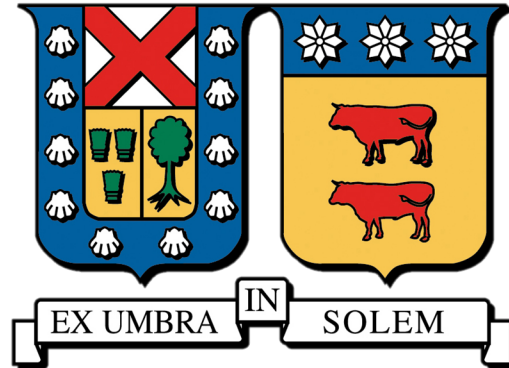


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE METALÚRGICA Y
DE MATERIALES



**VELOCIDAD LÍMITE Y VELOCIDAD
DE SEDIMENTACIÓN EN ARENAS CICLONEADAS**

CAMILA BEATRICE CASAL CAMPOS

Memoria para optar al Título Profesional de
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía:

Jorge Casanova S.

Profesor Correferente:

Dr. Sergio Palma M.

Enero, 2024

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios, a la Virgen y a mis familiares que están en el cielo por permitir que toda esta etapa fuera posible.

A mi mamá y a mi hermano, por su apoyo incondicional, por creer siempre en mis capacidades y nunca ponerlas en dudas, siempre seremos los tres mosqueteros.

A mi pololo Rousseau, por estar siempre a mi lado, darme todo su apoyo y tener fe en mí cuando yo no creía que era capaz.

A Gisselle y Ámbar, son la familia que la vida me regaló y siempre han estado en mis mejores momentos como también en los peores.

A mi papá por financiar mi educación.

A mis primos, tíos, tías y familia en general, gracias por siempre apoyarme en mis locas ideas y estar siempre ahí cuando los necesito.

A Jorge Casanova por darme esta oportunidad, por su buena disposición, su ayuda y colaboración en el transcurso de la memoria, especialmente cuando fue el desarrollo de cada uno de los experimentos que se realizaron y en la escritura del estudio.

A Sergio Palma por ser un buen profesor, por su preocupación y por estar dispuesto a la colaboración de este estudio.

A la empresa SHIMIN por darme la oportunidad de poder realizar mi memoria, además a mis compañeros de trabajo (Coni, Diego, Seba, Fernando, Mati y Carlos) por apoyarme en esta etapa de memoria y prácticas.

A mis amigos de la Universidad (Arleth, Schurli, Pipe, Leona, Ari, Flowers, Tomi, Bryan y Dieguito) y a mis compañeros de colegio (Cami, Cata, Kiwi, Charlie, Emi y Andrea) por darme las mejores aventuras y apoyo cada vez que lo necesite en todo el transcurso de las diferentes etapas de mi educación.

A mis perros, Rafiki y Adolpho que siempre me acompañaron en las noches de estudio.

DEDICATORIA

A mi mamá, por siempre darme todo y más.

RESUMEN

Se realiza un análisis de las influencias de los parámetros de concentración de sólidos, granulometrías y contenidos de finos en la velocidad límite y velocidad de sedimentación, analizando experimentalmente la velocidad de sedimentación mediante la creación de un prototipo y con los datos obtenidos en terreno, se calibra un modelo hidráulico, permitiendo extrapolar la velocidad límite para cada una de las granulometrías y por último, así estudiar las influencias de estas variables en ambas velocidades.

Para el estudio de velocidad de sedimentación, se desarrollan 5 muestras sintéticas de arenas a diferentes contenidos de finos ($\%<\#200$) correspondientes a 7 %, 13 % y un 19 % y además se define un diámetro característico que corresponde al 75 % en peso de las muestras (d_{75}) con valores de 240, 320 y 405 micrones. Por último, cada muestra varía la concentración de sólidos entre un 66 %, 68 % y un 70 %.

Los resultados obtenidos de velocidad de sedimentación al compararse con los modelos de sedimentación se observó un incremento en la velocidad de las partículas finas ($\%<\#200$). Esto indica que, al aumentar el contenido de finos, las partículas gruesas correspondientes a 425 micrones al sedimentar “arrastran” las partículas vecinas que poseen una menor velocidad de sedimentación, permitiendo aumentar la velocidad de ambas partículas.

En cuanto a las influencias de las variables en la velocidad de sedimentación, se muestra una relación indirecta para las concentraciones de sólidos y directa con respecto al tamaño de la partícula.

Por otro lado, los resultados de la extrapolación de velocidad límite, sugieren que al utilizar el modelo de Durand modificado genera una sobreestimación de estos valores al compararse con las granulometrías construidas.

Este estudio entrega como resultados una mejor comprensión de las variables estudiadas en la influencia de ambas velocidades, permitiendo ser útiles para el diseño de cubas, cajones y líneas de arenas.

ABSTRACT

This study considers the analysis of influences of the solids concentration parameters, granulometries and fine contents on terminal velocity and settling velocity, experimentally analyzing the settling velocity by creating a prototype and with the data obtained in field, it's calibrates an hydraulic model, allowing the terminal velocity to be extrapolated for each of the granulometries. Finally, thus studying the influences of these variables on both velocities.

For the study of settling velocity, five synthetic sand samples are developed at different fines contents ($\%<\#200$) corresponding to 7 %, 13 % and 19 % and a characteristic diameter is also defined that corresponds to 75 % by weight of the samples (d_{75}) with values 240, 320 and 405 microns. Finally, each sample varies the solids concentration between 66 %, 68 % and 70 %.

The results obtained for settling velocity when compared with the settling models will show an increase in the velocity of fine particles ($\%<\#200$). This indicates that, by increasing the fines content, the coarse particles corresponding to 425 microns when settling “drag” the neighboring particles that have a settling velocity, allowing the velocity of both particles to increase.

Regarding the influences of the variables on the settling rate, an indirect relationship is shown for the concentrations of solids and a direct relationship with respect to the particle size.

On the other hand, the results of the terminal velocity extrapolation suggest that using the modified Durand model generates an overestimation of these values when compared with the constructed granulometries.

This study results give a better understanding of the variables studied on the influence of both velocities, allowing them to be useful for the design of tanks, caissons and sand lines.

Glosario

- g : Aceleración de gravedad.
- A : Área del prototipo.
- β : Beta de Ismail.
- n_x : Coeficiente adimensional de la ecuación de Richardson & Zaki (1954) para la partícula de diámetro determinado (d_x).
- C : Concentración en volumen en algún punto de la tubería.
- C_A : Concentración en volumen de referencia.
- C_p : Concentración de sólidos en peso.
- C_v : Concentración de sólidos en volumen.
- $C_{v,j}$: Concentración de sólidos en volumen para cada fracción j según tamaño que compone la cama de sedimentos.
- $C_v^{d_x}$: Concentración de sólidos en volumen para un tamaño de partícula..
- ϕ : Concentración en volumen de la mezcla.
- κ : Constante de Von Karman.
- $\sqrt{C_D}$: Coeficiente de arrastre.
- ρ : Densidad del fluido.
- ρ_s : Densidad del sólido.
- ρ_p : Densidad de la pulpa.
- S : Densidad relativa del fluido.
- S_p : Densidad relativa de la pulpa.
- d_{75} : Diámetro característico correspondiente al 75 % en peso de la masa de sólidos.
- d_x : Diámetro de la partícula.
- D : Diámetro de la tubería.
- D_i : Diámetro interno de la tubería.
- $\Delta M_{\#x} / \Delta T$: Diferencial de masa para un tamaño de partícula x y de tiempo.

- f_ϕ : Factor de corrección por concentración de volumen realizada por Richardson & Zaki.
- f : Factor de fricción de Darcy.
- $F_{arrastre}$: Fuerza de arrastre.
- \vec{F}_p : Flujo de la pulpa.
- \vec{F}_s : Flujo de las partículas sólidas.
- \vec{F}_l : Flujo del líquido de la mezcla.
- M : Masa del fluido.
- $M_{S1_{\#x}}$: Masa de la mezcla de la sección S1.
- $M_{S2_{\#x}}$: Masa de la mezcla de la sección S2
- $M_{\#x}$: Masa para un tamaño de partícula determinado d_x .
- \bar{M} : Masa promedio de todas las partículas.
- $\bar{M}_{\#x}$: Masa promedio para un tamaño de partícula determinado d_x .
- $\% \bar{M} R_{\#x}$: Masa promedio retenida para un tamaño de partícula d_x en porcentaje.
- Re : Número de Reynolds.
- Re_x : Número de Reynolds para un tamaño de partícula determinado d_x .
- ϕ : Parámetro adimensional definido por Durand (1953).
- ψ : Parámetro adimensional definido por Zandi & Govatos (1967).
- F_L : Parámetro adimensional del gráfico de Durand.
- F'_L : Parámetro adimensional del gráfico de Wasp.
- J_B : Pérdida de carga del lecho o cama.
- J_v : Pérdida de carga del vehículo.
- J_M : Pérdida de carga total de la mezcla.
- $J_j B$: Pérdida de carga unitaria para cada fracción j según tamaño que compone la cama de sedimentos.
- J_w : Pérdida de carga unitaria del agua.
- $\% < \#200$: Porcentaje de partículas finas menores a 74 micrones.

- ϵ : Rugosidad de la cañería.
- d_x : Tamaño de partícula determinado.
- t : Tiempo de ensayo para un experimento.
- V_* : Velocidad de fricción.
- V_x : Velocidad de la partícula.
- \vec{V}_p : Velocidad de la pulpa.
- \vec{V}_s : Velocidad de sedimentación de los sólidos.
- V_{Stokes} : Velocidad de Stokes.
- $V_{Stokes,x}$: Velocidad de Stokes a un tamaño de partícula determinado d_x .
- \vec{V}_l : Velocidad del líquido de la mezcla.
- V_L : Velocidad límite.
- $V_{ponderada}$: Velocidad ponderada.
- w_t : Velocidad terminal de una partícula.
- μ : Viscosidad del fluido.
- V : Volumen del fluido.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo Principal	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Alcance	3
2. Marco Teórico	4
2.1. Etapas de Procesos Mineros	4
2.1.1. Conminución	4
2.1.2. Flotación	6
2.1.3. Separación Sólido-Líquido	6
2.1.4. Relaves	6
2.2. Clasificación de Fluidos	7
2.2.1. Ordenamiento de líneas de flujo	7
2.2.2. Variación en el tiempo	8
2.2.3. Variación Espacial	9
2.3. Tipos de Escurrimientos en Pulpas	9
2.4. Caracterización Pulpas	11
2.5. Sedimentación de partículas	13
2.5.1. Velocidad de Stokes	14
2.5.2. Corrección por Concentración de Richardson & Zaki	14
2.5.3. Sedimentación de mezclas bi-dispersas	15
2.6. Pérdidas de Cargas	16
2.7. Velocidad Límite	19
2.7.1. Modelo de Velocidad Límite	20
2.8. Análisis Dimensional	22
3. Estudio Experimental de Sedimentación	23
3.1. Matriz Experimental	23
3.2. Diseño y Construcción Prototipo Para el Estudio de Sedimentación	27
3.2.1. Prototipo	27
3.2.2. Modelo Para Estimar la Velocidad de Sedimentación	30

3.3.	Metodología Experimental	33
3.3.1.	Caracterización de la Muestra	33
3.3.2.	Procedimiento de Sedimentación	35
3.3.3.	Procedimiento Granulometrías	36
3.4.	Muestras Sintéticas de Arenas	37
3.5.	Resultados	38
3.5.1.	Densidad de Sólidos	38
3.5.2.	Granulometrías	39
3.5.3.	Velocidad de Sedimentación	40
3.5.4.	Velocidad Ponderada	44
3.5.5.	Análisis Dimensional	47
4.	Pérdidas de Cargas de Datos en Terreno	51
5.	Análisis y Discusión de Resultados Experimentales	54
5.1.	Velocidad de Sedimentación y Velocidad Ponderada	54
5.2.	Pérdidas de Cargas	57
6.	Conclusiones	59
7.	Referencias	61
	Referencias	61
	Anexos	63
A.	Granulometrías	64
A.1.	$\%<\#200 = 7 \%$	64
A.1.1.	$C_p = 66 \%$	64
A.1.2.	$C_p = 68 \%$	65
A.1.3.	$C_p = 70 \%$	65
A.2.	$\%<\#200 = 13 \%$ - $d_{75} = 254 [\mu m]$	66
A.2.1.	$C_p = 66 \%$	66
A.2.2.	$C_p = 68 \%$	66
A.2.3.	$C_p = 70 \%$	67
A.3.	$\%<\#200 = 13 \%$ - $d_{75} = 320 [\mu m]$	67
A.3.1.	$C_p = 66 \%$	67
A.3.2.	$C_p = 68 \%$	68
A.3.3.	$C_p = 70 \%$	68
A.4.	$\%<\#200 = 13 \%$ - $d_{75} = 405 [\mu m]$	69
A.4.1.	$C_p = 66 \%$	69
A.4.2.	$C_p = 68 \%$	69
A.4.3.	$C_p = 70 \%$	70
A.5.	$\%<\#200 = 19 \%$ - $d_{75} = 320 [\mu m]$	70

A.5.1. $C_p = 66\%$	70
A.5.2. $C_p = 68\%$	71
A.5.3. $C_p = 70\%$	71
B. Granulometrías Bases de Datos	72
C. Velocidad de Sedimentación	74
D. Pérdidas de Cargas	80
D.1. Pérdidas de Cargas para cada una de las granulometrías a diferentes concentraciones de sólidos (C_p).	80
D.2. Pérdidas de Cargas extrapolando la velocidad límite a una misma concentración de sólidos.	85
D.3. Pérdidas de Cargas extrapolando la velocidad límite para cada una de las granulometrías.	88

Índice de figuras

2.1. Circuito mina-planta	4
2.2. Circuito de Conminución	5
2.3. Distribución de los componentes verticales de velocidad de un hidrociclón	7
2.4. Flujo Laminar	8
2.5. Flujo Turbulento	8
2.6. Tipos de escurrimiento en pulpas	9
2.7. Flujo Homogéneo	10
2.8. Flujo Heterogéneo	10
2.9. Flujo con Lecho Móvil	11
2.10. Flujo con Lecho Fijo	11
2.11. Modelo de Sedimentación aplicada a una mezcla bi-dispersa	15
2.12. Pérdidas de cargas en tubería versus la velocidad media para diferentes concentraciones de sólidos.	16
2.13. Esquema propuesto por Wasp	17
2.14. Zona de predominancia modelo de Wasp	17
2.15. Gráfico de Durand para determinar F_L	21
2.16. Correlación de la velocidad de sedimentación para suspensiones de arenas	22
3.1. Contenido de Finos del registro de arenas.	24
3.2. Registro de contenido de finos (%<#200) menor a un 20 %	25
3.3. Registros de arenas con un diámetro característico d_{75}	26
3.4. Válvula de Bola de 40 milímetros.	28
3.5. Prototipo.	29
3.6. Secuencia para el desarrollo de los experimentos.	29
3.7. Secciones del Prototipo.	30
3.8. Curvas Granulométrica para diferentes contenidos de finos y diámetros característicos (d_{75}).	39
3.9. Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos con 7 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	40
3.10. Curva Granulométrica para las muestras con 13 % de finos y un $d_{75} = 254[\mu m]$	41
3.11. Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos con 13 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	42

3.12. Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos con 13 % de finos y un $d_{75} = 405[\mu m]$	43
3.13. Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos con 19 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	44
3.14. Curva de Velocidad Ponderada de Sedimentación con 7 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	45
3.15. Curvas de Velocidades Ponderadas de Sedimentación con 13 % de finos a diferentes concentraciones de sólidos y variando el diámetro característico (d_{75}).	46
3.16. Curva de Velocidad Ponderada de Sedimentación con 19 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	47
3.17. Ajuste de datos entre la velocidad de sedimentación adimensional y las variables adimensionales propuestas.	48
3.18. Ajuste de datos entre la velocidad ponderada adimensional y las variables adimensionales propuestas.	50
4.1. Esquema de las condiciones de terreno de la puesta en marcha de la batería de ciclones.	51
4.2. Modelo de Wasp calibrado con los datos en terreno para diferentes concentraciones de sólidos.	52
5.1. Curvas de Velocidad de Sedimentación con factor de corrección por concentración de Stokes a diferentes concentraciones de sólidos.	55
5.2. Curvas de Velocidades Ponderadas variando el contenido de finos (% < #200) a diferentes concentraciones de sólidos (C_p).	56
C.1. Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes contenidos de finos e igual concentración de sólidos al 66 %.	74
C.2. Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes contenidos de finos e igual concentración de sólidos al 68 %.	75
C.3. Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes contenidos de finos e igual concentración de sólidos al 70 %.	76
C.4. Curvas de Velocidad de Sedimentación al mismo contenido de finos y concentración de sólidos variando el diámetro característico (d_{75}).	77
C.5. Curvas de Velocidad de Sedimentación al mismo contenido de finos y concentración de sólidos variando el diámetro característico (d_{75}).	78
C.6. Curvas de Velocidad de Sedimentación al mismo contenido de finos y concentración de sólidos variando el diámetro característico (d_{75}).	79
D.1. Pérdidas de cargas a diferentes concentraciones de sólidos para granulometrías con un 7 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	80
D.2. Pérdidas de cargas a diferentes concentraciones de sólidos para granulometrías con un 13 % de finos y un $d_{75} = 254[\mu m]$	81
D.3. Pérdidas de cargas a diferentes concentraciones de sólidos para granulometrías con un 13 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	82

D.4. Pérdidas de cargas a diferentes concentraciones de sólidos para granulometrías con un 13 % de finos y un $d_{75} = 405[\mu m]$	83
D.5. Pérdidas de cargas a diferentes concentraciones de sólidos para granulometrías con un 19 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	84
D.6. Pérdidas de cargas a una misma concentración de sólidos (C_p) variando el contenido de finos ($\% < \#200$) estimando una velocidad límite.	85
D.7. Pérdidas de cargas a una misma concentración de sólidos (C_p) variando el contenido de finos ($\% < \#200$) estimando una velocidad límite.	86
D.8. Pérdidas de cargas a una misma concentración de sólidos (C_p) variando el contenido de finos ($\% < \#200$) estimando una velocidad límite.	87
D.9. Pérdidas de cargas extrapolando velocidad límite para granulometrías con un 7 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	88
D.10. Pérdidas de cargas extrapolando velocidad límite para granulometrías con un 13 % finos y un $d_{75} = 254[\mu m]$	89
D.11. Pérdidas de cargas extrapolando velocidad límite para granulometrías con un 13 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	90
D.12. Pérdidas de cargas extrapolando velocidad límite para granulometrías con un 13 % de finos y un $d_{75} = 405[\mu m]$	91
D.13. Pérdidas de cargas extrapolando velocidad límite para granulometrías con un 19 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	92

Índice de tablas

3.1.	Valor promedio del contenido de finos en los registros de arenas.	24
3.2.	Valor promedio del contenido de finos en los registros de arenas menores a un 20 %.	25
3.3.	Registros de las arenas con un diámetro característico correspondientes al 75 % del peso de las muestras ensayadas.	26
3.4.	Matriz Experimental.	27
3.5.	Registros de las masas de arenas y de agua para cada experimento con $d_{75} = 320[\mu m]$	38
3.6.	Registros de las masas de arenas y de agua para cada experimento con $d_{75} = 254[\mu m]$	38
3.7.	Registros de las masas de arenas y de agua para cada experimento con $d_{75} = 405[\mu m]$	38
3.8.	Registros para la obtención de densidad del agua y densidad del sólido.	39
3.9.	Registros de velocidades de sedimentación para finos iguales a 7 % y $d_{75} = 320[\mu m]$	40
3.10.	Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos con 13 % de finos y un $d_{75} = 254[\mu m]$	41
3.11.	Registros velocidad de sedimentación para finos igual a 13 % y $d_{75} = 320[\mu m]$	41
3.12.	Registros velocidad de sedimentación para finos igual a 13 % y $d_{75} = 405[\mu m]$	42
3.13.	Registros velocidad de sedimentación para finos igual a 19 % y $d_{75} = 320[\mu m]$	43
3.14.	Velocidad Ponderada a diferentes concentraciones de sólidos con un 7 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	44
3.15.	Curvas de velocidades ponderadas variando las concentraciones de sólidos a diferentes diámetros característicos d_{75}	45
3.16.	Velocidad Ponderada a diferentes concentraciones de sólidos con un 19 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$	46
3.17.	Valores de los parámetros adimensionales.	49
3.18.	Valores de los parámetros adimensionales.	50
4.1.	Parámetros del modelo de Wasp ajustados a los datos obtenidos en terreno.	52
5.1.	Registros velocidad de sedimentación con factor de corrección de concentración a diferentes tamaños de partículas a diferentes concentraciones de sólidos.	54
A.1.	Resultados ensayos de granulometría $C_p = 66\%$ $d_{75} = 320[\mu m]$	64
A.2.	Resultados ensayos de granulometría $C_p = 68\%$ $d_{75} = 320[\mu m]$	65

A.3. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 70\%$ $d_{75} = 320[\mu m]$	65
A.4. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 66\%$ $d_{75} = 254[\mu m]$	66
A.5. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 68\%$ $d_{75} = 254[\mu m]$	66
A.6. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 70\%$ $d_{75} = 254[\mu m]$	67
A.7. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 66\%$ $d_{75} = 320[\mu m]$	67
A.8. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 68\%$ $d_{75} = 320[\mu m]$	68
A.9. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 70\%$ $d_{75} = 320[\mu m]$	68
A.10. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 66\%$ $d_{75} = 405[\mu m]$	69
A.11. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 68\%$ $d_{75} = 405[\mu m]$	69
A.12. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 70\%$ $d_{75} = 405[\mu m]$	70
A.13. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 66\%$ $d_{75} = 320[\mu m]$	70
A.14. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 68\%$ $d_{75} = 320[\mu m]$	71
A.15. Resultados ensayos de granulometría $C_p = 70\%$ $d_{75} = 320[\mu m]$	71
B.1. Granulometrías de un día de operación.	72
B.2. Granulometrías de un día de operación.	72
B.3. Granulometrías de un día de operación.	73
B.4. Granulometrías de un día de operación.	73

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

La minería en Chile se ha posicionado dentro de uno de los grandes productores de cobre a nivel mundial, logrando para el año 2023 una producción de 5,6 millones de toneladas de cobre fino aproximadamente, representando el 24 % de la producción mundial (COCHILCO, 2023).

Para lograr esto, se deben procesar grandes cantidades de material de roca que a través de diferentes procesos metalúrgicos se obtienen minerales de alto interés económico como el cobre, pero para obtener estos minerales valiosos se debe pasar por diferentes procesos mineros que dependerán del tipo de mineral que se está procesando, que en el caso del cobre se pueden presentar en la corteza terrestre como óxidos y sulfuros. Los sulfuros de cobre para ser procesados deben pasar por la etapa de conminución que corresponde a la reducción del tamaño del mineral proveniente de la mina. Luego, pasan a la selección granulométrica que es la separación del mineral por su tamaño, después el mineral continúa con el proceso de flotación que corresponde a un proceso físico-químico que se utiliza para concentrar minerales, permitiendo separar el mineral valioso del no valioso, este último conocido como relaves o colas. Los relaves son una mezcla heterogénea compuesta por una fase dispersa (roca molida) con una fase dispersora (agua) (Palma, 2020), donde son transportados como pulpa hacia el lugar de depositación, es por esto que, se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable (SERNAGEOMIN, s.f.).

Los depósitos de relaves se encuentran normado por el decreto supremo N.º 248 “Reglamento de aprobación de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relave” (Ministerio de Minería, 2007). Este decreto indica la diferencia en el muro de contención de estos depósitos, donde el embalse de relave se caracteriza en que su muro está construido con material de empréstito, en cambio, el tranque de relaves, su muro de contención es de arenas que corresponde a la fracción más gruesa del relave y además debe contener un máximo de un 20 % de partículas menores al tamaño de 0.074 milímetros (menores a malla N.º 200) (Ministerio de Minería, 2007). Esta condición se debe a que las partículas finas disminuyen la permeabilidad del muro aumentando su nivel freático, provocando una licuefacción sísmica en el tranque de relaves.

Las mineras que generen relaves y su forma de depositación sea del tipo tranque, deben considerar una batería de ciclones que les permita una adecuada clasificación de los sólidos. Esto se debe a que el transporte de arenas mediante tuberías hacia el lugar de depositación del tranque toma un rol fundamental en la ingeniería, debido a que el diseño de esto debe procurar que los sólidos del relave deben ser transportados en su totalidad y que no ocurra la sedimentación de las partículas. Por esta razón, el estudio de la velocidad límite es fundamental porque es un parámetro que determina la mínima velocidad del flujo para que no haya riesgos de sedimentación y obstrucción de la tubería (Fuentes y cols., 2013). Por otro lado, la sedimentación de los sólidos en la tubería ocurre cuando la velocidad del flujo es menor a la velocidad límite y las partículas gruesas (arenas) comienzan a sedimentar en el fondo de las tuberías, provocando la obstrucción e impidiendo la construcción del muro en el tranque de relaves. Debido a esto, otro fenómeno a estudiar es la velocidad de sedimentación de las partículas, ya que permite comprender las variables involucradas y así proporcionar mayor información a las mineras sobre los sistemas de cajones de arenas de relaves donde los sólidos permanecen por largos tiempos y mejorar los diseños hidráulicos que contemplen tuberías de arenas hacia el lugar de depositación.

Los estudios realizados sobre este tema son escasos con relación al comportamiento de la sedimentación en mezclas polidispersas, pero existen estudios donde señalan que la velocidad de sedimentación se ve influenciada por la distribución, tamaño, forma y densidad de las partículas (Cotroneo, 2015), además de que al disminuir por debajo del 10 % del contenido de finos en las arenas cicloneadas se ve un aumento en la velocidad de sedimentación (Díaz Leiva, 2021). Por otro lado, los estudios de velocidad límite están contemplados para relaves convencionales con concentraciones en peso entre un 54 % a un 60 %, en cambio, la concentración de las arenas cicloneadas en este estudio contempla rangos entre un 66 % a un 70 % de sólidos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Principal

Determinar una relación entre la velocidad de sedimentación y la velocidad límite, variando el contenido de finos y la concentración de sólidos en arenas cicloneadas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Estudiar experimentalmente la velocidad de sedimentación con muestras sintéticas de arenas a diferentes concentraciones de sólidos y contenidos de finos.
- Identificar los parámetros que influyen en la velocidad límite.
- Comparar la velocidad límite obtenida con los datos en terreno con respecto a la velocidad de sedimentación en el laboratorio.

1.3. Alcance

- Estudio de la velocidad de sedimentación y las influencias de las variables de concentración de sólidos y de granulometrías en muestras de arenas de relaves cicloneadas.
- Estimación de velocidad límite a partir de datos de terreno en arenas cicloneadas.

Capítulo 2

Marco Teórico

La fluidodinámica es una rama de la física encargada de estudiar el comportamiento de los fluidos, ya sea en su estado líquido o gaseoso. Para el caso de la minería, una de las ramas a estudiar es el movimiento de las pulpas, que tiene como origen el comportamiento de la hidráulica clásica, es decir, la mayoría de las pulpas se comportan como el fluido puro que lo componen, si las condiciones fluidodinámicas así lo permiten, exceptuando a pulpas no arcillosas, o de alta concentración que se escapan del comportamiento del fluido puro (Fuentes y cols., 2013).

2.1. Etapas de Procesos Mineros

En esta sección, se verá toda la etapa productiva para la obtención de concentrados de cobre y como consecuencia la producción de relaves.

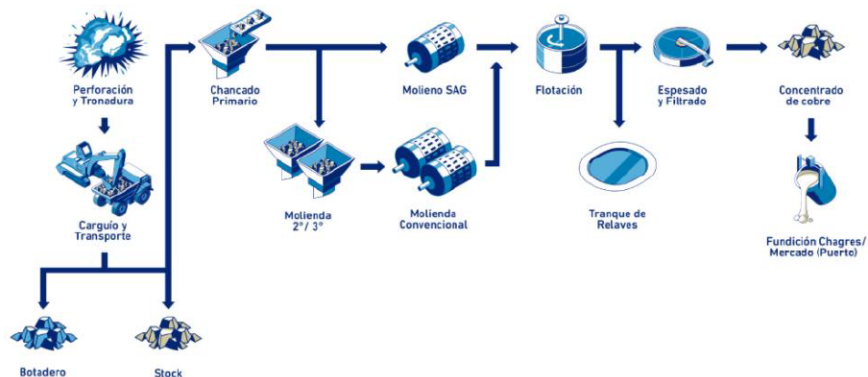


Figura 2.1: Circuito mina-planta (Díaz Leiva, 2021).

2.1.1. Conminución

Los concentrados y relaves proviene de las plantas concentradoras, que para el caso de la conminución el fin es reducir el tamaño del mineral que proviene de la mina (Ipinza, 2020), las

etapas presentadas son:

- **Chancado primario**
El tamaño del mineral se reduce a 20 centímetros.
- **Chancado secundario**
El tamaño del mineral se reduce a 7 centímetros.
- **Chancado terciario**
El tamaño del mineral se reduce a 1 centímetros.
- **Molienda**
La molienda se diferencia del chancado en que el material se mezcla con agua. El tamaño del mineral se reduce hasta aproximadamente 180 a 200 micrones.

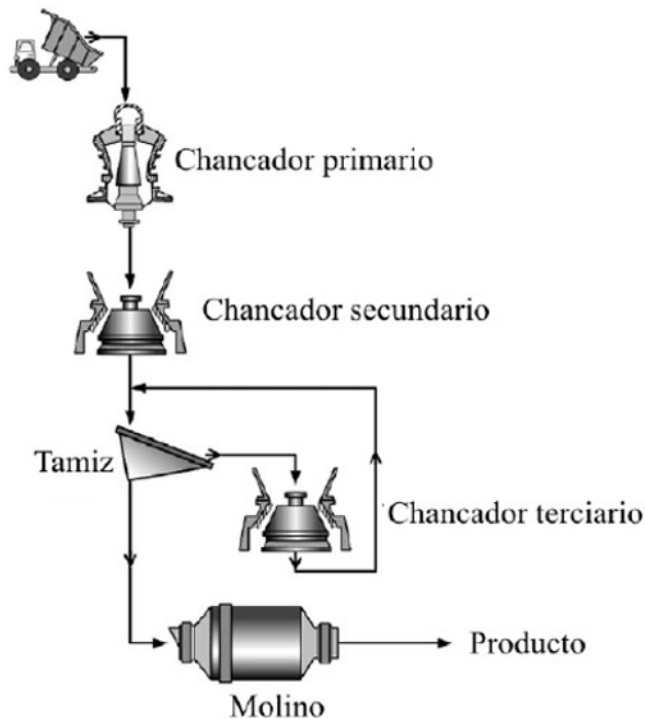


Figura 2.2: Circuito de Conminución (Ipinza, 2020).

Cuando está presente los circuitos cerrados de molienda, existe una manera de mejorar la eficiencia en la conminución que es a través de la presencia de hidrociclones. Los hidrociclones son equipos de clasificación que a través de la fuerza centrífuga aceleran la velocidad de sedimentación de las partículas más gruesas. Además, no solo están presentes en esta etapa, como se verá más adelante, también son utilizados para la clasificación de los relaves.

2.1.2. Flotación

La flotación corresponde a un proceso físico-químico que permite separar el mineral que posee un valor económico de la ganga. Este proceso se lleva a cabo en celdas de flotación, que permiten el mecanismo de agitar la pulpa y airearla mecánicamente. La acción de agitar la pulpa permite la colisión entre partículas y burbujas, permitiendo que las partículas de mineral valioso (hidrofóbicas) se adhieran a las burbujas con la ayuda de colectores químicos, y la espuma generada es retirada por rebalse siendo esto el concentrado.

Las partículas hidrofílicas que quedan en la base de la flotación (puede ser por la ayuda de reactivos depresores que ayudan a esto) se conoce como relaves o colas.

2.1.3. Separación Sólido-Líquido

Esta etapa consta del espesado y filtrado que su objetivo es obtener una mayor recuperación de agua, que para el caso de los relaves, solo se lleva a cabo el espesamiento y en el caso del concentrado es llevado a cabo el espesamiento y la filtración.

- **Espesamiento:**

Se basa en la sedimentación de las partículas y se utiliza modificadores químicos como los coagulantes y floculantes que permiten acelerar este proceso.

- **Filtración:**

Se basa en la separación de los sólidos y de los líquidos a través de un medio poroso.

2.1.4. Relaves

Los relaves están presentes en cada etapa metalúrgicas de los sulfuros de cobre. Es por esto que, ya en la etapa de espesamiento, los relaves son utilizados para la alimentación de los hidrociclones y así poder clasificar las partículas que contienen.

Las partículas de relaves en el hidrociclón están sometidas a dos fuerzas opuestas, la primera es la fuerza centrífuga que acelera la velocidad de sedimentación provocando que se muevan más rápido hacia la pared del ciclón, migrando a la abertura del ápex (underflow), que corresponde a las arenas que son la fracción más gruesa del relave. En el caso de fuerza de arrastre, las partículas que sedimentan más lento se mueven a la zona de menor presión migrando a la zona de desbordamiento del hidrociclón (overflow), que corresponde a las lamas que son los finos del relave (Ipinza, 2020).

Existen en los hidrociclones una envolvente de velocidad vertical cero, que significa que las partículas tienen la misma probabilidad de salir por el underflow como en el overflow, esto es debido a que las fuerzas mencionadas anteriormente para la partícula se comportan iguales.

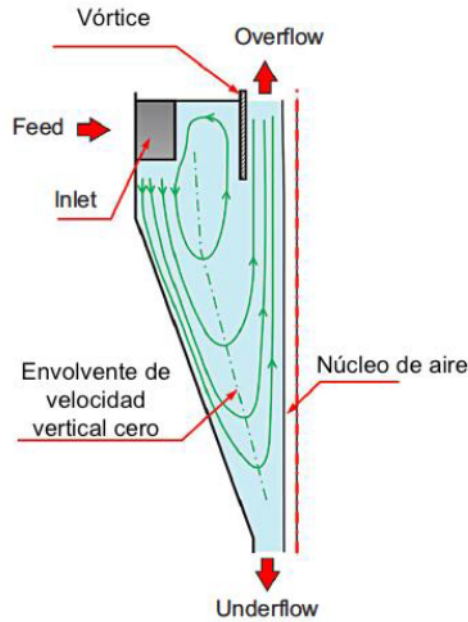


Figura 2.3: Distribución de los componentes verticales de velocidad de un hidrociclón (Ipinza, 2020).

Finalmente, toda minera que genere depósitos de relaves del tipo tranque, tiene por objetivo aumentar la producción de arenas para evitar los rebales en la zona, por ende, la presencia de hidrociclones permite operar al tranque de relaves de una manera más eficiente y segura, permitiendo clasificar el relave en arenas que serán depositadas en el muro del tranque y donde además deben tener un contenido de finos menores a un 20 %, mientras que las lamas y relaves se deben depositar en la cubeta del tranque (SERNAGEOMIN, s.f.).

2.2. Clasificación de Fluidos

El movimiento de los fluidos se puede clasificar de diferentes maneras, en este caso son:

2.2.1. Ordenamiento de líneas de flujo

- **Flujo Laminar**

El flujo laminar se caracteriza porque las partículas del fluido siguen una trayectoria regular, es decir, las líneas de escurrimientos son paralelas. Para este estudio, un ejemplo de esto es el flujo de arenas a altas concentraciones en peso por el muro de un tranque de relaves (JRI S.A, 2012).

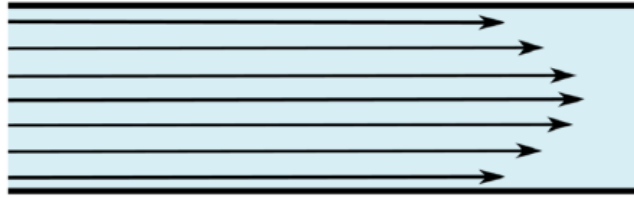


Figura 2.4: Flujo Laminar (Palma, 2020).

■ **Flujo Turbulento**

El flujo turbulento se caracteriza porque no presenta líneas de escurrimiento paralelas, provocando la formación de turbulencias.

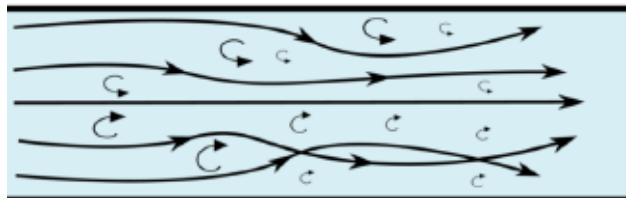


Figura 2.5: Flujo Turbulento (Palma, 2020).

■ **Número de Reynolds**

El número de Reynolds es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que están presentes en un fluido, este es un número adimensional que se representa de la siguiente manera:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.1)$$

- Si $Re < 2000 \rightarrow$ Flujo Laminar
- Si $Re > 4000 \rightarrow$ Flujo Turbulento
- Si $2000 < Re < 4000 \rightarrow$ Flujo entre Laminar y Turbulento

2.2.2. Variación en el tiempo

■ **Flujo Permanente**

El flujo permanente es en el que las condiciones de flujo (velocidad, densidad, presión y temperatura) en cualquier punto son constantes en el tiempo.

■ **Flujo Impermanente**

El flujo impermanente es en el que las condiciones en cualquier punto cambia con el tiempo.

2.2.3. Variación Espacial

- **Flujo Uniforme**

El flujo uniforme se caracteriza en que su velocidad en magnitud y dirección son iguales en todos los puntos de escurrimiento en un instante dado.

- **Flujo No Uniforme**

El flujo no uniforme es cuando la velocidad varía de un lugar a otro para un instante dado.

2.3. Tipos de Escurrimientos en Pulpas

Las pulpas mineras mediante los diferentes tipos de escurrimiento permiten identificar como son transportados los sólidos en las tuberías, asumiendo que solo varía la velocidad de la suspensión y el diámetro de la partícula.

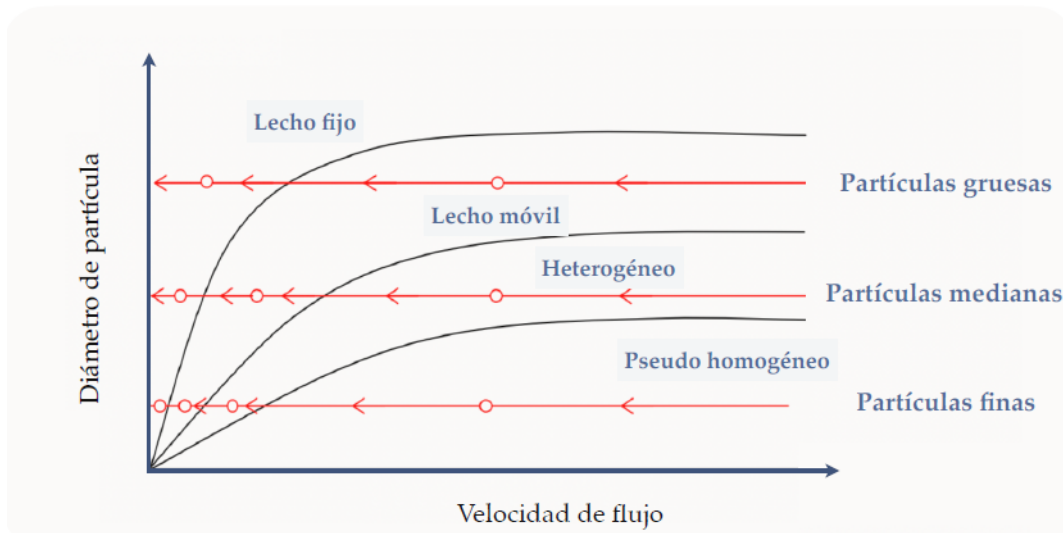


Figura 2.6: Tipos de escurrimiento en pulpas (Palma, 2020).

- **Flujo Homogéneo**

Un flujo es homogéneo cuando las partículas sólidas de la pulpa se encuentran de manera uniforme en el líquido que los contiene, este tipo de escurrimiento ocurre para partículas pequeñas y cuando son transportadas a gran velocidad. Debido a esto último, hay ausencia de sedimentación en este de flujo.

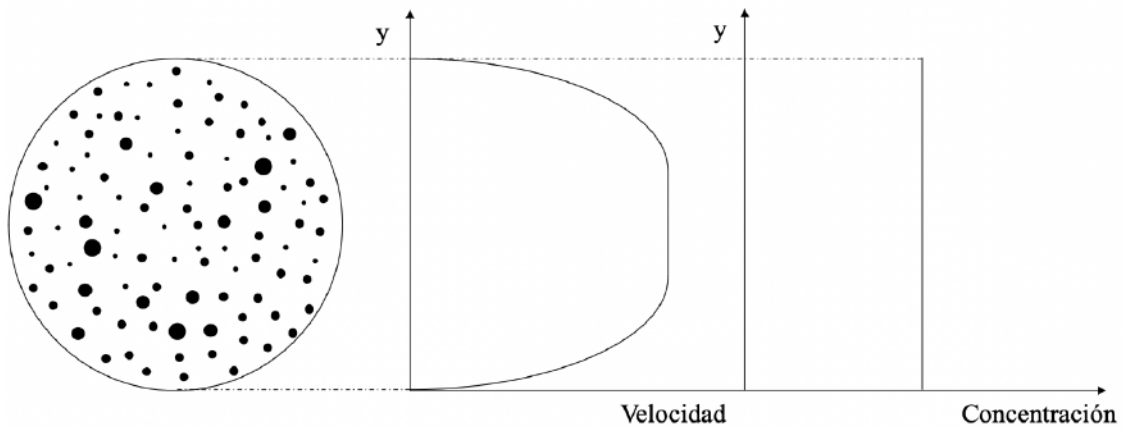


Figura 2.7: Flujo Homogéneo (Palma, 2020).

■ **Flujo Heterogéneo**

Un flujo es heterogéneo cuando la concentración de las partículas no son uniformes en la sección.

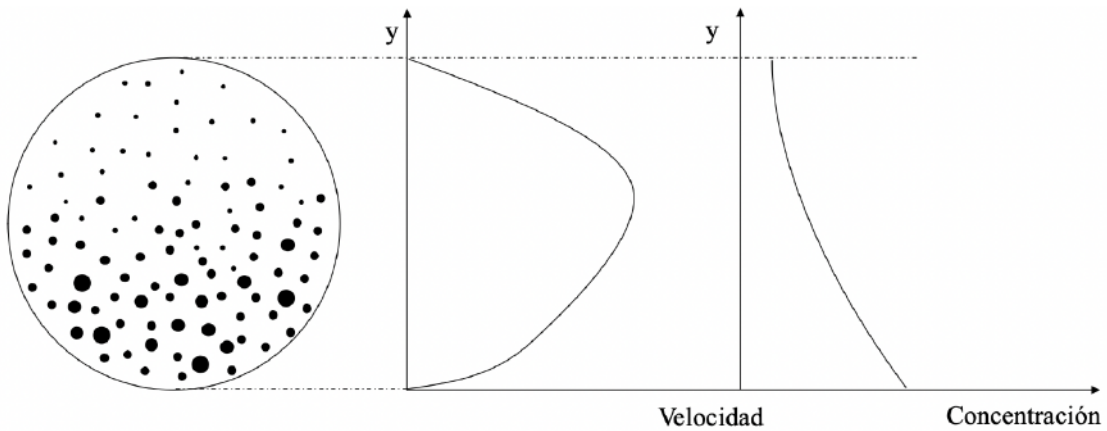


Figura 2.8: Flujo Heterogéneo (Palma, 2020).

■ **Flujo con Lecho Móvil**

Un flujo que posee un lecho móvil se caracteriza por poseer la sedimentación de partículas al fondo de la sección, provocando una disminución de la velocidad en esa zona. Este tipo de escurrimiento ocurre a velocidades bajas y las partículas que sedimentan son de mayor tamaño, pero están en movimiento.

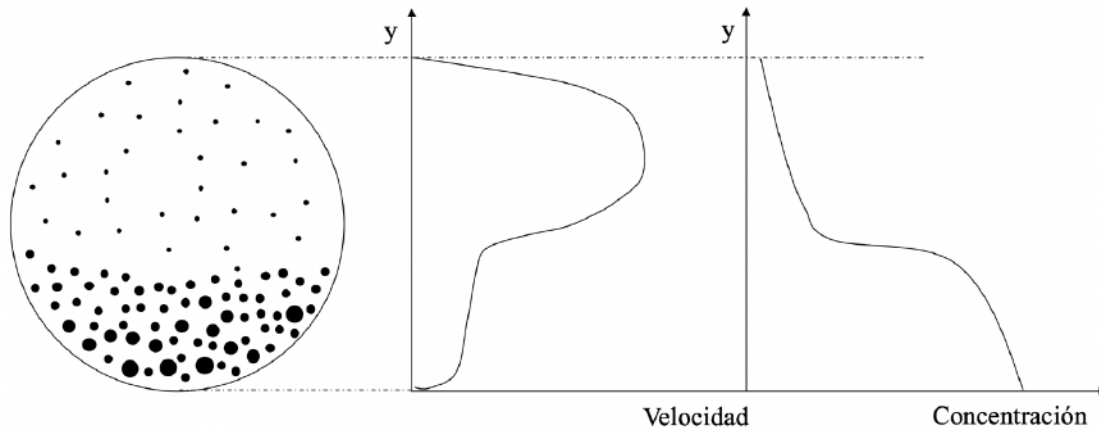


Figura 2.9: Flujo con Lecho Móvil (Palma, 2020).

■ **Flujo con Lecho Fijo**

Un flujo con lecho fijo se caracteriza por poseer la sedimentación de las partículas en el fondo de la sección, provocando un aumento de la concentración, pero esta se mantiene constante en el tiempo, es decir, el movimiento de las partículas en esa zona es básicamente nula.

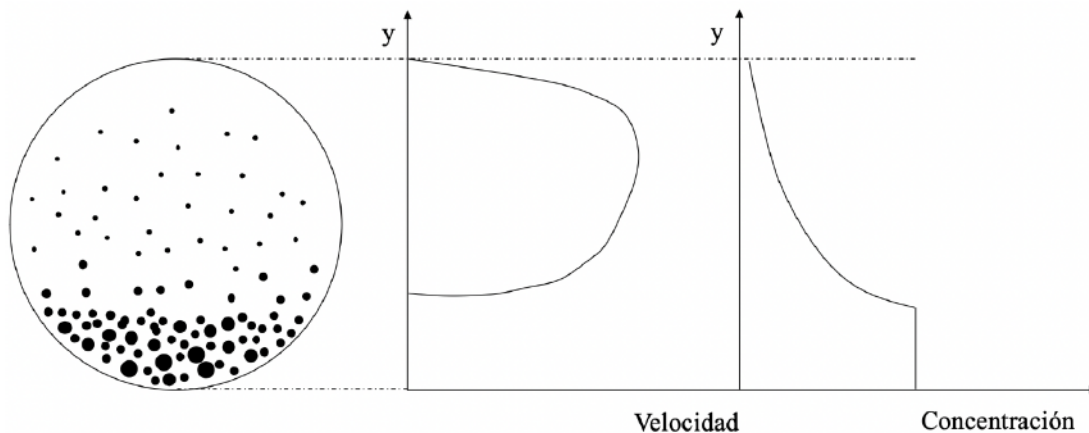


Figura 2.10: Flujo con Lecho Fijo (Palma, 2020).

2.4. Caracterización Pulpas

Los relaves mineros, como se mencionó anteriormente, poseen una fase dispersora correspondiente a las partículas sólidas y otra fase dispersa que corresponde al líquido que generalmente es agua. Es por esto que existen diferentes fórmulas para caracterizar las pulpas mineras (Díaz Leiva, 2021), las cuales son aplicadas a lo largo de este estudio.

- Densidad del fluido (ρ): Es la relación entre la masa y volumen del fluido.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.2)$$

- Densidad relativa del sólido (S): Es la relación entre la densidad del sólido y la densidad del fluido.

$$S = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (2.3)$$

- Densidad relativa de la mezcla (S_p): Es la relación entre la densidad de la pulpa y la densidad del fluido.

$$S_p = \frac{\rho_p}{\rho} \quad (2.4)$$

- Concentración de sólidos en peso (C_p): Cantidad de partículas sólidas en la pulpa, en una relación peso/peso.

$$C_p = \frac{\text{Peso del Sólidos}}{\text{Peso de la Mezcla}} \quad (2.5)$$

- Concentración de sólidos en volumen (C_v) Cantidad de partículas sólidas en la pulpa, en una relación volumen/volumen.

$$C_p = \frac{\text{Volumen del Sólido}}{\text{Volumen de la Mezcla}} \quad (2.6)$$

Con las siguientes ecuaciones se realiza una relación entre esto y las fórmulas se pueden transcribir de la siguiente manera:

- Concentración de sólidos en peso (C_p):

$$C_p = \frac{(S_p - 1)S}{(S - 1)S_p} \quad (2.7)$$

$$C_p = \frac{SC_v}{1 + (S - 1)C_v} \quad (2.8)$$

- Concentración de sólidos en volumen (C_v):

$$C_v = \frac{\rho_p - \rho}{\rho_s - \rho} \quad (2.9)$$

$$C_v = \frac{C_p}{S(1 - C_p) + C_p} \quad (2.10)$$

- Densidad de la pulpa (ρ_p):

$$\rho_p = \frac{\rho S}{C_p + (1 - C_p)S} \quad (2.11)$$

$$\rho_p = \rho(1 + C_v(S - 1)) \quad (2.12)$$

- Densidad relativa de la mezcla S_p :

$$S_p = \frac{S}{C_p + (1 - C_p)S} \quad (2.13)$$

$$S_p = 1 + C_v(S - 1) \quad (2.14)$$

2.5. Sedimentación de partículas

La sedimentación de partículas depende de diferentes factores tales como el diámetro de la partícula, su densidad y la densidad del fluido, entre otros. Los primeros dos modelos de velocidad de sedimentación son en un medio monodisperso y ya el último modelo es para mezclas bi-dispersas.

2.5.1. Velocidad de Stokes

Cuando una partícula se mueve en caída libre, se ve afectada solo por su fuerza de gravedad. Pero cuando esta misma partícula es inmersa en un fluido, la partícula se ve afectada por la fuerza de gravedad y se contrapone a esto, la fuerza de empuje y la fuerza de arrastre.

Es por esto que, Stokes en 1981 derivó la fuerza de arrastre al movimiento de una sola partícula esférica en un fluido infinito (Richardson y Zaki, 1997).

$$F_{arrastre} = 3\pi\mu V_x d_x \quad (2.15)$$

Al igualar la ecuación 2.15 con la fuerza efectiva de gravedad, se obtiene la ecuación 2.16.

$$V_{stokes,x} = \frac{d_x^2(\rho_s - \rho)g}{18\mu} \quad (2.16)$$

Es por esto que este modelo es solo aplicable para Reynolds muy inferiores a 1 (Cotroneo, 2015).

2.5.2. Corrección por Concentración de Richardson & Zaki

El estudio de Richardson & Zaki tiene como objetivo analizar el efecto de la concentración de las partículas en suspensión sobre la velocidad de sedimentación.

$$f(\phi) = \frac{\text{Velocidad Real Efectiva}}{\text{Velocidad de Stokes}} = (1 - \phi)^{n_x} \quad (2.17)$$

Donde n_i está dada por:

- Para $0 < Re_x < 0,2$

$$n_x = 4,65 + 19,5 \left(\frac{d_x}{D} \right) \quad (2.18)$$

- Para $0,2 < Re_x < 1$

$$n_x = \left(4,35 + 17,5 \left(\frac{d_x}{D} \right) \right) Re_x^{-0,03} \quad (2.19)$$

- Para $1 < Re_x < 200$

$$n_x = \left(4,35 + 18 \left(\frac{d_x}{D} \right) \right) Re_x^{-0,1} \quad (2.20)$$

- Para $200 < Re_x < 500$

$$n_x = 4,45 Re_x^{-0,1} \quad (2.21)$$

- Para $Re_x > 500$

$$n_x = 2,39 \quad (2.22)$$

Además, el número de Reynolds dependerá del tamaño de partícula (d_x) como se muestra en la ecuación 2.23.

$$Re_x = \frac{\rho d_x V_{stokes}}{\mu} \quad (2.23)$$

Este modelo presentado es aplicable para partículas mayores a 100 micrómetros y para la aplicación de partículas menores se requiere mayor trabajo para probar el rango de aplicabilidad.

2.5.3. Sedimentación de mezclas bi-dispersas

En la sedimentación de mezclas bi-dispersas se puede apreciar a medida que transcurre el tiempo las etapas que están involucradas en la sedimentación de las partículas, para este caso los subíndices 1 y 2 representan las partículas finas y gruesas tal como se señala en la figura 2.11 (Cotroneo, 2015).

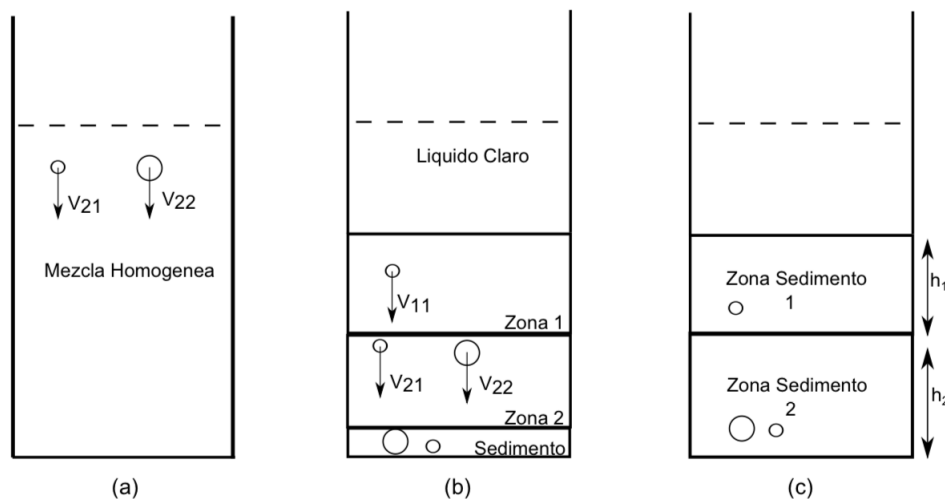


Figura 2.11: Modelo de Sedimentación aplicada a una mezcla bi-dispersa (Cotroneo, 2015).

Las etapas presentes en la sedimentación de mezclas bi-dispersas son:

- En la Figura 2.11 sección (a) se aprecia una mezcla homogénea y tal como se mencionó en la sección de tipos de escurrimiento, este tipo de flujo se caracteriza en que todas las partículas se encuentran uniforme en el líquido.
- En la Figura 2.11 sección (b) se aprecia la separación de zonas, donde se distingue una zona de sedimentación de partículas finas y gruesas.
- En la Figura 2.11 sección (c) se aprecia los lechos sedimentados, donde para la zona 1 se encuentran partículas finas y para la sección 2 se forma un sedimento de partículas gruesas y finas.

2.6. Pérdidas de Cargas

Las pérdidas de cargas están relacionadas con las pérdidas de energía que ocurren en un fluido a lo largo de la tubería. Este tipo de pérdidas se presentan de manera lineal que significa que se encuentra a lo largo de toda la tubería y pérdidas singulares que se refiere a que se encuentran concentradas en un punto (Fuentes y cols., 2013). Es por esto, que la las pérdidas de carga en pulpas tiende al comportamiento de la figura 2.12.

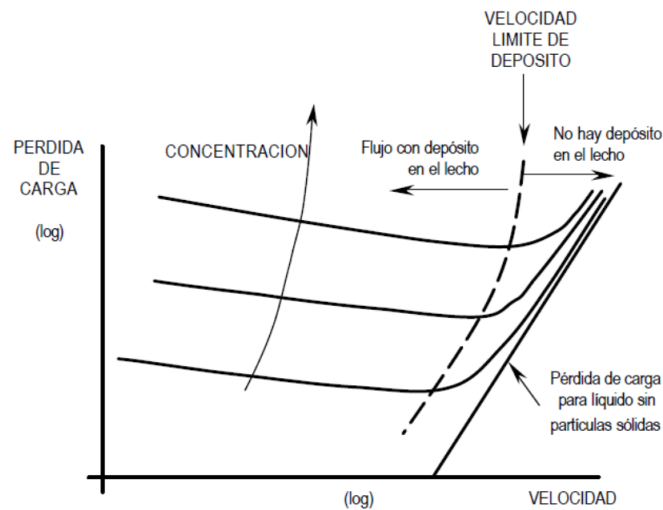


Figura 2.12: Pérdidas de cargas en tubería versus la velocidad media para diferentes concentraciones de sólidos (Montserrat, 2015).

En figura 2.12 demuestra que a medida aumenta la concentración a una misma velocidad, la pérdida de carga aumenta debido a que es necesaria mayor cantidad de energía para mantener las partículas sólidas suspendidas y que no ocurra la sedimentación.

2.6.0.1. Modelo de Wasp

El modelo de Wasp plantea un método empírico para mezclas bifásicas, descomponiendo esta mezcla por una fracción homogénea que lo denomina como vehículo que corresponde al líquido con partículas finas en suspensión y la otra fracción heterogénea corresponde al lecho o la cama de sedimentos (SHIMIN Ingeniería, 2020).

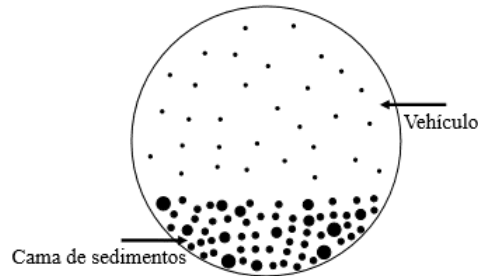
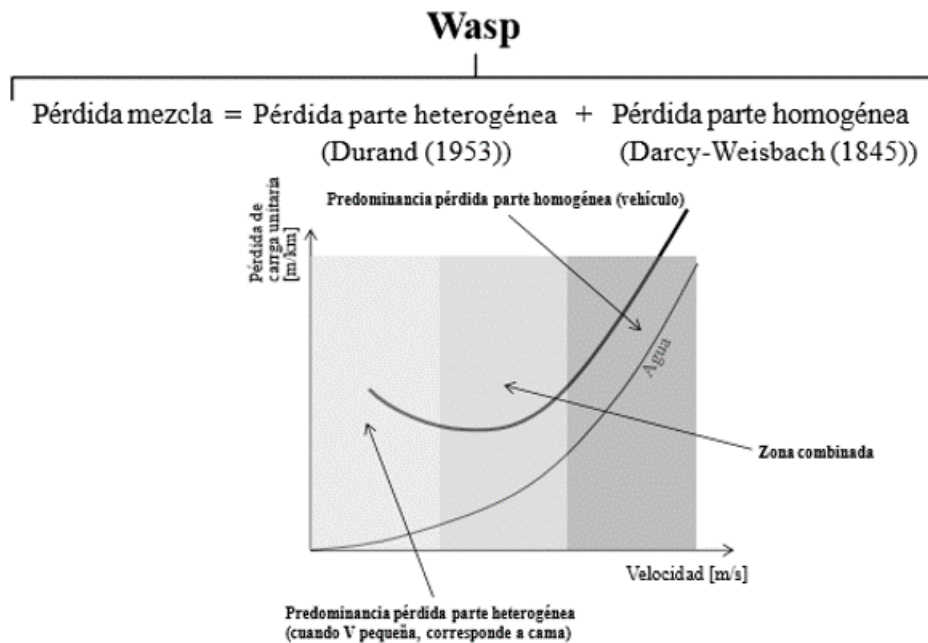


Figura 2.13: Esquema propuesto por Wasp (SHIMIN Ingeniería, 2020).



Definición de Predominancia: Ecuación de Ismail (1953) (estimación C_v -veh).

Figura 2.14: Zona de predominancia modelo de Wasp (SHIMIN Ingeniería, 2020).

A continuación, se presentan diferentes ecuaciones para el cálculo de las pérdidas de cargas (SHIMIN Ingeniería, 2020). Las pérdidas de carga totales se calculan mediante la ecuación 2.24.

$$J_M = J_v + J_B \quad (2.24)$$

Donde J_v corresponde a las pérdidas del vehículo correspondiente a la expresión de Darcy Weisbach (fórmula 2.25) y el factor de fricción (f) es calculado a partir de la fórmula de Colebrook-White correspondiente a la fórmula 2.26.

$$J_v = \frac{fV^2}{2gD} \quad (2.25)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/D_i}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (2.26)$$

La pérdida de carga del lecho o cama de sedimentación se calcula con la ecuación de Durand para cada banda granulométrica, como se muestra en la fórmula 2.27.

$$J_{jB} = 81J_w C_{vj} \left(\frac{gD_i(S-1)}{V^2\sqrt{C_d}} \right)^{1,5} \quad (2.27)$$

Por ende, esta pérdida de carga del lecho corresponde a la suma de las pérdidas de carga asociada a cada tamaño, como se señala en la ecuación 2.28.

$$J_B = \sum_{j=1}^n J_{jB} \quad (2.28)$$

Reemplazando la ecuación 2.25 y 2.28 en 2.24, la fórmula final para las pérdidas de carga en mezclas bifásicas se indica en la ecuación 2.29.

$$J(V) = \frac{fV^2}{2gD} + \sum_{j=1}^n 81J_w C_{vj} \left(\frac{gD_i(S-1)}{V^2\sqrt{C_d}} \right)^{1,5} \quad (2.29)$$

La expresión de Ismail (1953) permite determinar el grado de influencia del vehículo o la cama sobre la pérdida de la carga total, esto se calcula con la ecuación 2.30.

$$\log \frac{C}{C_A} = -1,8 \frac{w_j}{\beta\kappa V^*} \quad (2.30)$$

La expresión utilizada para el cálculo de la velocidad de sedimentación del lecho es presentada en la ecuación 2.31.

$$w_t = \sqrt{\frac{4g(\rho_s - \rho)d_x}{3C_D\rho}} \quad (2.31)$$

El coeficiente de arrastra proviene del régimen del flujo, que corresponde al número de Reynolds de la partícula mencionada en la ecuación 2.23. Entonces, el coeficiente de arrastre se puede subdividir en tres casos:

- Régimen de Stokes:

$$C_D = \frac{24}{Re_x} \quad (2.32)$$

- Régimen Intermedio:

$$C_D = 30Re_x^{-0,625} \quad (2.33)$$

- Régimen de Newton:

$$C_D = 0,4 \quad (2.34)$$

2.7. Velocidad Límite

La velocidad límite es un parámetro de riesgo y no de certeza, que determina la mínima velocidad del flujo para que no haya depositación y obstrucción de los sólidos en la tubería (Fuentes y cols., 2013). Otra definición que posee la velocidad límite en relación con las pérdidas de cargas es la cual la pérdida de carga de la pulpa en un flujo por tubería presenta un mínimo (Fuentes y cols., 2013). Esto se debe a que cuando la velocidad de la pulpa se encuentra por debajo de la velocidad límite, los sólidos empiezan a sedimentar provocando una reducción de la sección y el lecho formado aumenta la rugosidad en la base de la tubería, generando un incremento en las pérdidas de cargas a medida que disminuye el caudal de escurrimiento (Montserrat, 2015).

Cuando los sólidos sedimentan por tiempos prologados en el fondo de la tubería, se forman dunas móviles, que como se comentó en la sección de tipos de escurrimientos, corresponde a un flujo de lecho móvil, pero si en este caso, aumenta la sedimentación de las partículas y debido a esto provoca la disminución de la velocidad del flujo, el flujo de la pulpa ahora es de lecho fijo, que corresponde al peor caso, debido a que esto se le conoce como él embanque de la pulpa en la tubería.

Por ende, si la velocidad del flujo es menor a la velocidad límite, puede ocurrir la depositación de los sólidos en la tubería, provocando él embanque de la línea de la pulpa, por el contrario, si la velocidad del flujo es mayor a la velocidad límite ocurre un desgaste mayor de la tubería.

Los parámetros que influyen la velocidad límite (Fuentes y cols., 2013) son:

- Granulometría de las partículas sólidas.
- Densidad relativa de las partículas sólidas.
- Diámetro de la tubería.
- Concentración de sólidos en la mezcla.
- Inclinación de la tubería.
- pH de la pulpa.
- Factor de forma de las partículas sólidas.
- Temperatura de la mezcla.

2.7.1. Modelo de Velocidad Límite

Existen diferentes modelos de velocidad límite, como el modelo de Wasp, Durand, Oroskar & Turian entre otros. Los inconvenientes que existen con estos modelos es que están formulados para concentraciones volumétricas inferiores a un 30 % y se recomienda que para concentraciones superiores se evalúe los valores obtenidos en los modelos (Velasco y Molina, 1985).

El modelo de Durand es uno de los modelos más conocidos en la industria minera.

$$V_L = F_L \sqrt{2gD(S - 1)} \quad (2.35)$$

El parámetro adimensional F_L proviene de la figura 2.15.

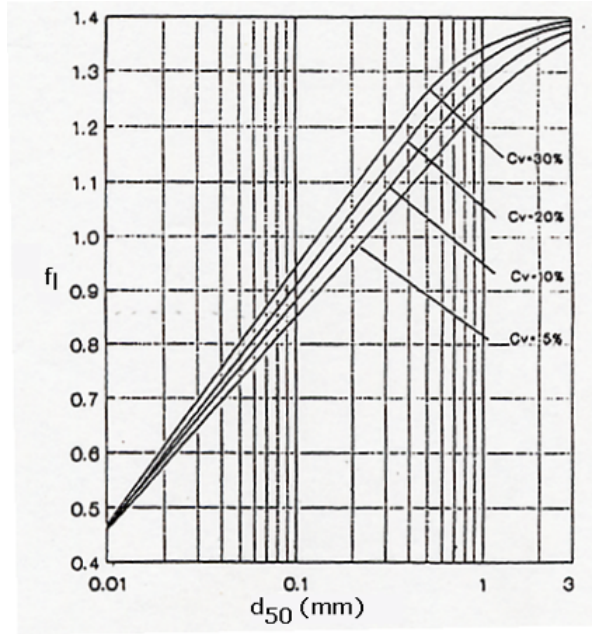


Figura 2.15: Gráfico de Durand para determinar F_L (Fuentes y cols., 2013).

Como se mencionó anteriormente, los modelos mencionados no son representativos para pulpas con presencia de partículas finas o demasiadas gruesas. Debido a esto, Juan Rayo (Fuentes y cols., 2013) realizó una modificación al modelo de Durand para diferentes tamaños de sólidos, espectro granulométricos y tamaños de tuberías a concentraciones volumétricas entre un 5 % a un 30 % de sólidos.

- Para sólidos finos y espectro granulométrico angosto (en ducto de pequeño diámetro).

$$V_L = 1,1F_L\sqrt{2gD(S-1)^{0,6}} \quad (2.36)$$

- Para sólidos gruesos y espectro granulométrico ancho (en ducto de pequeño diámetro).

$$V_L = 1,1F_L\sqrt{2gD(S-1)}\left[\frac{d_{80}}{d_{50}}\right]^{0,1} \quad (2.37)$$

- Para sólidos finos y espectro granulométrico angosto (en ducto de gran diámetro).

$$V_L = 1,25F_L^4\sqrt{2gD(S-1)} \quad (2.38)$$

Otro modelo de velocidad de límite es propuesta por Wasp (Wasp, Kenny, y Ramesh, 1977) donde realiza una modificación al parámetro adimensional a través de la figura 2.16 obteniendo la formula para describir la velocidad límite.

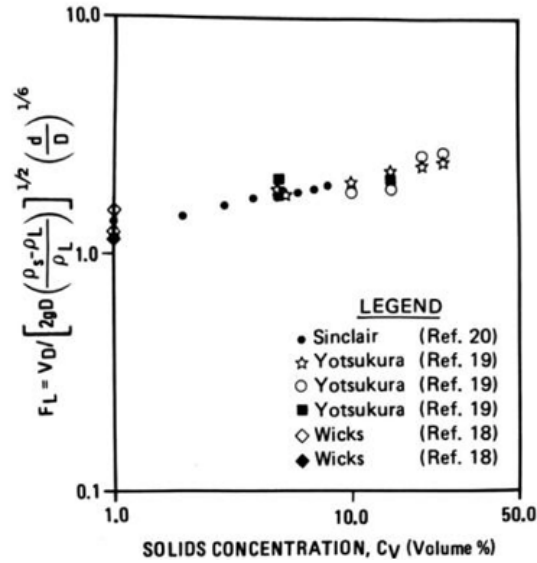


Figura 2.16: Correlación de la velocidad de sedimentación para suspensiones de arenas (Wasp y cols., 1977).

$$V_L = F'_L \left[2gD \frac{\rho_s \rho}{\rho} \right]^2 \left(\frac{d_x}{D} \right)^{(1/6)} \quad (2.39)$$

2.8. Análisis Dimensional

El análisis dimensional permite relacionar las variables que describen un fenómeno físico a través de parámetros adimensionales, para así después, expresar el problema en términos de estos parámetros. Por ejemplo, cuando se trata de emplear ecuaciones experimentales mediante fórmulas que no modelen directamente el fenómeno, el análisis dimensional permite simplificar y reducir el trabajo experimental (Universidad Nacional de la Plata, -).

Capítulo 3

Estudio Experimental de Sedimentación

Este capítulo aclara como se diseñó el prototipo para estudiar la velocidad de sedimentación, también se expresa la cantidad de experimentos empleados en este estudio con el rango de valores para cada variable. Además, explica la metodología de los experimentos y aparte, se menciona como se realizaron las muestras sintéticas de arenas y por último, el modelo utilizado para estimar la velocidad de sedimentación.

3.1. Matriz Experimental

Para la definición de la matriz experimental, a partir de los registros de arenas cicloneadas de una empresa minera. Se disponen de 40 registros de granulometrías de arenas cicloneadas con diferentes contenidos de finos, como se ilustra en la figura 3.1.

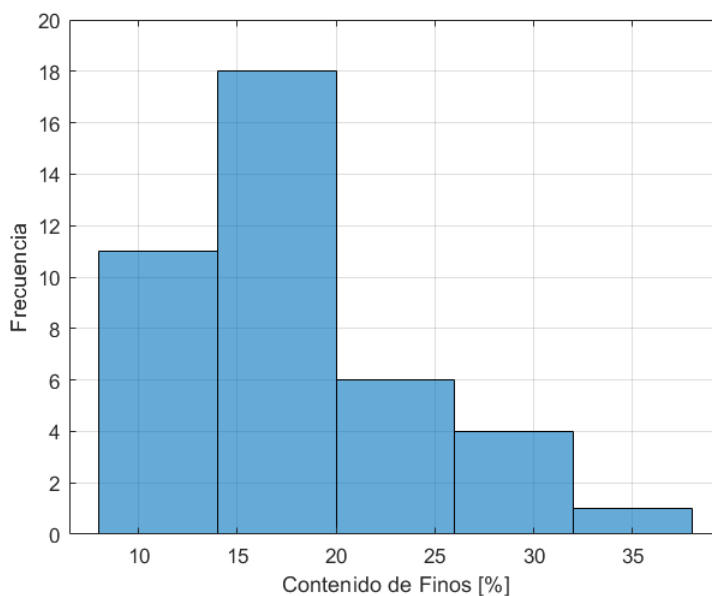


Figura 3.1: Contenido de Finos del registro de arenas.

Registro	Contenido de Finos	Unidad
Arenas	18 ± 6	[%]

Tabla 3.1: Valor promedio del contenido de finos en los registros de arenas.

Debido a que en el Decreto N.º 248 menciona que las arenas que son depositadas en el muro del tranque de relaves deben contener menos de un 20 % de contenidos de finos ($\% < \#200$), se procede a filtrar la base de datos cumpliendo con el requisito mencionado. Además, para el estudio de las granulometrías se selecciona un diámetro característico de partícula que corresponde al 75 % en peso de la muestra ensayada.

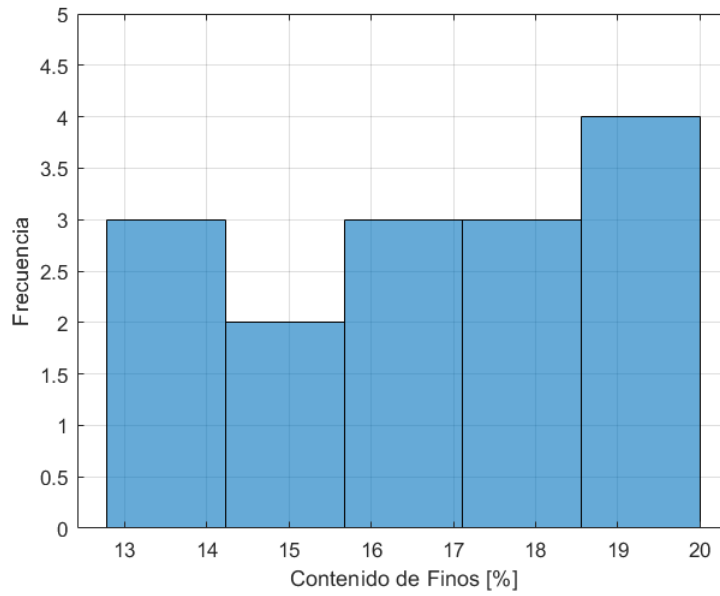


Figura 3.2: Registro de contenido de finos ($\%<\#200$) menor a un 20 %.

Registro	Contenido de Finos	Unidad
Arenas	17 ± 2	[%]

Tabla 3.2: Valor promedio del contenido de finos en los registros de arenas menores a un 20 %.

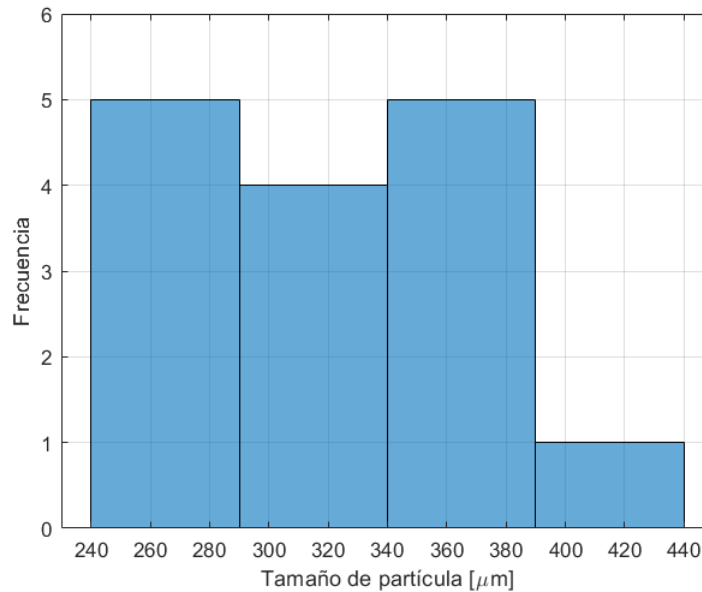


Figura 3.3: Registros de arenas con un diámetro característico d_{75} .

Registro	d_{75}	Unidad
Máximo	405	$[\mu m]$
Promedio	320	$[\mu m]$
Mínimo	254	$[\mu m]$

Tabla 3.3: Registros de las arenas con un diámetro característico correspondientes al 75 % del peso de las muestras ensayadas.

En los histogramas presentados se observa una gran variabilidad del contenido de finos de las arenas cicloneadas en los registros. Como se comentó, el filtro aplicado para poder seleccionar el contenido de finos es lo especificado en el Decreto N.º 248, permitiendo comprender los valores de 7 %, 13 % y 19 % de finos para la construcción de las bandas granulométricas. Para el caso del diámetro característico correspondiente al 75 % en peso de la muestra (d_{75}), seleccionando el máximo, promedio y mínimo, como se observa en la tabla 3.3.

Con el fin de estudiar la influencia del tamaño característico de las partículas, se procede a solo aplicar este parámetro al contenido de finos del 13 %, ya que permite analizar la influencia del diámetro característico d_{75} de las bandas granulométricas en la velocidad de sedimentación de las partículas para un mismo contenido de finos.

Para realizar la matriz experimental, se definió las variables involucradas discutidas en el marco teórico. En este caso, para la concentración de sólidos va desde el 66 % al 70 % en intervalos de 2 unidades, correspondientes a relaves en pasta (Ministerio de Minería, 2007). Además, debido

a la configuración del diseño del prototipo, las concentraciones de sólidos estaban limitadas hasta un 70 %, ya que para concentraciones de sólidos superiores no se evidenció la sedimentación de las partículas, por ende, no era posible su análisis. En el caso del contenido de finos ($\%<\#200$) se encuentra en el rango del 7 % al 19 % en intervalos de 6 unidades, todo esto sujeto a la norma del decreto supremo N.º 248. Por último, se seleccionan 3 rangos de tamaños de partículas característicos correspondientes a un d_{75} de 254, 320 y 405 micrómetros.

Se desarrollaron 15 experimentos totales, como se detalla en la siguiente tabla 3.4.

N.º Experimento	C_p	Finos (<#200)	d_{75}
[-]	[%]	[%]	[μm]
1	66 %	13 %	254
2	68 %	13 %	254
3	70 %	13 %	254
4	66 %	7 %	320
5	68 %	7 %	320
6	70 %	7 %	320
7	66 %	13 %	320
8	68 %	13 %	320
9	70 %	13 %	320
10	66 %	19 %	320
11	68 %	19 %	320
12	70 %	19 %	320
13	66 %	13 %	405
14	68 %	13 %	405
15	70 %	13 %	405

Tabla 3.4: Matriz Experimental.

3.2. Diseño y Construcción Prototipo Para el Estudio de Sedimentación

3.2.1. Prototipo

La construcción del prototipo para el estudio de la velocidad de sedimentación, se analizó si la velocidad efectiva de sedimentación de la partícula se ve influenciada por el diámetro del contenedor. Según el análisis de Richardson & Zaki (1997) se observó que los estudios de sedimentación están empleados para diámetros de partículas mayores a 100 micrones (Richardson y Zaki, 1997). Por ende, para ver la influencia del diámetro del contenedor, se utilizó la ecuación 2.17 para estimar la velocidad efectiva de las partículas. Entonces para estimar esta velocidad, el diámetro de partícula a estudiar corresponde a las del diámetro característico d_{75} . Concluyendo así que al comparar la velocidad efectiva con un diámetro de contenedor infinito contra la velocidad de un diámetro

de contenedor fijo, el resultado es que ambos diámetros tienda a cero, por lo tanto, la velocidad estimada de la partícula no se ve afectada por el diámetro del contenedor.

Para la confección del prototipo, basándose en lo mencionado anteriormente, se decide utilizar válvulas de tipo bola de 40 milímetros (figura 3.4). Este tipo de válvulas permite ser reutilizadas para cada experimento, además de ser rápidas en su limpieza y otro factor es su acceso para ser reemplazadas en la posibilidad de falla.



Figura 3.4: Válvula de Bola de 40 milímetros.

En los ensayos preliminares se utilizó válvulas de compuertas, siendo descartadas debido al diseño, que provocaba que las arenas estudiadas entraran por los espacios vacíos del diseño de la válvula.

El diseño del prototipo fue ideado basándose en la teoría de la sedimentación de mezclas poli-dispersas. Según lo mencionado en el marco teórico, las partículas más grandes van a sedimentar en el fondo del contenedor, y las más pequeñas van a quedar en la parte superior de este. Por eso, es que se decidió tener dos secciones separadas por una válvula y así identificar estas fases mediante la agitación y posterior reposo de la mezcla en el prototipo.



Figura 3.5: Prototipo.

En la figura (3.6) se ilustra la secuencia para el desarrollo de los experimentos de sedimentación. En la figura (3.6a), se observa cuando el prototipo se encuentra vacío en su interior. La segunda figura (3.6b) corresponde cuando la mezcla se encuentra dentro del prototipo, es decir, la arena y el agua ya están agitadas y además sin sedimentar, apreciar que la válvula superior se encuentra cerrada. Por último, en la figura (3.6c) corresponde cuando se ha cerrado la válvula intermedia transcurrido el tiempo de 10 segundos para la sedimentación de la mezcla, obteniendo una muestra superior y otra inferior.

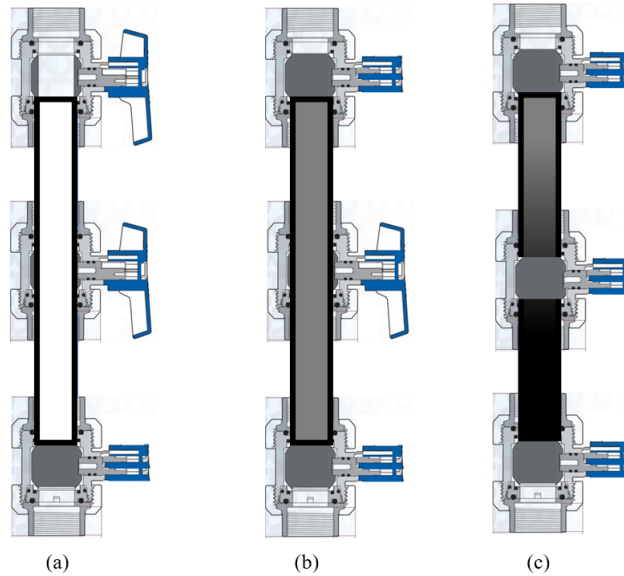


Figura 3.6: Secuencia para el desarrollo de los experimentos.

3.2.2. Modelo Para Estimar la Velocidad de Sedimentación

Para entender como se estimó la velocidad de sedimentación experimental, primero se identificaron las dos mezclas presentes en el prototipo, cada una de ellas correspondiente a la sección superior e inferior. La mezcla de la sección superior se identificó como S_1 y la mezcla de la sección inferior se identificó como S_2 , tal como se muestra en la siguiente figura 3.7.

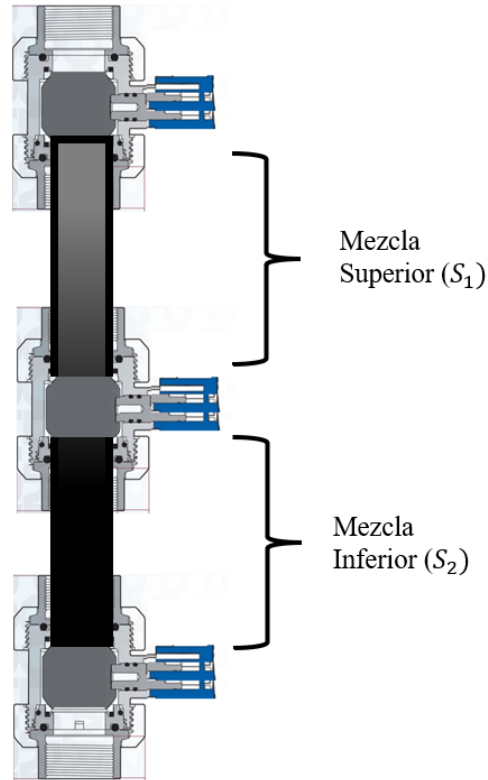


Figura 3.7: Secciones del Prototipo.

Para cada mezcla se realizó granulometría completa de la masa seca, permitiendo obtener la granulometría y la masa de cada tamiz de cada mezcla.

A continuación, se demuestra como se obtuvo la velocidad de sedimentación de los sólidos para cada tamaño de partícula realizados en los experimentos. Se denotará a lo largo de las ecuaciones el término d_x para hacer referencia al tamaño de partícula (abertura del tamiz) que se empleó para cada caso.

Primero, se calculó el promedio de las masas obtenidas en las granulometrías de cada tamiz, considerando la masa de la mezcla de la sección 1 ($M_{S1_{d_x}}$) y la masa de la mezcla de la sección 2 ($M_{S2_{d_x}}$).

$$\bar{M}_{d_x} = \frac{(M_{S1_{d_x}} + M_{S2_{d_x}})}{2} \quad (3.1)$$

Segundo, para obtener el diferencial de masa, se restó el promedio de masa calculado anteriormente con la masa de la mezcla de la sección 2 para ese tamaño de partícula (el cálculo de restar con la masa de la mezcla de la sección 1 no interfiere con el cálculo) y esto se dividió en el tiempo empleado para los experimentos.

$$\frac{\Delta M_{d_x}}{\Delta T} = \frac{|\bar{M}_{d_x} - M_{S2_{d_x}}|}{t} \quad (3.2)$$

Tercero, para obtener el porcentaje de masa promedio retenido en el tamiz, se obtuvo a partir de la relación de la masa promedio de ese tamiz con la masa promedio de toda la mezcla.

$$\% \bar{M} R_{d_x} = \frac{\bar{M}_{d_x}}{\bar{M}} \quad (3.3)$$

Entonces, para entender de donde proviene la ecuación de la velocidad de sedimentación de los sólidos, se debe tener en consideración que el flujo que hay dentro del prototipo es cero debido a que no se añade volumen de muestra al realizar los experimentos.

$$\vec{F}_p = \vec{V}_p \rho_p A = 0 \quad (3.4)$$

La velocidad de la pulpa (\vec{V}_p) se puede descomponer en una velocidad de sólidos (\vec{V}_s) más una velocidad del líquido (\vec{V}_l), y la ecuación 2.12 al ser reemplazada en la ecuación 3.4 queda compuesta por la ecuación 3.5.

$$\vec{F}_p = \vec{V}_s \rho_s C_v A + \vec{V}_l \rho_l (1 - C_v) A \quad (3.5)$$

Del mismo modo que la velocidad, el flujo de la pulpa se puede descomponer en un flujo para las partículas sólidas y un flujo para el líquido de la pulpa, como se muestra en la ecuación 3.6.

$$\vec{F}_p = \vec{F}_s + \vec{F}_l = 0 \quad (3.6)$$

Entonces, de la ecuación anterior, se desprenden las siguientes dos ecuaciones correspondientes a 3.7 y 3.8.

$$\vec{F}_s = \vec{V}_s \rho_s C_v A \quad (3.7)$$

$$\vec{F}_l = \vec{V}_l \rho_l (1 - C_v) A \quad (3.8)$$

Debido a que este estudio es sobre la velocidad de sedimentación de los sólidos, la ecuación para poder relacionar los términos obtenidos anteriormente es la ecuación 3.7, donde se despeja la velocidad de sólidos tal como se muestra en la ecuación 3.9.

$$\vec{V}_s = \frac{\vec{F}_s}{\rho_s C_v A} \quad (3.9)$$

Por otra parte, el flujo de sólido para este caso se puede entender como el diferencial de masa y tiempo, ya que los sólidos van sedimentando al pasar el tiempo.

$$\vec{F}_s = \frac{\Delta M_{dx}}{\Delta T} \quad (3.10)$$

Reemplazando la ecuación 3.10 en la ecuación 3.9, quedando de la siguiente manera la ecuación 3.11.

$$\vec{V}_{sdx} = \frac{\Delta M_{dx}}{\Delta T \rho_s C_v^\# A} \quad (3.11)$$

Por otro lado, la concentración de sólidos volumétrica no es constante, esto se basa en la ecuación 2.5, ya que esta concentración va a ir variando según la masa de sólidos que está presente en la mezcla y por ende al realizar las granulometrías el contenido de sólidos irá variando en cada tamiz, como se demuestra en la ecuación 3.12.

$$C_v^{d_x} = \% \bar{M} R_{d_x} C_v \quad (3.12)$$

Luego, reemplazando la ecuación 3.2, 3.3 y 3.12 en la ecuación 3.11 se obtiene la ecuación 3.13 que hace referencia a la velocidad de sedimentación para un tamaño de partícula (d_x) dado.

$$\vec{V}_{s_{d_x}} = \frac{\bar{M} |\bar{M}_{d_x} - M_{S2_{d_x}}|}{t \rho_s A C_v \bar{M}_{d_x}} \quad (3.13)$$

Por último, para estimar la velocidad ponderada de sedimentación para cada experimento se obtiene la ecuación 3.14.

$$\vec{V}_p = \sum \% \bar{M} R_{d_x} \vec{V}_{s_{d_x}} \quad (3.14)$$

3.3. Metodología Experimental

3.3.1. Caracterización de la Muestra

Para realizar los ensayos de reología y de sedimentación primero se debe caracterizar las muestras de arenas, debido a esto se obtendrán parámetros fundamentales como la densidad de sólidos, pH, temperatura, concentración y granulometrías.

3.3.1.1. Densidad de Sólidos

La densidad de sólidos (ρ_s) corresponde al coeficiente entre la masa de las partículas y el volumen que ocupan en una muestra.

La densidad de sólidos se encuentra normado por NCh 1532.of80 "Mecánica de Suelos - Determinación de la densidad de partículas sólidas" proporcionado por el Instituto Nacional de Normalización (INN). Esta norma indica el procedimiento para determinar la densidad de partículas sólidas de suelos que se componen de partículas menores a 5 milímetros, mediante un picnómetro (Norma Chilena [NCh], 1980). Para el alcance de este estudio, la densidad de sólidos será constante, pero para verificar el valor de la densidad de sólidos de las arenas se utilizará la norma antes mencionada.

3.3.1.1.1. Aparatos y Materiales

- Picnómetro:
Frasco volumétrico con una capacidad igual o mayor a 100 ml o una botella con tapón con una capacidad igual o mayor a 50 ml.
- Balanza:
Con precisión de 0,01 g.
- Herramientas y accesorios
Recipiente para las muestras, brochas, poruña, embudo, termómetro, estufa, secador, etc.
- Agua destilada o desmineralizada desairada

3.3.1.1.2. Calibración del picnómetro

- Limpiar, secar, pesar y registrar la masa del picnómetro vacío (M_f).
- Llenar con agua destilada a temperatura ambiente hasta que la parte inferior del menisco coincida con la marca de calibración. Secar el interior del cuello del picnómetro y también el exterior. Pesar y registrar la masa del picnómetro más el agua (M_a).
- Insertar un termómetro en el agua hasta el centro del picnómetro. Determinar y registrar la temperatura de calibración (t_i) aproximado a 1°C.
- De la masa del picnómetro más el agua a la temperatura de calibración (M_{ati}) se debe preparar una tabla de valores de M_a para una serie de temperaturas que probablemente prevalezcan durante el ensayo.
- Calculas los valores de M_a a distintas temperaturas de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$M_{a_{tx}} = \frac{\rho_{wtx}}{\rho_{wti}} (M_{ati} - M_f) + M_f \quad (3.15)$$

3.3.1.1.3. Tamaño de la Muestra

- La muestra de ensayo compuesta por partículas menores que 5 mm debe tener un tamaño mínimo, referido a su masa seca, de 25 g cuando se usa el frasco y de 10 g cuando se usa la botella con tapón.

3.3.1.1.4. Acondicionamiento de la Muestra

- Se debe secar la muestra en una estufa hasta masa constante con una temperatura a 110°C ± 5°C, esta temperatura fue evaluada, ya que en estudios anteriores de secado de muestra a masa constante la muestra no se vio afecta al elevar la temperatura a 200°C ± 5°C.
- Enfriar en un secador, pesar y registrar su masa seca (m_s).

3.3.1.1.5. Ensayo

- Colocar la muestra en el picnómetro, cuidando de evita perdidas del material cuando ya se ha determinado su masa seca. Agregar agua destilada cuidadosamente, evitando la formación de burbujas, hasta alcanzar aproximadamente $\frac{3}{4}$ de la capacidad del frasco o la mitad de la capacidad de la botella.
- Agregar agua destilada hasta llenar el picnómetro. Limpiar y secar el exterior con un paño limpio y seco. Determinar y registrar la masa del picnómetro con la muestra y el agua (M_m).

3.3.1.1.6. Expresión de resultados

$$\rho_s = \frac{m_s}{(m_s + M_a) - M_m} \rho_{wtx} \quad (3.16)$$

3.3.1.2. pH

Para medir el pH del agua contenida en las arenas, se debe utilizar un pH-metro que indica el pH de la solución o también se puede utilizar un papel indicador de pH. Este último funciona sumergiendo el papel en la solución ya agitada, y este papel tornará de un color que corresponde a uno de la escala de colores de ph estándar.

Para el caso de este estudio el pH será constante, por ende para cada muestra se registrará este valor del papel indicador de pH, en el caso de que exista variación de pH se procederá a utilizar productos comerciales que son ajustadores de pH.

3.3.1.3. Temperatura

La temperatura se medirá a través de un termómetro.

Para el caso de este estudio la temperatura será constante (temperatura ambiente) por ende para cada muestra a través de un termómetro se registrará dicho valor.

3.3.1.4. Concentración de Sólidos

La concentración de sólidos en este estudio es variable según el rango establecido en la matriz experimental. Para el cálculo de este parámetro será de manera indirecta, es decir, que se obtendrá con los parámetros de la densidad de la pulpa o mezcla y la densidad de sólidos.

3.3.2. Procedimiento de Sedimentación

3.3.2.1. Materiales

Para realizar los ensayos de sedimentación, lo primordial fue estimar el tiempo de sedimentación de las arenas ensayadas. Al realizar diferentes pruebas a distintos tiempos de sedimentación

se estimó 10 segundos, debido a que para tiempos inferiores a 10 segundos al aumentar la concentración de sólidos no se apreciaba el fenómeno de sedimentación en las partículas en el prototipo diseñado.

El paso a paso para los ensayos de sedimentación son:

- I. Llenar el prototipo con arenas sintéticas y agua intercaladamente, para lograr una correcta mezcla.
- II. Cerrar la válvula que se encuentra en el parte superior del prototipo.
- III. Agitar el prototipo por 5 minutos, esto permitirá una adecuada mezcla de la arena con el agua.
- IV. Dejar verticalmente el prototipo por el tiempo estimado (10 segundos).
- V. Cerrar la válvula que se encuentra a la mitad del prototipo (en el caso de no poder cerrar la válvula, colocar horizontalmente el prototipo y hacer palanca en la válvula).
- VI. Verter la arena de la sección superior en una bandeja y repetir lo mismo para la sección inferior.
- VII. Secar la muestra en un horno a 200°C.
- VIII. Masar la muestra de arena de las bandejas y registrar el valor en el Excel “Experimentos”.
- IX. Realizar granulometría completa a la masa total de las bandejas y registrar los valores en el Excel “Experimentos”.

3.3.3. Procedimiento Granulometrías

La granulometría corresponde a la distribución de tamaños de las partículas de un árido. Es por esto que la granulometría se encuentra normado por NCh 3236-2010 “Mecánica de Suelos – Tamizado y determinación de la granulometría” correspondiente al Instituto Nacional de Normalización (INN).

Para el alcance de este estudio se variará el contenido de finos (malla N°200) en los diferentes ensayos de esta memoria.

3.3.3.1. Aparatos

- Agitador Mecánico
- Balanza:
Con una precisión de 0,1 gramos.
- Tamices:
En este estudio se utilizaron tamices N°40/50/100/200/325.

- Depósito receptor y tapa
- Herramientas y accesorios:
Brochas, espátula, recipiente de pesaje.

3.3.3.2. Preparación de la muestra para análisis granulométrico por tamizado

Debido a que las arenas no superan los 4,75 milímetros se omiten los cálculos para material superior a la malla N°4.

- I. Cortar la muestra en el tamiz de 4,75 mm (ASTM N°4).
- II. Separar en dos porciones: Fracción retenida y fracción que pasa el tamiz de 4,75 mm (N°4).

3.3.3.3. Análisis Granulométrico

- I. Se debe secar la muestra en una estufa hasta masa constante con una temperatura a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, esta temperatura fue evaluada, ya que en estudios anteriores de secado de muestras de arenas a masa constante la muestra no se vio afectada al elevar la temperatura a $200^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- II. Secar la muestra a $200 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta que cumpla masa constante.
- III. Separar una fracción de la muestra y registrarla como masa inicial.
- IV. Iniciar el tamizado mediante el agitador de tamices.
- V. Retirar y registrar la masa retenida en cada uno de los tamices.
- VI. Una vez ya llegada al depósito receptor de los tamices, registrar la masa como masa residual.
- VII. Sumar la masa de los tamices más la masa residual y verificar que el error que exista entre la masa de los tamices versus la masa inicial no supere el 3 %.
- VIII. Mediante la siguiente fórmula se calcula el porcentaje retenido en cada tamiz.

$$\text{Masa Retenida} = \frac{B}{A} * 100(\%) \quad (3.17)$$

3.4. Muestras Sintéticas de Arenas

Para realizar las muestras sintéticas de arenas, el procedimiento a emplear fue estimar la masa de arena necesaria para cumplir con la concentración de sólidos deseada. Para esto primero se calculó el volumen del prototipo, mediante el área y el largo de este. Después, utilizando las fórmulas de caracterización de pulpas se estimó la masa de arena y la masa de agua necesaria.

Parámetro	Unidades	7 % Finos			13 % Finos			19 % Finos		
C_p	[%]	66 %	68 %	70 %	66 %	68 %	70 %	66 %	68 %	70 %
ρ_s	[g/cm ³]	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65	2,65
ρ	[g/cm ³]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
m_a	[g]	282	299	311	282	299	315	282	296	311
m_l	[g]	145	141	133	145	141	135	145	139	133

Tabla 3.5: Registros de las masas de arenas y de agua para cada experimento con $d_{75} = 320[\mu m]$.

Parámetro	Unidades	13 % Finos		
C_p	[%]	66 %	68 %	70 %
ρ_s	[g/cm ³]	2,65	2,65	2,65
ρ	[g/cm ³]	1,00	1,00	1,00
m_a	[g]	282	296	311
m_l	[g]	145	139	133

Tabla 3.6: Registros de las masas de arenas y de agua para cada experimento con $d_{75} = 254[\mu m]$.

Parámetro	Unidades	13 % Finos		
C_p	[%]	66 %	68 %	70 %
ρ_s	[g/cm ³]	2,65	2,65	2,65
ρ	[g/cm ³]	1,00	1,00	1,00
m_a	[g]	282	296	311
m_l	[g]	145	139	133

Tabla 3.7: Registros de las masas de arenas y de agua para cada experimento con $d_{75} = 405[\mu m]$.

A partir de esto, se calcularon las diferentes granulometrías, cumpliendo con él d_{75} y el contenido de finos para cada uno de los experimentos.

3.5. Resultados

3.5.1. Densidad de Sólidos

Para el desarrollo de la densidad de sólidos, se implementó el procedimiento Densidad de Sólidos descrito en la sección de Metodología Experimental Laboratorio. Obteniendo los siguientes resultados de la tabla 3.8.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Masa Muestra Seca	M_s	30	[g]
Masa Picnómetro Vacío	M_f	141	[g]
Masa Picnómetro más Agua	M_a	639	[g]
Masa Picnómetro, Agua y Masa	M_m	658	[g]
Temperatura del agua	t_i	20	[°C]
Densidad del agua	ρ_w	0,998	[g/cm ³]
Masa Picnómetro más Agua	$M_{a_{tx}}$	639	[g]
Densidad Picnómetro más Agua	$\rho_{a_{tx}}$	0,998	[g/cm ³]
Densidad del Sólido Aparente	ρ	2,65	[g/cm ³]
Densidad Relativa del Sólido	S	2,65	[-]

Tabla 3.8: Registros para la obtención de densidad del agua y densidad del sólido.

3.5.2. Granulometrías

Debido a lo anterior, se desarrollan diferentes granulometrías cumpliendo con las variables de contenido de finos y el diámetro característico. El análisis granulométrico se detalla en el Anexo A y el gráfico 3.8 muestran cada curva granulométrica realizada.

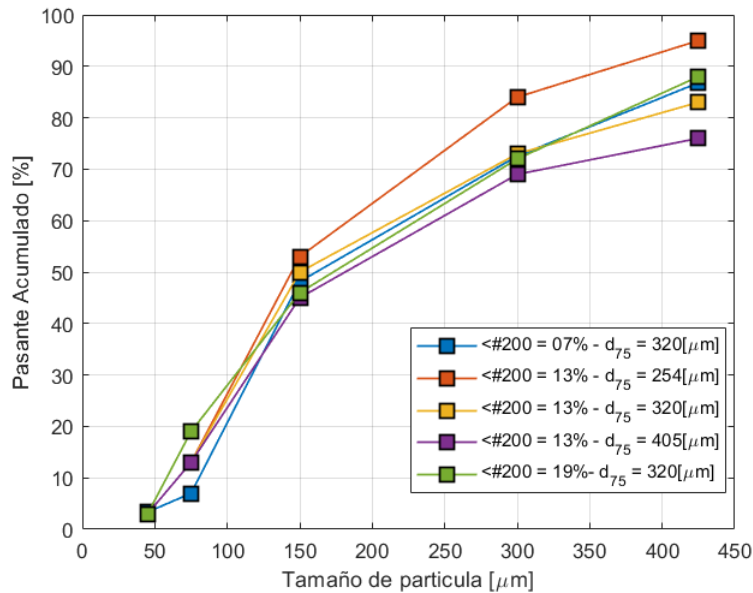


Figura 3.8: Curvas Granulométrica para diferentes contenidos de finos y diámetros característicos (d_{75}).

3.5.3. Velocidad de Sedimentación

Para obtener las velocidades de sedimentado fue llevado a cabo el "Procedimiento de Velocidad de Sedimentación" descrito en la sección de "Metodología Experimental Laboratorio".

Para cada contenido de finos (7 %, 13 % y 19 %) se abarcó la concentración de sólidos en peso (C_p) de 66 %, 68 % y 70 % con un d_{75} igual a 320 [μm], al igual que el ítem anterior, para el caso de 13 % de finos, él d_{75} abarcó los valores de 254 [μm], 320 [μm] y 405 [μm]. Obteniendo así los siguientes resultados presentados en la tabla 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 y 3.13. Las curvas de velocidad de sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos y al mismo contenido de finos son presentados en las Figuras 3.9, 3.10, 3.11, 3.12 Y 3.13.

- $<\#200 = 7\%$:

$d_x \backslash C_p$	425	300	150	75	45	[μm]
66 %	0.26	0.18	0.15	0.12	0.06	[cm/s]
68 %	0.20	0.14	0.11	0.10	0.07	[cm/s]
70 %	0.12	0.04	0.01	0.01	0.01	[cm/s]

Tabla 3.9: Registros de velocidades de sedimentación para finos iguales a 7 % y $d_{75} = 320[\mu m]$.

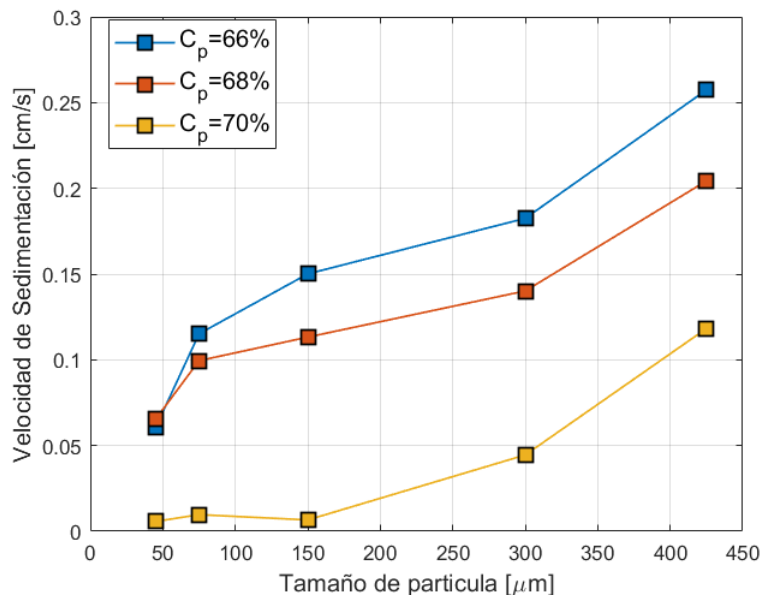


Figura 3.9: Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos con 7 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$.

- $<\#200 = 13\%$:

- $d_{75} = 254[\mu m]$

$C_p \backslash d_x$	425	300	150	75	45	$[\mu m]$
66 %	0.24	0.19	0.14	0.13	0.14	[cm/s]
68 %	0.15	0.13	0.08	0.06	0.05	[cm/s]
70 %	0.04	0.01	0.03	0.005	1 E-16	[cm/s]

Tabla 3.10: Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos con 13 % de finos y un $d_{75} = 254[\mu m]$.

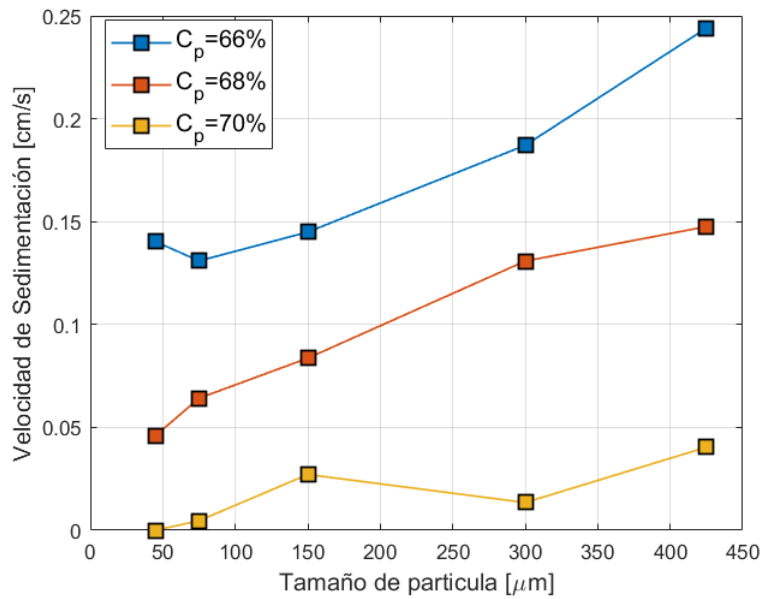


Figura 3.10: Curva Granulométrica para las muestras con 13 % de finos y un $d_{75} = 254[\mu m]$.

- $d_{75} = 320[\mu m]$

$C_p \backslash d_x$	425	300	150	75	45	$[\mu m]$
66 %	0.26	0.13	0.08	0.07	0.05	[cm/s]
68 %	0.24	0.13	0.05	0.02	0.01	[cm/s]
70 %	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	[cm/s]

Tabla 3.11: Registros velocidad de sedimentación para finos igual a 13 % y $d_{75} = 320[\mu m]$.

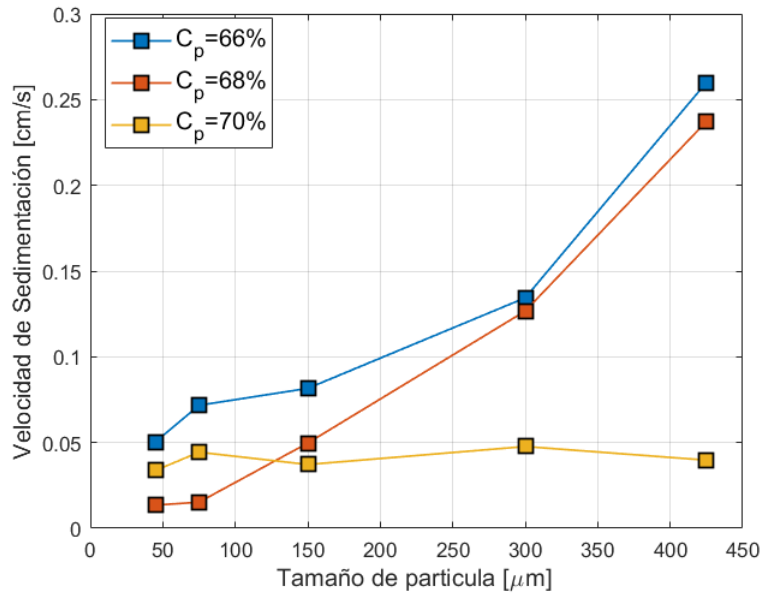


Figura 3.11: Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos con 13 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$.

- $d_{75} = 405[\mu m]$

$C_p \backslash d_x$	425	300	150	75	45	$[\mu m]$
66 %	0.38	0.18	0.13	0.10	0.09	[cm/s]
68 %	0.38	0.20	0.12	0.04	0.02	[cm/s]
70 %	0.20	0.12	0.10	0.09	0.02	[cm/s]

Tabla 3.12: Registros velocidad de sedimentación para finos igual a 13 % y $d_{75} = 405[\mu m]$.

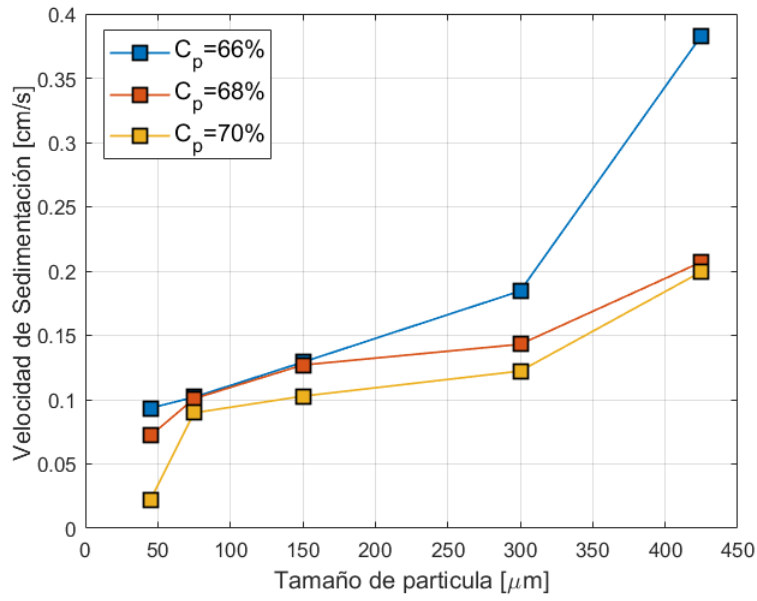


Figura 3.12: Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos con 13 % de finos y un $d_{75} = 405[\mu\text{m}]$.

- $<\#200 = 19\%$:

$C_p \backslash d_x$	425	300	150	75	45	$[\mu\text{m}]$
66 %	0.40	0.21	0.14	0.09	0.06	[cm/s]
68 %	0.24	0.09	0.06	0.03	0.02	[cm/s]
70 %	0.16	0.10	0.07	0.05	0.05	[cm/s]

Tabla 3.13: Registros velocidad de sedimentación para finos igual a 19 % y $d_{75} = 320[\mu\text{m}]$.

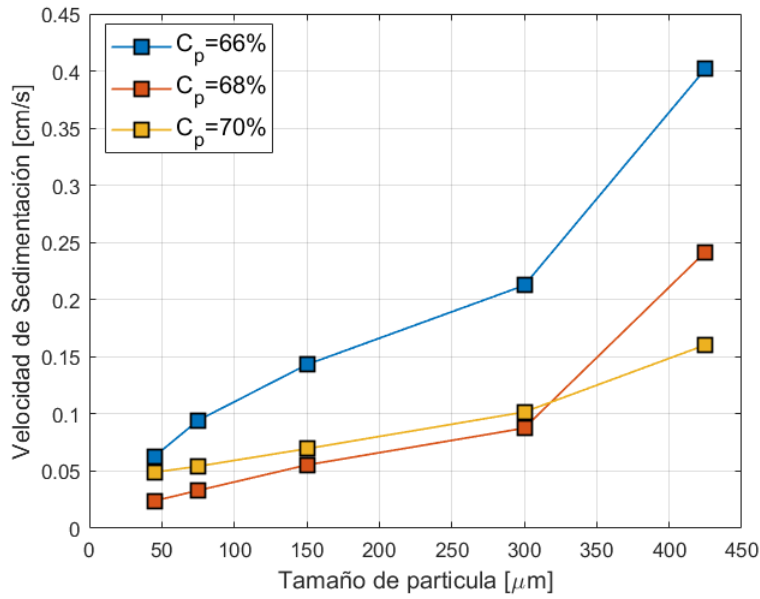


Figura 3.13: Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos con 19 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu\text{m}]$.

3.5.4. Velocidad Ponderada

Para obtener las velocidades ponderadas para cada experimento se utilizó la ecuación 3.14, donde se desarrollaron 15 cálculos de velocidades ponderadas de sedimentación para cada contenido de finos (7 %, 13 % y 19 %) abarcando las concentraciones de sólidos de 66 %, 68 % y 70 % con el mismo diámetro característico d_{75} igual a 320 [μm], al igual que en los ítems anteriores para el caso de 13 % de finos él d_{75} abarca los valores de 254 [μm], 320 [μm] y 405 [μm]. Obteniendo las tablas 3.14, 3.15 y 3.16 y gráficos 3.14, 3.15 y 3.16.

- $<\#200 = 7 \%$

C_p	Velocidad Ponderada	Unidades
66 %	0.15	[cm/s]
68 %	0.12	[cm/s]
70 %	0.03	[cm/s]

Tabla 3.14: Velocidad Ponderada a diferentes concentraciones de sólidos con un 7 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu\text{m}]$

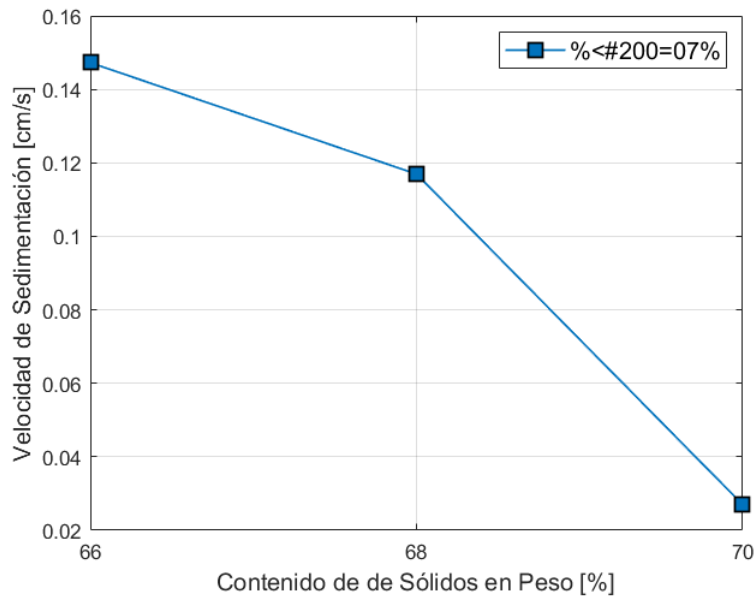


Figura 3.14: Curva de Velocidad Ponderada de Sedimentación con 7% de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$.

■ **<#200 = 13 %**

Contenido de finos (% <#200) = 13 %				Unidades
$C_p \backslash d_{75}$	254	320	405	micrones
66 %	0.14	0.11	0.18	[cm/s]
68 %	0.08	0.08	0.17	[cm/s]
70 %	0.01	0.04	0.13	[cm/s]

Tabla 3.15: Curvas de velocidades ponderadas variando las concentraciones de sólidos a diferentes diámetros característicos d_{75} .

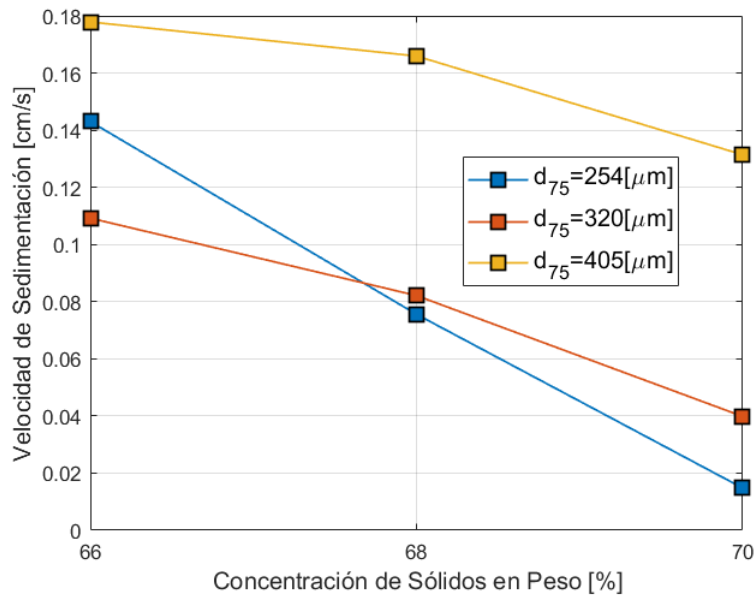


Figura 3.15: Curvas de Velocidades Ponderadas de Sedimentación con 13 % de finos a diferentes concentraciones de sólidos y variando el diámetro característico (d_{75}).

■ <#200 = 19 %

C_p	Velocidad Ponderada	Unidades
66 %	0.16	[cm/s]
68 %	0.07	[cm/s]
70 %	0.07	[cm/s]

Tabla 3.16: Velocidad Ponderada a diferentes concentraciones de sólidos con un 19 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$

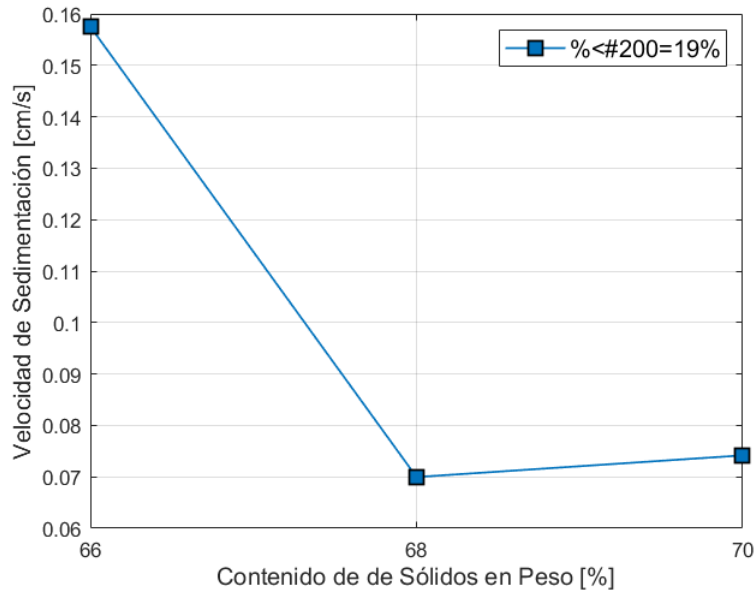


Figura 3.16: Curva de Velocidad Ponderada de Sedimentación con 19% de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$.

3.5.5. Análisis Dimensional

El análisis dimensional planteado reúne cada una de las variables para la velocidad de sedimentación para un tamaño de partícula (d_x), que son:

- Concentración de Sólidos en peso de la mezcla (C_p).
- Concentración de Sólidos para cada diámetro de partícula ($C_{p_{dx}}$).
- Contenido de Finos ($\%<\#200$).
- Diámetro de partícula (d_x).
- Diámetro característico de partículas (d_{75}).

El propósito del análisis dimensional es que a través de resultados experimentales permite poder determinar un modelo matemático que describa el fenómeno de velocidad de sedimentación. Mediante diferentes configuraciones de las variables en términos adimensionales, el mejor ajuste para modelar esta velocidad de sedimentación con un diámetro de partícula dado, es determinada por la ecuación 3.18.

$$Re = \nu_1(C_p)^{\nu_2}(C_{p_{dx}})^{\nu_3}(\% < \#200)^{\nu_4}(CU)^{\nu_5}(d_x/d_{75})^{\nu_6} \quad (3.18)$$

De la ecuación 3.18, el número de Reynolds se expresa en términos de la velocidad de sedimentación para un tamaño de partícula específico, el tamaño de partícula definido, densidad de la pulpa y la viscosidad de la pulpa. La viscosidad de la pulpa es constante con un valor igual a 2,47 [mPa s] (Díaz Leiva, 2021) correspondiente al estudio del análisis de la influencia del contenido de finos y concentraciones en las variables reológicas, donde realizan un ajuste al modelo de Wasp para experimentos de arenas a distintos contenidos de finos y concentraciones de sólidos. Obteniendo el número de Reynolds en la ecuación 3.19.

$$Re = \frac{V_s d_x \rho_p}{\eta} \quad (3.19)$$

Obteniendo la figura 3.17 que representa el mejor ajuste de los datos en parámetros adimensionales.

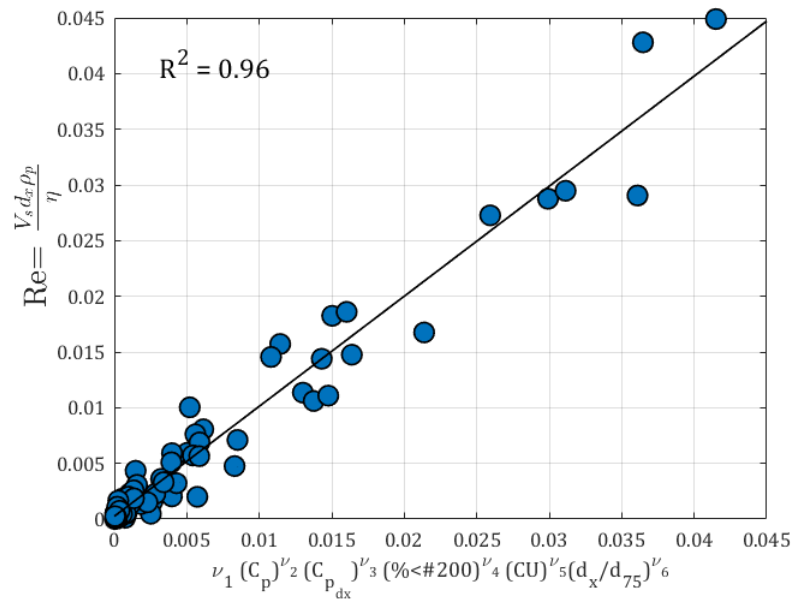


Figura 3.17: Ajuste de datos entre la velocidad de sedimentación adimensional y las variables adimensionales propuestas.

El valor de los ajustes para cada variable adimensional se observa en la tabla 3.17.

Parámetros Adimensional	Valor	Unidad
ν_1	5E-10	[-]
ν_2	-32.9	[-]
ν_3	0.4	[-]
ν_4	-0.6	[-]
ν_5	2.9	[-]
ν_6	2.1	[-]
R^2	0.96	[-]

Tabla 3.17: Valores de los parámetros adimensionales.

Despejando la velocidad de sedimentación de la ecuación 3.18 y reemplazando los valores de los parámetros adimensionales, se desprende la ecuación 3.20.

$$V_s = 5E - 10(C_p)^{-32,9}(C_{pdx})^{0,4}(\% < \#200)^{-0,6}(CU)^{2,9}(d_x/d_{75})^{2,1} \frac{\eta}{d_x \rho_p} \quad (3.20)$$

Otro punto de análisis es la velocidad ponderada, donde las variables identificadas son casi las mismas que para la velocidad de sedimentación de un diámetro de partícula. La variable que excluye la velocidad ponderada es el diámetro de partícula y la concentración de sólidos de esa partícula, ya que según la ecuación 3.14, es la suma de las velocidades de sedimentación para cada tamaño de partícula por el porcentaje de masa retenida de ese tamaño de partícula.

Mediante diferentes configuraciones de las variables en términos adimensionales, el mejor ajuste para modelar esta velocidad de sedimentación ponderada es determinada por la ecuación 3.21.

$$\frac{V_{ponderada}}{V_{Stokes}} = \nu_1(C_p)^{\nu_2}(d_{75}/d_{50})^{\nu_3}(\% < \#200)^{\nu_4}(CU)^{\nu_5} \quad (3.21)$$

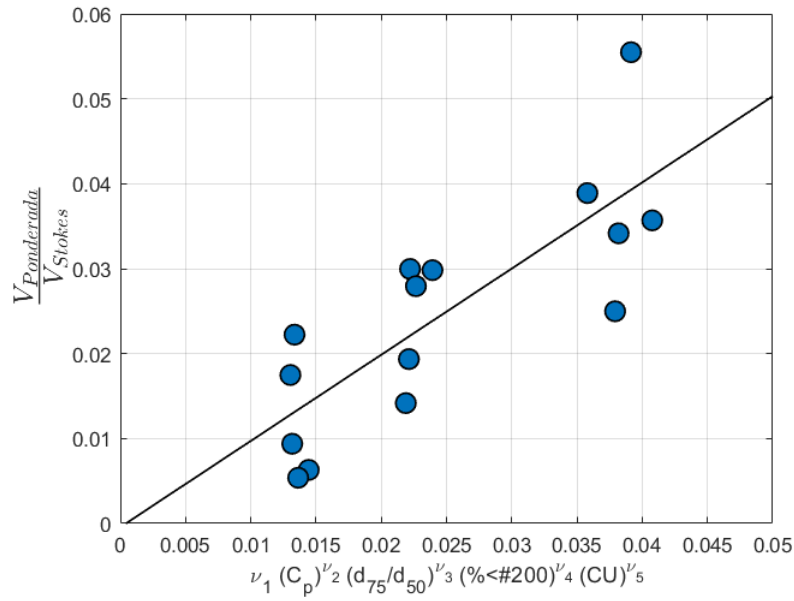


Figura 3.18: Ajuste de datos entre la velocidad ponderada adimensional y las variables adimensionales propuestas.

El valor de los ajustes para cada variable adimensional se observa en la tabla 3.18.

Parámetros Adimensional	Valor	Unidad
ν_1	8E-05	[-]
ν_2	-17.9	[-]
ν_3	-0.3	[-]
ν_4	-0.2	[-]
ν_5	-0.3	[-]
R^2	0.64	[-]

Tabla 3.18: Valores de los parámetros adimensionales.

Entonces, reemplazando los parámetros adimensionales en la ecuación 3.21, y despejando la variable de velocidad ponderada, queda la fórmula 3.22

$$V_{ponderada} = 8E - 05(C_p)^{-17,9}(d_{75}/d_{50})^{-0,3}(\% < \#200)^{-0,2}(CU)^{-0,3}V_{Stokes} \quad (3.22)$$

Capítulo 4

Pérdidas de Cargas de Datos en Terreno

Los datos en terreno fueron proporcionados mediante el monitorio de la puesta en marcha de una batería de ciclones. Debido a las condiciones existentes de terreno, por medio de los datos proporcionados de los equipos (manómetro (PI), densímetro (D) y un flujómetro (F)) permitieron calcular las pérdidas de cargas para cada una de las granulometrías de las arenas que fueron transportadas al lugar de depositación final.

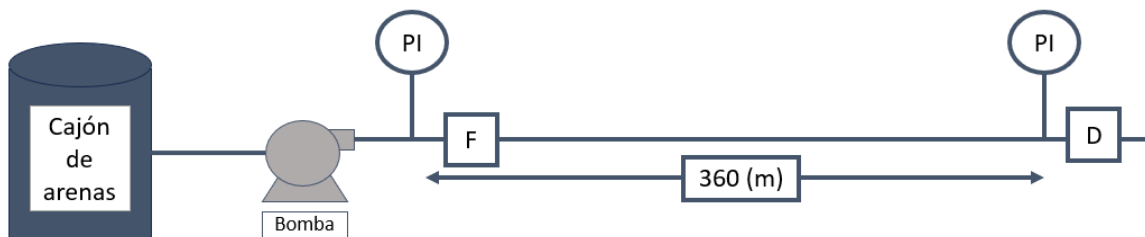


Figura 4.1: Esquema de las condiciones de terreno de la puesta en marcha de la batería de ciclones.

Para estudiar las pérdidas de cargas en las tuberías de arenas cicloneadas, se utilizó el modelo de Wasp que fue mencionado en el Marco Teórico. En la actualidad se han realizado diferentes estudios para la modificación a este modelo, como es el estudio de Pablo Vivero (Vivero Peralta, 2016) que realiza un ajuste a los parámetros del exponente de Durand y el factor de Von Karman.

Para el caso del exponente de Durand ($n = -1,5$) menciona que este parámetro corresponde a la pendiente de la recta que mejor se ajusta a los parámetros adimensionales ϕ y ψ definidos por Durand (1953) y Zandi y Govatos (1967) respectivamente. Por otro lado, la constante de Von Karman ($\kappa = 0,85$) menciona que a medida que aumenta la concentración, este valor decrece debido a que se produce una amortiguación de la turbulencia y no del tamaño de las partículas (Vivero Peralta, 2016).

Los parámetros empleados para el modelo de Wasp fueron ajustados a los datos obtenidos en terreno (Anexo B), modificando la constante de Durand y del factor Von Karman. Los parámetros

obtenidos son los indicados en la tabla 4.1.

Parámetros	Valor	Unidades
Diámetro interno de la tubería	13.88	[in]
Factor de Von Karman	0.15	[-]
Constante de Durand	81	[-]
Exponente de Durand	4,26	[-]
Rugosidad	0.0008	[in]
Beta de Ismail	1,2	[-]
Temperatura	20	[°C]
Gravedad Específica del Sólido	2.65	[-]
Parámetro B de viscosidad	2.47	[-]

Tabla 4.1: Parámetros del modelo de Wasp ajustados a los datos obtenidos en terreno.

Con los parámetros indicados en la tabla 4.1 se puede observar el modelo calibrado con los datos obtenidos en terreno como se observa en la figura 4.2.

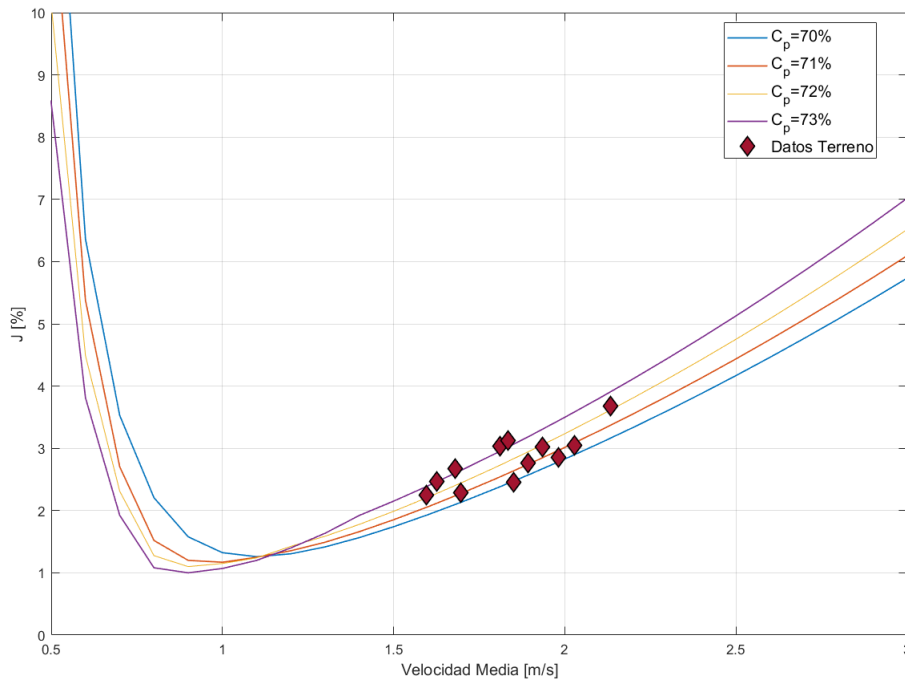


Figura 4.2: Modelo de Wasp calibrado con los datos en terreno para diferentes concentraciones de sólidos.

Entonces, se evaluaron las granulometrías construidas en la matriz experimental (tabla 3.4), obteniendo las pérdidas de cargas para cada una de las granulometrías. Obteniendo así los resulta-

dos que se encuentran en el Anexo D.1.

Debido a que actualmente, en la literatura, los modelos de velocidad límite están restringidos por las altas concentración de sólidos, se procede a extrapolar la velocidad límite mediante la mínima pérdida de carga por un factor de seguridad correspondiente al 25 % y además se calculó la velocidad límite modificada de Durand correspondiente a los gráficos en el Anexo D.3.

Por último, para poder estudiar la influencia del tamaño de partícula en la velocidad límite, se procede a graficar para una misma concentración de sólidos las velocidades límites estimada, como se muestran en los gráficos en el Anexo D.2.

Capítulo 5

Análisis y Discusión de Resultados Experimentales

Este capítulo tiene como propósito analizar la sedimentación de mezclas polidispersas con diferentes granulometrías y concentraciones de sólidos y discutir los resultados obtenidos.

5.1. Velocidad de Sedimentación y Velocidad Ponderada

Para poder analizar las velocidades obtenidas en el laboratorio, primero se debe conocer la velocidad de sedimentación de Stokes con la corrección de concentración de Richardson & Zaki, para esto se calculó con la fórmula 2.17, obteniendo los registros de velocidad de sedimentación para cada tamaño de partícula (d_x) a diferentes concentraciones de sólidos. Los resultados son presentados en la tabla 5.1 y las curvas de velocidad de sedimentación es ilustrada en la figura 5.1.

$d_x \backslash C_p$	425	300	150	75	45	$[\mu m]$
66 %	3.1	2.7	1.8	1.4	1.2	[cm/s]
68 %	2.8	2.4	1.6	1.1	1.0	[cm/s]
70 %	2.5	2.1	1.3	0.9	0.8	[cm/s]

Tabla 5.1: Registros velocidad de sedimentación con factor de corrección de concentración a diferentes tamaños de partículas a diferentes concentraciones de sólidos.

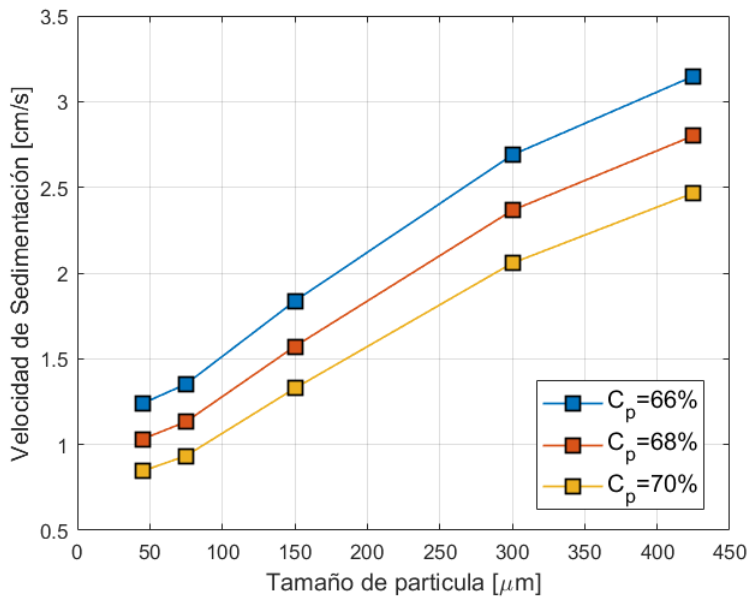


Figura 5.1: Curvas de Velocidad de Sedimentación con factor de corrección por concentración de Stokes a diferentes concentraciones de sólidos.

Para los 15 ensayos de velocidad de sedimentación, se observó que la magnitud de los valores obtenidos son inferiores comparados a la velocidad de Stokes con el factor de corrección, esto se debe a lo mencionado en el marco teórico, donde estas velocidades son para mezclas monodispersas y no polidispersas como es el caso de este estudio. Además, la reducción de la velocidad de sedimentación se debe primero a las interacciones que ocurren entre partículas de diferentes tamaños y el efecto del fluido para permitir el desplazamiento de éstas, ya que el fluido al estar en el espacio entre partículas permite, a medida que vaya avanzando la partícula se genere una sedimentación en un fluido de mayor densidad y viscosidad que el fluido puro provocando así la disminución de la velocidad de sedimentación (ESCONDIDA, 2004).

Otro punto es el análisis dimensional, que fue realizado tanto para la velocidad de sedimentación de una partícula y la velocidad ponderada, donde se puede apreciar que la concentración de sólidos posee una relación inversa con respecto a la velocidad de sedimentación, es decir, a medida que aumenta la concentración se espera una disminución de la velocidad de sedimentación.

Por otra parte, los resultados obtenidos no se logra una tendencia clara entre la velocidad de sedimentación y los contenidos de finos, esto se debe a las dificultades presentes al replicar estos experimentos en el laboratorio al utilizar el prototipo empleado. Esto se puede observar en la figura 5.2.

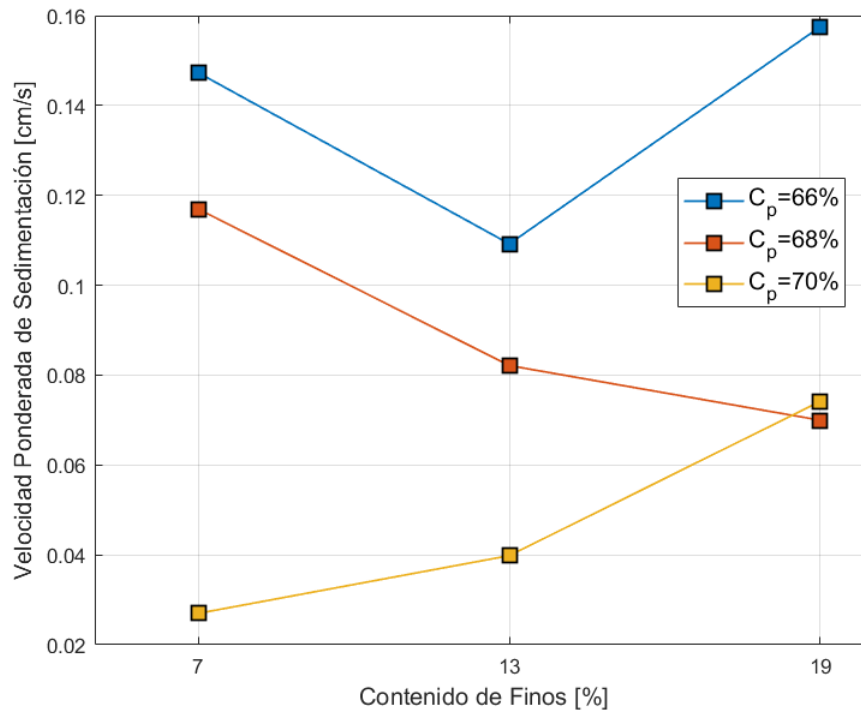


Figura 5.2: Curvas de Velocidades Ponderadas variando el contenido de finos ($\% < \#200$) a diferentes concentraciones de sólidos (C_p).

Entonces, no se logra apreciar una tendencia clara entre el contenido de finos y la velocidad de sedimentación, de hecho para un contenido de finos de un 7 % y un 13 % y para concentraciones de sólidos de 66 % y 68 %, se aprecia que a medida que aumenta el contenido de finos disminuye la velocidad de sedimentación, pero para el caso de una concentración de sólidos del 70 % no se aprecia esta tendencia. La intersección que ocurre entre las curvas de concentraciones de sólidos entre el 68 % y el 70 % se deba a la falta de precisión de los experimentos desarrollados con el prototipo. Con respecto al contenido de finos del 13 % y el 19 % no existe una relación clara al aumentar el contenido de finos en la velocidad de sedimentación.

Por otro lado, para un contenido de finos del 19 % un aumento de la velocidad de sedimentación, se debe a las interacciones entre las partículas de diferentes tamaños. En este caso, para pulpas de alta concentración, ocurre que al aumentar el contenido de finos, la estela que se produce en las partículas de mayor tamaño (425 micrones) al sedimentar, es arrastrar las partículas vecinas que poseen una menor velocidad de sedimentación y esto se debe a la colisión que se produce de las partículas de mayor tamaño con respecto a las de menor tamaño. (ESCONDIDA, 2004).

Con respecto a la velocidad de sedimentación para el mismo contenido de finos del 13 % variando el diámetro característico d_{75} , se puede observar en el Anexo C. Por medio de la velocidad ponderada se puede visualizar los resultados en la figura 3.15. Donde el aumento de la velocidad

de sedimentación para granulometrías con el diámetro característico d_{75} igual a 405 micrones, se debe al aumento de las partículas de mayor tamaño para estas bandas granulométricas, esto se debe a que el 25 % en peso de la muestra es superior a 405 micrones, en cambio, para diámetros característicos d_{75} igual a 254 micrones el 25 % de peso de la muestra es superior a 254 micrones, siendo este tamaño menor al comparado con el primer diámetro característico. Esto también al relacionarlo con el análisis dimensional permite identificar la relación directa entre el diámetro de la partícula y la velocidad de sedimentación.

Otro punto del gráfico 3.15, es sobre la intersección entre los diámetros característicos d_{75} igual a 254 y 320 micrones, esto se debe a la falta de precisión de los experimentos realizados con el prototipo.

Ahora bien, una de las variables del análisis dimensional es el coeficiente de uniformidad, en la teoría un coeficiente alto significa una granulometría menos uniforme, es decir, una granulometría con diferentes tamaños de partículas, por ende, la velocidad de sedimentación tendría una relación inversa, ya que serían velocidades en mezclas polidispersas provocando una disminución de la velocidad de sedimentación comparando esto con las mezclas monodispersas. Esta relación se puede observar en el análisis dimensional de la velocidad ponderada, en cambio, para el análisis de la velocidad sedimentación para diferentes tamaños de partículas se puede apreciar que el exponente del coeficiente de uniformidad es positivo, esto se debe a que al realizar el análisis dimensional se deben utilizar parámetros independientes y en este caso, el número de Reynolds posee dos parámetros dependientes, uno de esos es la viscosidad de las mezclas, ya que depende directamente de la reología y de la concentración de sólidos y, por otro lado, el diámetro de la partícula (d_x) que tiene efecto sobre el coeficiente de uniformidad provocando dependencia de las variables entre sí y por ende estas relaciones afectan el exponente del modelo presentado.

Por último, la variable de concentración de sólidos para un tamaño de partícula (C_{pdx}) presente en el análisis dimensional de la velocidad de sedimentación, posee una relación directa debido a que para un tamaño de partícula mayor la velocidad de sedimentación será mayor, y por ende, la cantidad de masa también será mayor, esto se puede relacionar con la fórmula de concentración de sólidos (fórmula 2.5), donde la masa del sólido posee una relación directa con la concentración de sólidos.

5.2. Pérdidas de Cargas

Para la velocidad límite modificada de Durand como se mostró en el marco teórico, indica que las concentraciones volumétricas que abarcan estas fórmulas van desde un 5 % a un 30 % de sólidos. Actualmente, en la industria minera chilena utilizan estas fórmulas a concentraciones altas, a pesar de que están diseñadas para el intervalo mencionado anteriormente. Entonces, para el caso de este estudio, las concentraciones volumétricas también se encuentran fuera de rango, ya que se encuentran entre un 45 % a un 47 %, pero al utilizar la ecuación límite de Durand modificada,

se comete un error. Esto se demuestra al comparar las figuras del Anexo ??, donde la velocidad modificada de Durand está muy sobreestimada relacionada con la velocidad límite propuesta en este estudio. Por ejemplo, para un 7 % de finos con un d_{75} de 320 micrones a una concentración de sólidos del 66 %, la mínima pérdida de carga corresponde a una velocidad media de 1.5 [m/s], en cambio, para la velocidad estimada la velocidad media es de 1,9 [m/s] y para la velocidad modificada de Durand corresponde a una velocidad media de 2,6 [m/s], es decir, están sobre un 25 % y un 70 % sobre la velocidad mínima respectivamente.

Es por esto, que el modelo de velocidad límite modificado de Durand realiza una sobreestimación de los resultados debido a que el modelo no posee los parámetros necesarios para describir el fenómeno de pulpas a altas concentraciones, que es el caso de este estudio. Esto se puede visualizar en los gráficos en el Anexo D.3, pero además se observa que en el caso de la figura D.12 para una concentración de sólidos del 66 %, la velocidad límite modificada de Durand está por debajo de la velocidad límite estimada, ya que el modelo no es capaz de describir el fenómeno de pulpas a altas concentraciones y con un tamaño de partícula mayor a los casos anteriores.

Por otro lado, en el Anexo D.2 se visualiza en cada uno de los gráficos que a medida que aumenta el tamaño de partícula que en este caso se relaciona al diámetro característico d_{75} , se observa un aumento en la velocidad límite estimada.

Por último, otra variable que influye en la velocidad límite es la concentración de sólidos, en donde en los gráficos en el Anexo D.3 muestran a medida que aumenta la concentración de sólidos la velocidad límite estimada disminuye.

En cuanto a plantear un modelo de velocidad límite con las variables discutidas en esta sección, escala a un mayor requerimiento de otras variables tales como el diámetro de la tubería. Al realizar un análisis dimensional, las variables involucradas como que son las granulometrías y la concentración de sólidos no se logra plantear un modelo consistente. Por ende, este punto da para una extensión de este estudio.

Capítulo 6

Conclusiones

El presente estudio realizó el objetivo de determinar una relación de la velocidad límite y la velocidad de sedimentación con las variables de granulometría y las concentraciones de sólidos. Para lograr los objetivos se realizó un prototipo experimental para el estudio de la velocidad de sedimentación y la influencias de las variables y, por otro lado, se realizó una extrapolación de la velocidad límite calibrando el modelo de Wasp para ver las influencias estas variables con los resultados obtenidos en laboratorio.

El presente trabajo logra estudiar la velocidad de sedimentación mediante la creación de un prototipo, permitiendo estudiar las variables que influyen en este fenómeno, que son la concentración de sólidos y el tamaño de partícula, concluyendo que poseen una relación directa en la influencia de la velocidad de sedimentación. En el caso del contenido de finos, los ensayos realizados no permiten evidenciar una relación entre ambos parámetros.

A través de los ensayos de sedimentación realizados, se observó la variable de concentración de sólidos, que es el factor más influyente en la velocidad de sedimentación, siendo este inversamente proporcional a la velocidad, y, en segundo orden de relevancia, al aumentar el tamaño de partícula tiende a aumentar la velocidad de sedimentación de las arenas cicloneadas de relave.

El prototipo para el estudio de velocidad de sedimentación permitió estudiar satisfactoriamente las principales variables que dominan el fenómeno, como concentración de sólido y granulometría, sin embargo, la dificultad del manejo de mezclas altamente concentradas, y los errores propagados no permiten ser completamente concluyentes respecto a las variables de segundo orden de influencia como, contenido de finos, o coeficiente de uniformidad. El prototipo utilizado cuenta con oportunidades de mejora respecto al diseño que permitirían a un futuro estudio una mejora relevante en la calidad de los resultados.

Mediante el análisis dimensional, se propone un modelo simplificado para determinar la velocidad de sedimentación de arenas cicloneadas, tanto para velocidades individuales de cada tamaño de partículas, como también para una velocidad ponderada, representativa de la mezcla polidispersa. Los resultados del modelo de velocidad de sedimentación aportan al análisis de riesgos operacio-

nales en mineras, permitiendo mejorar los diseños de cubas, cajones y líneas de arenas, además de estimación de secado y consolidación en depositación de arenas mediante el método Paddock y tiempo de sedimentación a interior de las tuberías de arena frente a una detención de la operación de cicloneo.

Por otro lado, en el presente trabajo se logra comparar la velocidad límite de un modelo de transporte hidráulico calibrado con información obtenida en terreno y datos en laboratorio, permitiendo comprender las variables que son influyentes y relacionarlas entre sí, concluyendo que ambas velocidades se ven influenciadas por la concentración de sólidos y el tamaño de la partícula.

Con respecto a la comparación de los modelos de velocidades límites, el modelo hidráulico calibrado sugiere que la velocidad límite en arenas cicloneadas es, en la mayor parte de los casos, mucho menor a la estimada por la velocidad límite modificada de Durand, por lo que se sugiere que esta no se debe utilizar para concentraciones altas, ya que provoca una sobreestimación de la velocidad mencionada. Esto último debe ser confirmado por un futuro estudio que tenga como objetivo obtener datos operacionales de pérdida de energía en el rango de velocidad indicado en el presente estudio como estimación de velocidad límite.

Se destaca que la metodología utilizada puede ser complementada con información operacional de otras faenas, con rangos granulométricos, de concentración y de diámetro de tuberías distintos, enriqueciendo la calibración del modelo.

Capítulo 7

Referencias

Referencias

- COCHILCO. (2023). *Informe de tendencias mercado del cobre*. Ministerio de Minería. Descargado 29 de Noviembre del 2023, de <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20tendencias%201Q%202023.pdf>
- Cotroneo, J. A. (2015). *Estudio experimental de la sedimentación de mezclas sólidos-líquida polidispersas en planos inclinados*.
- Díaz Leiva, C. B. (2021). *Implementación laboratorio de reología y análisis experimental de la influencia del contenido de finos y concentración en las variables reológicas de relaves de cobre y arenas cicloneadas*.
- ESCONDIDA. (2004). Fundamentos teóricos aplicados a plantas concentradoras de sulfuros de cobre. Descargado 17 de diciembre del 2023, de <https://es.slideshare.net/Gallas190987/4-fundamentos-teoricos-de-sedimentacin>
- Fuentes, R., Rayo, J., Moreno, C., Rickenberg, C., Salazar, A., Encina, V., y Gutierrez, S. (2013). *Fluidodinámica aplicada en la minería*. JRCap.
- Ipinza, J. (2020). Procesamiento de minerales I..
- JRI S.A. (2012). Fluidodinámica de pulpas mineras..
- Ministerio de Minería. (2007). Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves.
- Montserrat, G. J. (2015). *Estudio experimental de las pérdidas de carga en tuberías con flujos de mezclas sólidos líquido no-newtoniano en régimen laminar*.
- Norma Chilena [NCh]. (1980). Mecánica de suelos - determinación de la densidad de partículas sólidas.
- Palma, S. (2020). Transportes de fluidos en minería..
- Richardson, J., y Zaki, W. (1997). Sedimentation and fluidisation: Part i. *Chemical Engineering Research and Design*, 75, S82–S100.
- SERNAGEOMIN. (s.f.). *Depósitos de relaves, preguntas frecuentes*. <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>.
- SHIMIN Ingeniería. (2020). Estimación de pérdidas de carga en concentración en conductos..

- Universidad Nacional de la Plata. (-). *Análisis dimensional y semejanza en mecánica de fluidos*. Autor. Descargado 08 de diciembre del 2023, de <https://fim.umich.mx/teach/gsolorio/notas/Analisis%20Dimensional.pdf>
- Velasco, A. E., y Molina, A. C. (1985). Hidráulica de pulpas de relaves en contornos cerrados. En *Anales de la universidad de chile* (pp. ág-417).
- Vivero Peralta, P. A. (2016). Recopilación bibliográfica de métodos de estimación de pérdida de carga de mezclas sólido-líquido sedimentables: evaluación método de wasp con mediciones en concentrado de bauxita.
- Wasp, E., Kenny, J., y Ramesh, G. (1977). *Solid-liquid flow slurry pipeline transportation*. Trans Tech.

Anexos

Anexo A

Granulometrías

A.1. $\%<\#200 = 7 \%$

A.1.1. $C_p = 66 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	37	13	13	87
N°50	0,300	40	14	27	73
N°100	0,150	69	24	52	48
N°200	0,075	116	41	93	7
N°325	0,045	10	4	97	3
N°Residual	-	9	3	100	0

Tabla A.1: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 66 \%$ $d_{75} = 320[\mu m]$

A.1.2. $C_p = 68 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	40	13	13	87
N°50	0,300	42	14	27	73
N°100	0,150	72	25	52	48
N°200	0,075	121	41	93	7
N°325	0,045	12	4	97	3
N°Residual	-	10	3	100	0

Tabla A.2: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 68 \%$ $d_{75} = 320[\mu m]$

A.1.3. $C_p = 70 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	41	13	13	87
N°50	0,300	45	14	27	73
N°100	0,150	76	25	52	48
N°200	0,075	127	41	93	7
N°325	0,045	12	4	97	3
N°Residual	-	10	3	100	0

Tabla A.3: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 70 \%$ $d_{75} = 320[\mu m]$

A.2. %<#200 = 13 % - $d_{75} = 254 [\mu m]$

A.2.1. $C_p = 66 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	14	5	5	95
N°50	0,300	31	11	16	84
N°100	0,150	88	31	47	53
N°200	0,075	111	40	87	13
N°325	0,045	28	10	97	3
N°Residual	-	9	3	100	0

Tabla A.4: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 66 \%$ $d_{75} = 254[\mu m]$

A.2.2. $C_p = 68 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	15	5	5	95
N°50	0,300	33	11	16	84
N°100	0,150	93	31	47	53
N°200	0,075	117	40	87	13
N°325	0,045	30	10	97	3
N°Residual	-	9	3	100	0

Tabla A.5: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 68 \%$ $d_{75} = 254[\mu m]$

A.2.3. $C_p = 70\%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	16	5	5	95
N°50	0,300	33	11	16	84
N°100	0,150	99	31	47	53
N°200	0,075	125	40	87	13
N°325	0,045	31	10	97	3
N°Residual	-	10	3	100	0

Tabla A.6: Resultados ensayos de granulometría $C_p=70\%$ $d_{75} = 254[\mu m]$

A.3. $\%<\#200 = 13\%$ - $d_{75} = 320 [\mu m]$

A.3.1. $C_p = 66\%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	48	17	17	83
N°50	0,300	27	10	27	73
N°100	0,150	64	23	50	50
N°200	0,075	105	37	87	13
N°325	0,045	28	10	97	3
N°Residual	-	9	3	100	0

Tabla A.7: Resultados ensayos de granulometría $C_p=66\%$ $d_{75} = 320[\mu m]$

A.3.2. $C_p = 68 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	50	17	17	83
N°50	0,300	30	10	27	73
N°100	0,150	69	23	50	50
N°200	0,075	111	37	87	13
N°325	0,045	29	10	97	3
N°Residual	-	10	3	100	0

Tabla A.8: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 68 \%$ $d_{75} = 320[\mu m]$

A.3.3. $C_p = 70 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	52	17	17	83
N°50	0,300	32	10	27	73
N°100	0,150	73	23	50	50
N°200	0,075	116	37	87	13
N°325	0,045	31	10	97	3
N°Residual	-	10	3	100	0

Tabla A.9: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 70 \%$ $d_{75} = 320[\mu m]$

A.4. $<\#200 = 13 \% - d_{75} = 405 [\mu m]$

A.4.1. $C_p = 66 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	68	24	24	76
N°50	0,300	19	7	31	69
N°100	0,150	68	24	55	45
N°200	0,075	91	32	87	13
N°325	0,045	28	10	97	3
N°Residual	-	9	3	100	0

Tabla A.10: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 66 \% d_{75} = 405[\mu m]$

A.4.2. $C_p = 68 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	71	24	24	76
N°50	0,300	20	7	31	69
N°100	0,150	70	24	55	45
N°200	0,075	95	32	87	13
N°325	0,045	28	10	97	3
N°Residual	-	9	3	100	0

Tabla A.11: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 68 \% d_{75} = 405[\mu m]$

A.4.3. $C_p = 70 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	76	24	24	76
N°50	0,300	20	7	31	69
N°100	0,150	76	24	55	45
N°200	0,075	103	32	87	13
N°325	0,045	29	10	97	3
N°Residual	-	10	3	100	0

Tabla A.12: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 70 \%$ $d_{75} = 405[\mu m]$

A.5. $\% < \#200 = 19 \%$ - $d_{75} = 320 [\mu m]$

A.5.1. $C_p = 66 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	34	12	12	88
N°50	0,300	44	16	28	72
N°100	0,150	75	27	54	46
N°200	0,075	75	27	81	19
N°325	0,045	45	16	97	3
N°Residual	-	9	3	100	0

Tabla A.13: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 66 \%$ $d_{75} = 320[\mu m]$

A.5.2. $C_p = 68 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	35	12	12	88
N°50	0,300	47	16	28	72
N°100	0,150	79	27	54	46
N°200	0,075	79	27	81	19
N°325	0,045	46	16	97	3
N°Residual	-	10	3	100	0

Tabla A.14: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 68 \%$ $d_{75} = 320[\mu m]$

A.5.3. $C_p = 70 \%$

Tamiz ASTM	Abertura Nominal	Masa Retenida	Porcentaje Retenido	Porcentaje Acumulado	Pasante Acumulado
[-]	[mm]	[g]	[%]	[%]	[%]
N°04	4,740	0	0	0	100
N°40	0,425	37	12	12	88
N°50	0,300	49	16	28	72
N°100	0,150	83	27	54	46
N°200	0,075	83	27	81	19
N°325	0,045	49	16	97	3
N°Residual	-	10	3	100	0

Tabla A.15: Resultados ensayos de granulometría $C_p = 70 \%$ $d_{75} = 320[\mu m]$

Anexo B

Granulometrías Bases de Datos

Parámetro	Valor	Unidad
C_p	70	[%]
% < #200	15,7	[%]
d_{90}	144,1	[μm]
d_{75}	135,5	[μm]
d_{50}	115,3	[μm]
d_{30}	95,0	[μm]
d_{10}	70,5	[μm]

Tabla B.1: Granulometrías de un día de operación.

Parámetro	Valor	Unidad
C_p	72	[%]
% < #200	14,3	[%]
d_{90}	144,4	[μm]
d_{75}	135,1	[μm]
d_{50}	116,5	[μm]
d_{30}	96,7	[μm]
d_{10}	70,2	[μm]

Tabla B.2: Granulometrías de un día de operación.

Parámetro	Valor	Unidad
C_p	72	[%]
% < #200	13,5	[%]
d_{90}	144,4	[μm]
d_{75}	135,2	[μm]
d_{50}	116,7	[μm]
d_{30}	97,0	[μm]
d_{10}	69,2	[μm]

Tabla B.3: Granulometrías de un día de operación.

Parámetro	Valor	Unidad
C_p	72	[%]
% < #200	13,7	[%]
d_{90}	144,6	[μm]
d_{75}	135,7	[μm]
d_{50}	117,8	[μm]
d_{30}	98,5	[μm]
d_{10}	71,8	[μm]

Tabla B.4: Granulometrías de un día de operación.

Anexo C

Velocidad de Sedimentación

En la siguiente sección, se muestran las gráficas de las velocidades de sedimentación a diferentes contenidos de finos ($\%<\#200$) a la misma concentración de sólidos (C_p).

- Concentración de Sólidos (C_p) = 66 %

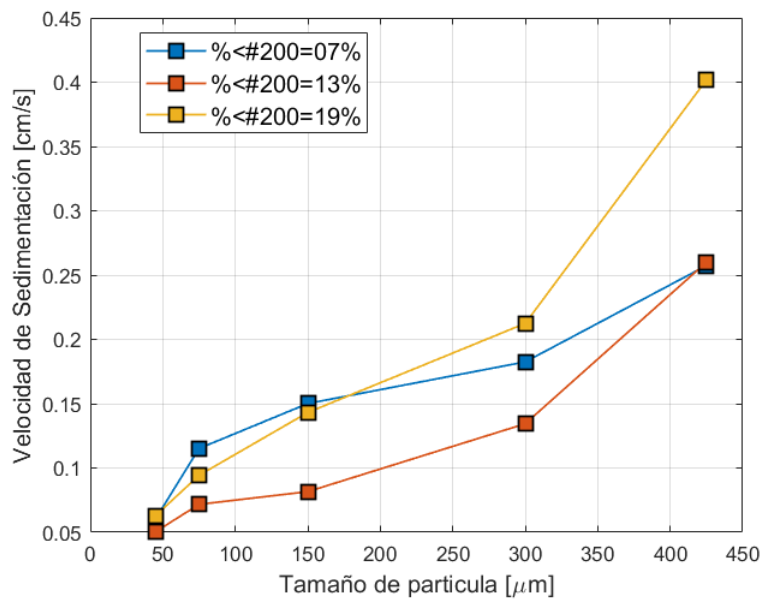


Figura C.1: Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes contenidos de finos e igual concentración de sólidos al 66 %.

- Concentración de Sólidos (C_p) = 68 %.

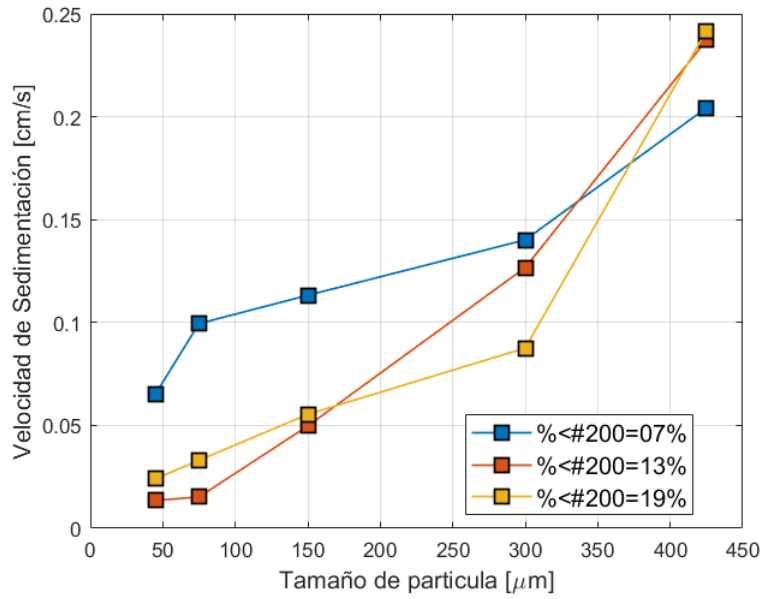


Figura C.2: Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes contenidos de finos e igual concentración de sólidos al 68 %.

- Concentración de Sólidos (C_p) = 70 %.

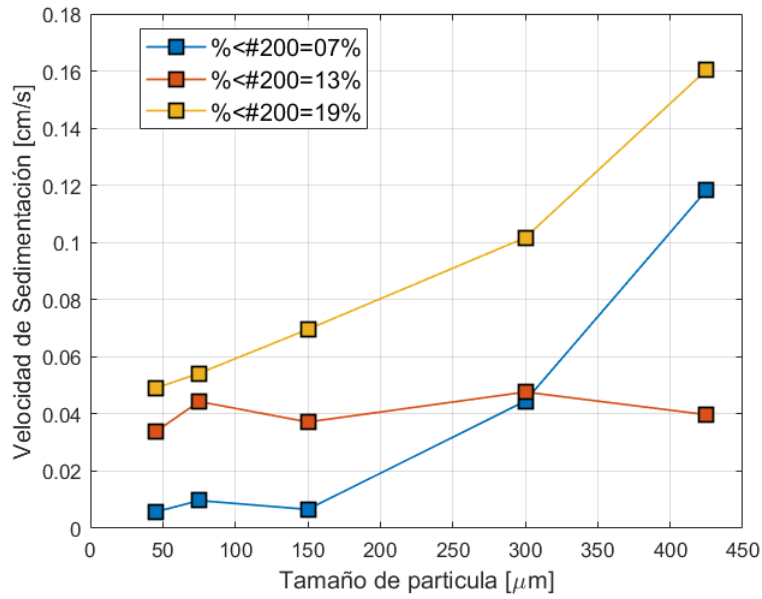


Figura C.3: Curvas de Velocidad de Sedimentación a diferentes contenidos de finos e igual concentración de sólidos al 70 %.

Ahora se muestran las gráficas de las velocidades de sedimentación al mismo contenido de finos (13 %<#200) y concentración de sólidos (C_p) pero distinto diámetro característico (d_{75}).

- Concentración de Sólidos (C_p)= 66 %

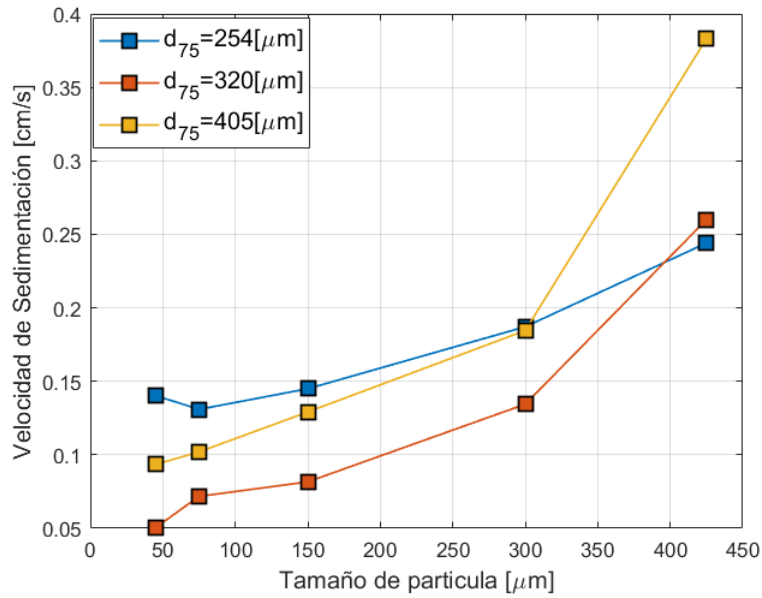


Figura C.4: Curvas de Velocidad de Sedimentación al mismo contenido de finos y concentración de sólidos variando el diámetro característico (d_{75}).

- Concentración de Sólidos (C_p) = 68 %.

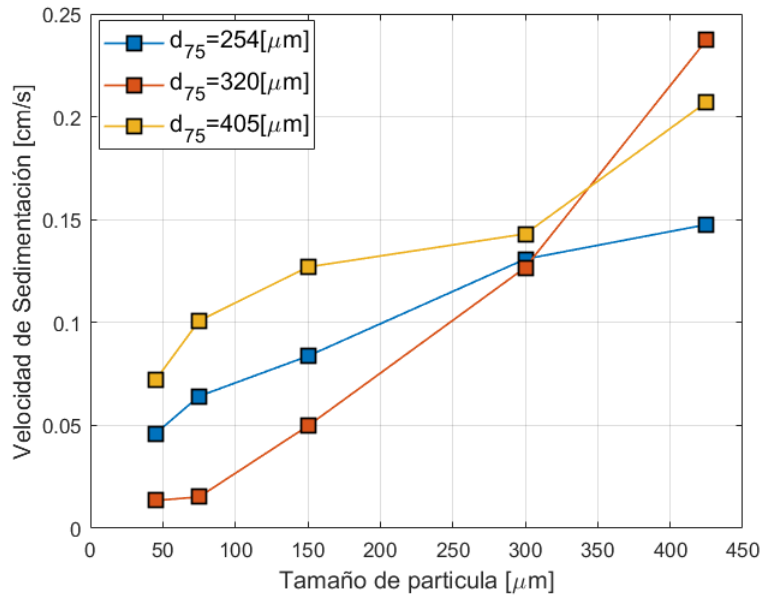


Figura C.5: Curvas de Velocidad de Sedimentación al mismo contenido de finos y concentración de sólidos variando el diámetro característico (d_{75}).

- Concentración de Sólidos (C_p) = 70 %.

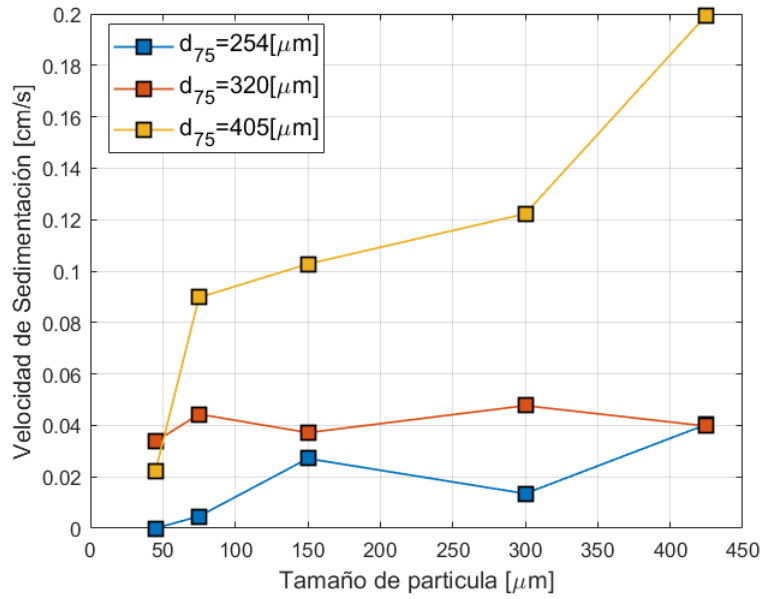


Figura C.6: Curvas de Velocidad de Sedimentación al mismo contenido de finos y concentración de sólidos variando el diámetro característico (d_{75}).

Anexo D

Pérdidas de Cargas

D.1. Pérdidas de Cargas para cada una de las granulometrías a diferentes concentraciones de sólidos (C_p).

- $<\#200 = 7\%$

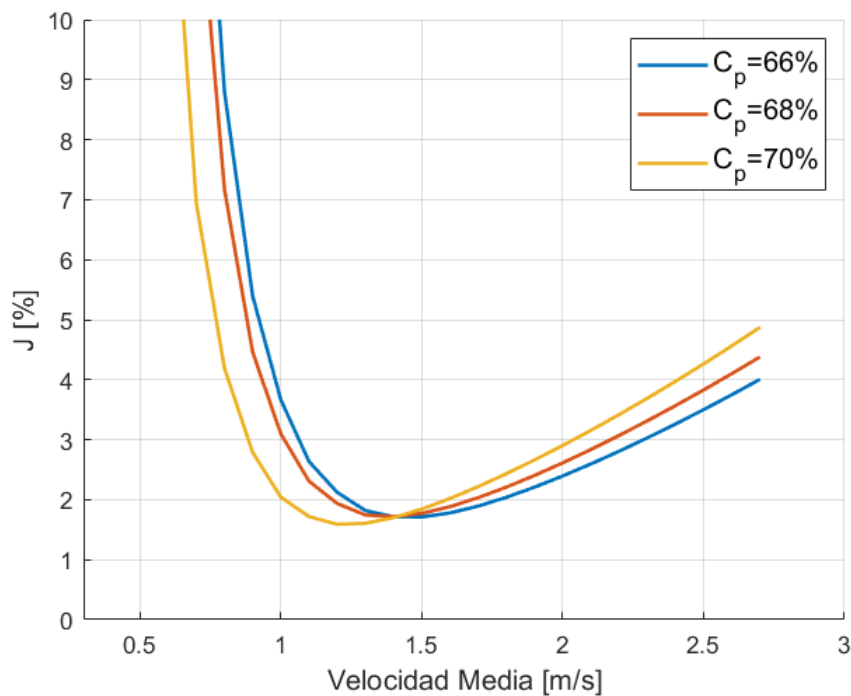


Figura D.1: Pérdidas de cargas a diferentes concentraciones de sólidos para granulometrías con un 7% de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$.

■ $<\#200 = 13\%$

• $d_{75} = 254[\mu m]$.

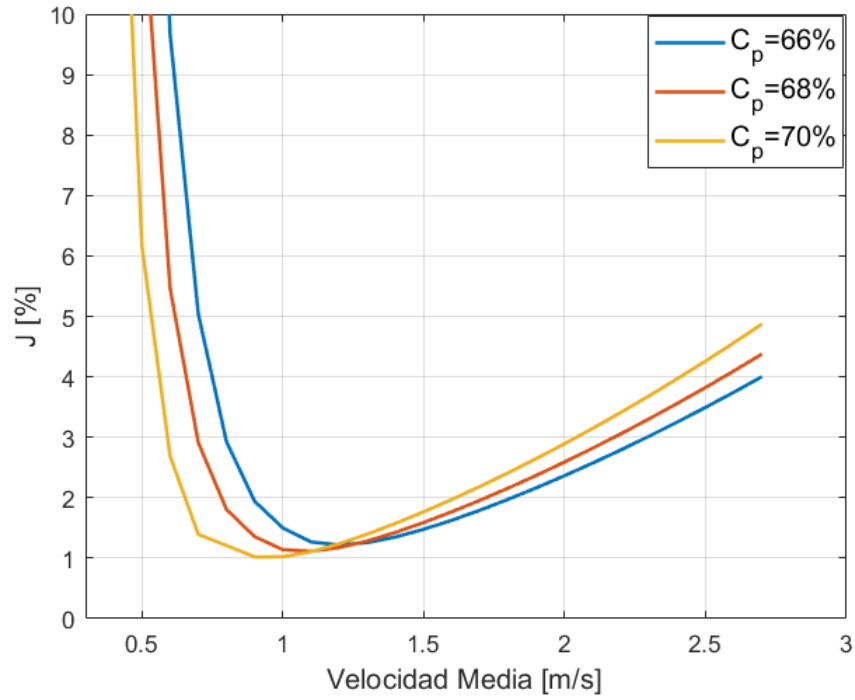


Figura D.2: Pérdidas de cargas a diferentes concentraciones de sólidos para granulometrías con un 13 % de finos y un $d_{75} = 254[\mu m]$.

- $d_{75} = 320[\mu m]$.

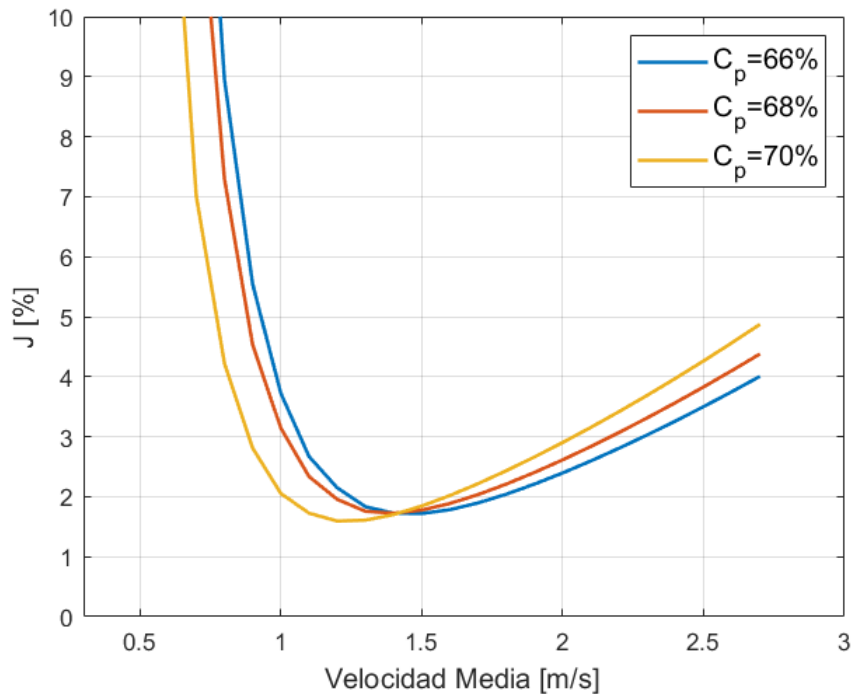


Figura D.3: Pérdidas de cargas a diferentes concentraciones de sólidos para granulometrías con un 13 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$.

- $d_{75} = 405[\mu m]$.

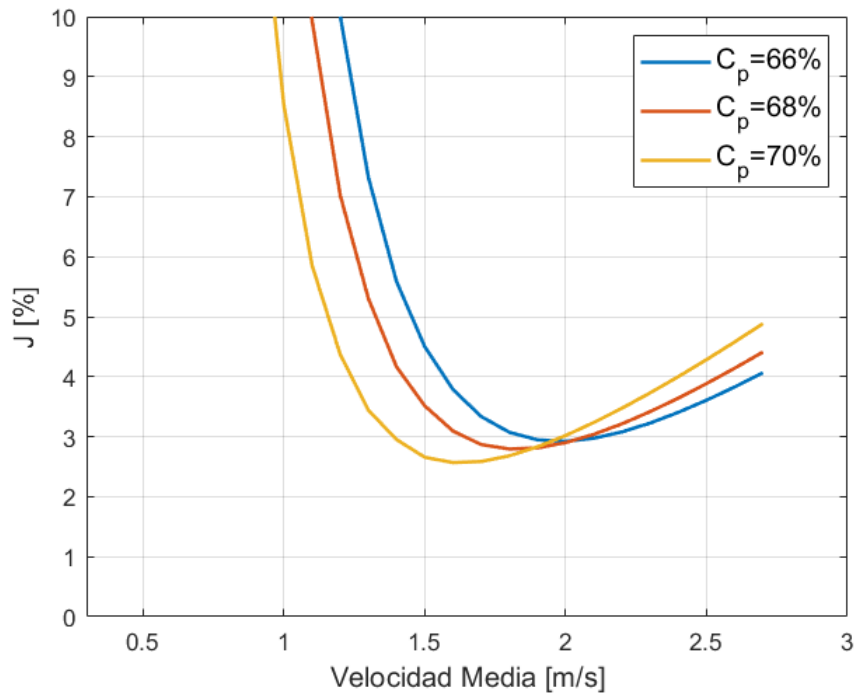


Figura D.4: Pérdidas de cargas a diferentes concentraciones de sólidos para granulometrías con un 13 % de finos y un $d_{75} = 405[\mu m]$.

- $<\#200 = 19\%$

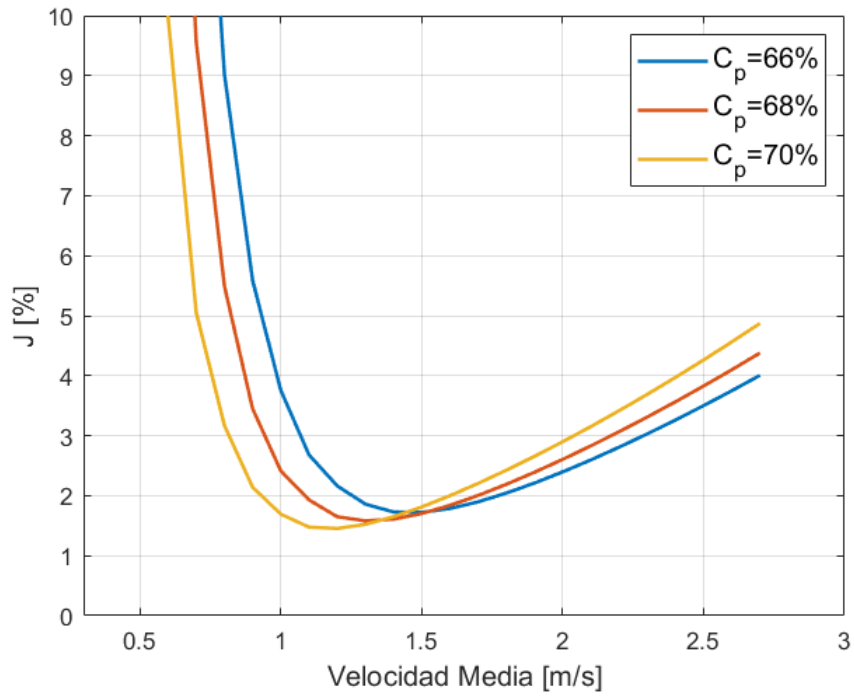


Figura D.5: Pérdidas de cargas a diferentes concentraciones de sólidos para granulometrías con un 19 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$.

D.2. Pérdidas de Cargas extrapolando la velocidad límite a una misma concentración de sólidos.

- $C_p = 66 \%$

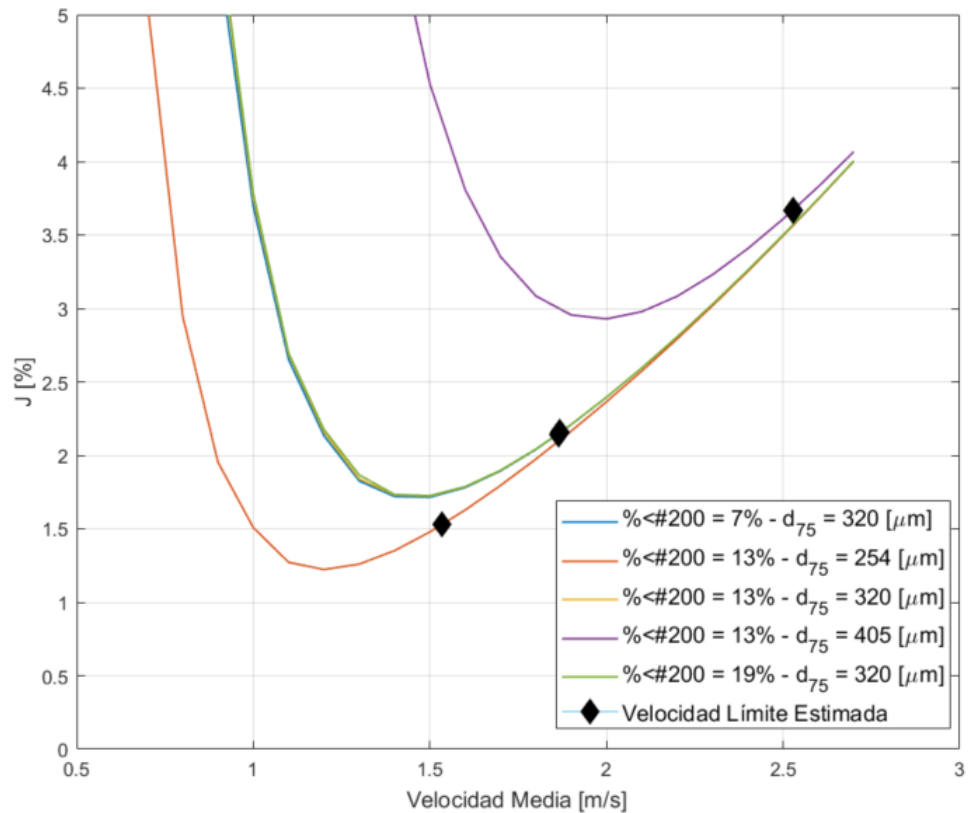


Figura D.6: Pérdidas de cargas a una misma concentración de sólidos (C_p) variando el contenido de finos ($\% < \#200$) estimando una velocidad límite.

■ $C_p = 68 \%$

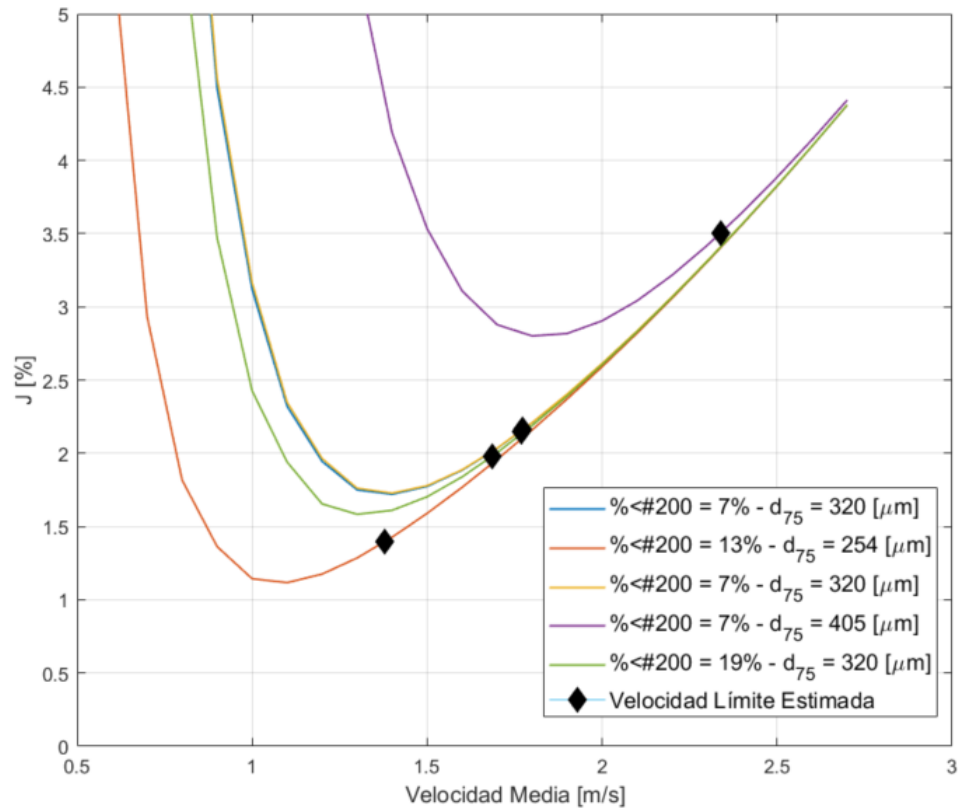


Figura D.7: Pérdidas de cargas a una misma concentración de sólidos (C_p) variando el contenido de finos ($\% < \#200$) estimando una velocidad límite.

■ $C_p = 70 \%$

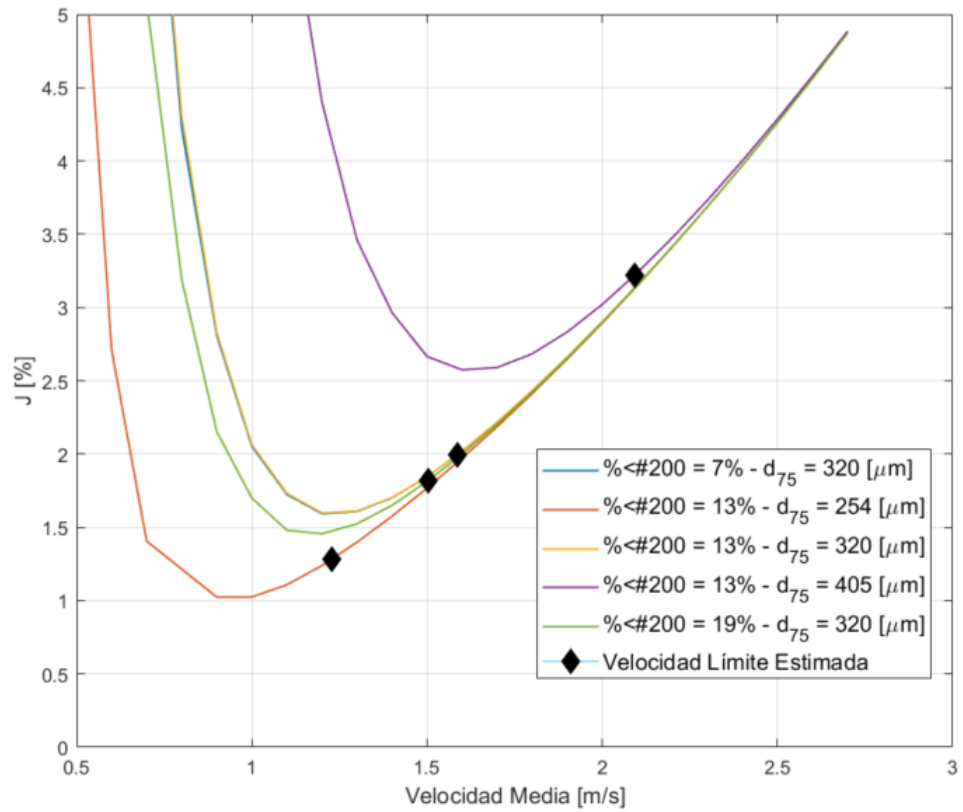


Figura D.8: Pérdidas de cargas a una misma concentración de sólidos (C_p) variando el contenido de finos ($\% < \#200$) estimando una velocidad límite.

D.3. Pérdidas de Cargas extrapolando la velocidad límite para cada una de las granulometrías.

- $<\#200 = 7\%$

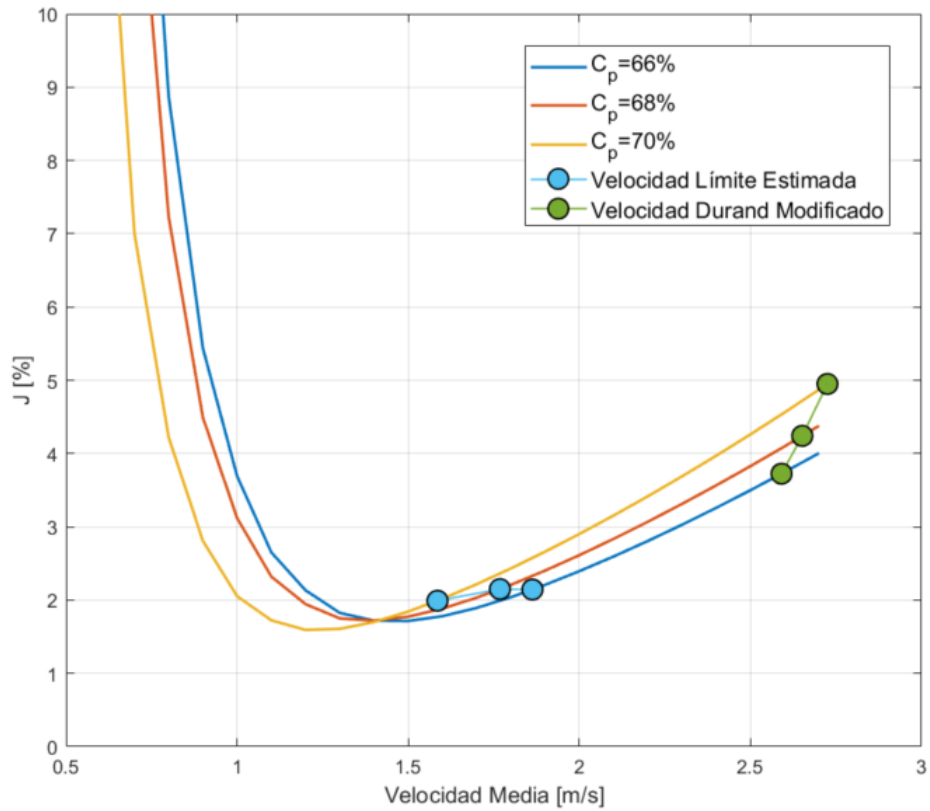


Figura D.9: Pérdidas de cargas extrapolando velocidad límite para granulometrías con un 7% de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$.

■ $<\#200 = 13\%$

• $d_{75} = 254[\mu m]$.

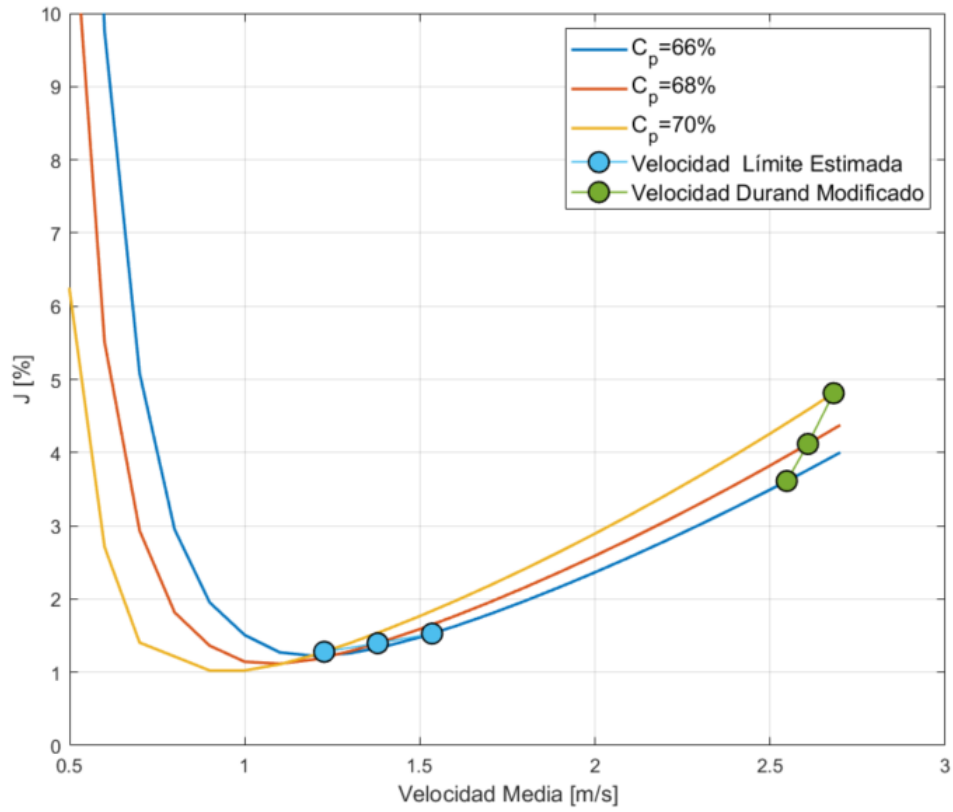


Figura D.10: Pérdidas de cargas extrapolando velocidad límite para granulometrías con un 13 % finos y un $d_{75} = 254[\mu m]$.

- $d_{75} = 320[\mu m]$.

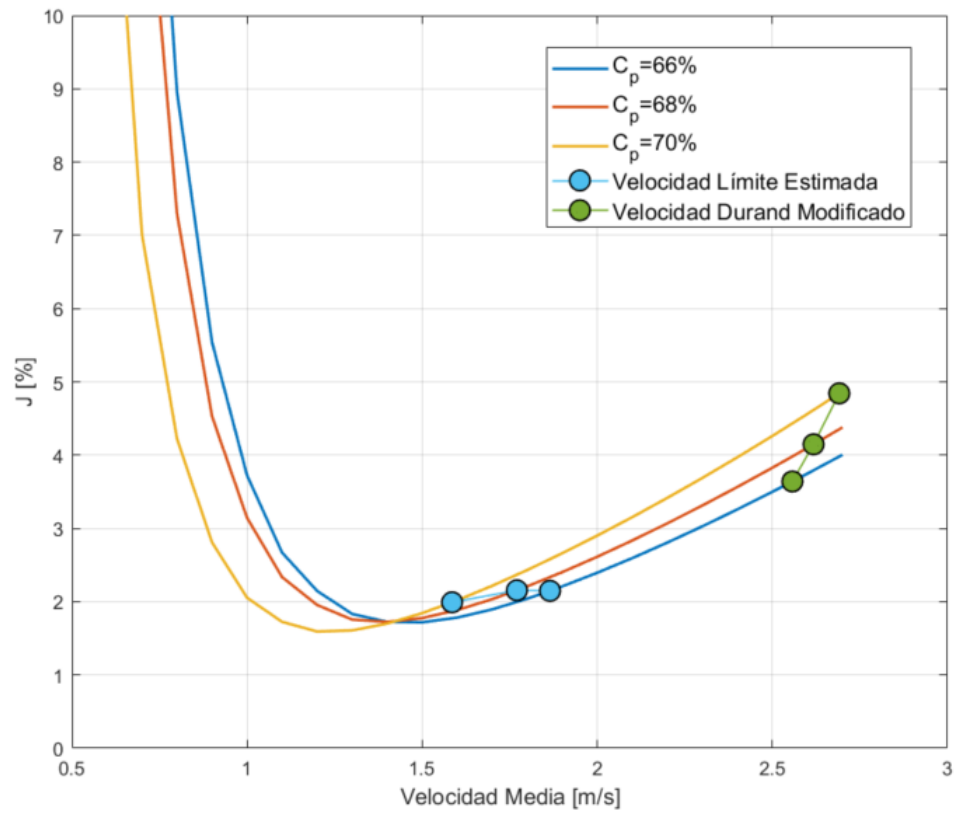


Figura D.11: Pérdidas de cargas extrapolando velocidad límite para granulometrías con un 13 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$.

- $d_{75} = 405[\mu m]$.

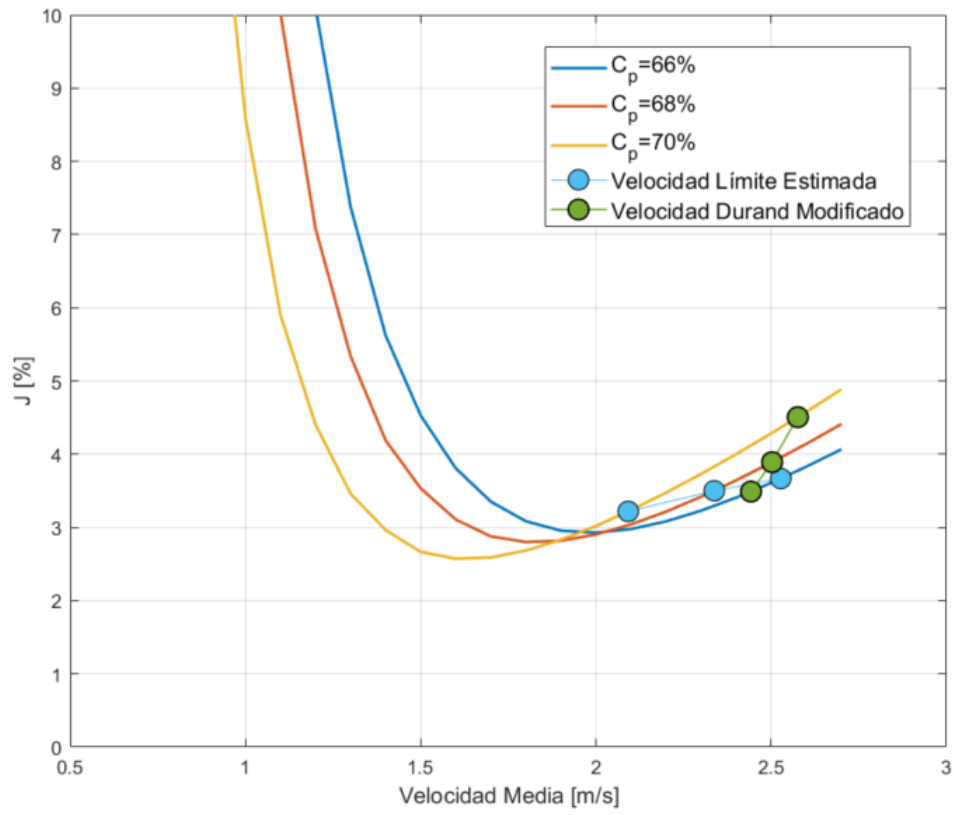


Figura D.12: Pérdidas de cargas extrapolando velocidad límite para granulometrías con un 13 % de finos y un $d_{75} = 405[\mu m]$.

■ $<\#200 = 19\%$

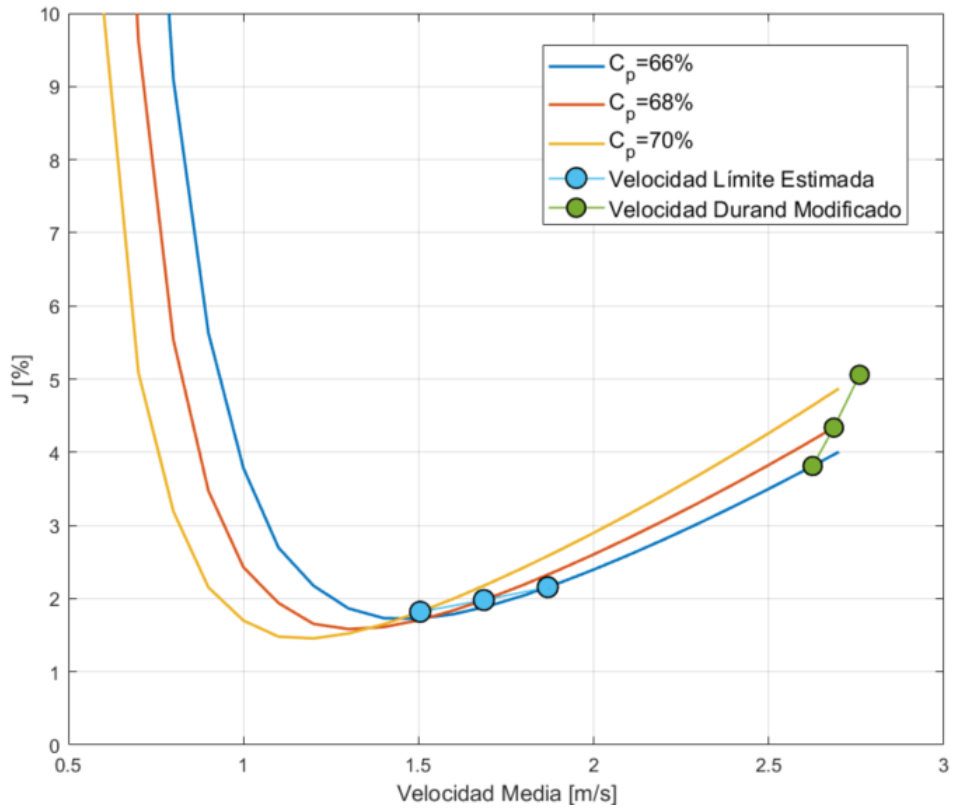


Figura D.13: Pérdidas de cargas extrapolando velocidad límite para granulometrías con un 19 % de finos y un $d_{75} = 320[\mu m]$.