan un perfil de velocidad que varía a lo alto y ancho del canal, similar al presentado en la figura 5.2.



Figura 5.7: Perfil de velocidad a los 5 [m] con modelo de turbulencia  $\kappa - \varepsilon$

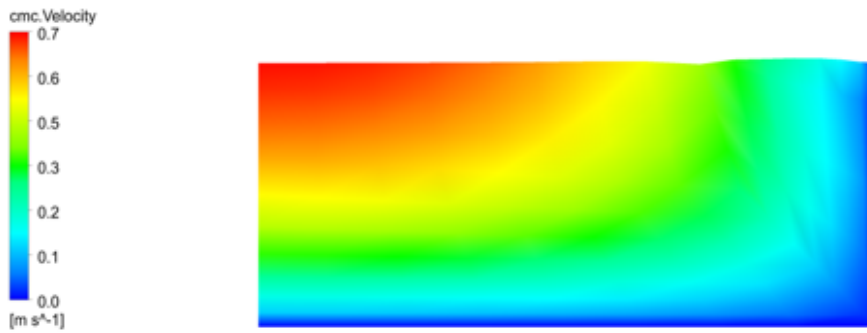


Figura 5.8: Perfil de velocidad a los 5 [m] con modelo de turbulencia  $\kappa - \omega$  SST

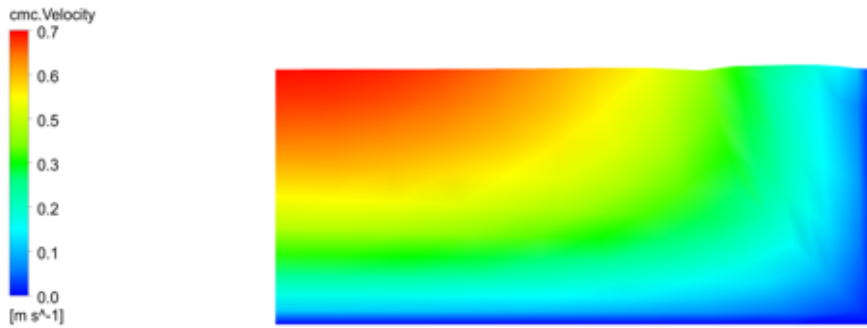


Figura 5.9: Perfil de velocidad a los 5 [m] con modelo de turbulencia  $\kappa - \omega$  BSL



Figura 5.10: Perfil de velocidad a los 5 [m] con modelo de turbulencia SSG

En la tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación computacional de la altura de flujo promedio a 5 metros de la entrada del flujo. Se observa que el modelo de turbulencia SST y BSL son los que presentan el menor porcentaje de error respecto a la altura obtenida experimentalmente, correspondiente a 0,059 [m], a diferencia de los modelos  $\kappa\text{-}\varepsilon$  y SSG, donde el error supera el 50%. Con respecto a los tiempos de simulación, los modelos de turbulencia que presentaron menor tiempo son aquellos que también presentan mayor error. Comparando el tiempo de simulación entre los modelos SST y BSL, que corresponden a los que poseen menor error, el modelo de turbulencia SST es el que presenta menor tiempo, por lo cual es el seleccionado como modelo de turbulencia para el trabajo principal.

Tabla 5.4: Resultados de altura según modelo de turbulencia, simulación de de perfil de velocidad

<b>Parámetro</b>	<b>Datos</b>	$k\text{-}\varepsilon$	<b>SST</b>	<b>BSL</b>	<b>SSG</b>
H [m]	0,059	0,027	0,064	0,064	0,022
Error %	-	54,003	9,881	9,881	62,521
Tiempo [h:min]	-	1:42	3:37	4:59	1:56

## 5.2. Fenómeno de adhesión

Para validar que el software capture el fenómeno de adhesión de flujo a una superficie se dispone a recrear el experimento que estudia el “teapot effect”, liberando un flujo en la parte superior de un cilindro circular, observando su separación de la superficie y su dependencia con la velocidad y altura del flujo que ingresa al sistema [14]. En la figura 5.11 se muestra esquemáticamente el experimento, en el cual se muestra que, para un flujo específico de agua definido por su altura y velocidad sobre una superficie de radio determinado, presenta un ángulo  $\theta$  de separación.

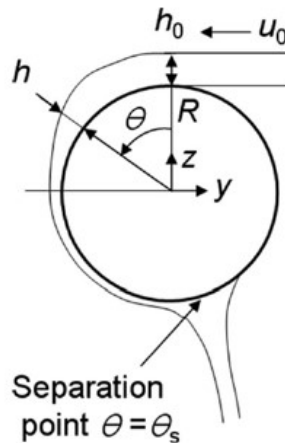


Figura 5.11: Flujo en superficie cilíndrica [14]

Para este experimento se tiene en cuenta los siguientes datos:

Tabla 5.5: Parámetros del modelo

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad del agua	1.000	$[kg/m^3]$
Viscosidad del agua	0,001	$[Pa \cdot s]$
Radio del cilindro	0,1	$[m]$

### 5.2.1. Consideraciones de la simulación

- Se considera un esquema multifásico homogéneo de agua y aire, consideradas como fases continuas.
- Se utiliza un modelo turbulento  $\kappa-\omega$  SST para describir las fluctuaciones de la velocidad.
- Se utiliza un régimen temporal estacionario.
- Modelo en 3 dimensiones con un solo elemento de espesor.
- Los resultados del modelo son comparados en términos del ángulo de separación del flujo con la superficie.
- Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes a través del método de volúmenes finitos.
- Resolución de las ecuaciones de momento y masa, sin considerar el balance térmico.

## 5.2.2. Dominio de estudio

En base a los datos bibliográficos, se crea un volumen de control que envuelve al cilindro, el cual posee los bordes exteriores suficientemente lejos de la lámina de flujo para no afectar su comportamiento. En la figura 7.1 se puede observar el volumen considerado, donde además se indica la zona de entrada de flujo.

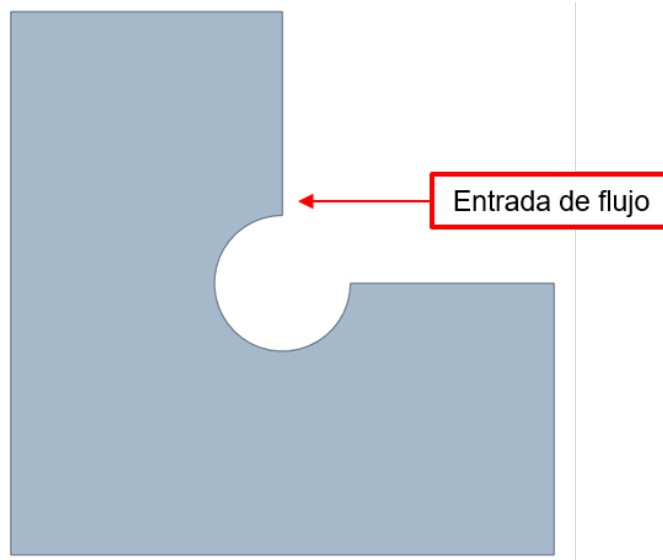


Figura 5.12: Dominio del estudio del fenómeno de adhesión

## 5.2.3. Discretización espacial

Se genera una malla con elementos hexaédricos con un tamaño máximo de 0,011 [mm], con un refinamiento en el borde del cilindro con un tamaño de elemento de 0,0013 [mm], inflación de 10 capas, y una tasa de crecimiento de 1,2 puesto en la pared del cilindro. En la figura 5.13 se puede observar la malla utilizada en los modelos estudiados.

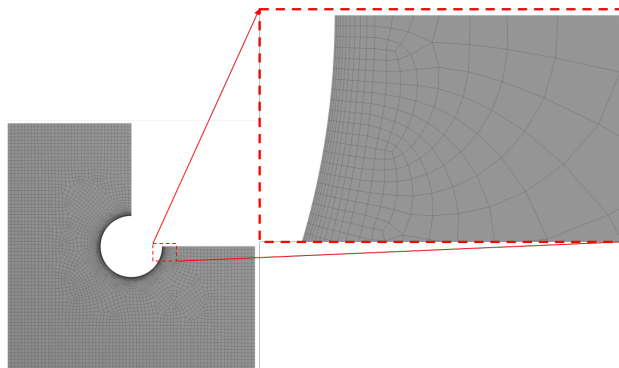


Figura 5.13: Discretización espacial del dominio y detalle de esta misma

En la tabla 5.6 se presentan la cantidad de nodos y elementos de la malla, además de los promedios de calidad ortogonal y skewness. En la figura 5.14 se presentan los gráficos con la distribución de la calidad de los elementos de las métricas mencionadas. Cabe destacar que ambas métricas se evalúan en un rango de 0 a 1, donde los valores cercanos a 1 representan

una buena calidad ortogonal y, para la simetría, los valores cercanos a 0 representan una buena calidad de malla.

Tabla 5.6: Valores de calidad de malla

<b>Cantidad de nodos</b>	19.536
<b>Cantidad de elementos</b>	9.437
<b>Promedio calidad ortogonal</b>	0,994
<b>Promedio skewness</b>	0,056

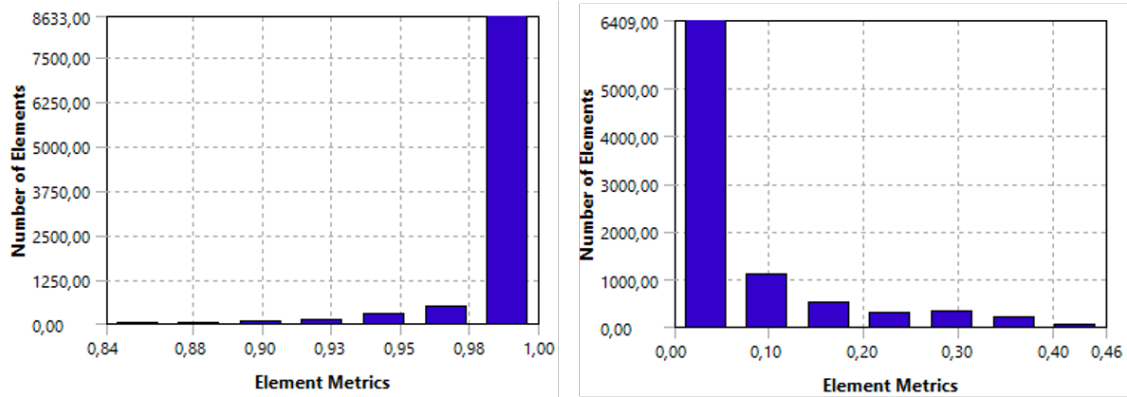


Figura 5.14: Valores de calidad ortogonal y asimetría de la malla

#### 5.2.4. Condiciones de borde

A continuación, se describen las condiciones de borde impuestas en el esquema de trabajo, presentadas esquemáticamente en la figura 5.15.

- **Entrada (verde):** Condición de entrada de agua y aire según la altura de la lámina de agua. Se crea una función para obtener la fracción volumétrica de agua y aire en función de la altura del flujo de agua inicial.
- **Pared (azul):** Define la velocidad del fluido igual a cero e impide el paso a través de esta. Se considera sin desplazamiento y con rugosidad de 0,02 [mm].
- **Apertura (rojo):** Permite el paso bidireccional de ambas fases. Se define con una presión relativa cero.
- **Simetría (gris):** Modelo idéntico (espejo) a cada lado del plano divisorio. Permite analizar la parte representativa del sistema.

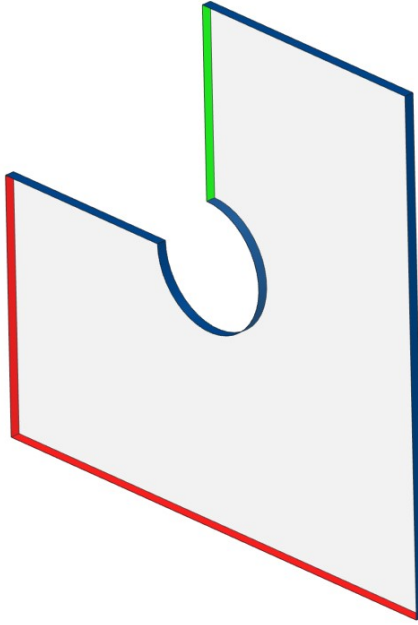


Figura 5.15: Condiciones de borde impuestas en el modelo

### 5.2.5. Escenarios de análisis

A continuación se presentan los casos evaluados y comparados con los resultados experimentales del autor.

- Velocidad de 0,5 [ $m/s$ ] y altura de flujo de 0,4 [ $mm$ ].
- Velocidad de 0,5 [ $m/s$ ] y altura de flujo de 1,0 [ $mm$ ].
- Velocidad de 0,5 [ $m/s$ ] y altura de flujo de 1,6 [ $mm$ ].
- Velocidad de 0,7 [ $m/s$ ] y altura de flujo de 0,4 [ $mm$ ].
- Velocidad de 0,7 [ $m/s$ ] y altura de flujo de 1,0 [ $mm$ ].
- Velocidad de 0,7 [ $m/s$ ] y altura de flujo de 1,6 [ $mm$ ].

### 5.2.6. Resultados

La figura 5.16 muestra la fracción volumétrica de uno de los casos analizados, donde se observa que la lámina de agua recorre la superficie del cilindro y se despega en poco más de  $180^\circ$  medidos desde la vertical de la zona superior en sentido antihorario, lo que demuestra la tendencia del fluido a mantenerse adherido a una superficie sólida, dependiendo de las condiciones.

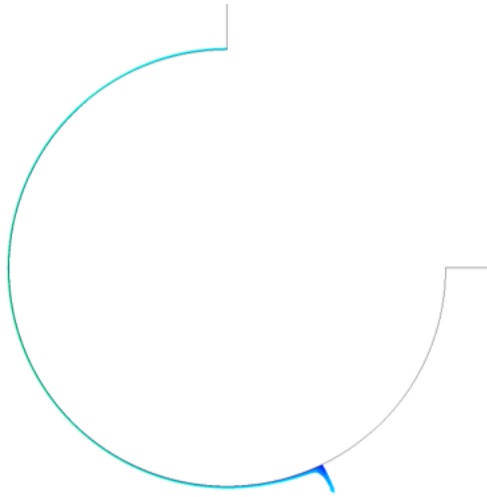


Figura 5.16: Fracción volumétrica de agua para el caso con velocidad = 0,5 [m/s] y altura = 1 [mm]

Para dar validez a los resultados obtenidos mediante la simulación y de los modelos computacionales utilizados, se dispone a calcular el ángulo de separación de los 6 escenarios analizados, para luego ser comparados con los datos experimentales y teóricos.

Para obtener el ángulo de separación de cada uno de los casos se parametriza el largo del cilindro en función del ángulo medido desde la entrada del flujo de agua. Luego se grafica la fracción volumétrica sobre esta parametrización, mostrando el ángulo de separación del flujo que corresponde al ángulo donde cambia la fracción volumétrica de 1 a 0, es decir, el ángulo donde deja de haber líquido en la superficie del cilindro. Esto se puede observar en la figura 5.17 y 5.18 para los flujos con velocidad de 0,5 [m/s] y 0,7 [m/s] respectivamente.

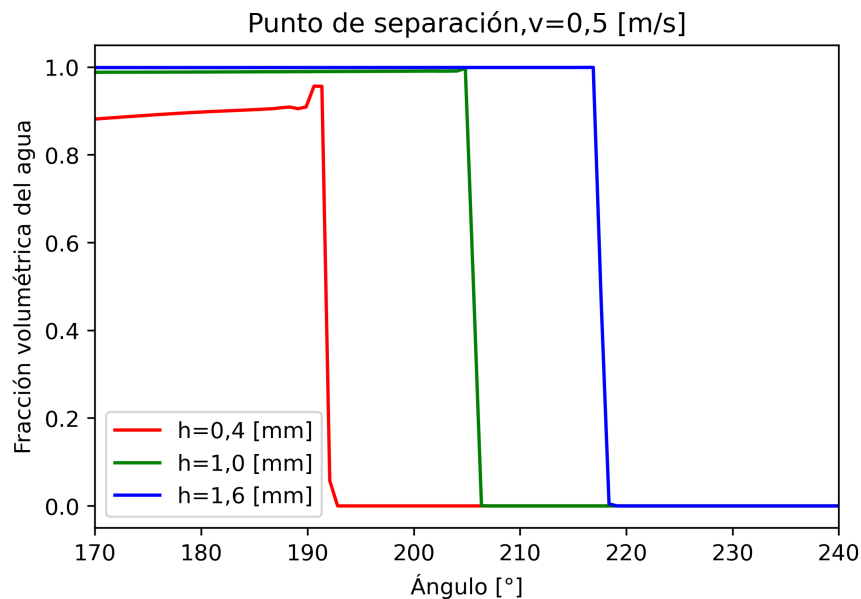


Figura 5.17: Punto de separación, velocidad = 0,5 [m/s]



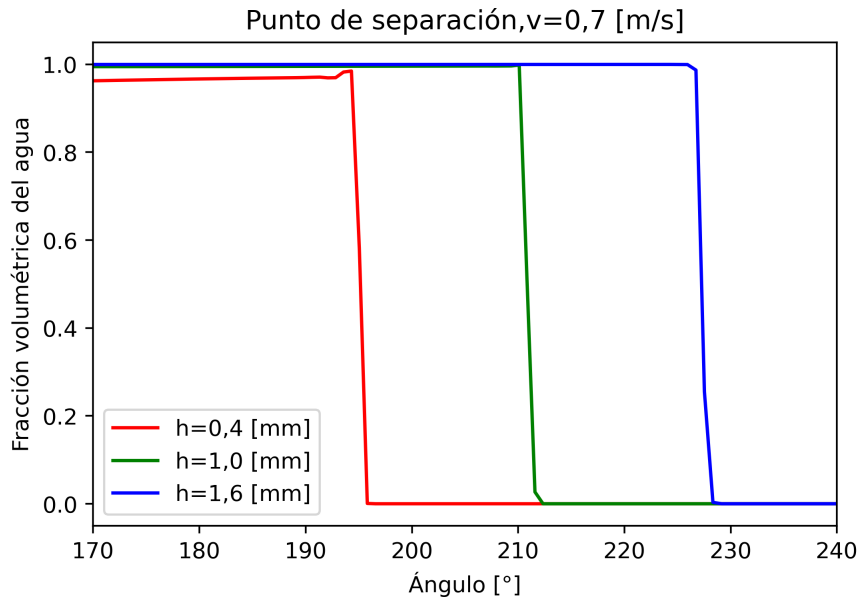


Figura 5.18: Punto de separación, velocidad = 0,7 [m/s]

En la tabla 5.7 se muestran los resultados obtenidos mediante la simulación del ángulo de separación del flujo, siendo comparado con el resultado promedio experimental del autor, observando que el error máximo entre ambos corresponde a 4,2%, el cual se considera aceptable, demostrando así que el software puede reproducir el fenómeno de adhesión.

Tabla 5.7: Resumen de resultados

Velocidad [m/s]	Altura [mm]	Teórico	Experimental	CFD	Error %
0,5	0,4	192	187,5	192	2,4
0,5	1,0	212	206,8	209	1,1
0,5	1,6	231	222,5	223	0,2
0,7	0,4	197	191,5	197	1,7
0,7	1,0	225	210,0	219	3,1
0,7	1,6	247	224,4	237	4,2

Realizando una comparación adicional, gráficamente se puede observar que los valores calculados mediante simulación corresponden a valores entre los resultados teóricos y experimentales, esto se puede observar en las figuras 5.19 y 5.20.

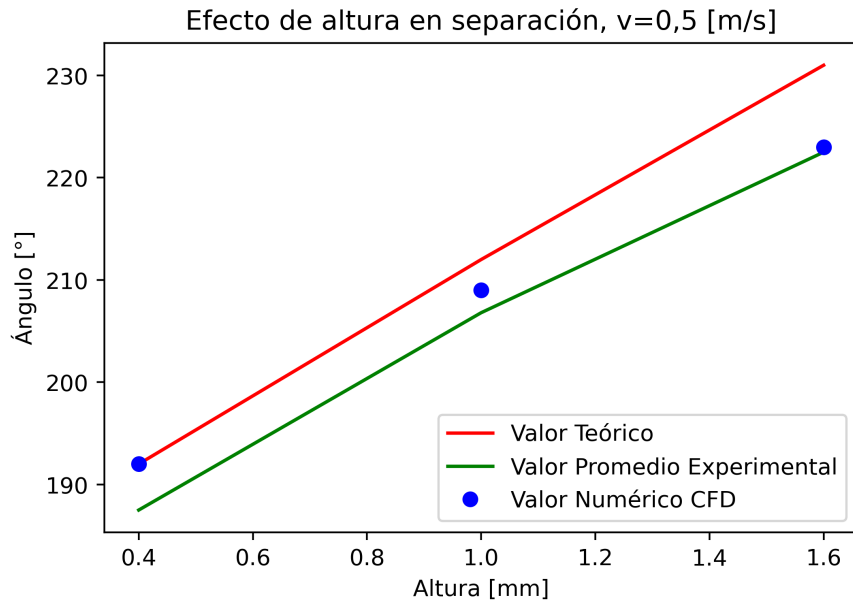


Figura 5.19: Efecto de altura en ángulo de separación, velocidad =  $0,5$  [m/s]

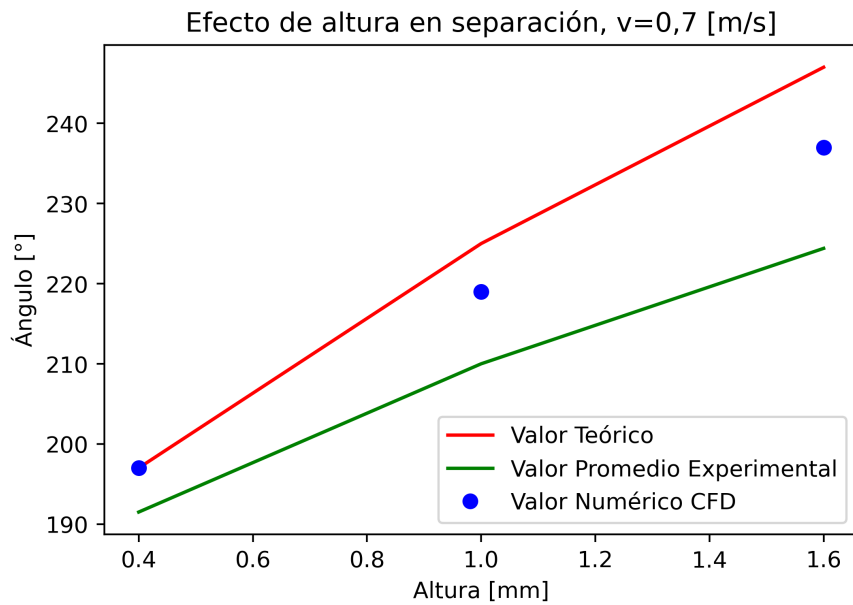


Figura 5.20: Efecto de altura en ángulo de separación, velocidad =  $0,7$  [m/s]

### 5.3. Comportamiento de flujo

Para validar el comportamiento de flujo en un canal abierto con dimensiones parecidas a las utilizadas en el esquema del trabajo de investigación, se recrea el experimento de aireación en un canal escalonado [15], que diferencia dos regímenes de flujo: skimming flow y nappe flow. En la figura 5.21 se muestran los dos regímenes de comportamiento.

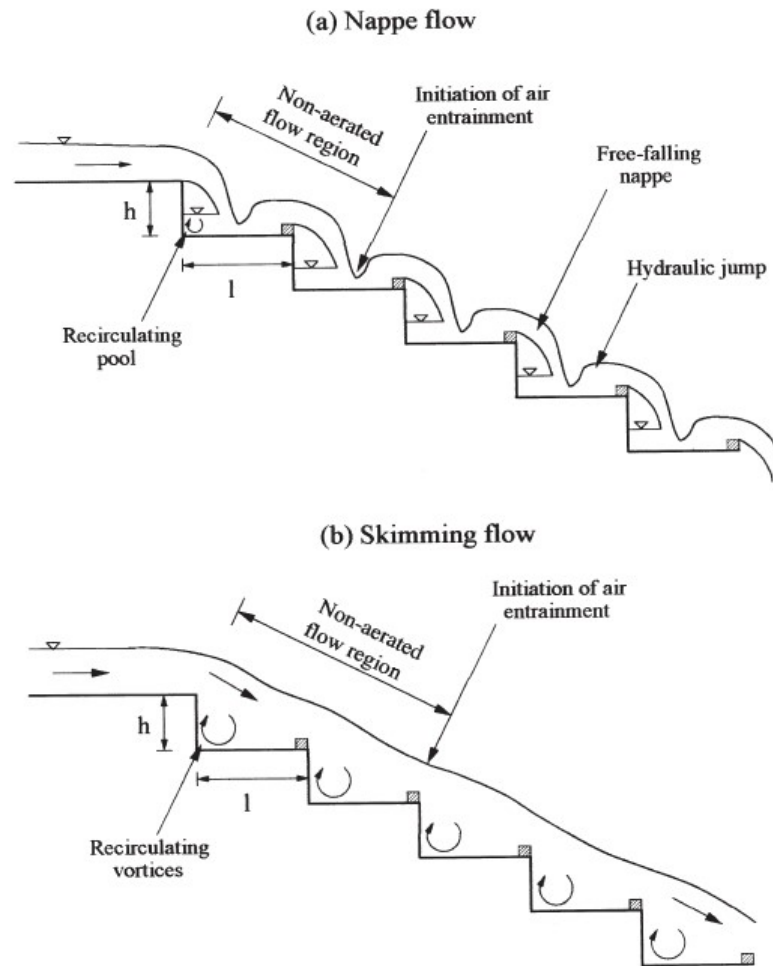


Figura 5.21: Diferenciación de Nappe flow y Skimming flow [15]

El nappe flow corresponde a un flujo tipo cascada entre los escalones, mientras que el skimming flow corresponde a un flujo con un pseudo fondo que permite una altura constante de flujo. Estos regímenes dependen de las dimensiones del canal, como el ancho de este, el largo y alto de los escalones, así como del caudal de flujo.

En la figura 5.22 se muestra la configuración utilizada para la obtención del comportamiento de los flujos. En la tabla 5.8 se muestran los parámetros de flujo y dimensiones geométricas utilizadas para la representación del problema mediante simulación.

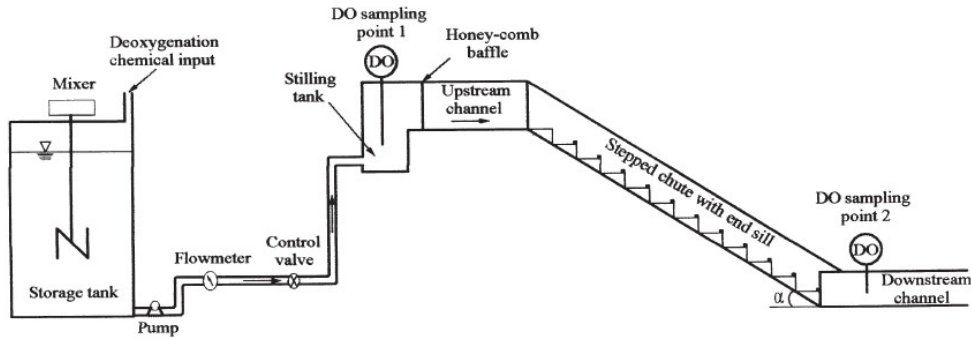


Figura 5.22: Configuración experimental de canal escalonado [15]

Tabla 5.8: Parámetros del modelo

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad del agua	1000	$[kg/m^3]$
Viscosidad del agua	0,001	$[Pa s]$
Largo escalón	0,241	$[m]$
Alto escalón	0,1	$[m]$
Ancho canal	0,3	$[m]$
Alto canal	0,5	$[m]$
Largo canal	10	$[m]$
Cantidad de escalones	8	-

Los casos que son simulados y comparados corresponden a los presentados en la tabla 5.9, los cuales corresponden a los regímenes de flujo obtenidos según el caudal de entrada para un sistema de escalones sin tope en la zona final. La relación de largo/alto de escalón de 2,41.

Tabla 5.9: Escenarios de análisis, regímenes de flujo experimentales [15]

Caudal	Régimen de flujo
10	Nappe
20	Nappe
40	Skimming
50	Skimming

### 5.3.1. Consideraciones

- La simulación consta de dos partes, una para la obtención de la altura de flujo y otra para el régimen según el caudal de entrada y la altura previamente calculada mediante simulación.
- Realización de simulación en 3D, con llenado de estanque para obtener la altura de flujo en el canal previo a los escalones.
- Realización de simulación 2D, para visualizar los regímenes de flujo en los escalones.

- Se considera un esquema multifásico homogéneo de agua y aire, consideradas como fases continuas.
- Se utiliza un modelo turbulento  $\kappa-\omega$  SST para describir las fluctuaciones de la velocidad.
- Se utiliza un régimen temporal estacionario.
- Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes a través del método de volúmenes finitos.
- Resolución de las ecuaciones de moméntum y masa, sin considerar el balance térmico.

### 5.3.2. Altura de flujo en canal recto

#### 5.3.2.1. Dominio de estudio

En base a los datos, se crea un volumen de control en 3 dimensiones que corresponde a un estanque de 2,25 [m] de largo, 3,25 [m] de alto y 0,15 [m] de ancho, este último debido a que se considera la geometría con simetría. Además de ello, se considera el canal recto sin inclinación de 6,25 [m] de largo, 0,5 [m] de alto y 0,15 [m] de ancho (ver figura 5.23).

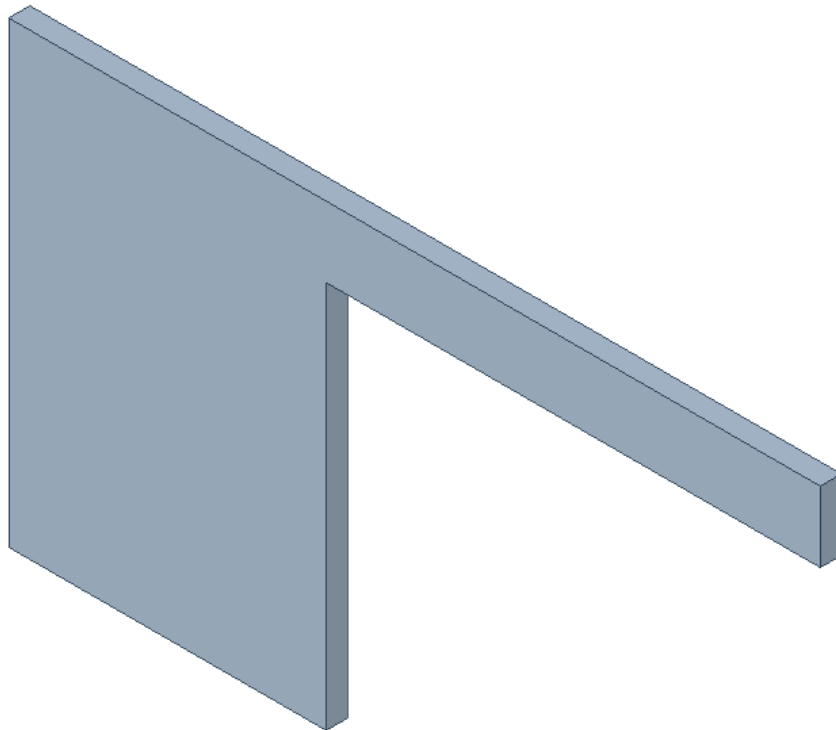


Figura 5.23: Dominio de estudio correspondiente a estanque y canal recto

#### 5.3.2.2. Discretización espacial

Se genera una malla con elementos hexaédricos con un tamaño máximo de 100 [mm], con un refinamiento en la cara derecha del estanque y la cara inferior del canal con un tamaño de elemento de 7,5 [mm], inflation de 5 capas y una tasa de crecimiento de 1,2 puesto en la pared del cilindro. En la figura 5.24 se puede observar la malla utilizada en los modelos estudiados.

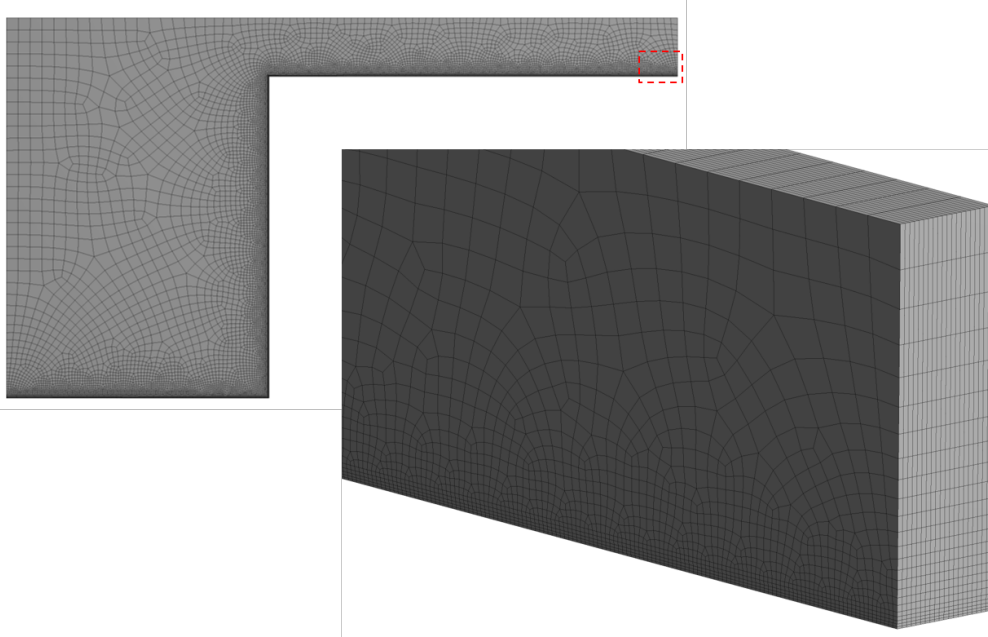


Figura 5.24: Discretización espacial del dominio y detalle de esta misma

En la tabla 5.10 se presentan la cantidad de nodos y elementos de la malla, además de los promedios de calidad ortogonal y skewness. En la figura 5.25 se presentan los gráficos con la distribución de la calidad de los elementos de las métricas mencionadas.

Tabla 5.10: Parámetros de malla

<b>Cantidad de nodos</b>	323.196
<b>Cantidad de elementos</b>	300.620
<b>Promedio calidad ortogonal</b>	0,926
<b>Promedio skewness</b>	0,214

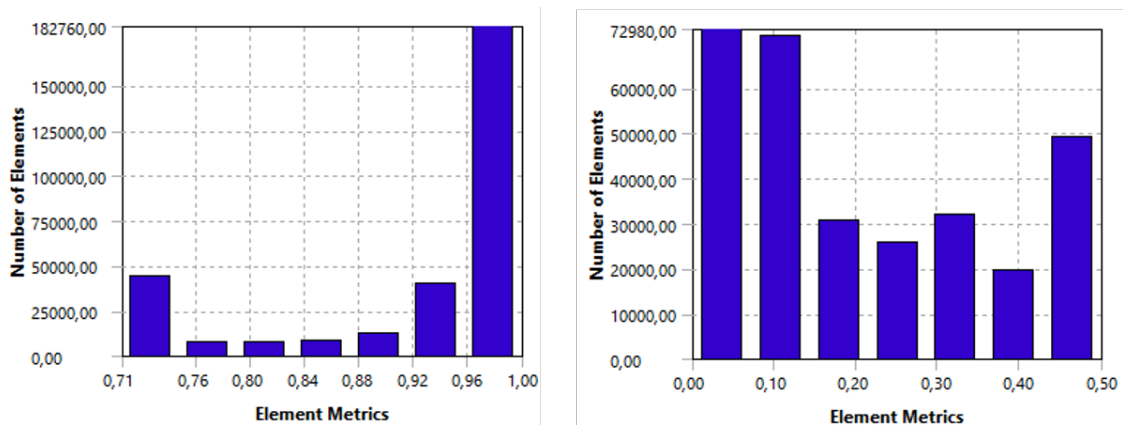


Figura 5.25: Valores de calidad de malla

### 5.3.2.3. Condiciones de borde

- **Entrada (verde):** Condición de entrada de agua.
- **Pared (azul):** Define la velocidad del fluido igual a cero e impide el paso a través de esta. Se considera sin desplazamiento y sin rugosidad.
- **Apertura (rojo):** Permite el paso bidireccional de ambas fases. Se define con una presión relativa cero.
- **Salida (amarillo):** Permite el flujo de agua o aire solo en la dirección de salida. Se define con una presión relativa cero.
- **Simetría (gris):** Modelo idéntico (espejo) a cada lado del plano divisorio. Permite analizar la parte representativa del sistema y disminuir el coste computacional.

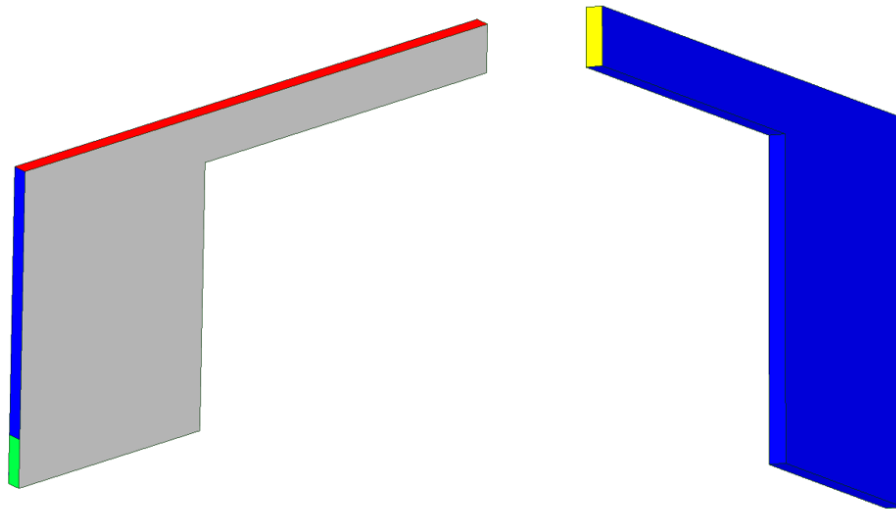


Figura 5.26: Condiciones de borde impuestas en el modelo

### 5.3.2.4. Resultados

La figura 5.27 muestra el resultado de uno de los casos simulados, donde se observa el estanque lleno de agua y un flujo en el canal, cuya altura cambia a lo largo.

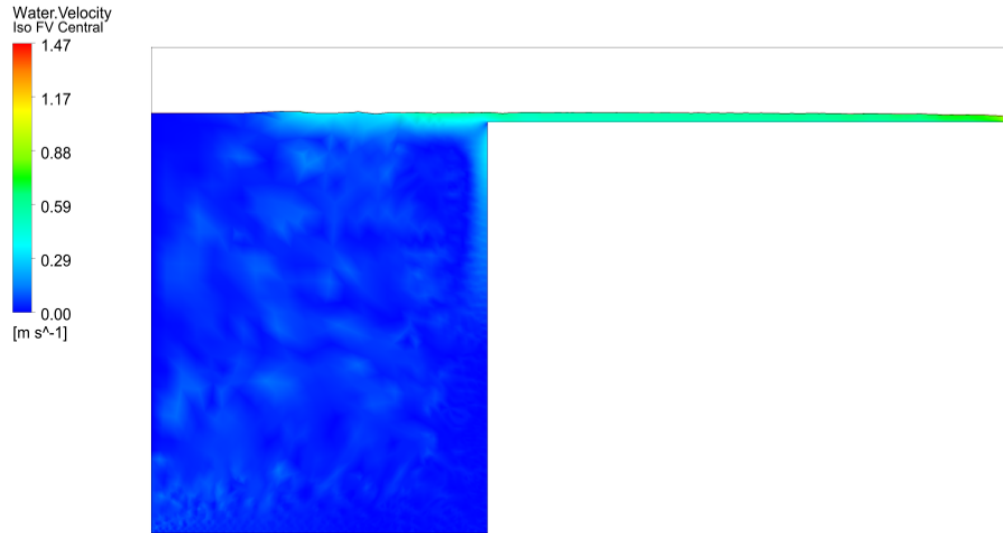


Figura 5.27: Velocidad de agua, vista lateral

La altura de flujo se obtiene directo de los resultados de la simulación, a dos metros del inicio del canal recto como se muestra en la línea marcado con rojo (ver figura 5.28).

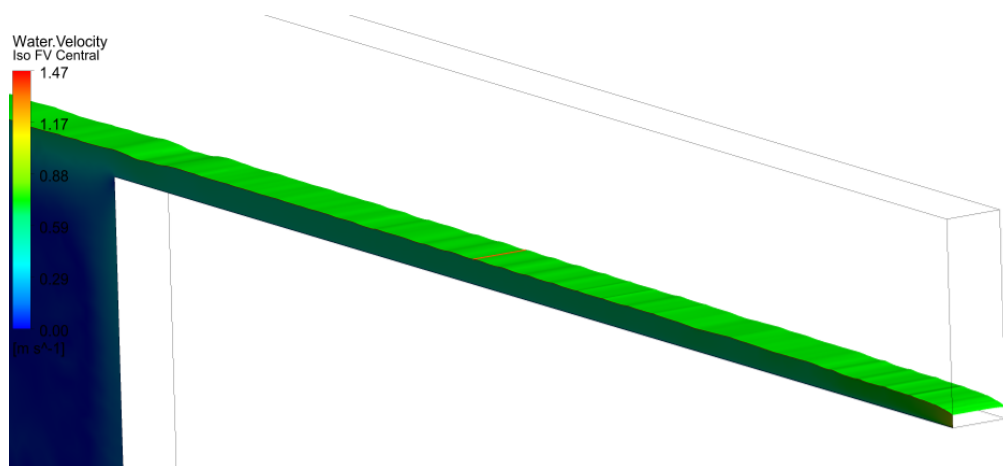


Figura 5.28: Superficie libre de agua

La altura final calculada de los cuatro escenarios se observa en la siguiente tabla.

Tabla 5.11: Escenarios de análisis considerados

Caudal	Altura [m]
10	0,060
20	0,088
40	0,130
50	0,144



### 5.3.3. Régimen de flujo en canal escalonado

Calculada la altura de flujo de cada uno de los escenarios, se procede a estudiar el comportamiento del flujo en los escalones, para lo cual se realiza una simulación en 3 dimensiones con un elemento de espesor que incluye solamente el canal recto y los ocho escalones considerados del diseño.

#### 5.3.3.1. Dominio de estudio

La geometría considerada corresponde a un tramo recto de canal rectangular de 10 [m] de largo y 0,5 [m] de alto, además de los escalones con las dimensiones mencionadas en la sección 5.3. En la figura 5.29 se observa la geometría utilizada.



Figura 5.29: Dominio de estudio correspondiente a canal escalonado

#### 5.3.3.2. Discretización espacial

La discretización espacial considera un cuerpo de influencia para refinar la zona de interés, correspondiente al último tramo del canal recto más la zona de los escalones, esto se puede observar en la figura 5.30 con mayor detalle.

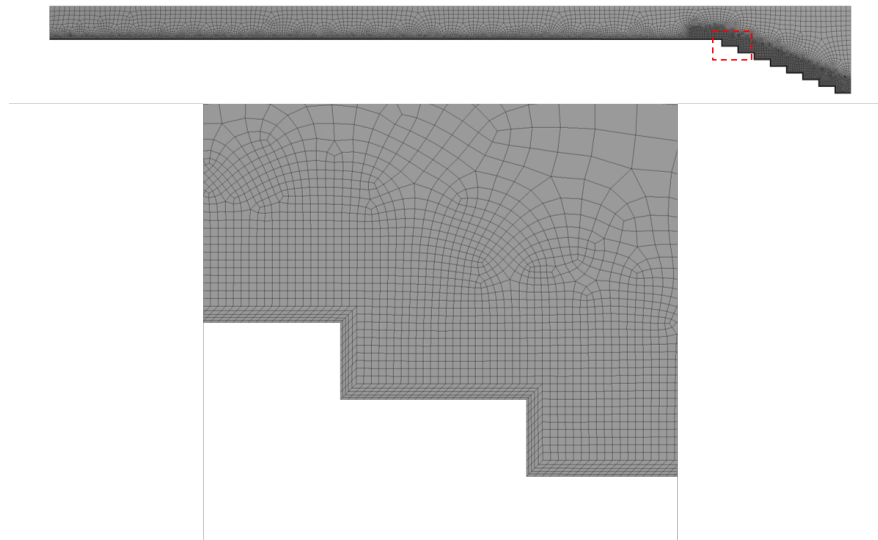


Figura 5.30: Discretización espacial del dominio y detalle de esta misma

Para esta malla se consideraron solo elementos hexaédricos, con un tamaño general de malla de 75 [mm] y un volumen de influencia con un tamaño de malla de 10 [mm], además de un inflation que recorre la pared inferior del sistema de 5 capas.

En la tabla 5.12 se presentan la cantidad de nodos y elementos de la malla, además de los promedios de calidad ortogonal y skewness. En la figura 5.31 se presentan los gráficos con la distribución de la calidad de los elementos de las métricas mencionadas.

Tabla 5.12: Valores de calidad de malla

<b>Cantidad de nodos</b>	36.214
<b>Cantidad de elementos</b>	17.435
<b>Promedio calidad ortogonal</b>	0,943
<b>Promedio skewness</b>	0,169

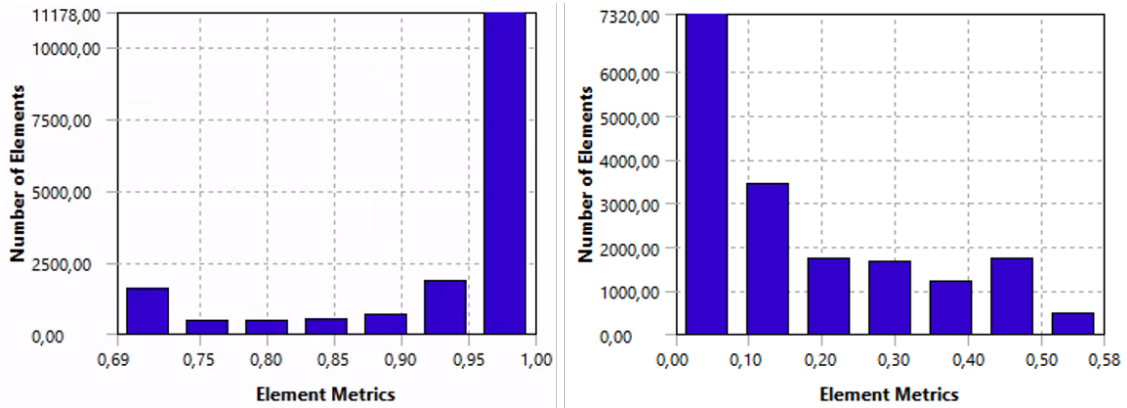


Figura 5.31: Valores de calidad ortogonal y asimetría de la malla

### 5.3.3.3. Resultados

Finalmente, el comportamiento de flujo se puede visualizar en los siguientes resultados, donde se muestra que para un caudal de 10 y 20  $[l/s]$  se obtiene un comportamiento nappe flow, como se muestra en las figuras 5.32 y 5.33, distinto a 40 y 50  $[l/s]$  donde se observa un flujo con una altura constante que está inclinado debido a un pseudo fondo existente, es decir, un skimming flow, correspondiente a las figuras 5.34 y 5.35. Estos resultados son acorde a los obtenidos experimentalmente por el autor, mencionados en la tabla 5.9, validando el comportamiento de flujo en un canal de dimensiones similares al del trabajo principal.

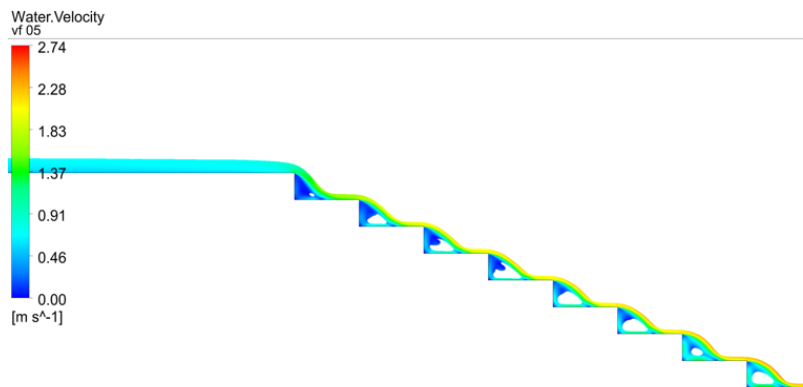


Figura 5.32: Contorno de velocidad, caudal de 10  $[l/s]$

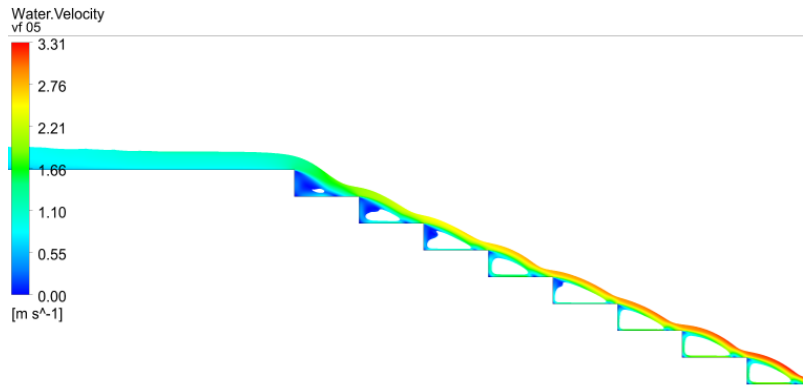


Figura 5.33: Contorno de velocidad, caudal de 20 [l/s]

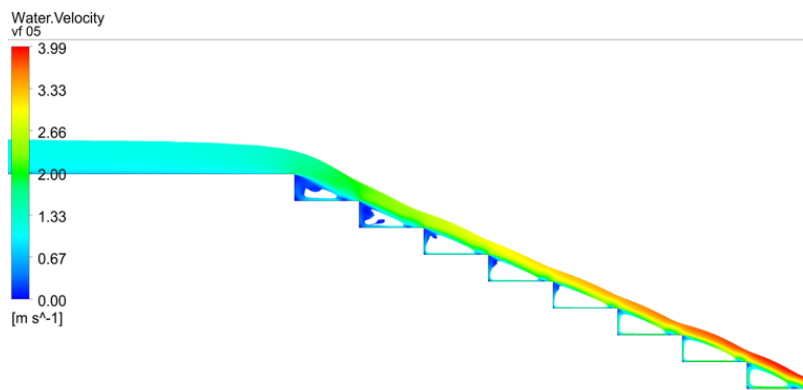


Figura 5.34: Contorno de velocidad, caudal de 40 [l/s]

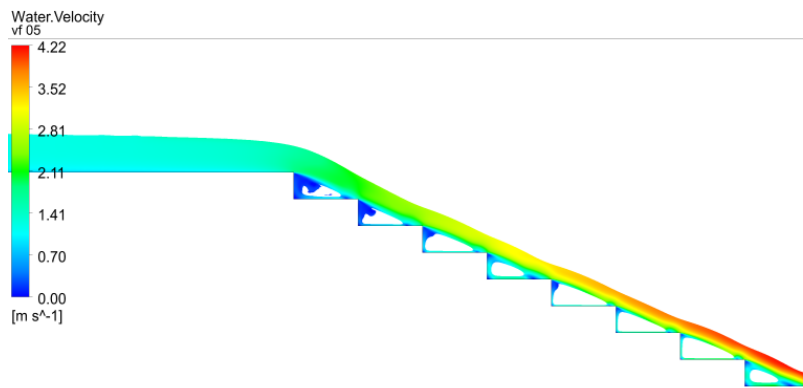


Figura 5.35: Contorno de velocidad, caudal de 50 [l/s]

# Capítulo 6

## Esquema de trabajo

### 6.1. Variables de análisis

En esta sección se presentan las variables influyentes en el fenómeno a estudiar y cómo fueron consideradas en el modelo de simulación.

En base a la bibliografía consultada, las variables de interés corresponden a la velocidad del flujo, viscosidad de pulpa, densidad de pulpa, dimensiones del canal, rugosidad del canal, inclinación del canal, concentración de sólidos en peso de la pulpa, la mojabilidad y tensión superficial.

De estas variables, solo 3 son analizadas para ver su efecto sobre el fenómeno, las cuales son consideradas las más influyentes del problema. Estas corresponden a la velocidad del flujo, concentración de sólidos en peso de la pulpa y el redondeo del borde del canal. El resto de parámetros se pueden considerar en 2 grupos: los parámetros fijos y los parámetros dependientes. En la tabla 6.1 se presentan los parámetros fijos y los valores considerados en el problema.

Tabla 6.1: Parámetros fijos del problema

Parámetro	Valor	Unidad
Viscosidad dinámica agua	0,001	$[Pa\ s]$
Densidad sólido	2.700	$[kg/m^3]$
Densidad agua	1.000	$[kg/m^3]$
Rugosidad canal	0,003	$[m]$
Ancho canal	1	$[m]$
Altura de flujo	0,1	$[m]$
Coefficiente de Manning	0,0124	$[1/(m^{1/3}s)]$

Una de las consideraciones de estos valores, corresponde a la rugosidad del canal, el cual se considera de concreto y tiene un coeficiente de Manning asociado.

Los parámetros dependientes del problema corresponden a la densidad de pulpa, viscosidad dinámica de la pulpa y la inclinación. Estos parámetros se calculan mediante las ecuaciones descritas en el capítulo 2 y son detallados en la siguiente sección.

Por último, cabe señalar que la mojabilidad y la tensión superficial no fueron considerados en el planteamiento del problema debido a la falta de información asociado a los valores de estos para cada caso de estudio.

## 6.2. Casos de estudio

En primer lugar, se debe tener en consideración que existen 2 posibles resultados en cada simulación, una que corresponde a que la pulpa, luego de la caída desde la canaleta rectangular, se mantenga adherida a la pared, y otra donde la pulpa tenga una caída libre estando despegada de la superficie.

Dicho esto, el proceso para analizar el efectos de las variables de estudio consta de 2 partes, la primera corresponde a un barrido inicial donde se analiza un rango específico de las variables de estudio, con tal de diferenciar 3 rangos correspondientes a los casos donde la pulpa se mantiene pegada a la pared, un rango de incerteza y, por último, un rango donde la pulpa no se encuentra pegada a la pared. Seguido de este barrido inicial, se realiza un refinamiento del parámetro de velocidad en el rango de incerteza, con el objetivo de poder estudiar con mayor precisión el efecto de la velocidad de flujo, que correspondería a la variable más influyente del problema.

Las simulaciones realizadas en el barrido inicial constan de 160 casos, que corresponden a la combinación de 8 velocidades en un rango de 0,5 a 4  $[m/s]$ , 5 redondeos en un rango de 0 a 100  $[mm]$  y 4 casos de concentración de sólidos en peso, en un rango de 15 a 60 %.

En la tabla 6.2 se muestran las distintas velocidades consideradas en el barrido inicial, además de la inclinación del canal para cada caso, la cual es calculada en función de la velocidad y los parámetros fijos expuestos en la tabla 6.1 mediante la ecuación 2.12.

Tabla 6.2: Valores de velocidad e inclinación en barrido inicial

<b>Velocidad</b> $[m/s]$	<b>Inclinación</b> $[\%]$
0,50	0,11
1,00	0,42
1,50	0,95
2,00	1,69
2,50	2,64
3,00	3,80
3,50	5,17
4,00	6,76

De igual forma, en la tabla 6.3 se muestran las distintas concentraciones de sólidos en peso consideradas en el barrido inicial, además de la densidad y viscosidad dinámica de la pulpa calculadas mediante las ecuaciones 2.3 y 2.5 respectivamente.

Tabla 6.3: Valores de Cp, densidad y viscosidad dinámica en barrido inicial

<b>Cp [%]</b>	<b>Densidad [<math>kg/m^3</math>]</b>	<b>Viscosidad dinámica pulpa [<math>Pa s</math>]</b>
15	1.104	0,0012
30	1.232	0,0017
45	1.395	0,0038
60	1.607	0,0233

Finalmente, los casos de redondeo del borde de la canaleta van desde un borde agudo, es decir, 0 [mm] hasta un redondeo de 100 [mm] (ver tabla 6.4).

Tabla 6.4: Valores de redondeo barrido inicial

<b>Redondeo [mm]</b>
0
25
50
75
100

Una vez realizado el barrido inicial, se procede a realizar un refinamiento de la variable de velocidad en cada rango de incerteza. Se mide la variación cada 0,05 [m/s], obteniendo un total de 9 casos de velocidad para cada combinación de redondeo y concentración de sólido en peso. Por lo tanto, el refinamiento de casos comprende 180 simulaciones adicionales, resultando un total de 340 simulaciones en el trabajo principal, teniendo en consideración 3 variables de estudio.

### 6.3. Workbench paramétrico

Para manejar el alto número de simulaciones del problema se decide utilizar las opciones de Parámetros en ANSYS Workbench, la cual es una herramienta que permite manejar, mediante una tabla de parámetros, las condiciones iniciales del setup y los resultados del post proceso de cada una de las simulaciones.

En la figura 6.1 se observa la tabla de datos obtenida para un caso específico de concentración de sólidos en peso y redondeo, donde se varía la velocidad del flujo según el rango señalado en la tabla 6.2.

Esta tabla presenta en las filas los llamados puntos de diseño o DP por su sigla en inglés, que corresponden a cada una de las simulaciones realizadas para este set de casos. Las columnas representan las variables, representadas por las casillas blancas, correspondientes a los parámetros de entrada del problema, los cuales se pueden modificar. Estos parámetros son: la inclinación, redondeo, viscosidad dinámica de la pulpa, densidad de la pulpa y la velocidad del flujo en la entrada del canal.

Table of Design Points																				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Name	P5 - Ancho	P6 - Inclinación	P7 - Redondeo	P15 - nManning	P19 - Viscosidad	P20 - Densidad	P21 - IncAux	P22 - VInlet	P8 - Altura de flujo	P9 - Altura de flujo area	P10 - Velocidad promedio 4	P11 - VF1	P12 - VF2	P13 - VF3	P17 - Manning	P18 - Inlet	Retain	Retained Data	Report Image
2	Units	mm	degree	mm		Pa s	kg m <sup>-3</sup>		m s <sup>-1</sup>	m	m	m s <sup>-1</sup>								
3	DP 0 (Current)	500	0,06508	25	0,0124	0,0038291	1395,3	0,06508	0,5	0,06069	0,063272	0,57385	1	0,99999	0,99999	0,0010561	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	DP 1	500	0,24203	25	0,0124	0,0038291	1395,3	0,24203	1	0,10241	0,10289	1,0286	1	1	1	0,0042243	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	DP 2	500	0,54456	25	0,0124	0,0038291	1395,3	0,54456	1,5	0,11696	0,11459	1,5838	0,99979	0,99989	0,99988	0,0095046	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	DP 3	500	0,96804	25	0,0124	0,0038291	1395,3	0,96804	2	0,11425	0,11527	2,0474	6,627E-06	1,0002E-15	1,0002E-15	0,016897	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
7	DP 4	500	1,5124	25	0,0124	0,0038291	1395,3	1,5124	2,5	0,11466	0,11461	2,5282	1,5979E-06	1,0307E-14	1,0419E-15	0,026402	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
8	DP 5	500	2,1772	25	0,0124	0,0038291	1395,3	2,1772	3	0,11656	0,11534	3,0216	1,0034E-15	5,6884E-14	5,8129E-14	0,038018	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
9	DP 6	500	2,9623	25	0,0124	0,0038291	1395,3	2,9623	3,5	0,11493	0,11561	3,4866	3,6532E-12	5,2481E-10	1,5369E-12	0,051747	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
10	DP 7	500	3,8666	25	0,0124	0,0038291	1395,3	3,8666	4	0,11582	0,1156	3,9592	3,349E-11	5,1758E-12	2,1905E-12	0,067588	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 6.1: Pestaña Parámetros de ANSYS Workbench

Por otro lado, las casillas en grises corresponden a los resultados obtenidos del post proceso de cada simulación, los cuales son detalladas a continuación:

- Altura de flujo [ $m$ ]: Para medir la altura del flujo se considera un área de la superficie libre de flujo, definida como las celdas con fracción volumétrica de pulpa igual a 0,5. Esta área va desde los 3,75 [ $m$ ] a 4,25 [ $m$ ] medido desde el borde de la canaleta. El cálculo corresponde al promedio de la altura en el área marcada en gris de la figura 6.2 con el fin de evitar los pequeños picos presentes por las ondas superficiales del flujo.

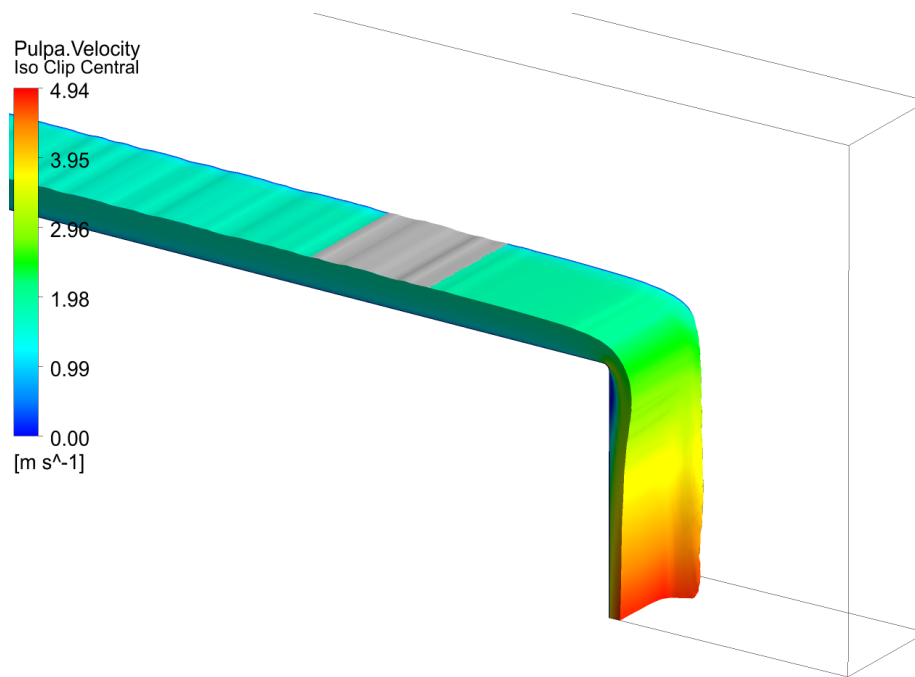


Figura 6.2: Zona de medición de altura de flujo

- Velocidad de flujo [ $m/s$ ]: La medición de la velocidad de flujo se realiza sobre un perfil a 4 metros medidos desde el borde de la canaleta. El cálculo corresponde a un promedio de la velocidad en el perfil mostrado en la figura 6.3.

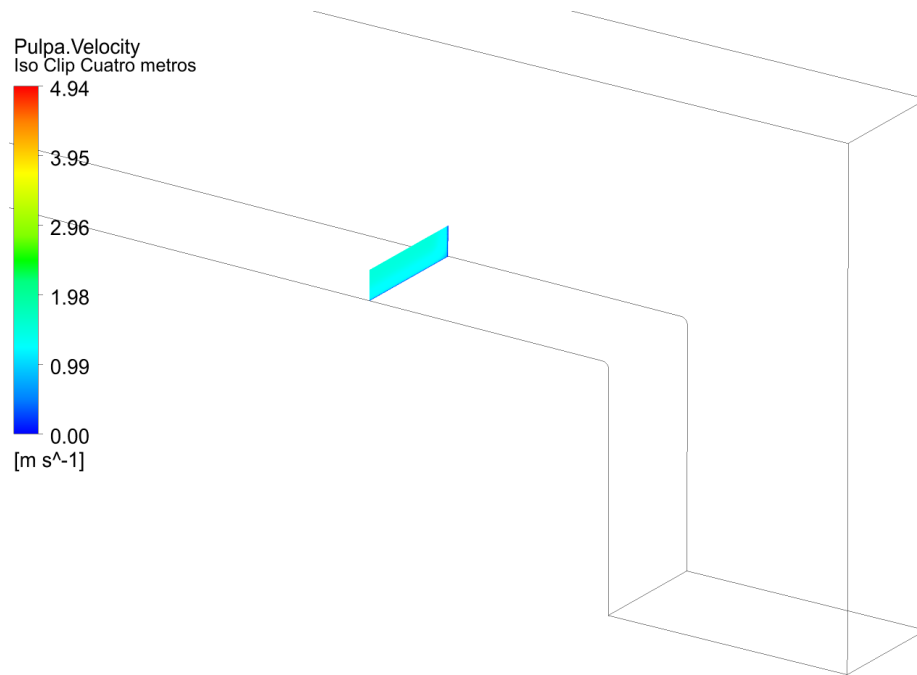


Figura 6.3: Zona de medición de velocidad de flujo

- Fracción volumétrica de pulpa en la pared de caída: Para medir si el flujo de pulpa se queda adherida a la pared de caída, se evalúa la fracción volumétrica de pulpa en 3 puntos separados por 0,25 [m]. Si esta es mayor a 0,95 significa que la pulpa se encuentra adherida a la superficie y si la fracción volumétrica es menor a 0,05 significa que la pulpa no está adherida. En la figura 6.4 se observan los puntos donde es medido en cada simulación.

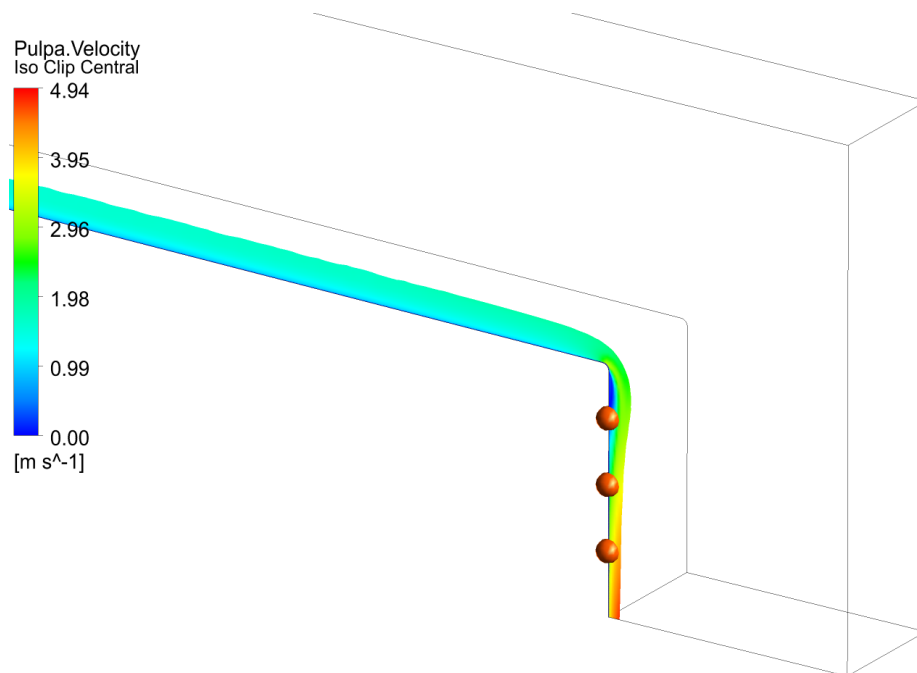


Figura 6.4: Puntos de medición de fracción volumétrica de pulpa en la pared de caída



- Imagen de reporte: La última columna de resultados corresponde a una figura con vista lateral del flujo, que permite revisar visualmente si los resultados calculados corresponden a lo esperado. En la figura 6.5 se puede observar la visualización del reporte de 2 figuras correspondientes a 2 puntos de diseño donde se genera el quiebre esperado entre la adhesión de flujo a la pared y el despegue de este.



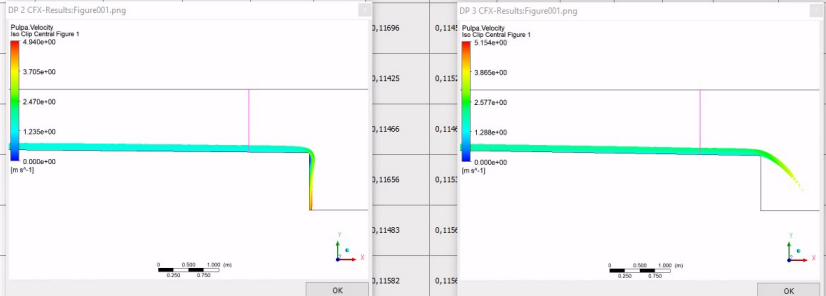






Table of Design Points																				
1	Name	P5 - Ancho	P6 - Inclinacion	P7 - Redondeo	P15 - nManning	P19 - Viscosidad	P20 - Densidad	P21 - IncAux	P22 - Vrilet	P8 - Altura de flujo	P9 - Altura de flujo area	P10 - Velocidad promedio 4	P11 - VF1	P12 - VF2	P13 - VF3	P17 - Manning	P18 - Hrilet	Retain	Retained Data	Report Image
2	Units	mm	degree	mm		Pa s	kg m <sup>-3</sup>		m s <sup>-1</sup>	m	m	m s <sup>-1</sup>								
3	DP 0 (Current)	500	0,060508	25	0,0124	0,0038291	1395,3	0,060508	0,5	0,06069	0,063272	0,57385	1	0,99999	0,99999	0,0010561	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	DP 1	500	0,24203	25	0,0124	0,0038291	1395,3	0,24203	1	0,10241	0,10289	1,0596	1	1	1	0,0042243	0,1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	DP 2	500	0,54456	25											<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				
6	DP 3	500	0,96804	25											<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				
7	DP 4	500	1,5124	25											<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				
8	DP 5	500	2,1772	25											<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				
9	DP 6	500	2,9623	25											<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				
10	DP 7	500	3,8666	25											<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				

Figura 6.5: Visualización de 2 figuras reportadas en la pestaña Parámetros de ANSYS Workbench

# Capítulo 7

## Resultados y Análisis

### 7.1. Simulación de caso base

A continuación se presenta la simulación del caso base del estudio principal mencionado en el punto 4 de la sección 4.1. Se presentan las variables consideradas, el dominio de trabajo, las condiciones de borde y el análisis de independencia de malla para validar los resultados.

Para el caso base se consideraron los parámetros de flujo mostrados en la tabla 7.1.

Tabla 7.1: Parámetros de flujo del modelo

Parámetro	Valor	Unidad
Velocidad de flujo inicial	2,50	$[m/s]$
Altura de flujo inicial	0,23	$[m]$
Densidad	1.203	$[kg/m^3]$
Viscosidad	0,0016	$[Pa\ s]$

Además, se deben tener en cuenta los parámetros fijos mencionados en la tabla 6.1, como la rugosidad del canal y el coeficiente de Manning.

#### 7.1.1. Consideraciones de la simulación

- Se considera un esquema multifásico homogéneo de pulpa y aire, consideradas como fases continuas.
- Se utiliza un modelo turbulento  $\kappa-\omega$  SST para describir las fluctuaciones de la velocidad.
- Se utiliza un régimen temporal estacionario.
- Modelo en 3 dimensiones correspondiente a la mitad del canal, debido a condición de simetría.
- Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes a través del método de volúmenes finitos.
- Resolución de las ecuaciones de momento y masa, sin considerar el balance térmico.
- Se considera modelo de flotabilidad con gravedad en el eje vertical y una densidad de referencia correspondiente a  $1,185 [kg/m^3]$ .

- La condición inicial corresponde a un canal repleto de aire.

### 7.1.2. Dominio de estudio

La geometría del modelo corresponde solo a la mitad, debido a su simetría, la cual fue considerada para disminuir el costo computacional por el alto número de simulaciones a realizar. Estos parámetros geométricos se observan en la tabla 7.2. Además, se debe tener en consideración que para este caso específico del caso base, se fija la inclinación en 1 [%] y el redondeo en 200 [mm]. En la figura 7.1 se observa la geometría considerada para el caso base.

Tabla 7.2: Parámetros geométricos del caso base

Parámetro	Valor	Unidad
Alto canal	1	[m]
Ancho canal	0,5	[m]
Largo canal	5	[m]
Inclinación	1	[°]
Redondeo	200	[mm]

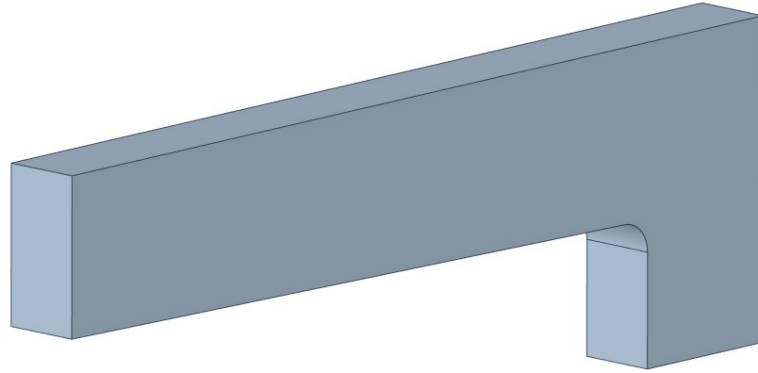


Figura 7.1: Dominio del estudio del trabajo de investigación.

### 7.1.3. Condiciones de borde

- **Entrada (verde):** Condición de entrada que considera tanto una una sección de aire como una de pulpa, definidas mediante una expresión de fracción volumétrica en función de la altura de la pared y la altura de entrada de flujo.
- **Pared (azul):** Define la velocidad del fluido igual a cero e impide el paso a través de esta. Se considera sin desplazamiento y con una rugosidad = 0,003 [m] correspondiente a la rugosidad del concreto.
- **Apertura (rojo):** Permite el paso bidireccional de ambas fases. Se define con una presión relativa cero.
- **Salida (amarillo):** Permite el flujo de pulpa o aire solo en la dirección de salida. Se define con una presión relativa cero.

- **Simetría (gris con transparencia):** Modelo idéntico (espejo) a cada lado del plano divisorio. Permite analizar parte representativa del sistema y disminuir el coste computacional.

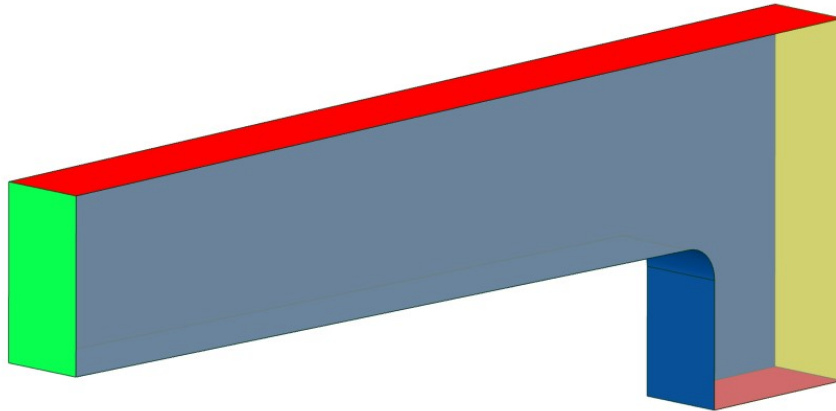


Figura 7.2: Condiciones de borde impuestas en el modelo

#### 7.1.4. Independencia de malla

Dada la simplicidad de la geometría, se realiza una malla hexaédrica, con inflación de 7 capas y tasa de crecimiento 1,2. Además, se considera un cuerpo de influencia en el borde, la cual corresponde a la zona de mayor interés debido a que es donde ocurre el fenómeno de adhesión de pulpa a la pared. En la figura 7.3 se observa la quinta malla.

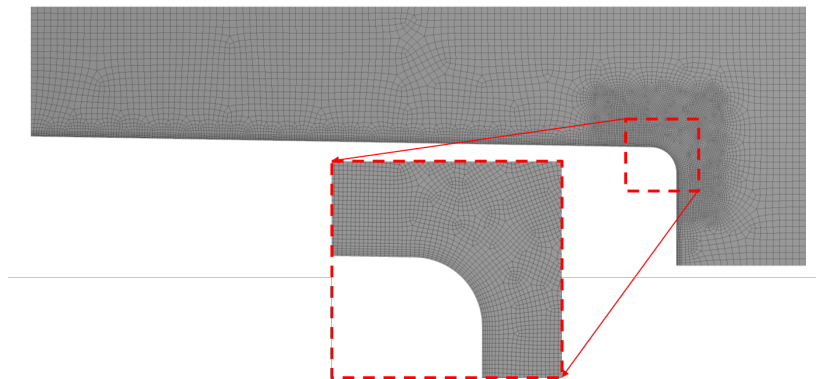


Figura 7.3: Discretización espacial del dominio y detalle de esta misma

Para seleccionar la malla se dispone a realizar 6 simulaciones con distinto tamaño de elementos, las cuales se muestran en la tabla 7.3. Luego, para cada una de las mallas se resuelve el problema y se calcula la altura de flujo como se menciona en la sección 6.3.

Tabla 7.3: Consideraciones de las 6 mallas probadas

Parámetro de malla	Body sizing	Body of influence	Nodos	Elementos
Malla 1	0,080	0,035	40.048	35.265
Malla 2	0,060	0,025	86.016	78.360
Malla 3	0,060	0,020	139.152	128.875
Malla 4	0,060	0,015	254.205	239.394
Malla 5	0,050	0,013	428.737	407.440
Malla 6	0.042	0.012	500.692	476.828

En la tabla 7.4 se observa la altura obtenida para cada una de las mallas y se calcula la diferencia porcentual de cada una respecto a la anterior. De la figura 7.5 se visualiza de mejor manera la variación de altura entre las distintas mallas.

La diferencia porcentual de las mallas 2, 3 y 4 son mayores a 10%, distinto a la malla número 5 donde la diferencia es menor al 2% respecto a la malla número 4, lo cual se considera adecuado para el problema.

Tabla 7.4: Consideraciones de las 6 mallas probadas

Parámetro	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla 4	Malla 5	Malla 6
Altura [m]	0,215	0,237	0,210	0,233	0,228	0,225
Error %	-	10,284	11,541	11,002	1,961	1,391

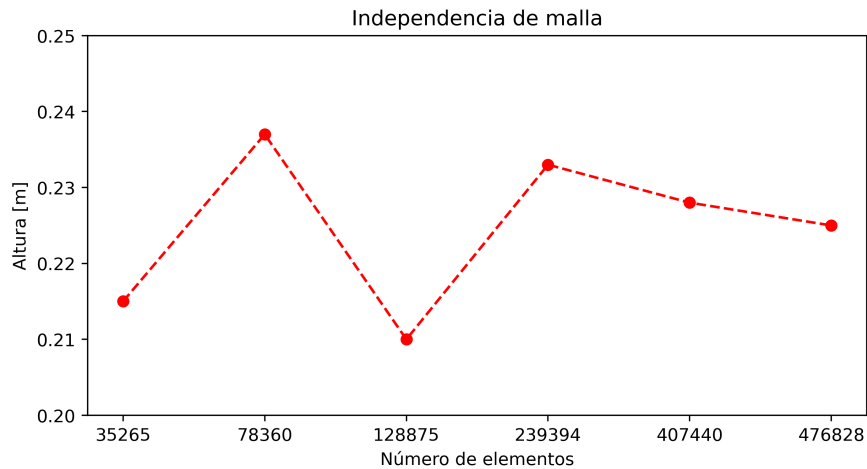


Figura 7.4: Análisis de independencia de malla

Por lo mencionado anteriormente, la malla seleccionada para el estudio corresponde a la quinta malla. A continuación se presentan la cantidad de nodos y elementos de la malla, además de los promedios de calidad ortogonal y skewness.

Tabla 7.5: Parámetros de malla número 5

<b>Cantidad de nodos</b>	428.737
<b>Cantidad de elementos</b>	407.440
<b>Promedio calidad ortogonal</b>	0,991
<b>Promedio skewness</b>	0,072

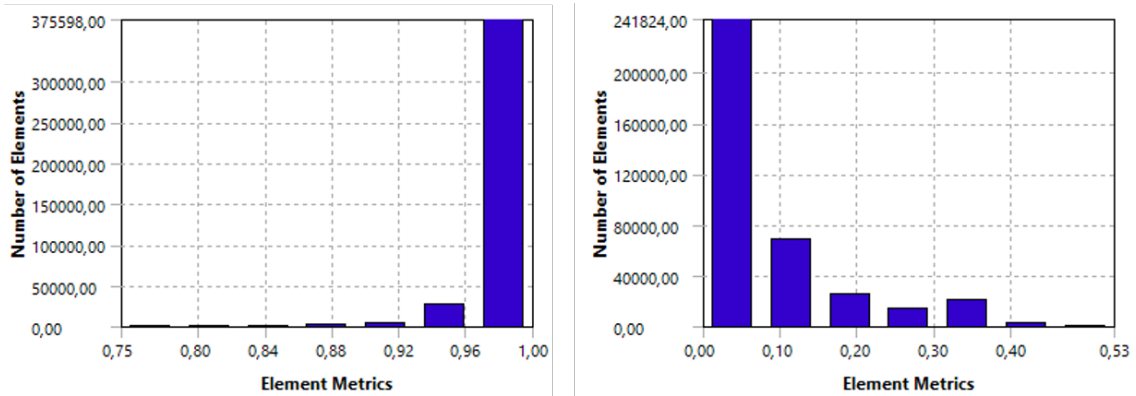


Figura 7.5: Valores de calidad ortogonal y asimetría de la malla

## 7.2. Barrido inicial de casos de estudio

Las simulaciones realizadas del barrido inicial muestran que no hay dependencia de la concentración de sólidos en peso en los rangos estudiados. La variación del  $C_p$  no genera cambios en los resultados del barrido inicial, es por esto que la presentación de resultados en esta sección se realiza considerando el  $C_p = 15\%$ , a modo de simplificar la visualización de estos.

A continuación, se presentan 5 figuras que muestran la velocidad crítica en la cual ocurre el efecto de despegue de pulpa, separándolos según el redondeo que tiene.

Para el caso de borde agudo o redondeo = 0 [mm] mostrado en la figura 7.6, se observa que a 0,578 [m/s] la pulpa continúa adherida a la pared y que a 1,093 [m/s] esta se despega.

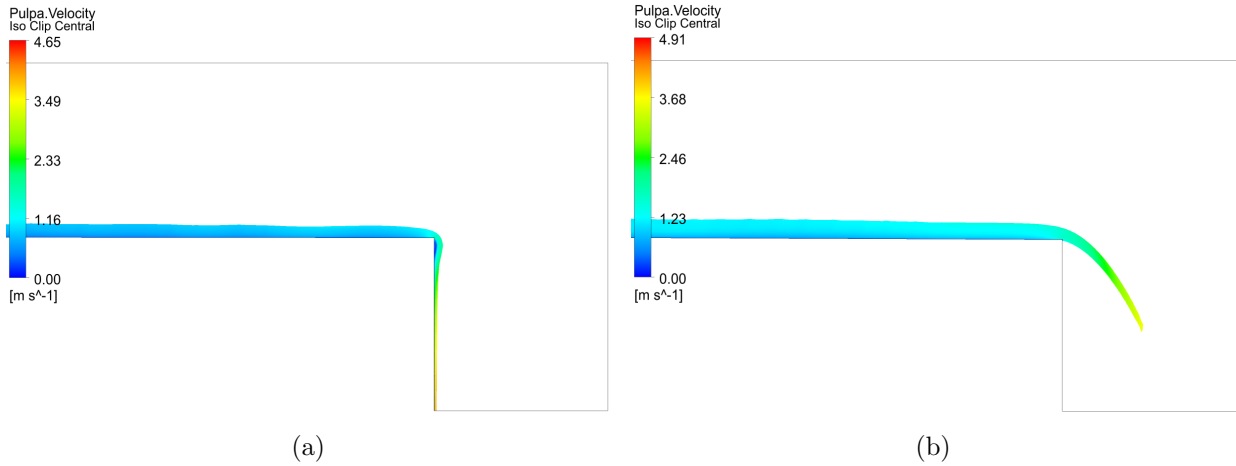


Figura 7.6: Rango de velocidad donde ocurre el despegue de flujo con redondeo de 0  $[mm]$ ; a) Velocidad de 0,578  $[m/s]$ , b) Velocidad de 1,093  $[m/s]$

Para el caso de redondeo = 25  $[mm]$  el rango crítico se encuentra entre 1,582  $[m/s]$  y 2,075  $[m/s]$ , como se observa en la figura 7.7.

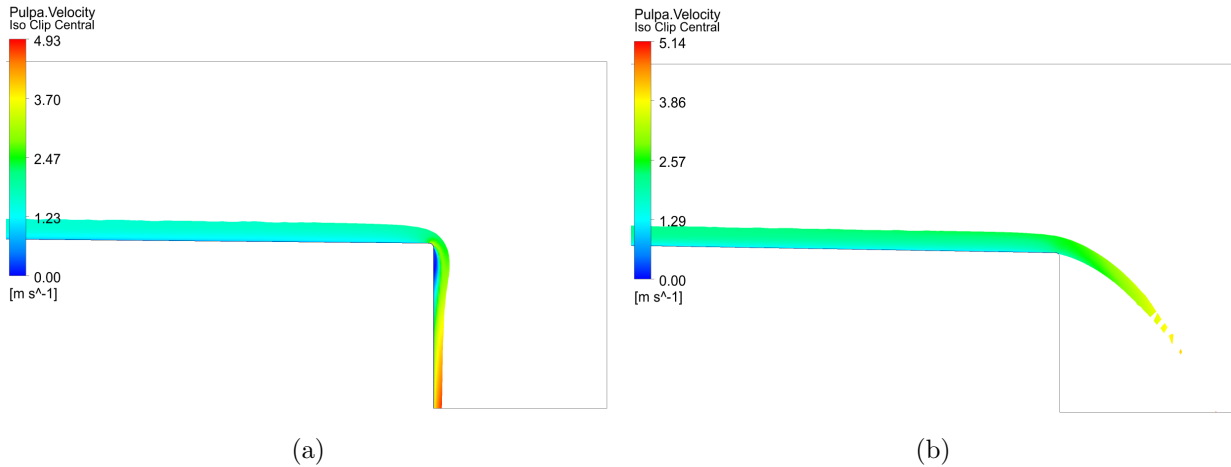


Figura 7.7: Rango de velocidad donde ocurre el despegue de flujo con redondeo de 25  $[mm]$ ; a) Velocidad de 1,582  $[m/s]$ , b) Velocidad de 2,075  $[m/s]$

Para el caso de redondeo = 50  $[mm]$  el rango crítico se encuentra entre 2,566  $[m/s]$  y 3,046  $[m/s]$ , como se observa en la figura 7.8.

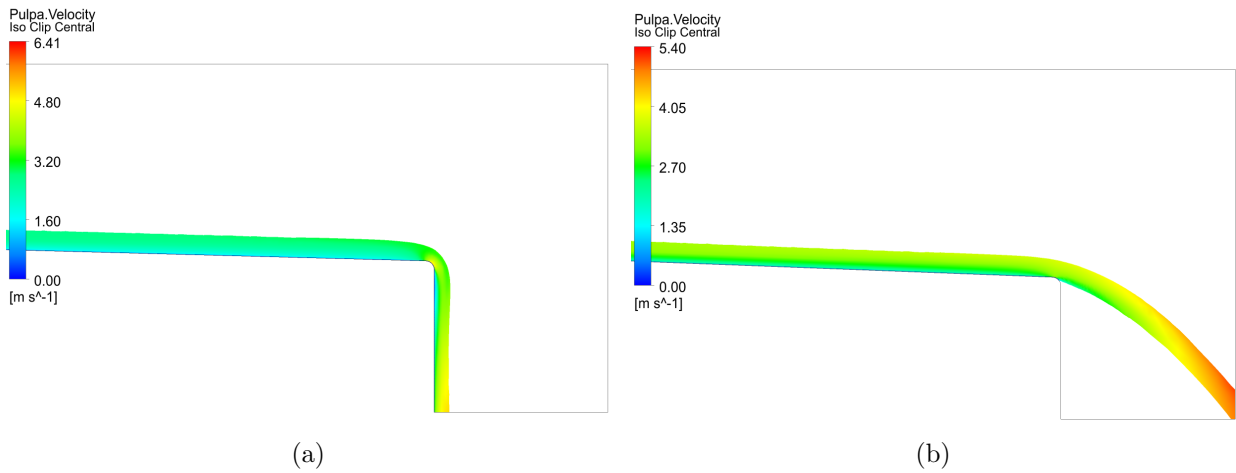


Figura 7.8: Rango de velocidad donde ocurre el despegue de flujo con redondeo de 50 [mm]; a) Velocidad de 2,566 [m/s], b) Velocidad de 3,046 [m/s]

Para el caso de redondeo = 75 [mm] el rango crítico se encuentra entre 3,046 [m/s] y 3,498 [m/s], como se observa en la figura 7.9.

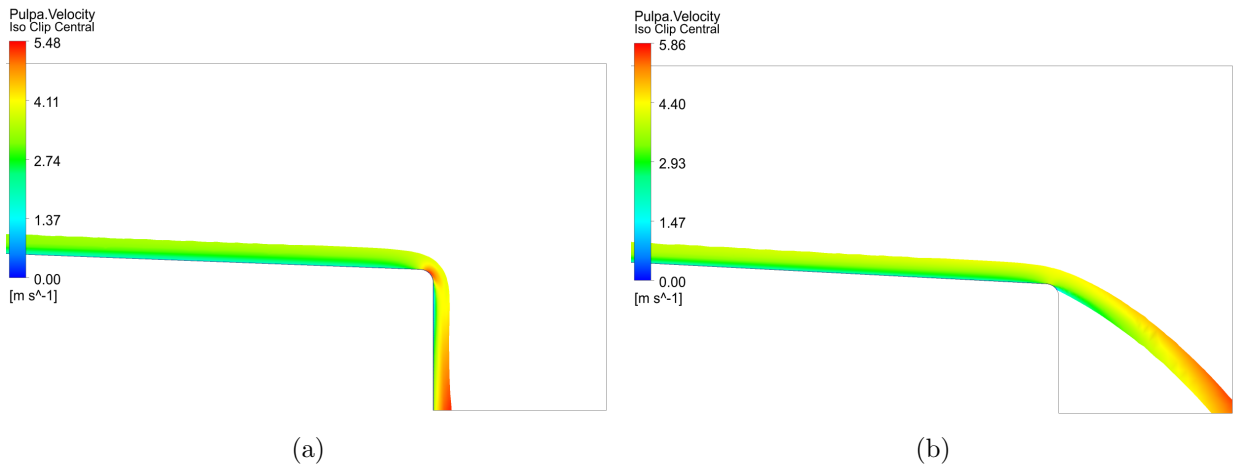


Figura 7.9: Rango de velocidad donde ocurre el despegue de flujo con redondeo de 75 [mm]; a) Velocidad de 3,046 [m/s], b) Velocidad de 3,498 [m/s]

Finalmente, para el caso de redondeo = 100 [mm] el rango crítico se encuentra entre 3,498 [m/s] y 3,976 [m/s], como se observa en la figura 7.10.



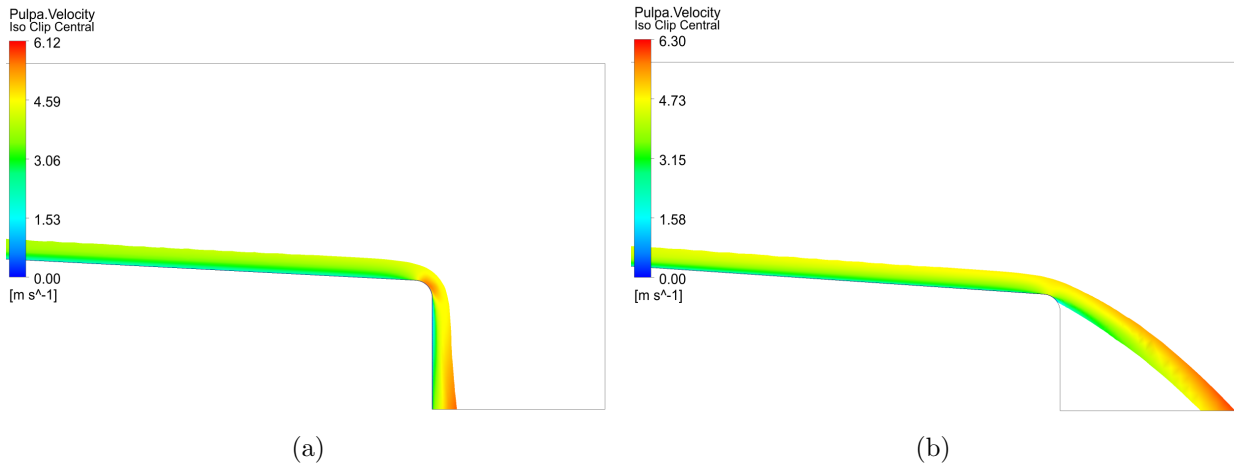


Figura 7.10: Rango de velocidad donde ocurre el despegue de flujo con redondeo de 100 [mm]; a) Velocidad de 3,498 [m/s], b) Velocidad de 3,976 [m/s]

Esto se puede resumir gráficamente, como se muestra en la figura 7.11, lo cual sugiere que existen 3 zonas correspondientes a una zona donde la combinación de velocidad y redondeo implicaría que la pulpa se mantendría pegada a la pared, una zona donde la combinación de parámetros indicaría que la pulpa se despega de la superficie al llegar al borde y una zona de incerteza, que es donde se hará el refinamiento de casos.

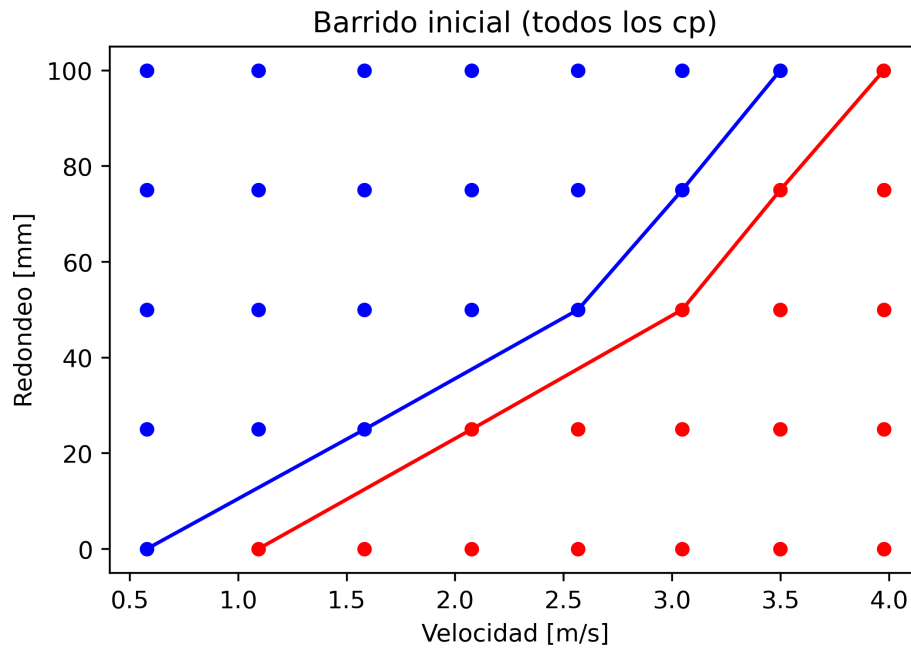


Figura 7.11: Barrido inicial, azul representa flujo pegado a la pared de caída y rojo representa el escenario cuando se despega la pulpa de la superficie

Para diferenciar estas 3 zonas se procede a obtener las curvas presentes en la figura 7.11 mediante un ajuste polinómico de tercer orden, dando como resultado la ecuación 7.1 para

el límite donde la pulpa continúa pegada a la superficie y 7.2 para el límite donde la pulpa se despega de la superficie.

$$R_0 = 3,78 \cdot v^3 - 16,06 \cdot v^2 + 44,75 \cdot v - 21,14 \quad (7.1)$$

$$R_1 = 3,37 \cdot v^3 - 18,63 \cdot v^2 + 57,33 \cdot v - 44,66 \quad (7.2)$$

Haciendo uso de estos resultados, se puede obtener el siguiente gráfico de contornos para visualizar los resultados de mejor manera.

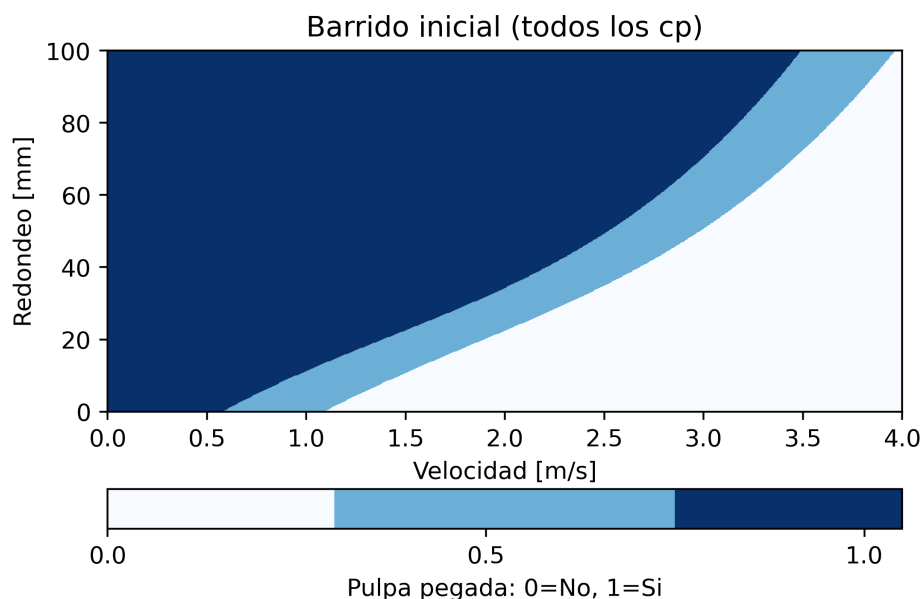


Figura 7.12: Barrido inicial considerando curvas de ajustes

La altura de flujo considerada en el análisis corresponde a 0,113 [m], la cual es un poco mayor que la ingresada como parámetro de entrada, correspondiente a 0,1 [m], y se debe a que el perfil de entrada es uniforme, mientras que el área donde se mide la altura de flujo, a 4 metros del borde, ya tiene un perfil desarrollado.

Considerando los mismos resultados, y tomando el redondeo como variable independiente, se obtiene la figura 7.13. Las ecuaciones que caracterizan los límites de las zonas diferenciadas en la figura 7.13 se obtienen mediante un ajuste polinómico de segundo orden, correspondientes a las ecuaciones 7.3 y 7.4.

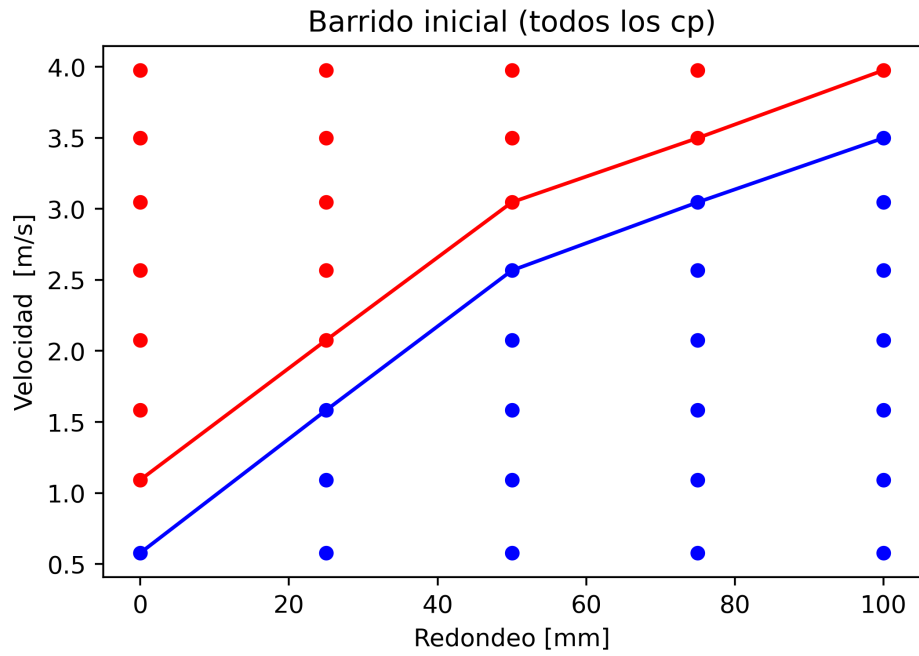


Figura 7.13: Barrido inicial, azul representa flujo pegado a la pared de caída y rojo representa el escenario cuando se despega la pulpa de la superficie

$$v_0 = -0,000175 \cdot r^2 + 0,04622 \cdot r + 1,0815 \quad (7.3)$$

$$v_1 = -0,000184 \cdot r^2 + 0,04758 \cdot r + 0,564 \quad (7.4)$$

Haciendo uso de estos resultados, se puede obtener el siguiente gráfico de contornos para visualizar los resultados de mejor manera.

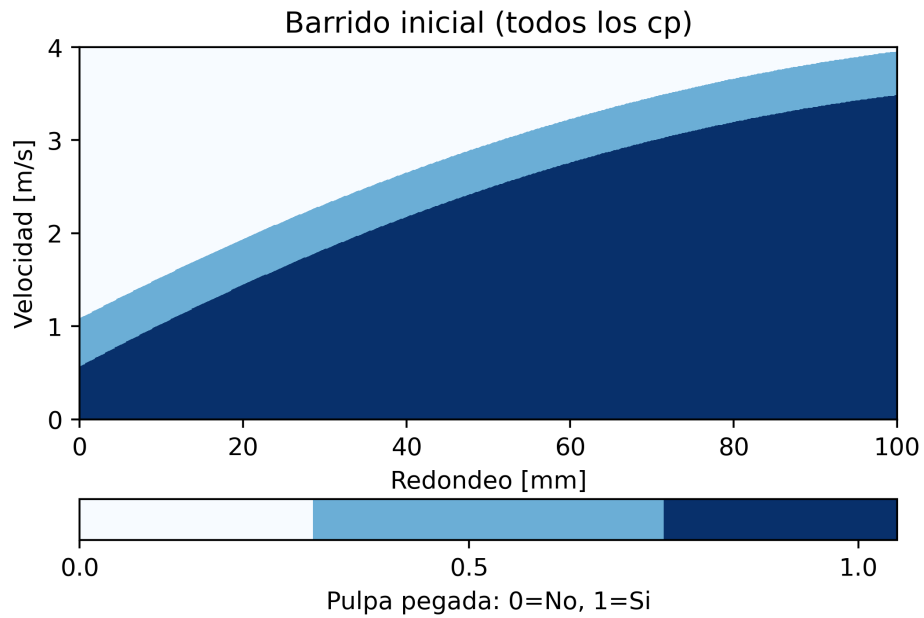


Figura 7.14: Barrido inicial considerando curvas de ajustes

Analizando la figura 7.12, se observa que a medida que aumenta la velocidad de la pulpa, mayor es la tendencia a despegarse de la superficie, esto está en acuerdo con lo mencionado en [12] y [14].

De manera contraria, se observa que al aumentar el redondeo, se facilita que la pulpa se mantenga adherida a la superficie, lo cual esta en acuerdo con [13], que menciona que un borde agudo facilita el despegue del flujo.

Finalmente, el problema muestra una independencia del fenómeno estudiado respecto a la concentración de sólidos en peso, esto se debe en parte a la sensibilidad del barrido inicial. En la siguiente sección se logra ver como influye el  $C_p$  en un análisis más fino que el barrido inicial.

### 7.3. Refinamiento de casos de estudio

El refinamiento de casos se realizó para cada uno de los rangos críticos mostrados en las figuras 7.6, 7.7, 7.8, 7.9 y 7.10. Para estos casos, se muestra una dependencia de los resultados, tanto para la velocidad, redondeo y la concentración de sólidos en peso, que no se aprecia en los resultados del barrido inicial.

Para resumir los 180 casos simulados del refinamiento de casos, donde se varía la velocidad cada  $0,05 [m/s]$ , se presentan 4 tablas de resultados correspondientes a cada concentración de sólidos en peso evaluado, donde se observa el rango crítico de velocidad en el cual ocurre el fenómeno estudiado para cada redondeo. El parámetro  $v_{max}$  corresponde al valor de velocidad límite para que la pulpa se mantenga pegada a la superficie a un redondeo específico y  $v_{min}$  corresponde al valor mínimo de velocidad requerido para que la pulpa se despegue a un redondeo específico.

Tabla 7.6: Resultados de refinamiento de casos con  $C_p = 15\%$

Redondeo [mm]	$v_{max}$ [m/s]	$v_{med}$ [m/s]	$v_{min}$ [m/s]
0	0,861	0,881	0,902
25	2,035	2,040	2,045
50	2,874	2,882	2,890
75	3,437	3,567	3,496
100	3,668	3,696	3,725

Tabla 7.7: Resultados de refinamiento de casos con  $C_p = 30\%$

Redondeo [mm]	$v_{max}$ [m/s]	$v_{med}$ [m/s]	$v_{min}$ [m/s]
0	0,861	0,881	0,902
25	2,035	2,040	2,045
50	2,874	2,882	2,890
75	3,437	3,478	3,520
100	3,788	3,800	3,711

Tabla 7.8: Resultados de refinamiento de casos con  $C_p = 45\%$

<b>Redondeo</b> [mm]	$v_{max}$ [m/s]	$v_{med}$ [m/s]	$v_{min}$ [m/s]
0	0,861	0,881	0,902
25	2,035	2,040	2,045
50	2,874	2,882	2,890
75	3,437	3,478	3,520
100	3,811	3,871	3,930

Tabla 7.9: Resultados de refinamiento de casos con  $C_p = 60\%$

<b>Redondeo</b> [mm]	$v_{max}$ [m/s]	$v_{med}$ [m/s]	$v_{min}$ [m/s]
0	0,813	0,837	0,861
25	1,980	2,013	2,045
50	2,874	2,882	2,890
75	3,437	3,478	3,520
100	3,811	3,871	3,930

Además, se calcula el valor promedio, denominado  $v_{med}$ , el cual es utilizado para obtener la curva característica de cada caso presentado, mediante un ajuste polinómico de tercer orden. Estas curvas se presentan en las siguientes ecuaciones:

$$R_{cp15} = 6,63 \cdot v^3 - 36,93 \cdot v^2 + 86,1 \cdot v - 52,58 \quad (7.5)$$

$$R_{cp30} = 4,83 \cdot v^3 - 25,87 \cdot v^2 + 65,58 \cdot v - 41,48 \quad (7.6)$$

$$R_{cp45} = 3,52 \cdot v^3 - 17,81 \cdot v^2 + 50,65 \cdot v - 33,40 \quad (7.7)$$

$$R_{cp60} = 3,37 \cdot v^3 - 16,57 \cdot v^2 + 47,22 \cdot v - 30,20 \quad (7.8)$$

En la figura 7.15 se observa el contorno obtenido del barrido inicial y las curvas características del refinamiento.

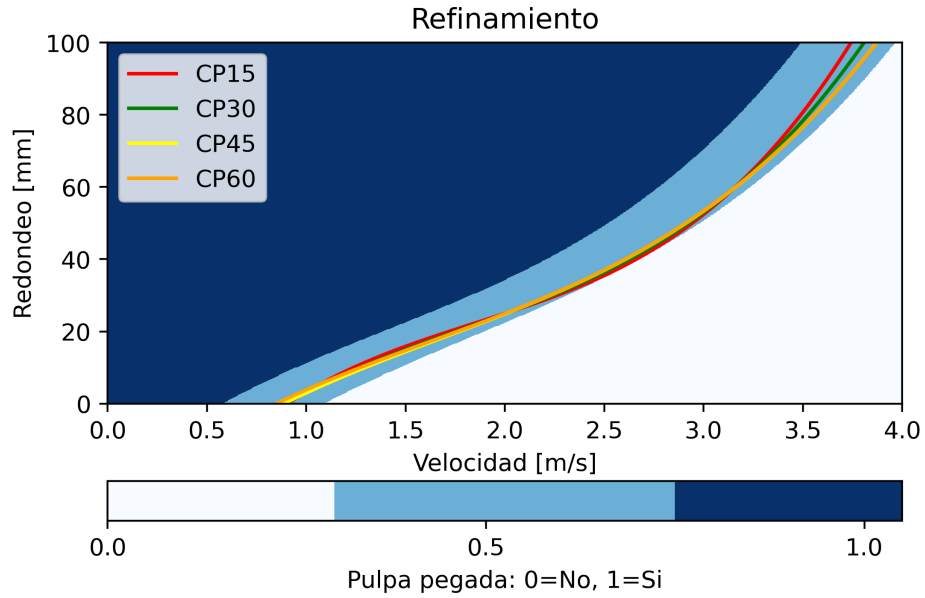


Figura 7.15: Curvas de ajustes obtenidas del refinamiento de casos sobre el barrido inicial

Considerando los mismos resultados y tomando el redondeo como variable independiente se obtienen las siguientes ecuaciones que caracterizan el fenómeno estudiado.

$$v_{cp15} = -0,000249 \cdot r^2 + 0,05346 \cdot r + 0,8459 \quad (7.9)$$

$$v_{cp30} = -0,000229 \cdot r^2 + 0,0521 \cdot r + 0,8576 \quad (7.10)$$

$$v_{cp45} = -0,000213 \cdot r^2 + 0,05105 \cdot r + 0,8657 \quad (7.11)$$

$$v_{cp60} = -0,00022 \cdot r^2 + 0,05206 \cdot r + 0,8322 \quad (7.12)$$

En la figura 7.16 se observa el contorno obtenido del barrido inicial y las curvas características del refinamiento.

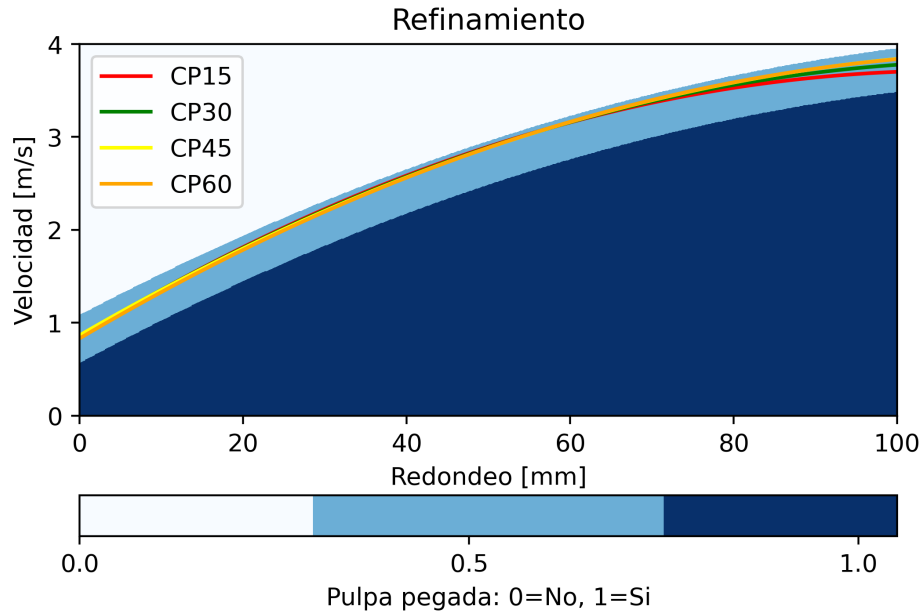


Figura 7.16: Curvas de ajustes obtenidas del refinamiento de casos sobre el barrido inicial

A partir de las curvas y de los datos de las tablas previamente mostradas, se observa que a redondeos altos, existe una tendencia de que a mayor  $C_p$ , mayor es la velocidad crítica que permite el despegue de flujo, lo cual se espera debido a que la pulpa con mayor concentración de sólidos es más viscosa y tiende a frenar su movimiento. Se observa además, que la dependencia de la velocidad y redondeo se mantiene respecto al barrido inicial.

### 7.3.1. Función resumen

A continuación se presenta una función que permite condensar los resultados, dando como resultado los estados posibles del fenómeno estudiado.

$$f(v, r) = \frac{v - (a_1 \cdot r^2 + b_1 \cdot r + c_1)}{\max\{a_2 \cdot r^2 + b_2 \cdot r + c_2; 0, 025\}} \begin{cases} \text{Pulpa pegada} & \text{si } f \geq 1 \\ \text{Incierto} & \text{si } -1 < f < 1 \\ \text{Pulpa despegada} & \text{si } f \leq -1 \end{cases} \quad (7.13)$$

Esta función es válida para todo  $C_p$  entre 15 y 60 %, velocidad entre 0,5 y 4 [m/s], y redondeo entre 0 y 100 [mm]. Los coeficientes de la función 7.13 se encuentran en la tabla 7.10:

Tabla 7.10: Coeficientes de ecuación 7.13

<b>Coeficiente</b>	<b>Valor</b>
$a_1$	-0,0002300
$b_1$	0,0542560
$c_1$	0,7968500
$a_2$	0,0000245
$b_2$	-0,0016775
$c_2$	0,0400520

Cabe destacar que el tiempo aproximado de cada simulación fue de 50 minutos, por lo que la simulación de los 340 casos tomó alrededor de 12 días completos de simulación.



# Capítulo 8

## Conclusiones

El estudio corresponde a la modelación de un flujo de pulpa, considerada como un flujo newtoniano y de fase continua, a través de una canaleta con una caída recta, con el objetivo de analizar el efecto de la velocidad,  $C_p$  y redondeo respecto al fenómeno de adhesión o despegue de la pulpa de la superficie, una vez alcanzado el borde de la canaleta. En relación a los objetivos planteados en la sección 2, las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- Se logra simular el flujo de pulpa a través de una canaleta, considerando los modelos computacionales que permitieron recrear las validaciones experimentales expuestas en el capítulo 5.
- Se demuestra la dependencia de las variables analizadas en el efecto de que la pulpa se mantenga adherida a la pared de caída o que se despegue de la superficie.
- La velocidad de la pulpa corresponde a la variable más crítica en el fenómeno estudiado. A medida que aumenta la velocidad, se facilita el despegue de la pulpa en el borde de la canaleta.
- El aumento del redondeo del borde facilita que la pulpa se mantenga adherida a la superficie, lo cual se justifica con la teoría descrita en la sección 2.5.
- Se observa que la concentración de sólidos en peso no tiene una gran influencia en el fenómeno, siendo relevante considerando redondeos de 75 y 100 [mm]. Esto puede deberse a la consideración de la pulpa como un flujo newtoniano.
- Se obtienen, mediante ajustes polinómicos de segundo y tercer orden, ecuaciones que permiten relacionar las variables de velocidad y redondeo para cada concentración de sólidos en peso, permitiendo diferenciar los rangos donde el flujo de pulpa se mantiene adherido a la superficie, usando las figuras 7.15 y 7.16.
- Finalmente, se condensan los resultados obtenidos en el estudio mediante la función 7.13, que permite diferenciar los estados posibles del fenómeno analizado dependiendo de la velocidad y redondeo, para un  $C_p$  entre 15 y 60 %.

## 8.1. Propuesta de mejora y posibles desafíos futuros

- Estudiar la dependencia de otra variable, como la consideración de la pulpa con partículas, la altura de flujo y ancho del canal, respecto al fenómeno mencionado. Dado el tiempo y la capacidad computacional necesitada, el trabajo fue limitado al estudio de 3 variables, las cuales fueron consideradas las más influyentes según literatura, pero no descarta la posibilidad del efecto de otra variable.
- Validar el modelo mediante datos experimentales, a través de mediciones que permitan verificar que tan acertados son los ajustes matemáticos propuestos en este trabajo para la relación de las variables respecto al fenómeno de adhesión o despegue de la pulpa.

# Bibliografía

- [1] Consejo Minero. Cifras actualizadas de la minería, 2020. URL <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/cifras-actualizadas-de-la-mineria/>.
- [2] T. G. Fitton. A launder design method for thickened tailings. 2015.
- [3] B. Abulnaga. *Slurry Systems Handbook*. McGRAW-HILL, 2002.
- [4] D. G. Thomas. Transport characteristics of suspension: Viii. a note on the viscosity of newtonian suspensions of uniform spherical particles. *J. Colloid Sci.*, 20:267–277, 1905.
- [5] MI42C. Transporte de pulpas, ing. minas u. de chile, 2010.
- [6] G. E. Moglen. *Fundamentals of Open Channel Flow*. CRC Press, 2015.
- [7] V. T. Chow. *Open-Channel Hydraulics*. McGRAW-HILL, 1959.
- [8] R. Chhabra R. Haldenwang, R. Kotze. Determining the viscous behavior of non-newtonian fluids in a flume using a laminar sheet flow model and ultrasonic velocity profiling (uvp) system. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, 34, 2012.
- [9] ESSS Virtual. Curso básico de simulación fluidodinámica utilizando ansys, 2020.
- [10] ANSYS Inc. Ansys cfx-solver theory guide, release r1, 2020.
- [11] L. Kollgaard. Comparison of turbulence models for numerical calculation of airflow in an annex 20 room. 2000.
- [12] C. Clanet L. Bocquet C. Duez, C. Ybert. Wetting controls separation of inertial flows from solid surfaces. *Phys. Rev. Lett.*, 104, 2010.
- [13] J. H. Snoeijer W. Bouwhuis. The effect of surface wettability on inertial pouring flows. 2015.
- [14] D. J. Yum H. Isshiki, B. S. Yoon. Separation of sheet on the surface of a circular cylinder. *Phys. Fluids*, 21, 2009.
- [15] A. Baylar M. E. Emiroglu. An investigation of effect of stepped chutes with end sill on aeration performance. *Water Qual. Res. J. Can.*, 38, 2003.