

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA MINERA Y METALÚRGICA



SEPARACIÓN POR MEDIOS DENSOS DEL MINERAL DE ANDALUCITA

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO METALURGISTA**

ELABORADO POR:

LEENIN FLORES OSORIO

ASESOR:

ING. DAVID PEDRO MARTINEZ AGUILAR

LIMA – PERU

2014

A MIS PADRES

Por su lucha constante, por haberme inculcado sus valores y principios que fueron la base sólida de mi formación como persona y profesional.

RESUMEN

La separación por medios densos se realiza teniendo como base principal la densidad de los materiales, pero existen otras características tales como el tipo de mineral, tamaño de las partículas, la forma, los rangos de tamaño y densidad que también influirán en el rendimiento de este proceso.

Se realizó una serie de pruebas del proceso de separación por medios densos, teniendo como objetivo la separación del mineral de andalucita con granos menores a 8.0 mm dentro de un conjunto de minerales formados principalmente por cuarzo, esquistos y micas.

Las pruebas consistieron en alimentar al circuito de medios densos (DMS) variando la presión y alimentación de los ciclones. Se muestreó el alimento, Underflow y Overflow del circuito. Se realizaron las pruebas de HLS (separación por líquidos pesados) y PSD (Distribución del tamaño de partícula) para la construcción de los coeficientes de partición.

Los resultados indicaron que los valores tanto en la recuperación como en el porcentaje de hundidos del rango (-8.0, +2.36 mm) se mantuvieron por encima del 85% y 98% respectivamente, mientras que en el rango (-2.36, +0.6 mm) estuvieron por debajo de 81% y 98%. Pero en las partículas menores a 1.7 mm tuvieron una recuperación menor a 55% y un porcentaje de hundidos menor a 97.5%.

Existe un efecto en la separación por medios densos para las partículas menores a 2.36 mm, por lo cual se recomienda realizar un corte en la granulometría y tratarlos en formas separadas.

Las pruebas con los trazadores (Tracers) indicaron que a una presión de trabajo de 49 KPa se obtuvieron los menores valores de Eps, y a una densidad de 2.45 alcanzó su mayor valor, pero a la densidad de 2.50 g/cm³ disminuyó hasta 0.04.

Las pruebas con los trazadores estuvieron dentro de la zona de estabilidad del Ferrosilicio 270D.

Las pruebas de HLS indicaron que a una densidad de corte 2.96 g/cm^3 se recuperaría el 88.15% de Al_2O_3 , pero si se sube el corte a 3.00 g/cm^3 , la recuperación bajará a 84.82%, este cambio estaría ligado principalmente al incremento del porcentaje de flotados en el Underflow, lo que generaría una inconsecuencia con la calidad del producto final.

Las curvas de partición presentaron una densidad de corte de 3.0 g/cm^3 , y un E_p de 0.048, el cual escapa del rango en la clasificación para ciclones de medios densos.

Las pruebas de HLS y PSD para la evaluación de la planta DMS arrojaron que el punto de rotura se genera para partículas menores a 1.3 mm trabajando conciclones de 360 mm.

ABSTRACT

The process of dense media separation is based on one specific property of materials, that property is their density, there are other characteristics such as the type of mineral, shape, size distribution, and these characteristics influence the process performance.

Some tests were made using a material with a size distribution 100% -8mm, the composition of this mineral is silice, esquisto and micas.

The tests were made feeding DMS (dense media separation) circuit at different pressure and feeding rate. We took samples of feed, underflow and overflow from DMS circuit. Tests of Heavy Liquid Separation and Particle size distribution were made in order to build partition coefficient.

Results shown that the values of recovery and sinks percent at a range of (-8.0, +2.36 mm) were over 85% y 98% respectively. On the other hand a range of (-2.36, +0.6 mm) have values under 81% y 98% respectively, but in particles under 1.7mm had values of recovery and sinks percent of 55% and 97.5% respectively.

It's recommended to treat separately particles under 2.36mm because at this size exist a separation effect at DMS.

Tests with tracers indicate that a pressure of 49KPa lowers values of Eps were obtained and at a density of 2.45 g/cm³ reach its maximum value, but at a density of 2.50 g/cm³ has a diminution up to 0.04.

The tests using tracers were into the stability area of Ferro silicon 270D.

Heavy liquid separation shows that a density of 2.96g/cm³ recovery value will be 88.15% of Al₂O₃, but using a density of 3.0 g/cm³ recovery value will be 84.82% this change is related with sinks percent of the Underflow.

Partition diagrams show a density of 3.0g/cm³ and an Ep of 0.048, these values are not appropriate for dense media Cyclones.

Tests of heavy liquid separation and particles size distribution for DMS indicate that the rupture point is reached for particles under 1.3mm working with 360mm Cyclones.

INDICE

	Pág.
Introducción	14
CAPITULO I: ASPECTOS TEÓRICOS	
1.1 Dimensionamiento y Selección de Ciclones para medios Densos	15
1.1.1 Datos de ingreso	15
1.1.2 Componentes de un ciclón de medios densos	16
1.2 Eficiencia de separación de medios densos	19
1.3 El probable error de separación (Ep)	20
1.4 Porcentaje de finos en el proceso	21
1.5 Efecto de la densidad del material cercano	22
1.6 Estabilidad del medio y viscosidad	23
CAPITULO II: SELECCIÓN DEL TIPO DE CICLÓN	
2.1 Dimensionamiento y Selección de Ciclones para medios Densos	24
2.1.1 Datos de Entrada	24
2.1.2 Cálculo del Diámetro del Ciclón	26
2.1.3 Capacidad del Ciclón	27
2.1.4 Capacidad del Spigot	28
CAPITULO III: PRUEBAS DE SEPARACIÓN POR MEDIOS DENSOS	
3.1 Efecto del Tamaño de Partícula en el DMS	30
3.1.1 Muestreo	30
3.1.2 Preparación De Muestras	30
3.1.3 Separación por Líquidos Pesados (HLS)	33
3.1.4 Distribución De Tamaño De Partícula (PSD)	33

3.2 Separación por Medios Densos Variando la Presión	33
3.2.1 Resultados de las Pruebas de Distribución por Tamaño de Partícula	33
3.2.1.1 Alimentación al Mixing Box	33
3.2.1.2 Underflow del Ciclón	34
3.2.1.3 Overflow del Ciclón	34
3.2.2 Resultados de las Pruebas de separación por Líquidos Pesados	34
3.2.2.1 Alimentación al Mixing Box	34
3.2.2.2 Underflow del Ciclón	35
3.2.2.3 Overflow del Ciclón	35
3.2.3 Coeficientes de Partición del porcentaje de Hundidos	40
3.2.3.1 Recuperación Total Vs Porcentaje De Hundidos	42
3.2.3.2 Recuperación Por Rango De Mallas	42
3.2.3.3 Porcentaje De Hundidos Por Rango De Mallas	44
3.3 Separación por Medios Densos Variando la Presión	45
3.3.1 Resultados de las Pruebas de Distribución por Tamaño de Partícula	45
3.3.1.1 Alimentación al Mixing Box	45
3.3.1.2 Underflow del Ciclón	45
3.3.1.3 Overflow del Ciclón	45
3.3.2 Resultados de las Pruebas de separación por Líquidos Pesados	46
3.3.2.1 Alimentación al Mixing Box	46
3.3.2.2 Underflow del Hidrociclón	46
3.3.2.3 Overflow del Hidrociclón	47
3.3.3 Coeficientes de Partición del porcentaje de Hundidos	50
3.3.3.1 Recuperación Total Vs Porcentaje De Hundidos	50
3.3.3.2 Recuperación Por Rango De Mallas	52
3.3.3.3 Porcentaje De Hundidos Por Rango De Mallas	53
3.4 Separación Prueba de Tracers	54
3.4.1 Procedimiento de la prueba de los tracers	54
3.4.2 Resultados de la prueba de los tracers	55
3.5 Análisis Valorado por densidades	58
3.5.1 Muestreo	58
3.5.2 Preparación De Muestras	58

3.5.3 Prueba de líquidos pesados (HLS)	58
3.5.4 Análisis De Fluorescencia De Rayos X (XRF)	61
3.5.5 Resultados de las Pruebas de separación por Líquidos Pesados	61
3.5.6 Resultados de los análisis de Fluorescencia De Rayos X	61
3.5.6.1 Alimentación	61
3.5.6.2 Underflow	62
3.5.6.3 Overflow	63
3.5.7 Alimentación reconstruida y coeficientes de partición	67
3.5.6.1 Evaluación del desempeño de la planta	67
CONCLUSIONES	74
BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXOS	

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1: Componentes de un ciclón de medios densos	17
Figura 1.2: Curva de partición o curva de Tromp	20
Figura 1.3: Estabilidad del medio y viscosidad	23
Figura 2.1: Tamaño de partícula vs diámetro del ciclón	27
Figura 2.2: Capacidad del Spigot para cada diámetro del ciclón	29
Figura 3.1: Puntos de muestreo del circuito de medios densos	31
Figura 3.2: Procedimiento para las pruebas de (PSD) y (HLS)	32
Figura 3.3: Curvas de partición de los hundidos variando la presión	40
Figura 3.4: Recuperación vs porcentaje de Hundidos	42
Figura 3.5: Recuperación en los rangos de mallas	43
Figura 3.6: Porcentaje de Hundidos en los diferentes rangos de mallas	44
Figura 3.7: Curvas de partición de los hundidos, variando la alimentación	50
Figura 3.8: Recuperación vs porcentaje de Hundidos	51
Figura 3.9: Recuperación en los rangos de las mallas	52
Figura 3.10: Porcentaje de Hundidos en los diferentes rangos de mallas	53
Figura 3.11: Tracers de densidades 2.50, 2.60, 2.70, 2.80, 2.90, 3.00, 3.10, 3.20, 3.30, 3.40 y 3.53 g/cm ³	55
Figura 3.12: Ep vs densidad de corte a 49 KPa de Presión	56
Figura 3.13: Ep vs densidad de corte a 52 KPa de Presión	57
Figura 3.14: Combinación de TBE y Aguarrás	59
Figura 3.15: Diagrama de flujo del procedimiento de HLS	60
Figura 3.16: Curva de densidades para el Alimento Underflow y Overflow	63
Figura 3.17: Curva de Tromp por densidades	68
Figura 3.18: Curva de Tromp del Underflow	72
Figura 3.19: Curva de partición del Underflow	73

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1: Características del mineral	16
Tabla 1.2: Valores del dimensionamiento de un ciclón	18
Tabla 1.3: Condiciones de operación	18
Tabla 1.4: Errores probables para algunos procesos de separación por gravedad	21
Tabla 1.5: Selección de un ciclón vs porcentaje más fino que el tamaño de ruptura	22
Tabla 1.6: Efecto de la densidad del material cercano	22
Tabla 2.1: Parámetros de Diseño	24
Tabla 2.2: Condiciones de operación para 70tph de alimentación	25
Tabla 2.3: Presión operativa	26
Tabla 2.4: Balance con ciclones de 360 mm de diámetro	26
Tabla 2.5: Capacidad de los ciclones a diferentes cabezas	28
Tabla 3.1: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 40 KPa	36
Tabla 3.2: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 41 KPa	36
Tabla 3.3: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 42 KPa	37
Tabla 3.4: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 43KPa	37
Tabla 3.5: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 44 KPa	38
Tabla 3.6: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 45KPa	38
Tabla 3.7: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 46 KPa	39
Tabla 3.8: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 48 KPa	39
Tabla 3.9: Coeficientes de partición para diferentes presiones	41
Tabla 3.10: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para una alimentación de 38.36 Tph	48
Tabla 3.11: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para una alimentación de 43.34 Tph	48
Tabla 3.12: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para una alimentación de 48.14 Tph	49
Tabla 3.13: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para una alimentación	

de 52.17 Tph	49
Tabla 3.14: Coeficientes de partición Variando la alimentación	51
Tabla 3.15: Parámetros obtenidos a presión 49 Kpa	56
Tabla 3.16: Parámetros obtenidos a presión 52 Kpa	57
Tabla 3.17: Resultados de las pruebas HLS corregidos para el alimento, Underflow y Overflow	62
Tabla 3.18: Resultados de la prueba de HLS a la muestra de alimento	64
Tabla 3.19: Resultados acumulados de la prueba de HLS a la muestra de Alimento	64
Tabla 3.20: Resultados de la prueba de HLS a la muestra del Underflow	65
Tabla 3.21: Resultados Acumulados de la prueba de HLS a la muestra del Underflow	65
Tabla 3.22: Resultados de la prueba de HLS a la muestra del Overflow	66
Tabla 3.23: Resultados Acumulados de la prueba de HLS a la muestra del Overflow	66
Tabla 3.24: Resultados de la alimentación reconstruida y partición	67
Tabla 3.25: Alimentación del DMS	69
Tabla 3.26: Underflow del DMS	70
Tabla 3.27: Overflow del DMS	71

NOMENCLATURA

SIMBOLOS	DESCRIPCION
ABREVIATURA	
cm ³	Centímetro cubico
DMS	Separación por medios densos
Ep	El probable error de separación
g	Gramo
h	Hora
HLS	Separación por líquidos pesados
KPa	Kilo pascal
Kg	Kilogramo
mm	Milímetro
m	Metro
m ³	Metros cúbicos
MBX	Caja de mezcla del medio y mineral
PSD	Distribución del tamaño de partículas
SCR	Zaranda vibratoria
Tph	Tonelada por hora
TBE	Tetrabromuro de acetileno (Tetrabromoetano)
Wa	Peso de Hundidos y flotados
Wf	Peso de flotados
Wh	Peso de hundidos
XRF	Fluorescencia de rayos X
μm	Micras
%	Porcentaje
s	Segundo

INTRODUCCIÓN

El tamaño de mineral es una característica muy importante en una concentración por medios densos, el cual debe estudiarse con profundidad antes del diseño de un circuito de medios densos. Existe un efecto del tamaño de partículas que altera el performance de los ciclones, es así que en las partículas con tamaños menores al límite inferior (límite de rotura) se incrementa la viscosidad del medio denso y genera una caída en el coeficiente de partición, lo que significa una disminución en la recuperación y la calidad del producto. Es importante analizar el rango de tamaño de las partículas a concentrar, ya que existe una afinidad entre determinados rangos de tamaños que podrían mejorar el performance de una separación por medios densos.

El diseño y selección de un ciclón para medios densos, requiere de datos de entrada, tales como el tamaño máximo y mínimo de las partículas a tratar, el ratio medio mineral, la presión operativa, y el balance de masa. Durante la selección se debe tener en cuenta el tamaño de rotura, por debajo del cual el E_p posee un mayor incremento, lo que bajaría su eficiencia.

Las pruebas por líquidos pesados (HLS), nos brindan una gran información del comportamiento de las partículas a diferentes densidades.

CAPITULO I

ASPECTOS TEÓRICOS

1.1 Dimensionamiento y Selección de Ciclones para medios Densos

El proceso de selección de un ciclón para medios densos es sencillo, pero existen una serie de factores que se deben tener en cuenta para garantizar que se ha seleccionado el tamaño de ciclón de mejor eficiencia.

1.1.1 Datos de ingreso

Los datos de ingreso deben ser resultados de una serie de pruebas pilotos tales como: chancado, separación por medios densos y separación magnética. A continuación se menciona los datos de ingreso:

Características del mineral

- Densidad del material
- Distribución del tamaño de partículas (PSD)

Balance de Masa

- Alimentación
- Recuperación

Parámetros de Diseño

- Ratio medio mineral
- Cabeza de operación

En la tabla 1.1 se muestra las características que tendría un mineral, el cual define el pre y post tratamiento del mismo en un diseño de separación por medios densos.

Tabla 1.1: Características del mineral

Item	Procedencia	Restricciones	Resultados (ej.)
Características del mineral	Liberación de cristales de andalucita del resto de mineral	Se establece el tamaño a que el mineral será chancado	-8.0, +0.6 mm -4.0, +0.6 mm -8.0, +3.0 mm
	Cantidad de andalucita en el mineral	Posible porcentaje de mineral en la alimentación reportado en el producto	Ley 5% a 30% de la alimentación de mina.
	Mineralogía: como son limpiados los mismos cristales.	Establecer el lavado o la limpieza que los minerales necesitan.	Limpieza superficial chancadora de impacto y celdas de atrición

1.1.2 Componentes de un ciclón de medios densos

De todos los componentes del ciclón, los más importantes y que necesitarán de un proceso de cálculo para su selección, son las siguientes:

- Overflow Elbow
- Vortex finder
- Inlet head
- Barrel extension
- Cone
- Spigot

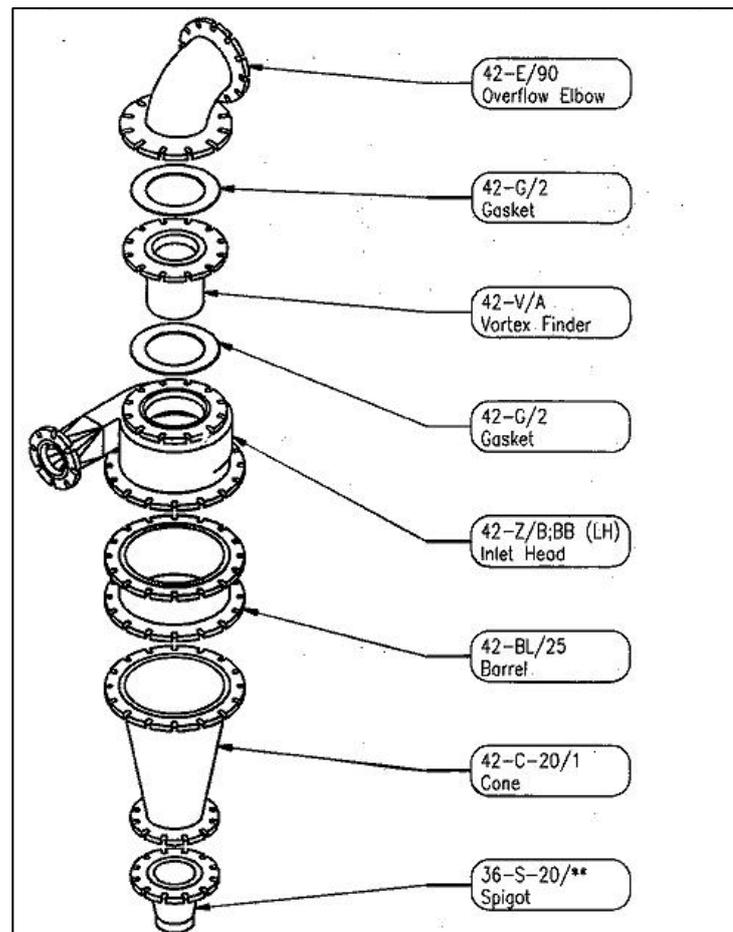


Figura1.1: Componentes de un ciclón de medios densos

El performance de un ciclón del DMS está basado en el rendimiento y la calidad de la densidad de separación. En la tabla 1.2 muestra los componentes del ciclón y sus respectivas propiedades, que son considerados en el diseño, y en la tabla 1.3 se muestra las condiciones de operación, del cual se obtienen los parámetros de diseño.

Tabla 1.2: Valores del dimensionamiento de un ciclón

Item	Procedencia	Restricciones	Diseño (ej.)
Dimensionamiento de ciclones	Diámetro de ciclón	Rendimiento	250, 360, 420, 510 mm de diámetro
		Límite del tamaño inferior del grano	
	Inlet	Tamaño superior del mineral	45, 65 mm Inlet
	Vortexfinder	Capacidad para eliminar los flotados	150 mm
	Spigot	Capacidad para eliminar los hundidos	70, 100 mm
	Barrel	Aumenta el rendimiento en 5%	Un Barril

Tabla 1.3: Condiciones de operación

Item	Procedencia	Restricciones	Andalucita
Condiciones de Operación	Presión de alimentación	Afecta a la capacidad de rendimiento y a la eficiencia de clasificación.	40-75kPa
	Tipo de Ferrosilicio	Afecta a la estabilidad y la viscosidad	270D, 40 y 60C
	Densidad de alimentación	Afecta a la densidad de corte	2.3-2.6 g/cm ³
	Diferencial del ciclón Ep	Afecta a la eficiencia de separación	0.01-0.04

1.2 Eficiencia de separación de medios densos

Las pruebas realizadas en el laboratorio nos reflejan una separación perfecta, y los puntos de corte son cercanos a los ideales, pero en un proceso de operación continuo existen muchas variaciones, que se concentran principalmente en la variación de la densidad de la alimentación, de tal forma que las partículas muy densas o muy ligeras se dividen fácilmente a través del medio y son enviadas rápidamente como producto apropiado, pero las partículas de densidad cercana al punto de corte se mueven más lentos y no pueden alcanzar su producto correspondiente en el tiempo disponible de separación.

Las partículas cercanas a la densidad de corte seguirán en el medio y se dividirán en gran parte en la misma proporción. Existen otros factores como el porcentaje de partículas finas que generalmente son separados menos eficientemente y que influirán en la eficiencia de separación, debido a que poseen ratios de sedimentación más lentos.

La eficiencia de separación puede ser representada por la pendiente de la curva de partición o Tromp, introducida por primera vez por K.F. Tromp (1937). En él se describe la eficiencia de separación para un separador cualquiera sea la calidad de la alimentación y que puede ser utilizado para la estimación del rendimiento y la comparación entre separadores.

La curva de la partición relaciona el coeficiente de partición, es decir, el porcentaje del material alimentado de una gravedad específica particular que es reportado ya sea el producto hundido o el producto flotado, y es similar a la curva de eficiencia de clasificación por tamaño.

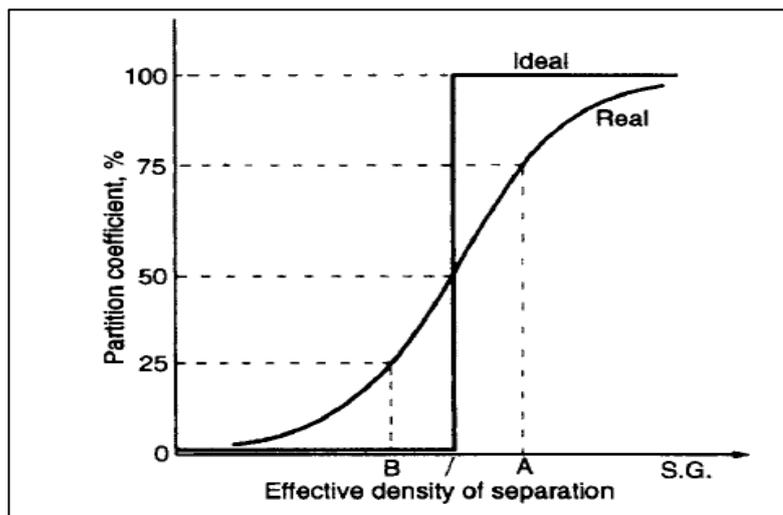


Figura 1.2: Curva de partición o curva de Tromp

La curva de partición ideal refleja una separación perfecta en la que todas las partículas que tienen una densidad mayor que la densidad de separación son enviadas a los hundidos y las partículas más ligeras hacia los flotados. No hay pérdida de material.

La curva de la partición para una separación real muestra que la eficiencia es más alta para las partículas de densidad lejanas a la densidad de corte y disminuye para las partículas que se aproximan a ella.

El área entre las dos curvas se denomina "zona de error" y es una medida del grado de extravío de las partículas en el producto equivocado.

Muchas curvas de partición le dan una relación de línea recta razonable entre la distribución de 25 y 75%, y la pendiente de la línea entre estas distribuciones se utiliza para mostrar la eficiencia del proceso.

1.3 El probable error de separación (E_p)

Se define como la mitad de la diferencia entre la densidad en donde el 75% es recuperado en los hundidos y aquella en la que el 25% se recupera en los hundidos, es decir, de la ecuación 1.1.

$$EP = \frac{(A-B)}{2} \dots\dots\dots (1.1)$$

La densidad con la que el 50% de las partículas es enviado a los hundidos se muestra como la densidad efectiva de separación (densidad de Corte), que puede ser no exactamente igual a la densidad del medio, Cuanto más bajo sea el E_p , más cerca a la vertical es la línea entre el 25 y el 75% y más eficiente es la separación. Una separación ideal tiene una línea vertical con un $E_p = 0$, mientras que en la práctica el E_p por lo general se encuentra en el rango 0.01-0.10, pero para los ciclones de medio denso está en el rango de (0.01-0.04), como muestra la tabla 1.3.

Tabla 1.4: Errores probables para algunos procesos de separación por gravedad

Process	E_p
Table	0.03-0.11
DM Bath	0.01-0.02
DM Cyclone	0.01-0.04
Hydrocyclone	0.08-0.14
BaumJig	0.03-0.12

El E_p se utiliza como un método para evaluar la separación del proceso de medios densos (DMS), sin embargo se debe tener cuidado en su aplicación, ya que no refleja el rendimiento en los extremos de la curva, que puede ser importante.

1.4 Porcentaje de finos en el proceso

El porcentaje de finos viene a ser la cantidad de partículas que son menores al tamaño mínimo del diseño. Por ello es necesario que durante el diseño de las dimensiones del ciclón, se debe saber la cantidad de finos que ingresará al circuito de medios densos, el cual afectara directamente con la subida en la viscosidad, ocasionado problemas de la separación. La tabla 1.5 muestra los porcentajes de partículas que deberían ingresar al circuito de separación de medios densos.

Tabla 1.5: Selección de un ciclón vs porcentaje más fino que el tamaño de ruptura

% Finer	Comment
0-5 %	Acceptable
5-15 %	Onthelimit
>15 %	Reduce cyclonediameter

1.5 Efecto de la densidad del material cercano

El rango de la variación de las densidades entre las partículas a separar es un factor importante a tomar durante el diseño de separación por medios densos. La tabla 1.6 muestra los distintos porcentajes en masa de la variación de partículas cercanas a la densidad de corte en un rango (± 0.1 g/cm³).

Tabla 1.6: Efecto de la densidad del material cercano

Wt % within ± 0.1 gravity of separation	Gravity process recommended	Type
0-7	Almost any process	Jigs, tables, spirals
7-10	Efficient process	Sluices, cones, DMS
10-15	Efficient process with good operation	
15-25	Very efficient process with expert operation	DMS
Above 25	Limited to a few exceptionally efficient processes with expert operation	DMS with close control

1.6 Estabilidad del medio y viscosidad

La elección del medio que permita estabilidad en el proceso, también será un factor importante, durante el diseño de un circuito de medio denso. Estas pruebas deben de realizarse con los trazadores de densidad (tracers), sin alimentación de mineral.

La figura 1.3 representa el rendimiento de un ciclón en términos de estabilidad y viscosidad, muestra que bajo una amplia variedad de condiciones de funcionamiento, el ferrosilicio 270D es una opción apropiada.

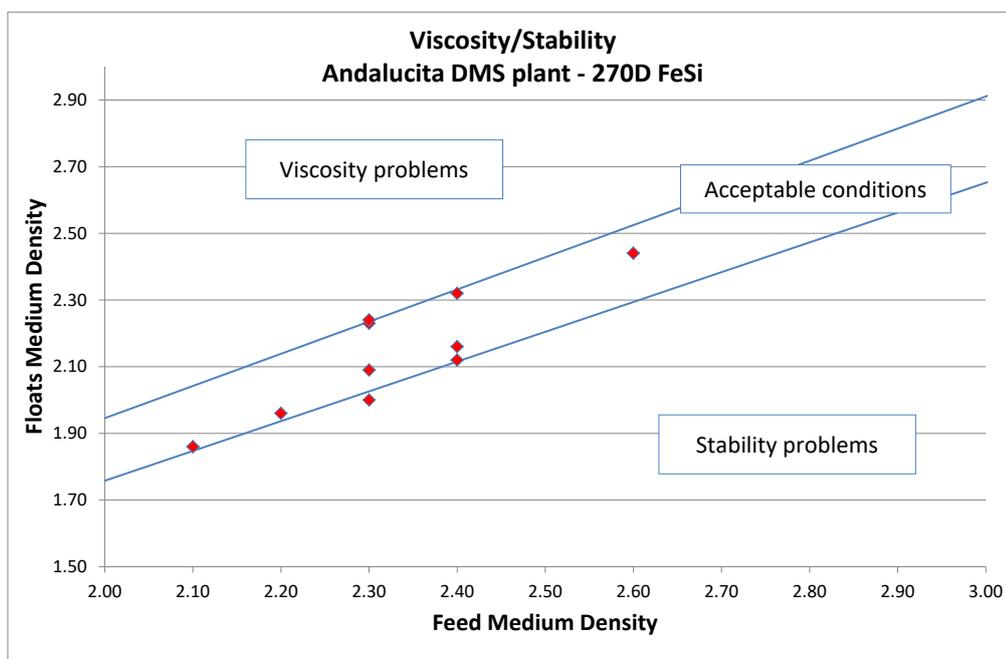


Figura 1.3: Estabilidad del medio y viscosidad

CAPITULO II

SELECCIÓN DEL TIPO DE CICLÓN

2.1 Dimensionamiento y Selección de Ciclones para medios Densos

En esta sección se realizará los cálculos para la selección de los ciclones del medio denso, para ello se necesitaran los datos de entrada tales como: alimentación, densidad del material, distribución del tamaño de partícula, balance de masa y los respectivos parámetros de diseño (ratio medio mineral y cabeza de operación).

2.1.1 Datos de Entrada

Los datos de entrada fueron construidos aprovechando los resultados del ciclón de 250 mm, para una alimentación de 30 tph. El tamaño máximo de partícula a tratar es de 8 mm, y la zaranda de lavado posee un corte inferior de 0.63 mm. Las tablas siguientes muestran los datos de entradas que fueron construidos a partir de los parámetros de diseño, ratio medio mineral y densidad del medio, también se muestra la presión operativa, el balance de masa y la distribución del tamaño de partícula.

Tabla 2.1: Parámetros de Diseño

Ratios	
Relación volumen medio-mineral	12.9
Relación masa ferrosilicio-mineral	8.1
Relación volumen ferrosilicio-mineral	3.3

Tabla 2.2: Condiciones de operación para 70tph de alimentación

Alimentación	Solidos	Medio	Total
Masa (Tph)	54.6	623.0	677.6
Volumen (m ³ /h)	19.6	254.3	273.9
S.G. (g/cm ³)	2.78	2.45	2.47
Ratio Medio mineral			12.96

Hundidos	Solidos	Medio	Total
Masa (Tph)	9.8	188.0	197.8
Volumen (m ³ /h)	3.2	62.7	65.8
S.G. (g/cm ³)	3.09	3.00	3.00
Ratio Medio mineral			19.83

Flotados	Solidos	Medio	Total
Masa (Tph)	44.8	435.0	479.8
Volumen (m ³ /h)	16.8	191.6	208.4
S.G. (g/cm ³)	2.67	2.27	2.30
Ratio Medio mineral			11.42

Presión equivalente, presión ejercida por el medio circulante, en una columna equivalente al diámetro del ciclón.

$$P. E. = \rho \times g \times \emptyset \dots \dots \dots (2.1)$$

Dónde:

P.E: Presión Operativa.

ρ : Densidad del medio circulante.

\emptyset : Diámetro del ciclón.

Presión operativa, relación entre presión de ingreso al ciclón y la presión equivalente.

$$P. O. = \frac{P}{P.E.} \dots \dots \dots (2.2)$$

Dónde:

P.O: Presión Operativa.

P: Presión de ingreso a los ciclones (mineral y Medio Circulante).

Tabla 2.3: Presión operativa

Presión	KPa
Distribuidor	40.0
Hidrostática	24.0
Entrada ciclón	64.0
Equivalente a 360 mm	8.7
Operativa	8D

Tabla 2.4: Balance con ciclones de 360 mm de diámetro.

Productos	Peso (Tph)	Ley (%)	Finos (Tph)	Recuperación	Ratio
Alimento	70.0	19.1	13.4	100.0%	
Underflow	9.8	98.9	9.7	72.2%	7.17
Lodos	15.4	8.9	1.4	10.3%	
Overflow	44.8	5.2	2.3	17.4%	

2.1.2 Cálculo del Diámetro del Ciclón

Según la figura 2.1, el tamaño máximo de partícula (8 mm), se encuentra dentro de un rango aceptable para una separación con ciclones de 360 mm, pero existe un límite inferior (1 mm), por debajo del cual no habría una buena separación. En nuestro caso la zaranda de lavado posee una abertura de 0.63mm, lo cual implica que el corte inferior será 0.6 mm, este problema se analizara con mayor detalle en el capítulo 03.

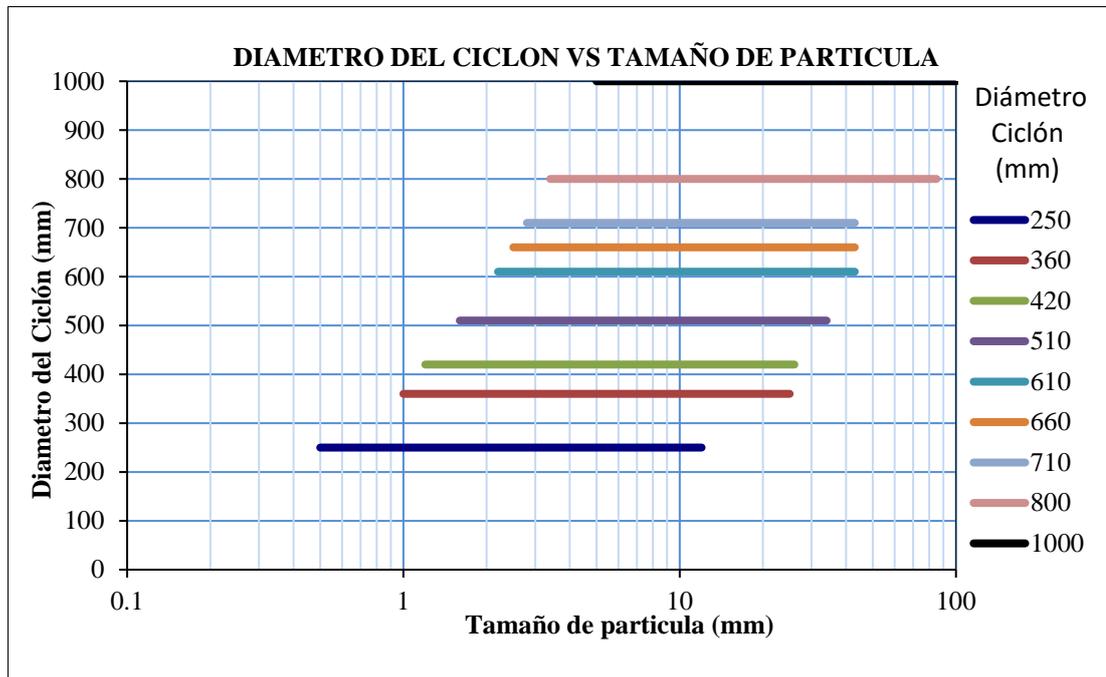


Figura 2.1: Tamaño de partícula vs diámetro del ciclón

2.1.3 Capacidad del Ciclón

La capacidad del ciclón se determinará por la siguiente relación:

$$\text{Caudal } Q_1 = \text{Caudal } Q_2 \times \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dónde:

Q: Caudal de pulpa (m³/h)

H: Cabeza expresada en diámetro del Ciclón (D_c)

Con esta relación se crea los distintos valores para cada diámetro de ciclón con diferentes cabezas, obteniéndose la tabla 2.5:

Tabla 2.5: Capacidad de los ciclones a diferentes cabezas

		cabeza de operación (En relación al diámetro del ciclón)										
Capacidad del ciclón (m ³ /h)	Modelo	7D	8D	9D	10D	11D	12D	13D	14D	15D	16D	17D
		250-20-1	29	31	33	34	36	38	39	41	42	43
	360-20-1	61	65	69	73	76	79	83	86	89	92	95
	420-20-1	88	94	100	105	110	115	120	125	129	133	137
	510-20-1	137	146	155	163	171	179	186	193	200	207	213

Cada ciclón de 360 mm posee la capacidad de tratar 65 m³/h de pulpa (mineral y medio circulante), pero el volumen a tratar es de 273.9 m³, entonces el número de ciclones a usar sería 5, pero el tamaño mínimo de las partículas sería 1.0 mm.

Si elegimos el ciclón de 250 mm, se tendría que utilizar 9 ciclones y podría tratar minerales mayores a 0.5 mm.

2.1.4 Capacidad del Spigot

Para hallar la capacidad del Spigot, se utilizara la relación de la figura 2.2, en el cual se detalla los rangos máximos y estándares por cada ciclón. Para nuestro caso trabajamos con ciclón de 360 mm de diámetro, entonces las capacidades serían:

$$\text{Capacidad estandar} = 7.4 \times 5 = 37 \text{ m}^3$$

$$\text{Capacidad maxima} = 9.6 \times 5 = 48 \text{ m}^3$$

Estos resultados son mayores a los 3.2 m³ requeridos en el balance

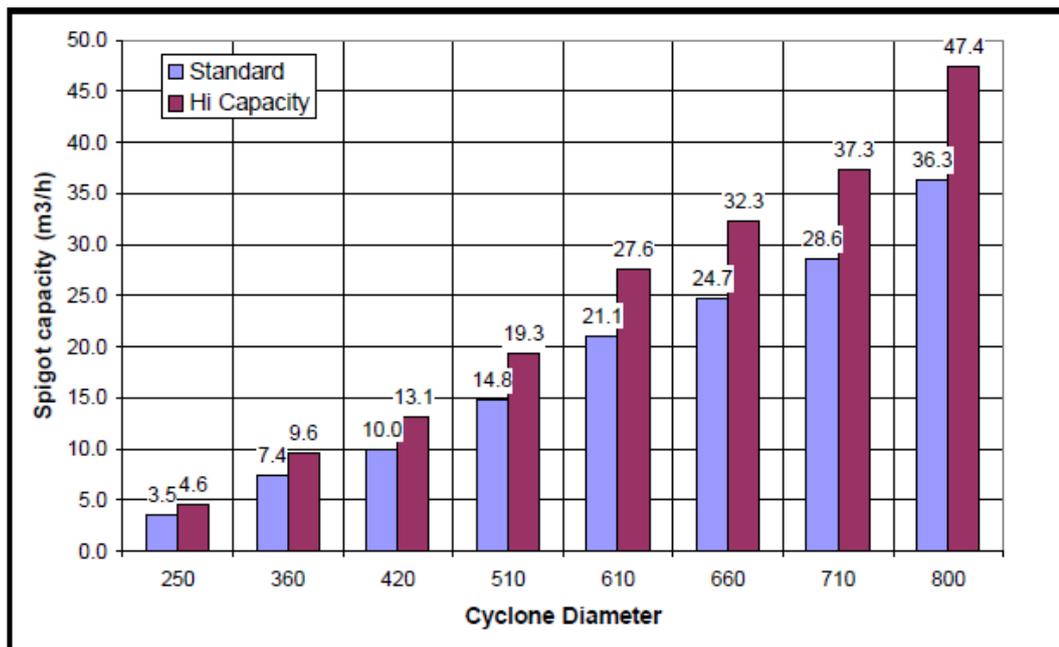


Figura 2.2: Capacidad del Spigot para cada diámetro del ciclón

CAPITULO III

PRUEBAS DE SEPARACIÓN POR MEDIOS DENSOS

3.1 Efecto del Tamaño de Partícula en el DMS

Se realizó una evaluación en la separación de partículas con tamaños menores a 8.0 mm, utilizando ciclones de 360 mm de diámetro, para ello se realizaron pruebas con alimentación y densidad constante variando la presión, y pruebas con presión y densidad constante variando la alimentación.

3.1.1 Muestreo

Durante las pruebas se realizó el muestreo del circuito de medios densos (DMS), exactamente en los puntos: entrada del Mixing Box (02-MBX-01), Rebose de la zaranda del Overflow del ciclón (02-SCR-02), y rebose de la zaranda del Underflow del hidrociclón (02-SCR-03). El muestreo tuvo una duración de 40 minutos por cada punto, con un periodo de 10 minutos.

3.1.2 Preparación De Muestras

Las muestras obtenidas tienen un promedio de 20 Kg, las cuales fueron secadas, para posteriormente ser cuarteadas. En el cuarteo de las muestras, se obtuvo un peso aproximado de 500 g, las cuales sirvieron simultáneamente para realizar las pruebas de distribución del tamaño de partícula (PSD) y las pruebas de separación por líquidos pesados (HLS).

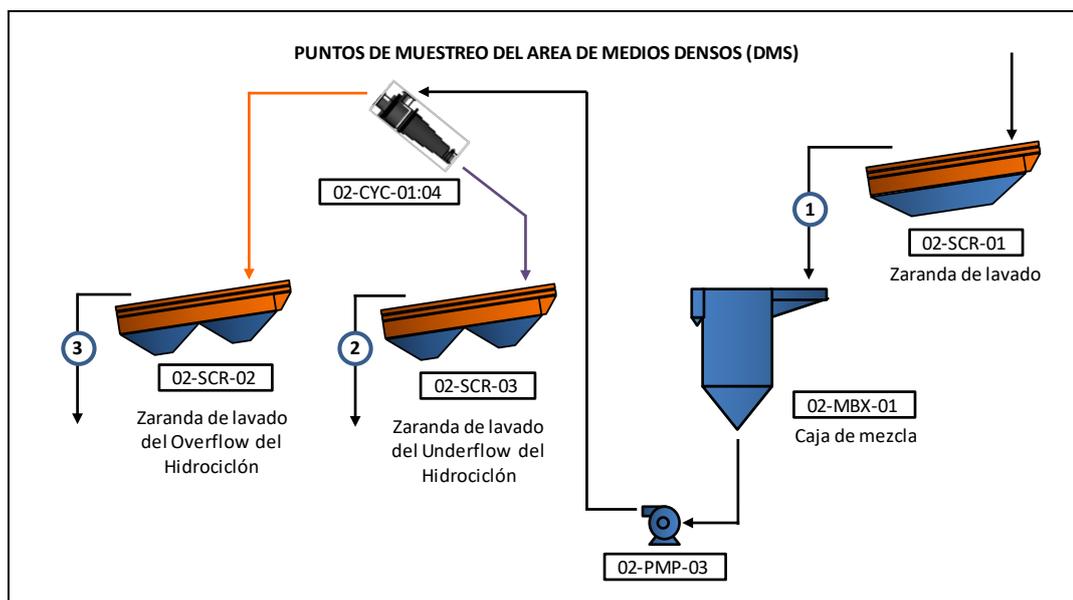


Figura 3.1: Puntos de muestreo del circuito de medios densos

Inicialmente se realizó las pruebas de separación por líquidos pesados, para obtener los productos hundidos y flotados, y con estos productos se realizó las pruebas de distribución del tamaño de partícula (PSD). En la figura 3.2 se puede apreciar la secuencia del procedimiento de preparación de las muestras, donde la muestra de aproximadamente 500 g fue introducida a un balde 4.5 L que contenía el líquido pesado TBE (Tetrabromoetano), con una densidad de 2.96 g/cm^3 , por diferencias de densidades se obtienen los productos flotados y hundidos, los cuales fueron secados para su análisis granulométrico.

Dónde: W_h representa el peso de los hundidos, mientras W_f el peso de los flotados y W_a representa la suma de los pesos de hundidos y flotados.

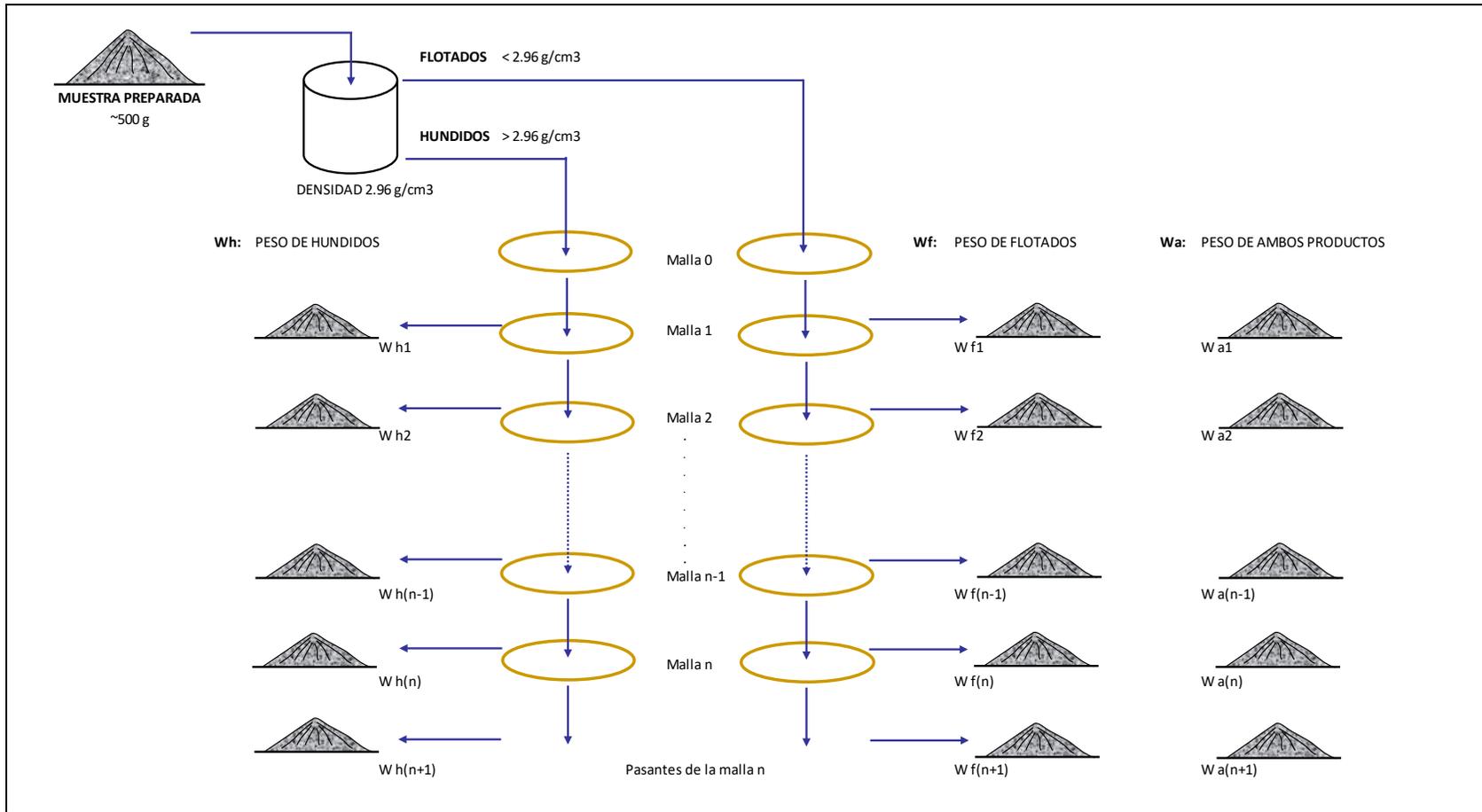


Figura 3.2: Procedimiento para las pruebas de (PSD) y (HLS)

3.1.3 Separación por Líquidos Pesados (HLS)

Se realizó la prueba de separación por líquidos pesados a todas las muestras cuarteadas con un peso aproximado de 500 g, el líquido denso empleado fue el tetrabromoetano (TBE) con densidad 2.96 g/cm^3 , la cantidad empleada fue de 3 litros en un recipiente de 4.5 litros. Los productos hundidos y flotados fueron lavados y secados, para su posterior análisis granulométrico.

3.1.4 Distribución De Tamaño De Partícula (PSD)

Se realizó el análisis granulométrico de los productos flotados y hundidos, empleándose mallas con aberturas: 8.0, 6.7, 4.75, 3.35, 2.36, 1.7, 1.0, 0.85, 0.6, 0.5, y 0.212 mm. Cada fracción fue pesada y registrada, para hallar sus respectivas distribuciones granulométricas, estas mismas muestras fraccionadas fueron empleadas para hallar el peso total de la muestra inicial.

3.2 Separación por Medios Densos Variando la Presión.

Para esta prueba se trabajó con una densidad del medio de 2.47 g/cm^3 , con una alimentación de 47.87 Tph y se varió la presión de entrada hacia los ciclones con 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, y 48 Kpa.

3.2.1 Resultados de las Pruebas de Distribución por Tamaño de Partícula

3.2.1.1 Alimentación al Mixing Box

El mineral que ingreso al circuito de separación por medios densos, se concentró principalmente en el rango de 6.7 mm a 1.0 mm con un porcentaje de masa que varió del 82.35% al 87.3%, las partículas mayores a 6.7 mm tuvieron un porcentaje menor a 2.6%, las partículas que se encontraron en el rango de 1.0 mm a 0.6 mm tuvieron un porcentaje que varió de 8.86% a 13.43%, y las partículas menores a 0.6 mm

estuvieron en un rango de 1.76% a 3.19%. Este último valor incrementa la viscosidad del medio denso.

3.2.1.2 Underflow del Ciclón

El mineral producto del Underflow que ingreso al circuito de separación por medios densos, se concentró principalmente en el rango de 6.7 mm a 1.0 mm con un porcentaje de masa que varió del 91.29% al 95.65%, las partículas mayores a 6.7 mm tuvieron un porcentaje menor a 5.45%, las partículas que se encontraron en el rango de 1.0 mm a 0.6 mm tuvieron un porcentaje que varió de 3.41% a 4.44%, y las partículas menores a 0.6 mm estuvieron en un rango de 0.12% a 0.27%.

3.2.1.3 Overflow del Ciclón

El mineral producto del Underflow que ingreso al circuito de separación por medios densos, se concentró principalmente en el rango de 6.7 mm a 1.0 mm con un porcentaje de masa que varió del 85.07% al 90.09%, las partículas mayores a 6.7 mm tuvieron un porcentaje menor a 2.42%, las partículas que se encontraron en el rango de 1.0 mm a 0.6 mm tuvieron un porcentaje que varió de 6.9% a 11.48%, y las partículas menores a 0.6 mm estuvieron en un rango de 0.72% a 1.42%.

3.2.2 Resultados de las Pruebas de separación por Líquidos Pesados

3.2.2.1 Alimentación al Mixing Box

La ley en la alimentación tuvo una variación de 19.1% a 22.8%, el porcentaje de hundidos en cada rango de malla posee una distribución uniforme, pero en algunos casos existe un incremento en las mallas superiores (-8.0, +4.75 mm) llegando alcanzar una ley de 40.96% o también caídas como 8.72%.

Más del 86.7% de mineral valioso se encuentra principalmente en el rango de malla (-6.7, +1.0 mm), donde las partículas del rango (-4.75, +3.35 mm) poseen el mayor porcentaje.

3.2.2.2 Underflow del Hidrociclón

Las leyes del Underflow variaron de 97.2 a 99.2%, a una presión de 40 KPa se observó que la ley era de 99.1%, esto obedeció a la cantidad de partículas finas en la alimentación, que ingresó al sistema el cual fue el menor de todas las pruebas (1.76%).

A medida que aumentaba la presión se observó que los cambios en la calidad de los distintos rangos de las mallas, obtenían mejores valores, esto empezó en el rango (-8.0, +3.35 mm) y se amplió al rango (-8.0, +1.7 mm). Los valores mejoraron por encima del 98.8%, con una variación máxima de 1.2%.

En el rango (-1.7, +1.0 mm) se empezó a generar una caída que llegó hasta el 95.33%, esta caída se da en todas las pruebas, llegando a obtener un valor de 97.05% a una presión de 48 KPa.

El mayor porcentaje del contenido de hundidos está en el rango (-6.7, +1.0 mm), con una variación en masa de 91.54% a 96.08%.

3.2.2.3 Overflow del Ciclón

El porcentaje de hundidos se mantuvo por debajo del 5% en el rango de (-8.0, +1.7 mm), pero se observó que el rango de (-8.0, +6.7 mm) reportó 8.76% trabajando con 44 KPa, esto obedeció a la ley elevada en la alimentación que llegó a alcanzar el 40.96% siendo este el más alto alcanzado durante la prueba. En el rango (-1.7, +1.0 mm) el porcentaje de hundidos se incrementa por encima de 5% y alcanza valores altos a medida que disminuye su granulometría.

Más del 70% de la masa de hundidos se encuentra entre el rango (-2.36, +0.6 mm) y la mayor masa se concentra en el rango de malla (-1.7, +1.0 mm), alcanzando el 34.63% cuando se trabajó a una presión de 46 KPa.

Tabla 3.1: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 40KPa

Abertura mm	Alimentación (%)			Underflow (%)			Overflow (%)		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	1.97	20.91	2.76	3.1	100.00	3.10	2.42	0.00	0.00
-6.7, +4.75	11.93	16.64	14.72	15.3	99.82	15.40	17.28	1.31	9.07
-4.75, +3.35	19.10	19.13	24.82	27.0	99.83	27.21	24.39	0.52	5.05
-3.35, +2.36	19.11	21.01	21.64	23.1	99.57	23.22	19.02	1.12	8.56
-2.36, +1.7	16.05	19.62	14.56	15.2	99.28	15.20	14.01	1.66	9.33
-1.7+1.0	21.11	18.50	14.36	12.4	97.53	12.16	15.39	5.28	32.52
-1.0, +0.85	3.96	20.80	4.05	2.9	95.22	2.75	3.91	9.45	14.78
-0.85, +0.6	5.01	19.22	2.65	1.0	89.65	0.87	3.00	14.50	17.40
-0.6, +0.212	1.16	21.77	0.43	0.1	84.31	0.08	0.44	18.84	3.29
-0.212	0.60			0.1			0.15		
Total	100.00	19.149	100.00	100.0	99.106	100.00	100.00	2.50	100.00

Tabla 3.2: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 41KPa

Abertura mm	Alimentación (%)			Underflow (%)			Overflow (%)		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	2.41	8.72	0.55%	0.6	100.00	0.66	1.37	0.00	0.00
-6.7, +4.75	12.30	17.10	14.46%	15.6	99.71	15.87	16.91	1.79	7.53
-4.75, +3.35	19.41	18.41	21.80	24.5	99.33	24.86	23.15	1.17	6.77
-3.35, +2.36	19.49	19.28	20.50	22.6	98.31	22.65	20.68	1.93	9.93
-2.36, +1.7	16.30	22.33	15.62	16.7	98.25	16.80	13.22	2.98	9.82
-1.7+1.0	19.37	23.57	18.96	16.3	95.50	15.90	15.80	8.63	34.00
-1.0, +0.85	4.16	20.41	3.99	2.4	88.30	2.14	4.15	12.59	13.04
-0.85, +0.6	4.70	20.15	3.65	1.2	86.58	1.07	4.06	16.18	16.35
-0.6, +0.212	1.22	21.48	0.47	0.1	73.53	0.05	0.51	20.16	2.55
-0.212	0.64			0.1			0.16		
Total	100.0	19.74	100.00	100.0	97.87	100.00	100.00	4.01	100.00

Tabla 3.3: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 42KPa

Abertura mm	Alimentación			Underflow			Overflow		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	2.60	22.22	2.04	2.4	97.89	2.36	2.02	0.00	0.00
-6.7, +4.75	12.81	25.91	17.99	18.8	99.87	19.05	15.10	2.85	11.17
-4.75, +3.35	18.56	24.11	23.41	25.3	99.68	25.68	21.34	1.59	8.80
-3.35, +2.36	17.17	22.77	19.09	21.1	99.38	21.33	18.62	0.98	4.73
-2.36, +1.7	15.43	22.54	13.60	14.4	98.77	14.45	13.60	2.29	8.10
-1.7+1.0	20.14	21.80	15.21	13.9	95.33	13.47	16.42	6.18	26.36
-1.0, +0.85	4.15	20.15	4.82	2.6	90.39	2.39	6.16	12.71	20.33
-0.85, +0.6	6.75	16.04	3.17	1.3	88.20	1.15	5.31	11.68	16.11
-0.6, +0.212	1.79	17.00	0.69	0.2	63.00	0.11	1.12	15.20	4.40
-0.212	0.59			0.1			0.31		
Total	100.0	22.807	100.00	100.0	98.32	100.00	100.00	3.85	100.00

Tabla 3.4: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 43KPa

Abertura mm	Alimentación			Underflow			Overflow		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	1.11	21.43	1.98	2.3	100.00	2.30	2.03	0.00	0.00
-6.7, +4.75	10.67	28.93	18.58	21.1	99.91	21.31	12.79	0.42	1.41
-4.75, +3.35	17.01	22.38	22.82	25.2	99.80	25.48	22.32	1.06	6.15
-3.35, +2.36	19.18	23.27	20.38	22.0	99.69	22.18	19.08	1.82	9.06
-2.36, +1.7	15.69	21.02	12.94	13.5	98.81	13.52	13.89	2.58	9.34
-1.7+1.0	20.61	18.61	13.44	11.2	96.20	10.91	17.44	6.46	29.39
-1.0, +0.85	4.85	22.64	5.44	3.1	95.63	3.03	5.94	13.26	20.57
-0.85, +0.6	7.69	18.14	3.51	1.3	87.25	1.15	5.08	13.81	18.29
-0.6, +0.212	2.42	20.79	0.90	0.1	80.68	0.12	1.17	18.97	5.78
-0.212	0.77			0.1			0.25		
Total	100.0	22.445	100.00	100.0	98.867	100.00	100.00	3.83	100.00

Tabla 3.5: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 44KPa

Abertura mm	Alimentación (%)			Underflow (%)			Overflow (%)		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	0.61	40.96	2.93	2.9	100.00	2.95	1.17	8.76	2.81
-6.7, +4.75	8.42	29.12	23.06	26.0	99.75	26.20	14.29	1.11	4.37
-4.75, +3.35	14.97	23.82	24.54	27.4	99.56	27.61	19.98	1.15	6.32
-3.35, +2.36	18.67	23.67	20.00	21.2	99.36	21.31	16.67	2.65	12.18
-2.36, +1.7	18.52	15.27	10.84	11.3	98.33	11.27	15.43	1.96	8.33
-1.7+1.0	25.30	11.35	10.81	7.6	95.47	7.34	22.36	5.10	31.42
-1.0, +0.85	5.40	18.13	4.43	2.8	95.59	2.71	5.55	9.59	14.65
-0.85, +0.6	6.12	19.02	2.94	0.6	86.50	0.53	3.76	16.63	17.20
-0.6, +0.212	1.43	16.86	0.45	0.1	85.11	0.07	0.66	15.02	2.72
-0.212	0.56			0.1			0.15		
Total	100.0	20.69	100.00	100.0	98.86	100.00	100.00	3.63	100.00

Tabla 3.6: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 45KPa

Abertura mm	Alimentación (%)			Underflow (%)			Overflow (%)		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	0.83	29.09	2.05	2.4	100.00	2.43	1.43	0.00	0.00
-6.7, +4.75	7.29	27.75	18.45	20.0	99.55	20.27	14.08	2.61	8.39
-4.75, +3.35	15.53	22.46	22.42	24.7	99.40	24.96	22.45	1.64	8.39
-3.35, +2.36	19.43	21.72	19.42	21.4	98.42	21.41	20.29	1.82	8.44
-2.36, +1.7	18.71	21.47	13.89	14.6	98.01	14.53	14.91	3.05	10.37
-1.7+1.0	25.10	22.09	15.74	13.3	96.32	13.09	17.08	7.80	30.40
-1.0, +0.85	4.91	20.67	4.18	2.4	91.95	2.28	5.18	12.41	14.68
-0.85, +0.6	6.17	23.66	3.41	1.1	85.60	0.96	3.85	19.29	16.94
-0.6, +0.212	1.47	19.89	0.43	0.1	80.00	0.07	0.59	17.76	2.39
-0.212	0.56			0.0			0.13		
Total	100.0	22.933	100.00	100.0	98.230	100.00	100.00	4.38	100.00

Tabla 3.7: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 46KPa

Abertura mm	Alimentación (%)			Underflow (%)			Overflow (%)		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	1.04	37.30	4.53	5.4	100.00	5.50	2.10	0.00	0.00
-6.7, +4.75	9.74	26.96	23.55	26.9	99.90	27.16	17.94	1.82	6.71
-4.75, +3.35	15.58	21.57	21.00	23.7	99.71	23.81	21.46	1.79	7.89
-3.35, +2.36	17.06	19.91	17.41	19.2	99.57	19.32	19.73	2.11	8.52
-2.36, +1.7	16.27	19.66	11.75	11.9	99.13	11.89	13.77	3.93	11.08
-1.7+1.0	23.69	21.83	13.83	9.6	96.72	9.37	15.29	11.04	34.63
-1.0, +0.85	7.22	22.88	4.04	2.2	94.40	2.12	4.36	14.51	12.97
-0.85, +0.6	6.21	19.63	3.38	0.8	89.85	0.70	4.58	16.90	15.86
-0.6, +0.212	2.36	22.09	0.52	0.1	93.42	0.13	0.62	18.44	2.33
-0.212	0.83			0.1			0.15		
Total	100.0	22.46	100.00	100.0	99.07	100.00	100.00	4.88	100.00

Tabla 3.8: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para presiones de 48KPa

Abertura mm	Alimentación		Underflow		Overflow				
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	2.79	40.44	4.39	5.5	100.00	5.56	1.74	0.00	0.00
-6.7, +4.75	11.19	28.64	17.58	19.6	100.00	19.78	12.32	4.34	9.40
-4.75, +3.35	16.25	27.14	23.98	28.0	100.00	28.18	17.79	2.66	8.31
-3.35, +2.36	17.12	18.68	18.43	20.9	99.71	21.01	22.08	2.27	8.81
-2.36, +1.7	16.41	16.41	12.57	13.0	98.99	12.97	17.84	3.54	11.09
-1.7+1.0	22.81	19.62	14.14	9.8	97.05	9.61	17.29	10.22	31.05
-1.0, +0.85	6.32	22.25	4.72	2.2	95.48	2.13	5.24	15.62	14.36
-0.85, +0.6	4.81	19.55	3.55	0.8	85.65	0.69	4.71	17.16	14.19
-0.6, +0.212	1.79	21.98	0.65	0.1	88.24	0.07	0.77	20.62	2.80
-0.212	0.52			0.0			0.23		
Total	100.0	22.17	100.00	100.0	99.25	100.00	100.00	5.69	100.00

3.2.3 Coeficientes de Partición del porcentaje de Hundidos

Los porcentajes en masa del contenido de hundidos de los distintos productos (alimentación, Underflow y Overflow) fueron corregidos utilizando el método de multiplicadores de Lagrange, para hallar los coeficientes de partición para cada prueba. Los coeficientes de partición fueron obtenidos dividiendo el contenido de hundidos a un determinado rango de malla del Underflow entre el contenido de hundidos del mismo rango de la alimentación.

La figura 3.3 muestra las distintas curvas de partición que se han generado según el cambio de la presión de trabajo. La curva de partición a una presión de 44 KPa muestra una recuperación de 86.17% a un tamaño de 7321 μm , a diferencia de las demás curvas que tuvieron el 100%, esto se debió principalmente al elevado porcentaje de hundidos en la alimentación en el rango (+8.0, +6.7 mm), llegando a alcanzar el 44.96%.

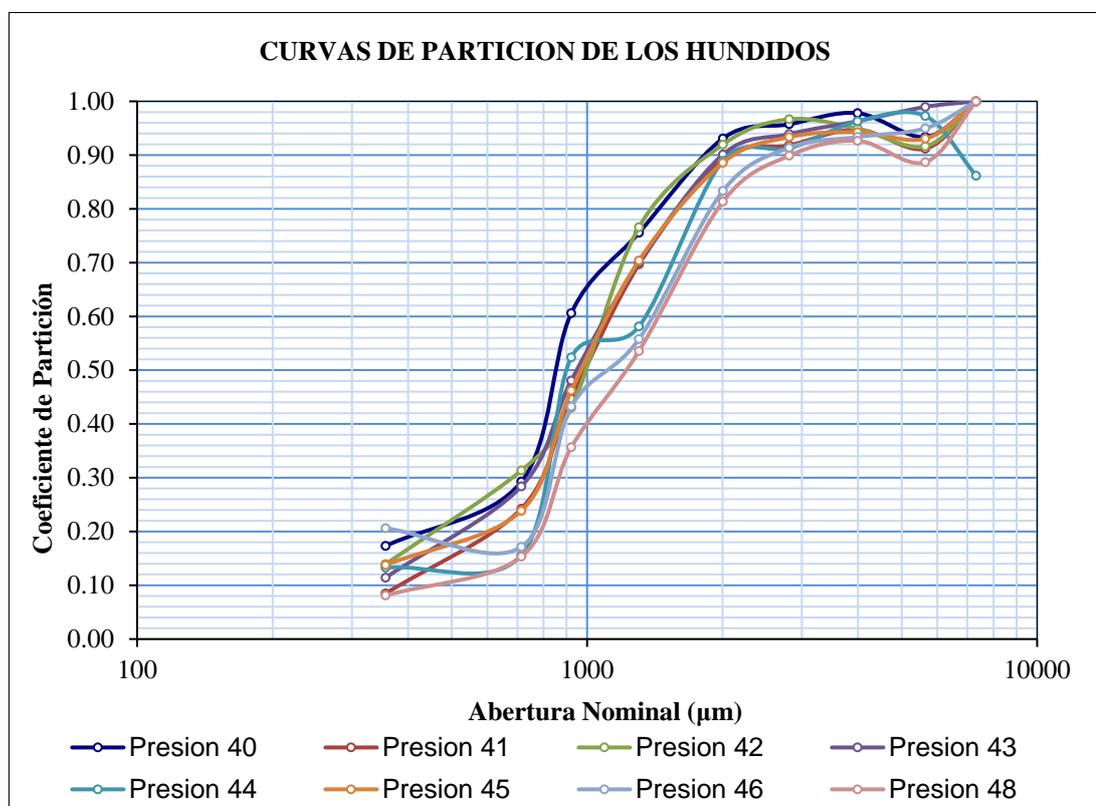


Figura 3.3: Curvas de partición de los hundidos variando la presión

3.2.3.1 Recuperación Total Vs Porcentaje De Hundidos

La recuperación y los porcentajes de hundidos obtenidas en el Underflow fueron graficados con respecto al incremento de la presión de trabajo. La recuperación tiene una tendencia hacia la caída, mientras el porcentaje de hundidos experimentaba un pequeño incremento, según el aumento de la presión. La figura 3.4 muestra las tendencias de estos dos resultados.

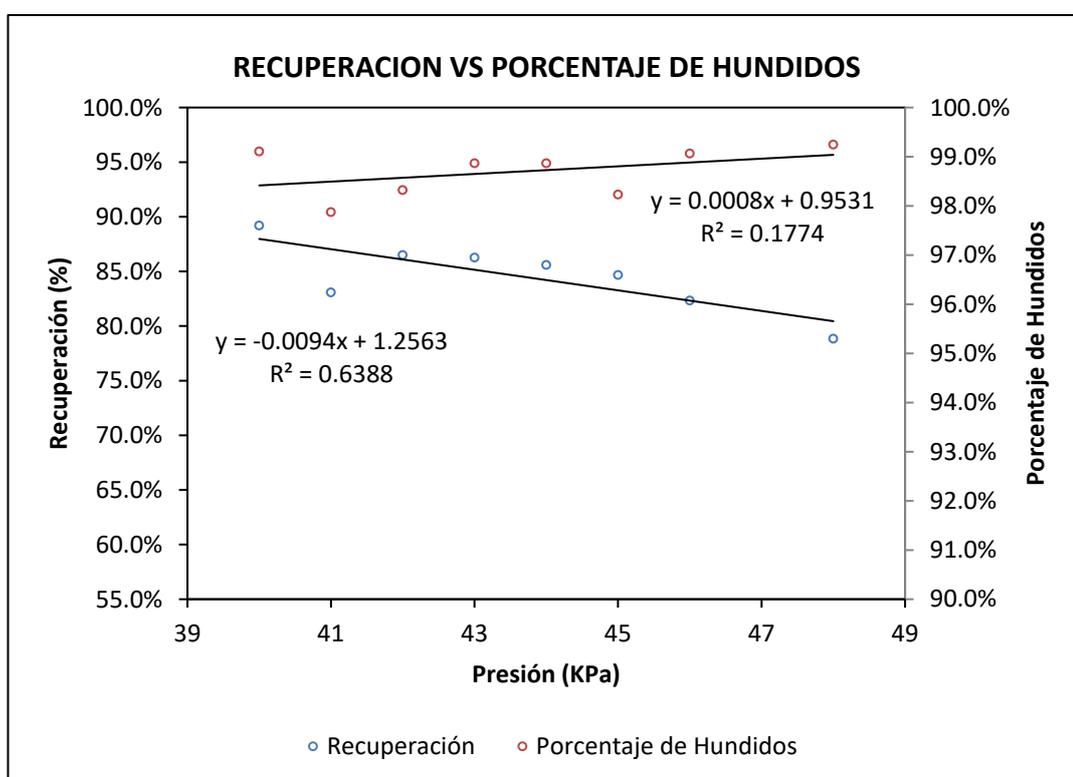


Figura 3.4: Recuperación vs porcentaje de Hundidos

3.2.3.2 Recuperación Por Rango De Mallas

La recuperación de las partículas en los distintos rangos de mallas (coeficientes de partición) fueron graficados con respecto a la presión de trabajo, obteniéndose la figura 3.5, donde el conjunto de rectas de los rangos (-8.0, +2.36 mm) permanecieron relativamente juntas, alcanzando valores por encima de 88% a una presión de 48 KPa. La recta del rango (-2.36, +1.7 mm) se aleja con una mayor pendiente negativa a comparación de las anteriores y obtiene una recuperación por debajo del 81%.

La recta del rango (-1.7, +1.0 mm), se alejó completamente obteniendo valores por debajo del 55% de la recuperación. La recta del rango (-1.0, +0.85 mm) obtuvo valores por debajo de 36% y finalmente la recta del rango (-0.85, +0.6 mm) bajo su recuperación por debajo de 16%.

La presencia de partículas por debajo de 0.6 mm es resultado de la baja eficiencia en la zaranda de lavado, por lo que será necesario evaluar el sistema o eliminarlo en el circuito de atrición.

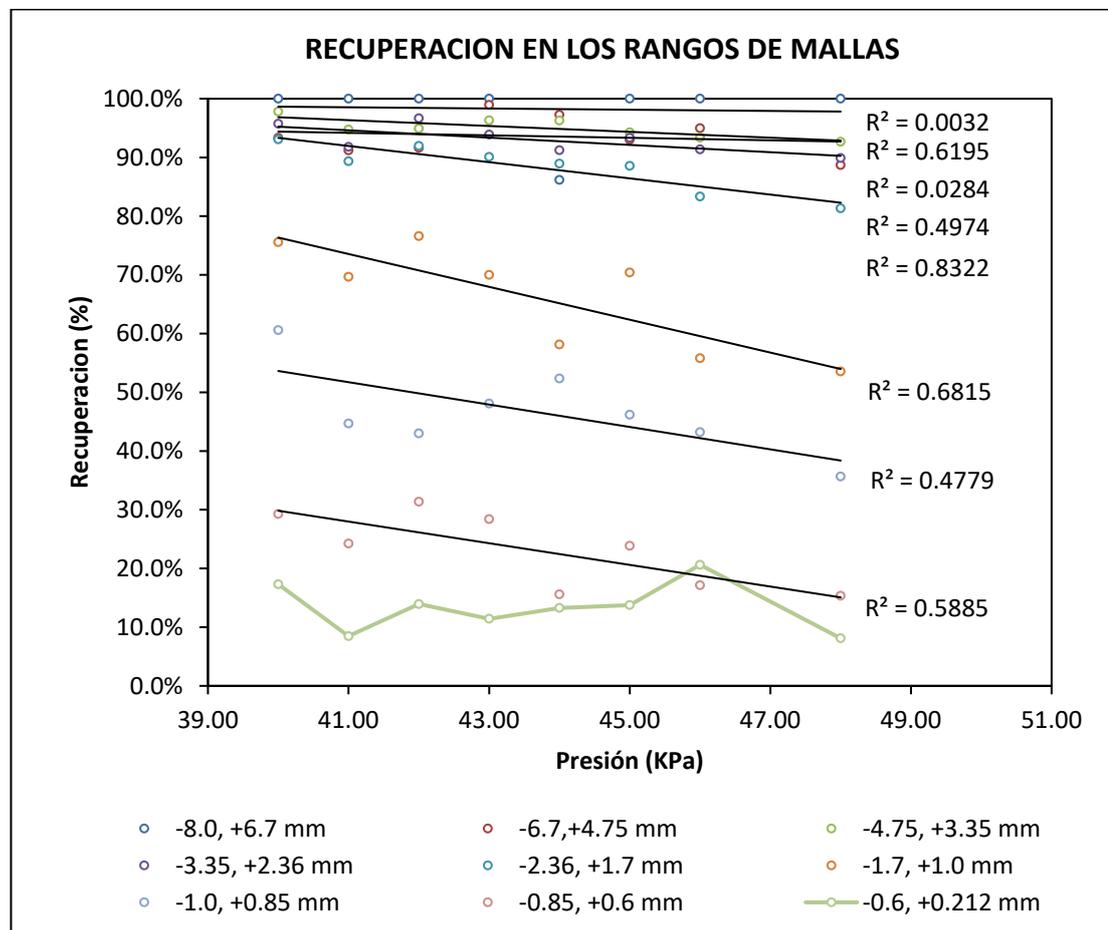


Figura 3.5: Recuperación en los rangos de mallas

3.2.3.3 Porcentaje De Hundidos Por Rango De Mallas

Los porcentajes de hundidos de todos los rangos de mallas del Underflow fueron graficados con respecto a la presión de trabajo, obteniéndose la figura 4.6, donde los valores de las rectas de los rangos de (-8.0, +1.7 mm) tuvieron valores cercanos y mayores a 98.0% con una pendiente positiva a una presión de 48 KPa. La recta del rango (-1.7, +1.0 mm) estuvo alejado de las anteriores también tuvo una pendiente positiva pero solo llego alcanzar el 97.5%. La recta del rango (-1.0, +0.85 mm) experimento una mayor pendiente logrando alcanzar un porcentaje de hundidos de 95.48%. La recta del rango (-0.85, +0.6 mm) experimento una pendiente negativa obteniendo valores por debajo de 85.65%.

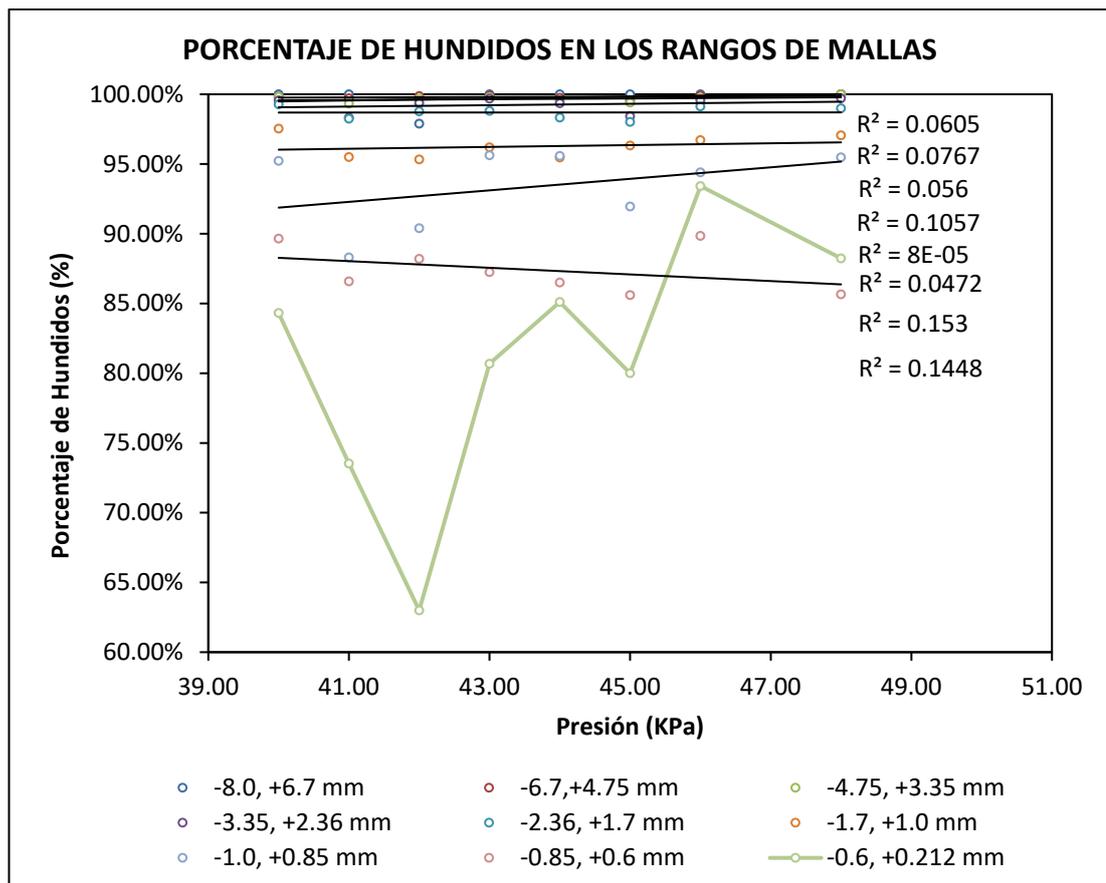


Figura 3.6: Porcentaje de Hundidos en los diferentes rangos de mallas

3.3 Separación por Medios Densos Variando la Presión

En esta prueba se trabajó con una densidad del medio de 2.48 g/cm^3 , presión de 48 KPa, y se varió la alimentación de mineral al Mixing Box con 34.85, 43.34, 48.14 y 52.17 Tph.

3.3.1 Resultados de las Pruebas de Distribución por Tamaño de Partícula

3.3.1.1 Alimentación al Mixing Box

El mineral que ingreso al circuito de separación por medios densos, se concentra principalmente en el rango de 6.7 mm a 1.0 mm con un porcentaje de masa que varía del 85.46% al 89.66%, las partículas mayores a 6.7 mm tienen un porcentaje menor a 2.35%, las partículas que se encuentran en el rango de 1.0 mm a 0.6 mm tienen un porcentaje que varía de 7.66% a 9.66%, y las partículas menores a 0.6 mm poseen un rango de 1.48% a 2.22%.

3.3.1.2 Underflow del Ciclón

El producto Underflow del circuito de separación por medios densos, se concentra en el rango de 6.7 mm a 1.0 mm con un porcentaje de masa que varía del 91.98% al 95.76%, las partículas mayores a 6.7 mm tienen un porcentaje menor a 5.09%, las partículas que están en el rango de 1.0 mm a 0.6 mm tienen un porcentaje que varía de 2.02% a 2.80%, y las partículas menores a 0.6 mm tienen en un rango de 0.10% a 0.13%.

3.3.1.3 Overflow del Ciclón

El producto Overflow del circuito de separación por medios densos, se concentró principalmente en el rango de 6.7 mm a 1.0 mm con un porcentaje de masa que varió del 84.36% al 89.34%, las partículas mayores a 6.7 mm tuvieron un porcentaje menor a 2.42%, las partículas que se encuentran en el rango de 1.0 mm a 0.6 mm

tienen un porcentaje que varía de 6.23% a 10.47%, y las partículas menores a 0.6 mm tienen en un rango de 0.64% a 1.1%.

3.3.2 Resultados de las Pruebas de separación por Líquidos Pesados

3.3.2.1 Alimentación al Mixing Box

Las leyes de alimentación para cada prueba fueron de: 19.68%, 15.21%, 18.0% y 21.42%, como se observa la ley en la segunda prueba disminuyó considerablemente, lo que generó un incremento de ley para partículas menores a 3.35 mm. El porcentaje de hundidos en cada rango de malla tuvo una distribución uniforme, pero en la segunda prueba hubo una caída en el rango (-8.0, +6.7 mm) siendo su valor 4.94%.

Más del 86.6% de mineral valioso se encuentra principalmente en el rango de malla (-6.7, +1.0 mm), donde las partículas del rango (-4.75, +3.35 mm) poseen el mayor porcentaje.

3.3.2.2 Underflow del Ciclón

Las leyes del Underflow variaron de 98.99% a 99.29%, en la segunda y tercera prueba se observó que las leyes fueron de 99.29% y 99.20%, esto obedeció a la cantidad de partículas finas que ingresaron en la alimentación, los cuales fueron de 1.65% y 1.48% sucesivamente.

En las pruebas se observó que a medida que se aumentaba la alimentación, mejoraba la calidad de los distintos rangos de las mallas, esto se consiguió hasta el rango (-8.0, +1.7 mm). Los valores mejoraron por encima del 99.0%.

En el rango (-1.7, +1.0 mm) los valores bajaron hasta 95.87, esta caída se da en todas las pruebas, llegando a obtener un valor de 96.10% en la cuarta prueba.

El mayor porcentaje del contenido de hundidos está en el rango (-6.7, +1.0 mm), con una variación en masa de 92.34% a 95.96%.

3.3.2.3 Overflow del Ciclón

Las leyes del Overflow obtenidos para cada prueba fueron: 6.9%, 5.4%, 5.1%, y 6.45%, el porcentaje de hundidos se mantuvo por debajo del 6.78% en el rango de (-8.0, +1.7 mm), En el rango (-1.7, +1.0 mm) el porcentaje de hundidos se incrementó por encima de 10.98% y alcanzó valores altos a medida que disminuyó su granulometría.

Más del 70% de la masa de hundidos se encuentra entre el rango (-2.36, +0.6 mm) y la mayor masa se concentra en el rango de malla (-1.7, +1.0 mm), alcanzando el 36.08% en la tercera prueba.

Tabla 3.10: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para una alimentación de 38.36 Tph

Abertura mm	Alimentación (%)			Underflow (%)			Overflow (%)		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	2.27	15.42	3.98	5.1	100.00	5.14	5.09	1.78	1.31
-6.7, +4.75	14.73	17.69	17.29	22.0	99.72	22.20	18.79	2.18	5.95
-4.75, +3.35	22.92	22.25	22.34	26.6	99.61	26.75	18.66	4.49	12.15
-3.35, +2.36	17.05	20.83	18.97	21.4	99.83	21.56	17.37	5.16	12.99
-2.36, +1.7	14.56	18.34	12.41	12.7	99.40	12.75	13.42	5.98	11.62
-1.7+1.0	17.54	19.58	15.60	9.3	96.83	9.08	16.71	12.66	30.66
-1.0, +0.85	3.59	19.47	4.08	1.7	85.17	1.44	4.52	15.56	10.20
-0.85, +0.6	5.44	20.93	4.22	1.1	88.54	1.01	4.43	18.15	11.65
-0.6, +0.212	1.40	34.84	1.10	0.1	80.00	0.07	0.71	33.97	3.47
-0.212	0.50			0.0			0.30		
Total	100.0	19.68	100.00	100.0	98.99	100.00	100.00	6.90	100.00

Tabla 3.11: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para una alimentación de 43.34 Tph

Abertura mm	Alimentación (%)			Underflow (%)			Overflow (%)		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	0.95	4.94	1.44	2.1	100.00	2.12	4.72	0.00	0.00
-6.7, +4.75	9.94	14.08	21.04	26.0	100.00	26.20	22.37	2.40	9.94
-4.75, +3.35	18.76	14.81	23.55	27.4	99.62	27.47	23.83	3.42	15.11
-3.35, +2.36	20.80	17.17	18.62	21.9	99.61	21.97	15.87	3.88	11.41
-2.36, +1.7	18.71	15.96	13.49	12.3	98.76	12.20	12.93	6.78	16.25
-1.7+1.0	21.22	17.81	15.07	8.2	98.28	8.11	13.42	12.07	30.01
-1.0, +0.85	3.29	16.12	4.04	1.3	89.44	1.21	4.10	13.31	10.11
-0.85, +0.6	4.69	17.51	2.28	0.7	93.97	0.65	2.13	14.61	5.77
-0.6, +0.212	1.22	18.15	0.48	0.1	90.91	0.06	0.44	16.96	1.40
-0.212	0.43			0.0			0.19		
Total	100.0	15.22	100.00	100.0	99.29	100.00	100.00	5.40	100.00

Tabla 3.12: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para una alimentación de 48.14 Tph

Abertura mm	Alimentación (%)			Underflow (%)			Overflow (%)		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	1.21	15.56	2.70	3.5	100.00	3.56	3.07	0.00	0.00
-6.7, +4.75	13.81	20.57	20.71	25.6	99.92	25.74	17.02	1.44	4.85
-4.75, +3.35	20.94	18.35	22.83	27.5	99.91	27.68	21.70	1.76	7.56
-3.35, +2.36	20.44	17.75	19.10	20.9	99.74	21.04	19.22	3.42	12.98
-2.36, +1.7	16.52	16.88	13.45	12.2	99.05	12.21	14.76	5.95	17.35
-1.7+1.0	17.94	17.17	14.66	8.1	95.87	7.86	16.63	10.98	36.08
-1.0, +0.85	3.51	19.51	3.25	1.2	90.55	1.12	3.30	15.26	9.95
-0.85, +0.6	4.15	15.95	2.85	0.8	90.61	0.72	3.63	13.35	9.56
-0.6, +0.212	1.21	17.37	0.45	0.1	90.00	0.07	0.54	15.77	1.67
-0.212	0.26			0.0			0.13		
Total	100.0	18.09	100.00	100.0	99.20	100.00	100.00	5.06	100.00

Tabla 3.13: Resultados de las Pruebas de PSD y HLS para una alimentación de 52.17 Tph

Abertura mm	Alimentación (%)			Underflow (%)			Overflow (%)		
	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución	Peso	Hundidos	Distribución
-8.0, +6.7	2.35	10.47	1.60	2.1	100.00	2.15	3.51	0.00	0.00
-6.7, +4.75	11.74	21.99	16.61	20.2	99.69	20.29	15.42	2.39	5.70
-4.75, +3.35	17.57	25.77	22.29	27.0	99.88	27.23	16.90	2.92	7.65
-3.35, +2.36	19.38	22.28	19.68	22.5	99.56	22.63	18.23	3.87	10.93
-2.36, +1.7	16.16	20.43	14.75	15.2	99.23	15.26	15.53	5.51	13.25
-1.7+1.0	20.61	19.74	15.79	10.1	96.10	9.85	18.48	11.65	33.37
-1.0, +0.85	4.38	19.66	3.98	1.6	93.43	1.54	4.86	14.89	11.22
-0.85, +0.6	5.58	19.39	4.41	1.1	88.18	0.98	5.61	16.77	14.58
-0.6, +0.212	1.93	18.12	0.88	0.1	94.74	0.07	1.23	17.27	3.30
-0.212	0.30			0.0			0.23		
Total	100.0	21.428	100.00	100.0	99.01	100.00	100.00	6.45	100.00

3.3.3 Coeficientes de Partición del porcentaje de Hundidos

La figura 3.7 muestra las cuatro curvas de partición que fueron generadas a partir del cambio en la alimentación al Mixing Box. La curva de partición para una alimentación de 50 Tph, muestra una recuperación de 90.06% a un tamaño de 7321 μm .

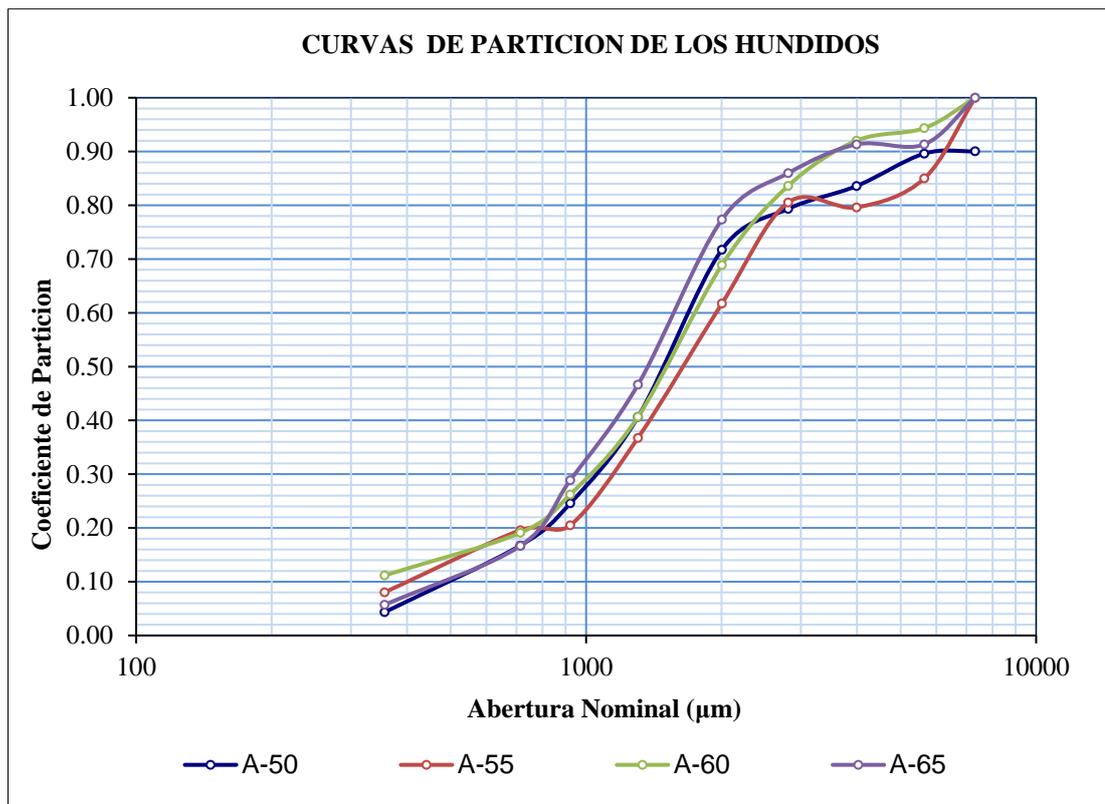


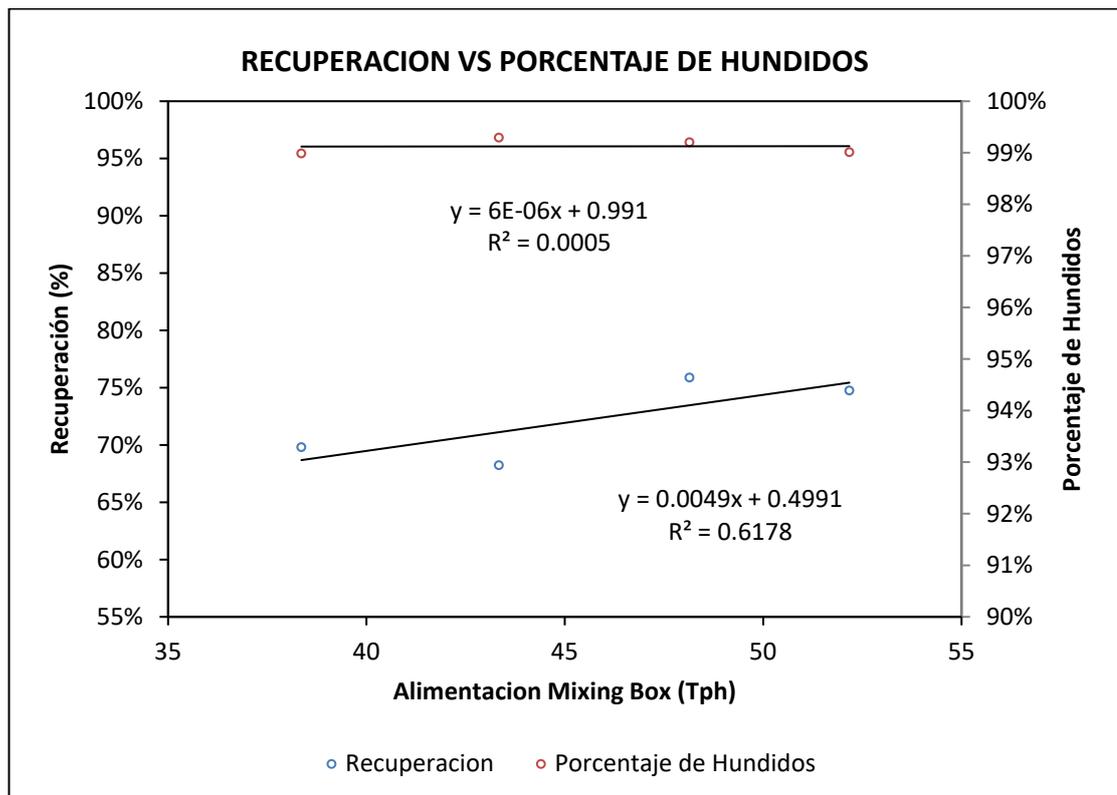
Figura 3.7: Curvas de partición de los hundidos, variando la alimentación

3.3.3.1 Recuperación Total Vs Porcentaje De Hundidos

La recuperación mejoró, mientras el porcentaje de hundidos experimentó un mínimo incremento, según el aumento de la alimentación. La figura 3.8 muestra las tendencias de estos dos resultados.

Tabla 3.14: Coeficientes de partición Variando la alimentación

Máximo	Abertura (x) μm		Coeficiente de Partición de los Hundidos (%)			
	Mínimo	Promedio	Feed 50	Feed 55	Feed 60	Feed 65
8000	6700	7321	90.1	100.0	100.0	100.0
6700	4750	5641	89.6	85.0	94.4	91.3
4750	3350	3989	83.6	79.6	92.0	91.3
3350	2360	2812	79.3	80.5	83.6	86.0
2360	1700	2003	71.7	61.7	68.9	77.3
1700	1000	1304	40.6	36.7	40.7	46.6
1000	850	922	24.6	20.5	26.2	28.9
850	600	714	16.7	19.6	19.1	16.7
600	212	357	4.3	8.0	11.2	5.7
212	0	106	0.0	0.0	0.0	0.0

**Figura 3.8:** Recuperación vs porcentaje de Hundidos

3.3.3.2 Recuperación Por Rango De Mallas

La figura 3.9, muestra las rectas de las cuatro pruebas (variado la alimentación), donde el conjunto de rectas de los rangos (-8.0, +2.36 mm) se han alejado entre sí, estas rectas tienen la tendencia a mejorar pero solo consiguen superar el 85% en la cuarta prueba la menor de ellas.

La recta del rango (-2.36, +1.7 mm) está alejada de las anteriores, posee una pendiente positiva, pero solo obtiene una recuperación de 77%.

La recta del rango (-1.7, +1.0 mm), se alejó completamente obteniendo valores por debajo del 47% de la recuperación. La recta del rango (-1.0, +0.85 mm) obtuvo valores por debajo de 30% y finalmente la recta del rango (-0.85, +0.6 mm) donde sus valores estuvieron por debajo de 20%.

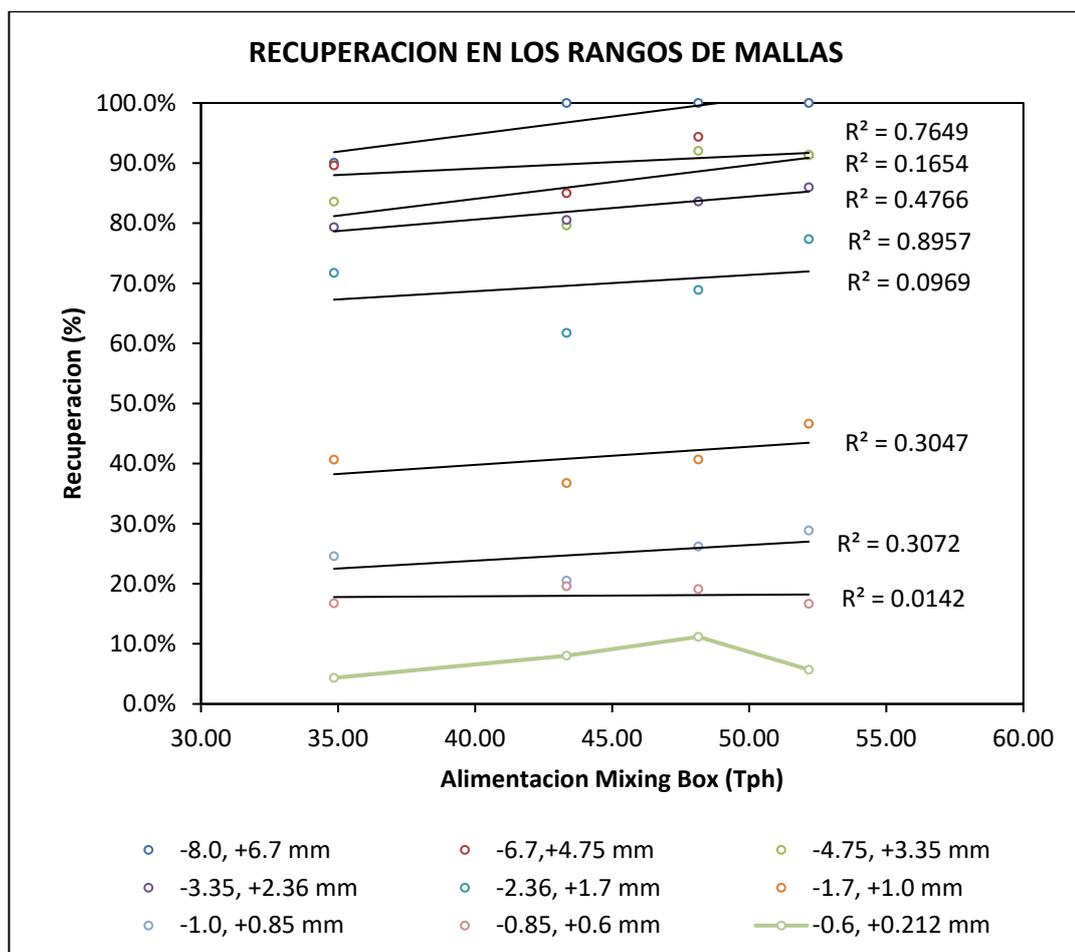


Figura 3.9: Recuperación en los rangos de las mallas

3.3.3.3 Porcentaje De Hundidos Por Rango De Mallas

La figura 3.10, muestra las rectas de los rangos de (-8.0, +1.7 mm), se observó que el porcentaje de hundidos está sobre el 98.76%. La recta del rango (-1.7, +1.0 mm) está alejado de las anteriores y poseyó una pendiente negativa.

La recta del rango (-1.0, +0.85 mm) experimento una pendiente positiva logrando alcanzar un porcentaje de hundidos de 93.43%. La recta del rango (-0.85, +0.6 mm) experimento una pendiente negativa obteniendo valores por debajo de 93.97% en la segunda prueba.

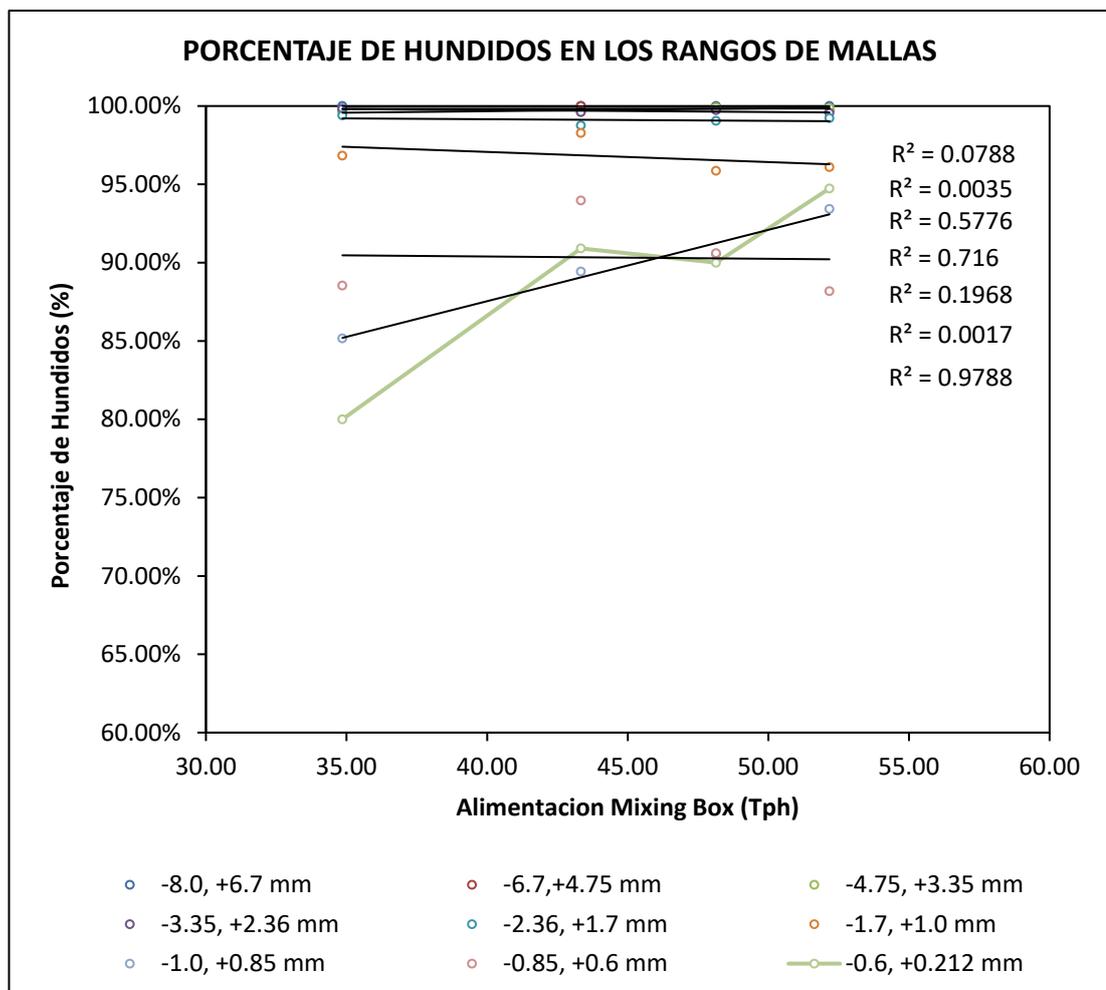


Figura 3.10: Porcentaje de Hundidos en los diferentes rangos de mallas

3.4 Prueba de Tracers

Se realizó la prueba de los Tracers (trazadores), para ello se utilizó 100 trazadores de cada densidad (2.50, 2.60, 2.70, 2.80, 2.90, 3.00, 3.10, 3.20, 3.30, 3.40 y 3.53 g/cm³). La prueba consistió en operar el DMS con una presión de 49 y 52 KPa, variando la densidad del medio con los valores de (2.30, 2.35, 2.40, 2.45 y 2.50 g/cm³)

3.4.1 Procedimiento de la prueba de los tracers

Se llevó el circuito de medios densos a los parámetros especificados (Presión 49 KPa y Densidad 2.30 g/cm³).

Se aseguró que la densidad y presión de trabajo estén estables.

Se contó 100 tracers de cada densidad, especificados por colores.

Se registraron los parámetros de:

- Presión del Hidrociclón.
- Densidad de alimentación del medio.
- Densidad del Underflow.
- Densidad de Overflow.

Se colocó los tracers en un balde de 4 litros y se echó al Mixing Box, luego se recogió en las zarandas del Underflow y Overflow por separados.

El proceso se repitió para las cinco densidades mencionadas y se cambió la presión a 52 Kpa y se volvió a repetir el mismo proceso.

Se contó los tracers dentro de cada fracción de densidad y se calculó los coeficientes de partición para cada producto de la siguiente manera.

$$C.P. = \frac{N^{\circ} \text{ Tracers Underflow}}{N^{\circ} \text{ Tracers Underflow} + N^{\circ} \text{ Tracers Overflow}} \dots \dots \dots (3.1)$$

Trazar los puntos en un gráfico Densidad vs Coeficiente de partición y hallar el punto de corte (d₅₀) y el E_p.



Figura 3.11: Tracers de densidades 2.50, 2.60, 2.70, 2.80, 2.90, 3.00, 3.10, 3.20, 3.30, 3.40 y 3.53 g/cm³

3.4.2 Resultados de la prueba de los tracers

A una presión de 49 KPay una densidad de 2.3 g/cm³ la densidad de corte o d_{50} es de 2.96 g/cm³ y el E_p posee un valor de 0.028, y a medida que se aumenta la densidad del medio se incrementa la densidad del corte y el E_p hasta un valor máximo de 0.047, luego del cual empieza a disminuir.

A una presión de 52KPay una densidad de 2.3 g/cm³ el d_{50} es de 2.97 g/cm³ y el E_p posee un valor de 0.033, y a medida que se aumenta la densidad del medio también incrementa la densidad del corte y el E_p obteniéndose un valor máximo de 0.053, luego del cual empieza a disminuir, estos nuevos valores son superiores a las pruebas anteriores.

Tabla 3.15. Parámetros obtenidos a presión 49 Kpa

Parámetros	Prueba 01	Prueba 02	Prueba 03	Prueba 04	Prueba 05
Densidad del Medio (g/cm^3)	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50
Probable Error (Ep)	0.028	0.045	0.04	0.047	0.04
Densidad de Corte (g/cm^3)	2.96	2.98	3.00	3.02	3.06
Presión (Kpa)	49.0	49.0	49.0	49.0	49.0
Densidad Underflow (g/cm^3)	2.88	2.98	3.09	3.09	2.95
Densidad Overflow (g/cm^3)	2.20	2.22	2.30	2.34	2.35

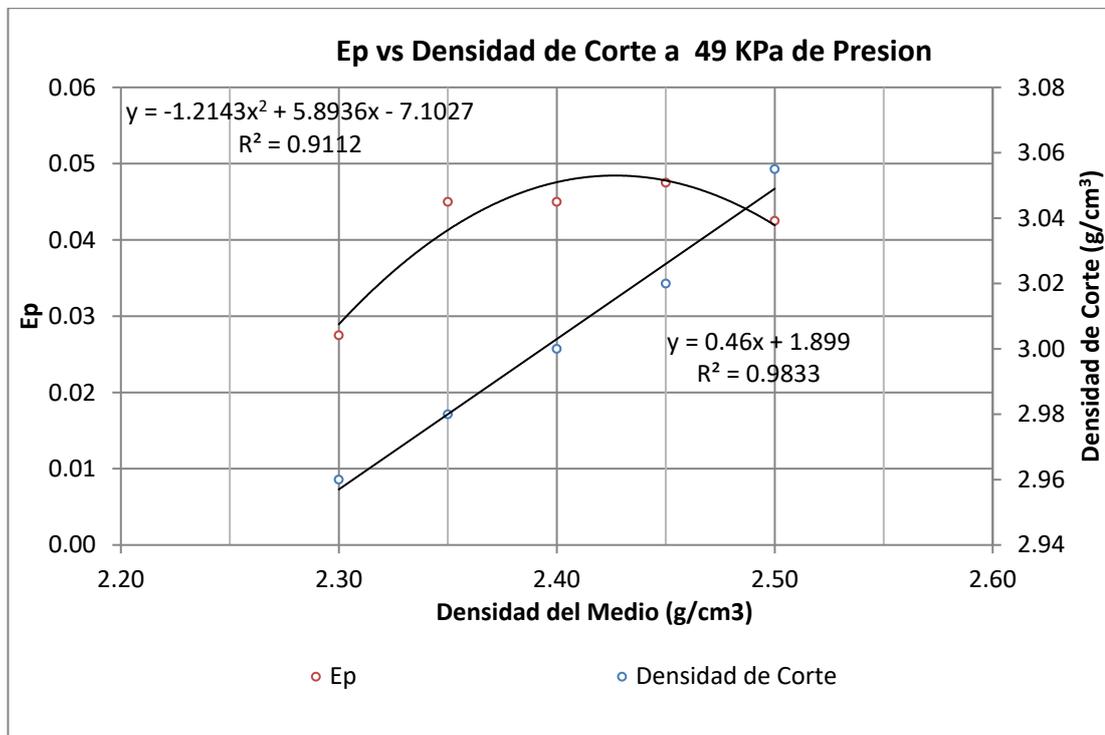
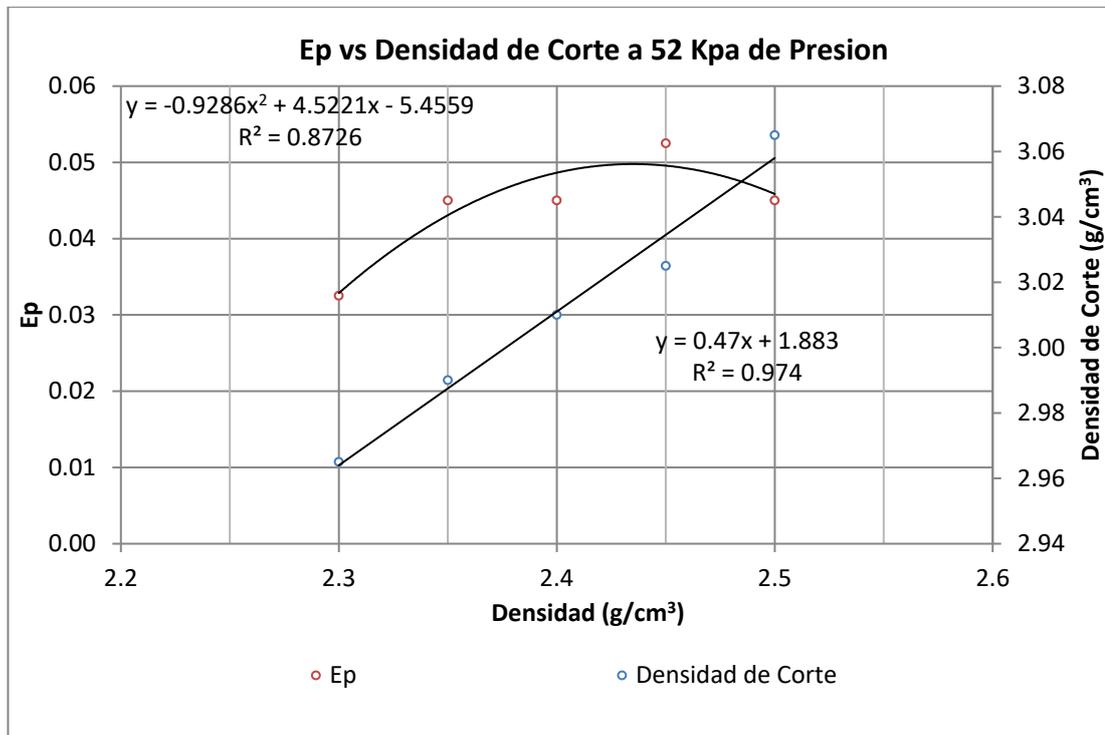
**Figura 3.12:** Ep vs densidad de corte a 49 KPa de Presión

Tabla 3.16. Parámetros obtenidos a presión 52 Kpa

Parámetros	Prueba 01	Prueba 02	Prueba 03	Prueba 04	Prueba 05
Densidad del Medio (g/cm ³)	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50
Probable Error (Ep)	0.033	0.045	0.045	0.053	0.045
Densidad de Corte (g/cm ³)	2.97	2.99	3.01	3.03	3.07
Presión (Kpa)	52.0	52.0	52.0	52.0	52.0
Densidad Underflow (g/cm ³)	3.00	3.07	3.05	3.06	3.20
Densidad Overflow (g/cm ³)	2.21	2.25	2.26	2.30	2.39

**Figura 3.13:** Ep vs densidad de corte a 52 KPa de Presión

3.5 Análisis Valorado por densidades

En esta sección se analizó los distintos productos obtenidos en la separación por medios densos del grano (-8.0, +0.6 mm), para ello se trabajó con los mejores parámetros conseguidos.

3.5.1 Muestreo

El muestreo se realizó en los mismos puntos indicados en la prueba de la sección 3.1.1, como son: la entrada del Mixing Box (02-MBX-01), el rebose de la zaranda del Overflow del ciclón (02-SCR-02), y el rebose de la zaranda del Underflow del ciclón (02-SCR-03). El muestreo tuvo una duración de 4 horas por cada punto, con un periodo de 20 minutos y los pesos de las muestras variaron de 20 a 30 Kg.

3.5.2 Preparación De Muestras

Las muestras fueron secadas y pesadas para luego ser cuarteadas, el peso inicial tanto para el Underflow y Overflow fue aproximadamente 10 Kg y para el alimento 5 Kg. Esta decisión en la cantidad del peso de las muestras obedeció a la escasa masa de hundidos que se tiene en los flotados y la masa de flotados en los hundidos.

3.5.3 Prueba de líquidos pesados (HLS)

Las muestras fueron pasados en húmedo por la malla con abertura 0.6 mm, para luego ser divididas con TBE a una densidad de 2.96 g/cm³. Las partículas mayores a esta densidad fueron divididas por densidades por el método de suspensión (TBE y Ferrosilicio), mientras que las partículas menores fueron divididas usando una mezcla de (Aguarrás y TBE).

Para alcanzar las densidades superiores a 2.96 g/cm³, se utilizó una mezcla de Ferrosilicio Atomizado (<25 µm) y Tetrabromoetano (TBE), las densidades fueron corroboradas con los Tracers. Las densidades alcanzadas fueron: 3.0, 3.05, 3.10, y 3.15.

Para obtener densidades menores a 2.96 g/cm^3 se utilizó una combinación de Tetrabromoetano y Aguarrás, este último con una densidad de 0.8 g/cm^3 . Las densidades conseguidas fueron: 2.90, 2.85, 2.80, 2.75, 2.70, 2.65 y 2.60. La figura 3.15 muestra el procedimiento de preparación de la prueba HLS.



Figura 3.14: Combinación de TBE y Aguarrás

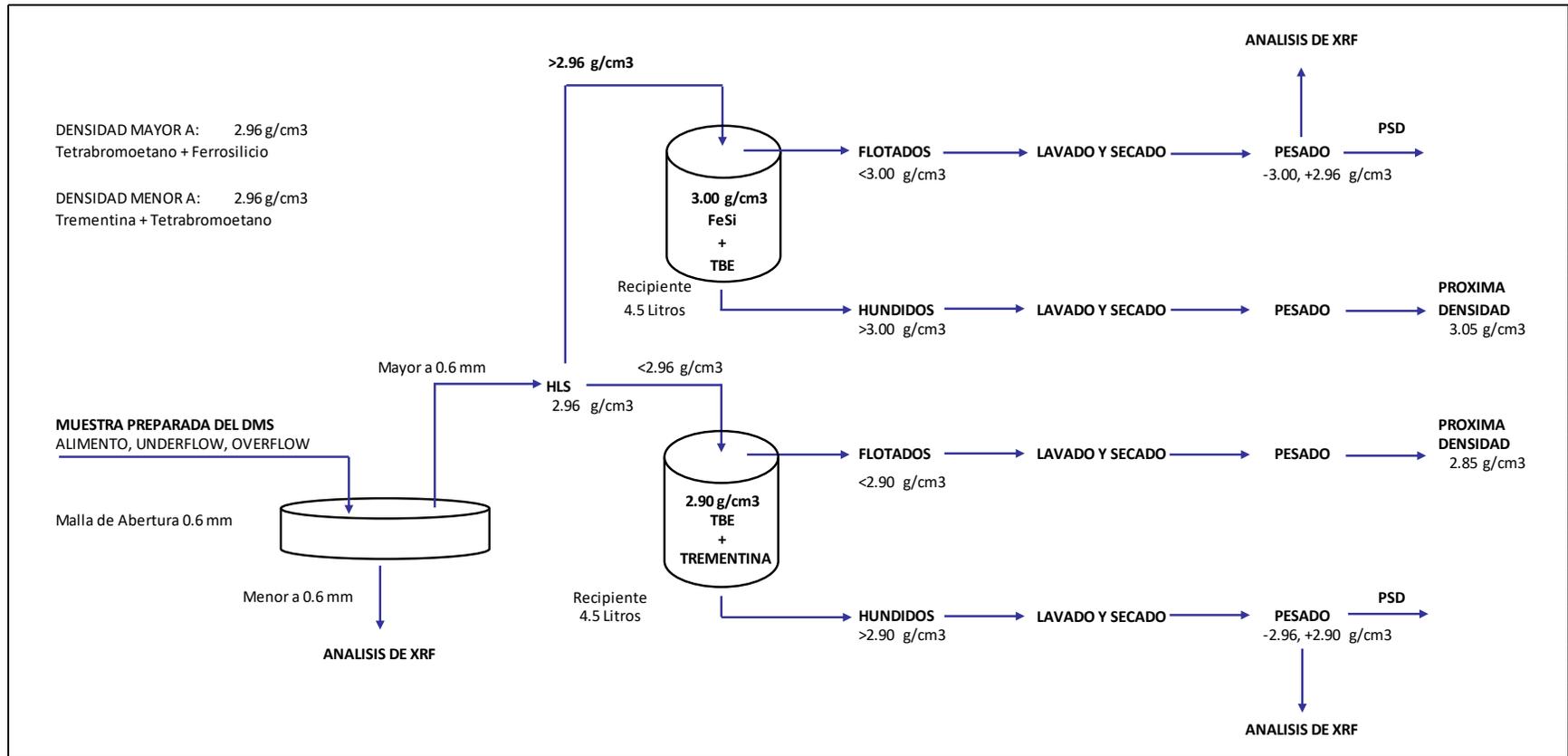


Figura 3.15: Diagrama de flujo del procedimiento de HLS

3.5.4 Análisis De Fluorescencia De Rayos X (XRF)

Las briquetas de las distintas muestras fueron analizadas por el equipo de fluorescencia de rayos X, para hallar los valores de óxidos: Aluminio (Al_2O_3), Hierro (Fe_2O_3), silicio (SiO_2), potasio (K_2O), sodio (Na_2O), magnesio (MgO), calcio (CaO), y manganeso (MnO).

3.5.5 Resultados de las Pruebas de separación por Líquidos Pesados

Los datos obtenidos fueron corregidos por el método de multiplicadores de Lagrange, para luego hallar los coeficientes de partición. La tabla 3.17 muestra el porcentaje en masa de los distintos productos obtenidos en distintos rangos de densidades.

El mineral alimento se concentró principalmente en el rango de $(-2.65, +2.60 \text{ g/cm}^3)$, con un 68.95%, en el rango $(-3.15, +3.05 \text{ g/cm}^3)$, se agrupó el 20.73% y todo el rango $(-2.90, +2.70 \text{ g/cm}^3)$, solo tenía 2.07%. En el Underflow la mayor concentración estuvo en el rango $(-3.15, +3.05 \text{ g/cm}^3)$, con un 88.32%. En el Overflow la masa se concentró en 87.0% en el rango $(-2.65, +2.60 \text{ g/cm}^3)$.

3.5.6 Resultados de los análisis de Fluorescencia De Rayos X

3.5.6.1 Alimentación

Con una densidad de corte de 2.90 g/cm^3 , la ley de Al_2O_3 sería 58.46 %, y se obtendría una recuperación de 92.14 %, si la densidad de corte sube a 2.96 % la ley de Al_2O_3 subiría a 59% y la recuperación bajaría a 88.15%. La densidad de corte está ligado principalmente al contenido de flotados en el Underflow (contenido de SiO_2 en el producto final).

La ley de Fe_2O_3 se concentra principalmente en las partículas con densidades mayores a 3.15 g/cm^3 en 3.24 %, y en las partículas con rango $(-3.00, +2.65 \text{ g/cm}^3)$ varían de 2.18 % a 8.01 %. Su mayor contenido se agrupa en los rangos

(-3.15, +3.10 g/cm³) y (-2.65, +2.60 g/cm³) con porcentajes de 12.49 % y 38.50 % sucesivamente.

El 84.82 % del contenido de Al₂O₃ se encuentra en el rango de (-3.15, +3.00 g/cm³), donde el contenido de Fe₂O₃ es de 23.95 %, y en el rango de (-2.65, +2.60 g/cm³), el contenido de Al₂O₃ es de 0.04 % y el contenido de Fe₂O₃ es de 38.50 %.

3.5.6.2 Underflow

El Underflow obtuvo una ley total de Al₂O₃ de 58.92%, por encima de 2.96 g/cm³ la ley fue mayor a 59.55%, el rango de mayor concentración fue (-3.20, +3.00 g/cm³) con una ley de 59.73% y un contenido de 97.38% Al₂O₃.

La ley de Fe₂O₃ por encima de 3.15 g/cm³, fue de 5.12% y el 92.91% de su contenido se concentró en la densidad mayor a 3.0 g/cm³.

Tabla 3.17. Resultados de las pruebas HLS corregidos para el alimento, Underflow y Overflow

Rango Densidades (g/cm ³)	Densidad Promedio (g/cm ³)	Peso Corregido (%)		
		Alimento	Overflow	Underflow
-3.20,+3.15	3.17	0.57	0.19	2.02
-3.15, +3.10	3.12	14.12	1.47	61.97
-3.10, +3.05	3.07	6.61	1.39	26.35
-3.05, +3.00	3.02	2.13	1.07	6.11
-3.00, +2.96	2.98	1.17	0.91	2.15
-2.96, +2.90	2.93	1.10	1.30	0.34
-2.90, +2.85	2.87	0.62	0.76	0.09
-2.85, +2.80	2.82	0.63	0.79	0.05
-2.80, +2.75	2.77	0.33	0.41	0.01
-2.75, +2.70	2.72	0.49	0.62	0.01
-2.70, +2.65	2.67	1.26	1.57	0.05
-2.65, +2.60	2.62	68.95	87.00	0.70
-2.60, +2.50	2.55	2.03	2.52	0.14
Total		100.00	100.00	100.00

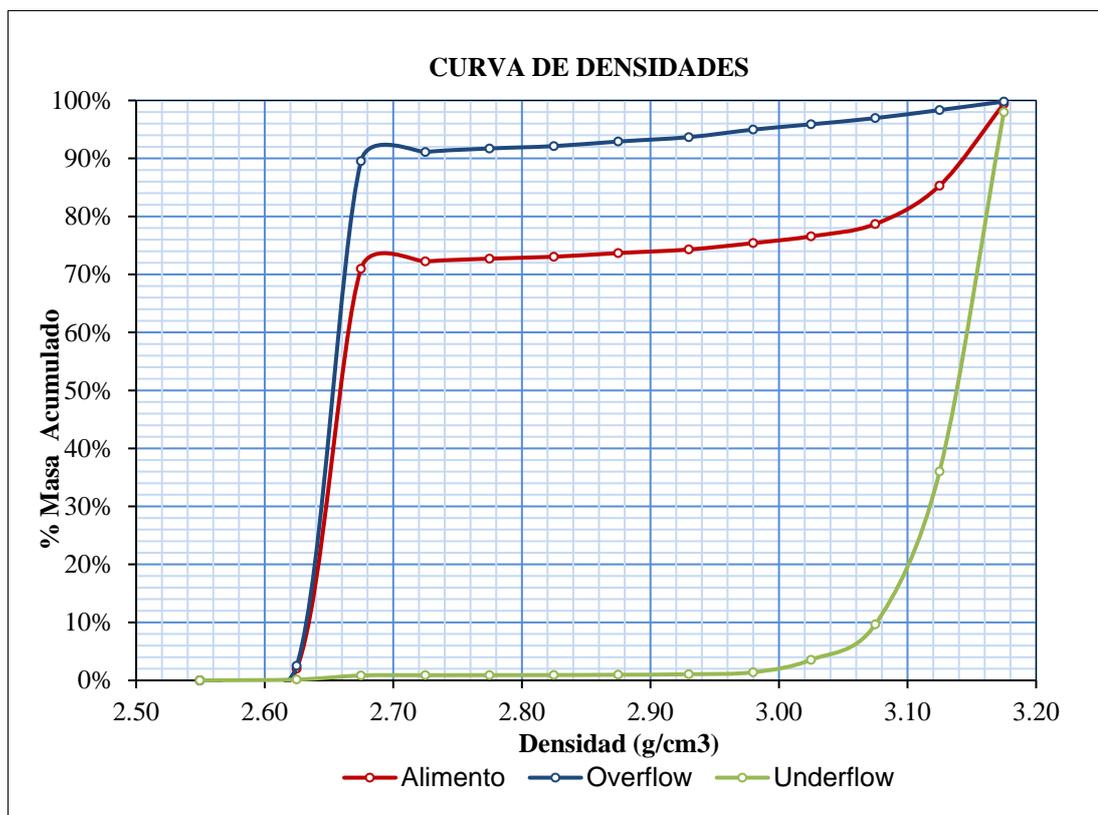


Figura 3.16: Curva de densidades para el Alimento Underflow y Overflow

3.5.6.3 Overflow

Por encima de la densidad de 3.00 g/cm^3 , posee una ley 57.06% de Al_2O_3 , con un contenido de 46.16% y una ley de Fe_2O_3 de 1.39% con 5.91% de su contenido. El mayor contenido de Al_2O_3 se concentra en el rango $(-3.15, +2.90 \text{ g/cm}^3)$, con un 65.37% .

El Fe_2O_3 se ha concentrado en el rango $(-2.65, +2.60 \text{ g/cm}^3)$ con 48.52% de su contenido. La ley total de Fe_2O_3 de 0.97% .

3.5.7 Alimentación reconstruida y coeficientes de partición

Los datos de tabla 3.17 fueron normalizados y se obtuvieron los coeficientes de partición, y la distribución en masa de los tres productos.

La alimentación reconstruida y la alimentación normal son comparadas, y ambos conjuntos de datos coinciden, con la mayor parte de material a una densidad de 2.62 g/cm^3 y 3.10 g/cm^3 .

Tabla 3.24: Resultados de la alimentación reconstruida y partición

Densidad (g/cm^3)		Hundidos	Flotados	Alimentación Reconstruida	Alimentación	Coeficientes Partición
Rango	Promedio					
+3.15*	3.17	0.42	0.15	0.57	1.00	73.71
-3.15, +3.10	3.12	12.96	1.16	14.12	15.48	91.78
-3.10, +3.05	3.07	5.51	1.10	6.61	4.46	83.41
-3.05, +3.00	3.02	1.28	0.85	2.13	2.19	60.10
-3.00, +2.96	2.98	0.45	0.72	1.17	1.08	38.49
-2.96, +2.90	2.93	0.07	1.03	1.10	1.28	6.55
-2.90, +2.85	2.87	0.02	0.60	0.62	0.57	2.97
-2.85, +2.80	2.82	0.01	0.62	0.63	0.63	1.63
-2.80, +2.75	2.77	0.00	0.32	0.33	0.44	0.94
-2.75, +2.70	2.72	0.00	0.49	0.49	0.71	0.54
-2.70, +2.65	2.67	0.01	1.25	1.26	1.54	0.84
-2.65, +2.60	2.62	0.15	68.80	68.95	69.47	0.21
-2.60	2.55	0.03	2.00	2.03	1.13	1.46
Total		20.92	79.08	100.00	100.00	

Las curvas de partición presentan una densidad de corte de 3.0 g/cm^3 , y un E_p de 0.048.

3.5.6.1 Evaluación del desempeño de la planta

De la Tabla 3.25 a la tabla 3.27 representan los datos de tamaño por densidad para las muestras de alimentación de DMS, hundidos y flotados.

Estas tablas fueron construidas a partir de los datos de tamaño de partículas de cada fracción pesada de los análisis HLS. La masa se divide (flotados 79.08% y hundidos 20.92%) para cada fracción se utilizaron como base la medición directa, y la distribución de tamaño reconstituido. La distribución del tamaño reconstituido no tiene mucha variación con los valores medidos.

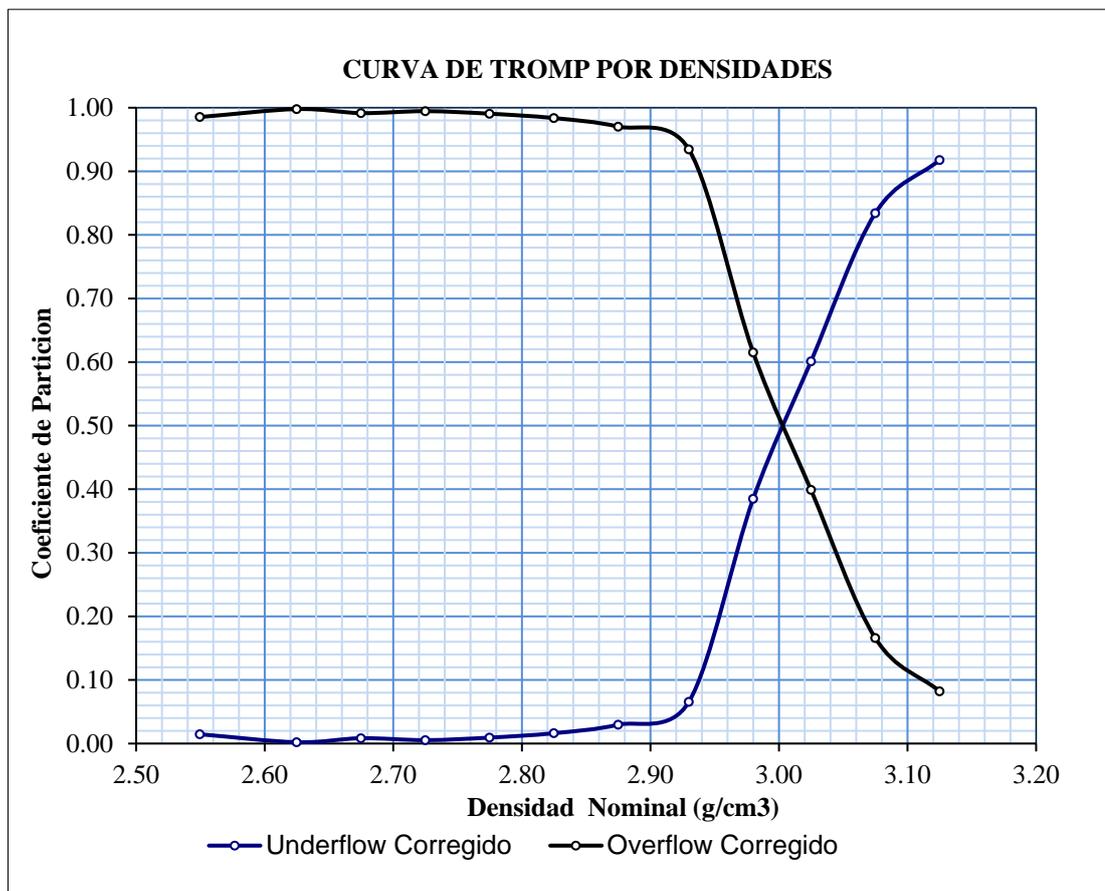


Figura 3.17: Curva de Tromp por densidades

Tabla 3.25: Alimentación del DMS

			Densidad Relativa (g/cm ³)										
Alimentación DMS			Máximo	2.65	2.80	2.96	3.00	3.05	3.10	3.15	3.20		
			Mínimo	2.50	2.65	2.80	2.96	3.00	3.05	3.10	3.15		
Tamaño (mm)			Densidad promedio (g/cm ³)								Total		
Máximo	Mínimo	Promedio	2.57	2.72	2.88	2.98	3.02	3.07	3.12	3.17	Reconstruido	Feed	
8.000	6.700	7.32	1.69	0.00	0.03	0.02	0.01	0.08	0.41	0.00	2.23	2.14	
6.700	4.750	5.64	9.03	0.13	0.23	0.20	0.18	0.78	2.45	0.12	13.12	13.83	
4.750	3.350	3.99	13.59	0.45	0.32	0.25	0.31	1.14	3.10	0.18	19.34	19.34	
3.350	2.360	2.81	13.67	0.38	0.29	0.21	0.33	0.94	3.26	0.04	19.11	19.86	
2.360	1.700	2.00	11.81	0.41	0.33	0.15	0.30	0.67	2.63	0.10	16.42	17.05	
1.700	1.000	1.30	14.00	0.64	0.64	0.16	0.54	0.60	2.59	0.39	19.55	19.32	
1.000	0.850	0.92	2.57	0.18	0.18	0.03	0.18	0.10	0.40	0.13	3.78	3.87	
0.850	0.600	0.71	4.26	0.50	0.45	0.05	0.35	0.16	0.63	0.04	6.44	4.60	
Total			70.61	2.69	2.48	1.08	2.19	4.46	15.48	1.00	100.00	100.00	

Tabla 3.26: Underflow del DMS

Densidad Relativa (g/cm ³)												
Underflow DMS		Máximo	2.65	2.80	2.96	3.00	3.05	3.10	3.15	3.20		
		Mínimo	2.50	2.65	2.80	2.96	3.00	3.05	3.10	3.15		
Tamaño (mm)			Densidad promedio (g/cm ³)								Total	
Máximo	Mínimo	Promedio	2.57	2.72	2.88	2.98	3.02	3.07	3.12	3.17	Reconstruido	Feed
8.000	6.700	7.32	0.00	0.00	0.01	0.08	0.21	1.45	1.94	0.00	3.68	2.99
6.700	4.750	5.64	0.00	0.00	0.05	0.37	0.83	5.58	10.05	0.10	16.97	18.07
4.750	3.350	3.99	0.04	0.00	0.11	0.76	1.12	6.05	14.67	0.66	23.42	23.48
3.350	2.360	2.81	0.09	0.00	0.09	0.44	1.22	5.77	12.89	0.07	20.57	21.14
2.360	1.700	2.00	0.14	0.01	0.06	0.24	0.97	4.08	10.64	0.22	16.35	17.17
1.700	1.000	1.30	0.34	0.02	0.09	0.18	1.15	3.34	9.25	0.66	15.04	14.19
1.000	0.850	0.92	0.09	0.01	0.03	0.03	0.27	0.39	1.01	0.13	1.96	1.90
0.850	0.600	0.71	0.14	0.02	0.04	0.06	0.31	0.36	1.07	0.01	2.02	1.06
		Total	0.85	0.07	0.48	2.14	6.08	27.02	61.50	1.86	100.00	100.00

Tabla 3.27: Overflow del DMS

Overflow DMS		Densidad Relativa (g/cm ³)									Total	
		Máximo	2.65	2.80	2.96	3.00	3.05	3.10	3.15	3.20		
		Mínimo	2.50	2.65	2.80	2.96	3.00	3.05	3.10	3.15		
Tamaño (mm)			Densidad promedio (g/cm ³)									
Máximo	Mínimo	Promedio	2.57	2.72	2.88	2.98	3.02	3.07	3.12	3.17	Reconstruido	Feed
8.000	6.700	7.32	2.65	0.05	0.10	0.04	0.03	0.01	0.00	0.00	2.88	2.04
6.700	4.750	5.64	12.18	0.21	0.24	0.21	0.10	0.06	0.00	0.00	12.99	12.67
4.750	3.350	3.99	18.26	0.22	0.53	0.23	0.12	0.10	0.02	0.00	19.50	17.73
3.350	2.360	2.81	17.24	0.36	0.39	0.18	0.15	0.17	0.06	0.00	18.54	18.63
2.360	1.700	2.00	14.56	0.34	0.36	0.12	0.16	0.25	0.11	0.00	15.89	17.19
1.700	1.000	1.30	16.88	0.57	0.58	0.12	0.29	0.60	0.55	0.02	19.60	21.69
1.000	0.850	0.92	2.96	0.17	0.18	0.02	0.08	0.16	0.23	0.03	3.84	5.16
0.850	0.600	0.71	4.93	0.49	0.47	0.03	0.14	0.23	0.40	0.09	6.76	4.88
Total			89.66	2.40	2.84	0.94	1.07	1.59	1.37	0.14	100.00	100.00

Las figuras de 3.18 y 3.19 muestran el comportamiento del ciclón DMS mediante el uso de las curvas de Tromp y partición respectivamente.

La figura 3.18, muestra las curvas de Tromp por tamaño de partícula, calculado a partir de los datos de las pruebas HLS. Las curvas muestran que la ruptura ocurre demasiado pronto como el material se hace más fino, esto ocurre por debajo de las partículas de tamaño 1.3mm.

La figura 3.19 muestra las curvas de partición por densidades de partícula, donde se puede apreciar que a partir de un tamaño menor a 2.0 mm la recuperación de minerales de todas las densidades sufren una caída. Las partículas con densidades 3.17g/cm^3 son las que más soportan este cambio, debido que en el rango de tamaño (2.00 mm a 0.71 mm) su recuperación baja de 88.8 % a 3.7 %.

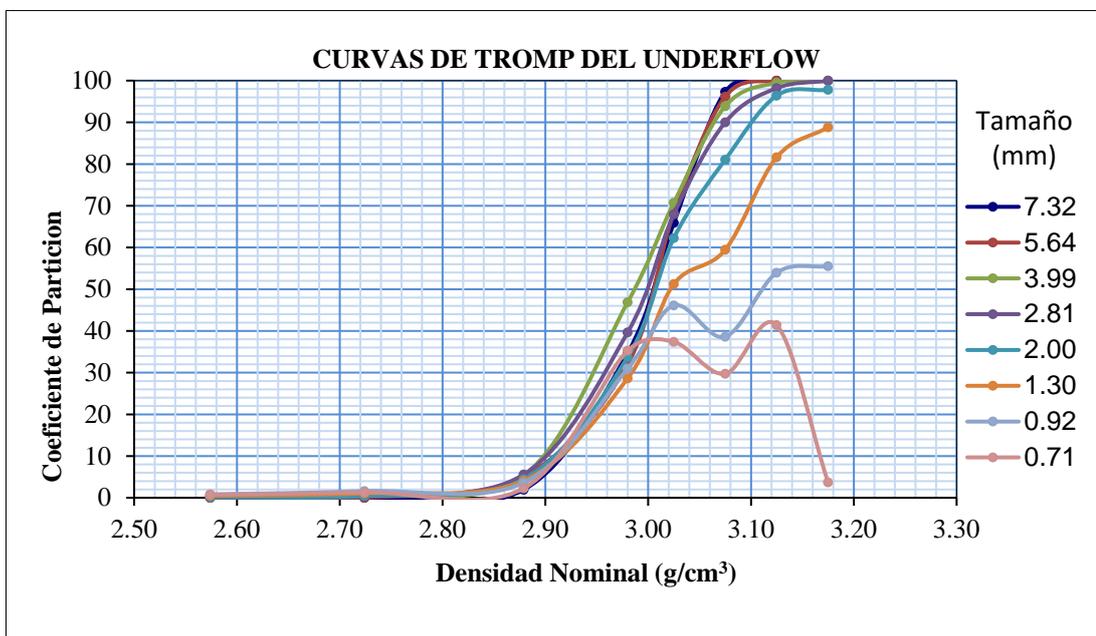


Figura 3.18: Curva de Tromp del Underflow

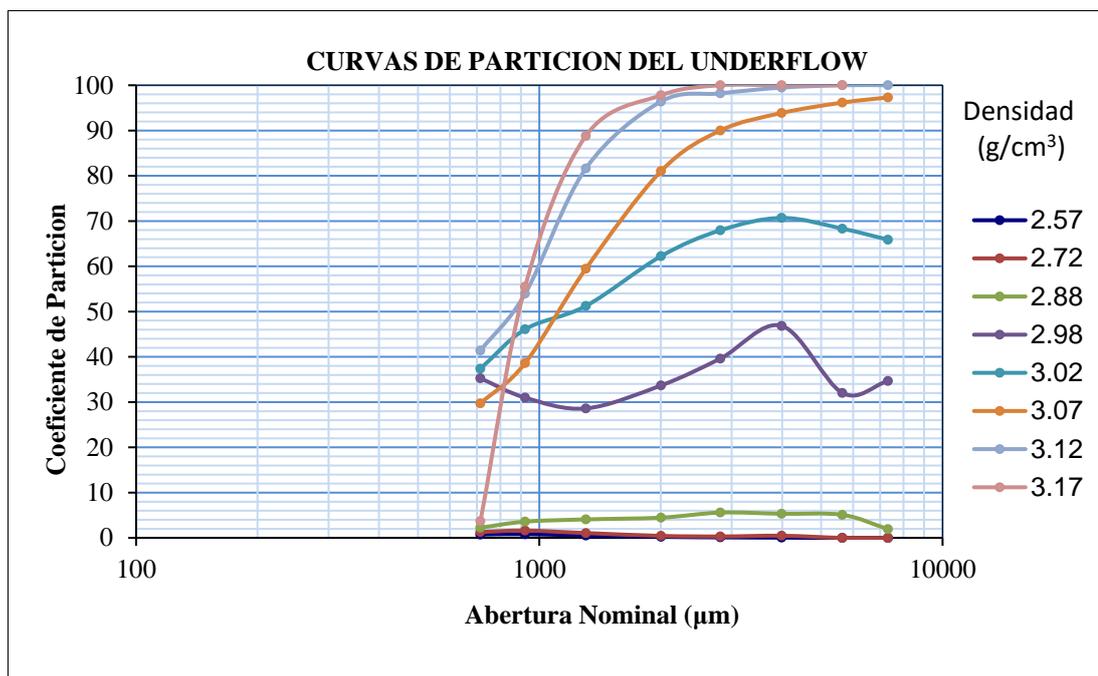


Figura 3.19: Curva de partición del Underflow

CONCLUSIONES

1. En las dos pruebas del efecto del tamaño de partícula, los valores tanto en la recuperación como en el porcentaje de hundidos del rango (-8.0, +2.36 mm) se mantuvieron por encima del 85% y 98% respectivamente, mientras que en el rango (-2.36, +0.6 mm) estuvieron por debajo de 81% y 98%.
2. Las partículas menores a 1.7 mm tienen una recuperación menor a 55% y un porcentaje de hundidos menor a 97.5%.
3. Existe un efecto en la separación por medios densos para las partículas menores a 2.36 mm, por lo cual es recomendable realizar un corte en la granulometría y tratarlos en forma separada.
4. Se recomienda utilizar ciclones de 250 mm de diámetro para el tratamiento del grano (-2.36, +0.6 mm), y ciclones de 360 mm para el rango (-8.0, +2.36 mm), debido a que los ciclones de 250 mm tienen como punto de rotura 0.6 mm y los ciclones de 360 mm 1.0 mm.
5. A una presión de trabajo de 49 KPa se obtuvieron menores valores de E_p , y a una densidad de 2.45 g/cm³ alcanzó su mayor valor, pero a la densidad de 2.50 g/cm³ disminuyó hasta 0.04, según las pruebas de los tracers.
6. Todas las pruebas con los trazadores estuvieron dentro de la zona de estabilidad del ferrosilicio 270D.
7. A una densidad de corte de 2.96 g/cm³ se recuperaría el 88.15% de Al₂O₃, pero si el corte sube a 3.00 g/cm³, la recuperación bajara a 84.82%, el cambio de la

densidad de corte está ligado principalmente al contenido de flotados en el Underflow (contenido de SiO₂ en el producto final).

8. Las curvas de partición presenta una densidad de corte de 3.0 g/cm³, y un Ep de 0.048, el cual escapa del rango en la clasificación para ciclones de medios densos.
9. Las pruebas de HLS y PSD para la evaluación de la planta DMS arrojaron que el punto de rotura se genera para partículas menores a 1.3 mm.

BIBLIOGRAFIA

1. A. GUPTA AND D. S. YAN. Mineral Processing Design and Operations And Introduction. Edición 2006. Dense Media Separation. Pag. 537-534
2. ANDREW L. MULAR Mineral Processing Plant, Design Practice and Control. Edición 2002 Solid- Solid Separation. Pag. 945-962.
3. B. A. WILLS, T. J. NAPIER MUNN. Wills' Mineral processing Technology. Sétimaedición 2005. Dense Medium Separation (DMS) Pag. 246-265.
4. ERROL G. KELLY. Introducción al Procesamiento de Minerales. Primera Edición 1990, Separación en Medio Denso. Pag. 271-277.
5. JUAN CHIA AQUIAJE. Operaciones Unitarias en Procesamiento de Minerales. Primera edición. Separación Gravimétrica. Pag. 12-1, 12-32.

ANEXOS

ANEXO 1: CURVAS DE TROMP OBTENIDOS CON LOS TRACERS

ANEXO 2: ANDALUCITA PROPIEDADES Y APLICACIONES

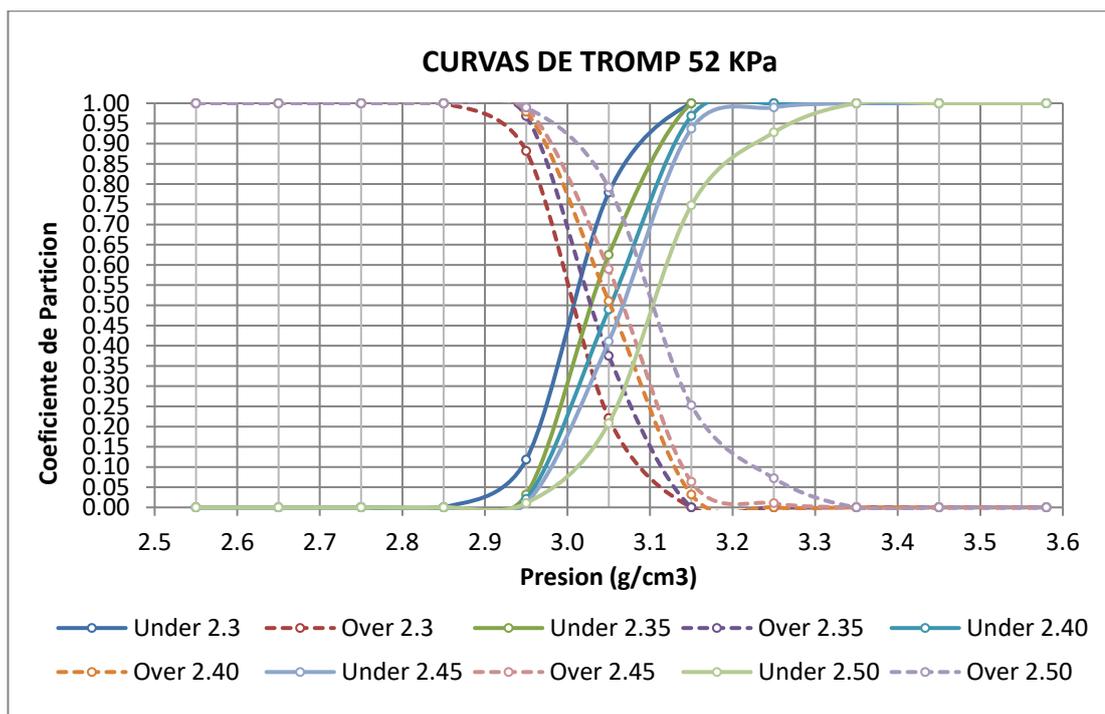
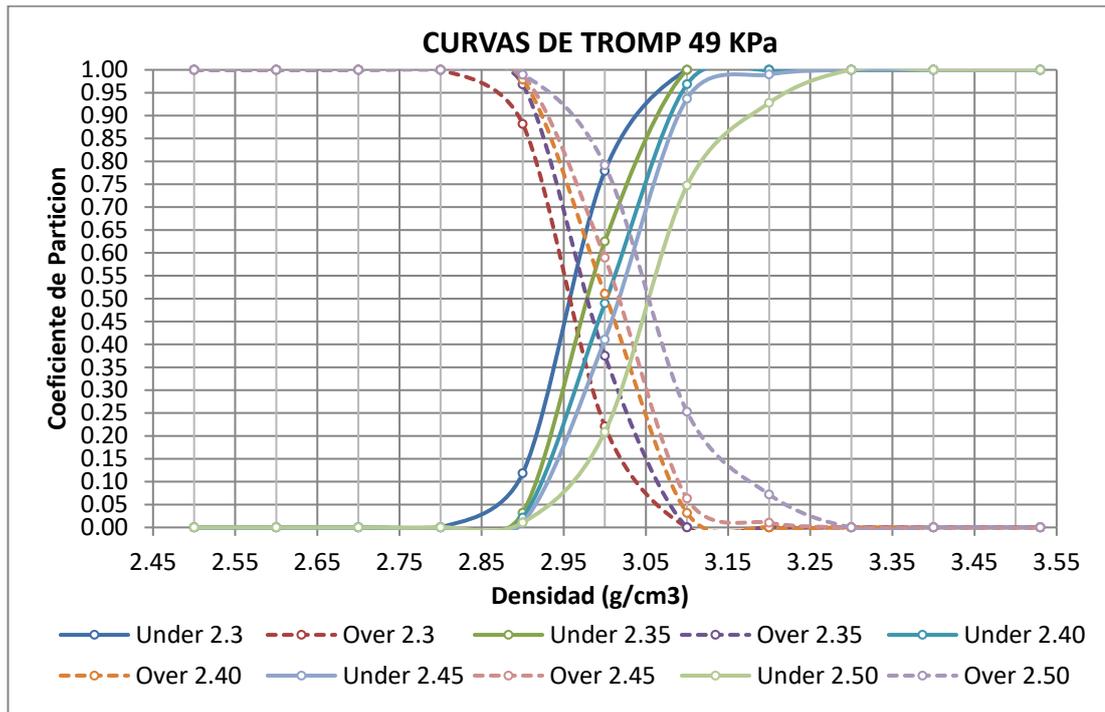
ANEXO 3: CARACTERISTICAS DEL LOS PRODUCTOS FINALES

ANEXO 4: TAMAÑO DE RUPTURA VS DIAMETRO DEL CICLON

ANEXO 1

CURVAS DE TROMP OBTENIDOS CON LOS TRACERS

Curvas de Tromppara una presión constante de 49 KPa Y 52 KPa y una densidad variable de 2.30, 2.35, 2.40, 2.45, 2.50 g/cm³.



ANEXO 2

ANDALUCITA PROPIEDADES Y APLICACIONES

Andalucita es un material silico-aluminoso ampliamente utilizado para fabricar ladrillos y monolíticos refractarios. Las características físico-químicas de la Andalucita peruana son Al_2O_3 59% y Fe_2O_3 0.80%, dureza de 7.0 – 7.5, gravedad específica de 3.0 – 3.2.

El 95% de la andalucita que se obtiene en el mundo se destina a producir materiales refractarios para industrias siderúrgicas, cementeras, hornos y crisoles. Forma parte, además, de muchas rocas empleadas en la construcción y con una parte menor de la producción, se fabrican aislantes térmicas, loza de alta calidad, bujías para el encendido y losetas para pavimentos.

En aplicaciones durante el proceso de calentamiento del horno y a partir de los $1,100^\circ \text{C}$ la Andalucita se convierte gradualmente en mulita incrementando las propiedades del producto como se indica:

- a. La conversión de andalucita a mulita a temperaturas relativamente bajas, impone fortaleza y resistencia a la erosión físico-química con muy buena resistencia a la penetración de escoria y al ataque de álcalis.
- b. Un mínimo de variación en el volumen cuando se queman materiales refractarios que contienen andalucita, mejorando el control dimensional del refractario.
- c. Alta resistencia a la fluencia, la abrasión a altas temperaturas y la resistencia a la erosión física/química.
- d. La baja variación en el volumen cuando se quema es muy ventajosa especialmente en refractarios monolíticos.
- e. Resistencia al ataque y penetración de gases y escoria.
- f. El bajo nivel de fundentes protege del ataque de la escoria y de los álcalis.

ANEXO 3
CARACTERISTICAS DEL LOS PRODUCTOS FINALES

PRODUCT DATA SHEET

ANDALUSITE GRADE	COARSE PREMIUM 1-3 mm			COARSE PREMIUM 3-8 mm			COARSE PREMIUM 1-4 mm			FINE PREMIUM 0-1 mm		
CHEMICAL ANALYSIS, %	OXIDE	TYPICAL	LIMITS									
	Al ₂ O ₃	59.14	≥ 58.5	Al ₂ O ₃	58.8	≥ 58.5	Al ₂ O ₃	59.0	≥ 58.5	Al ₂ O ₃	59.52	≥ 59.0
	Fe ₂ O ₃	0.80	≤ 1.0	Fe ₂ O ₃	0.90	≤ 1.0	Fe ₂ O ₃	0.83	≤ 1.0	Fe ₂ O ₃	0.60	≤ 0.75
	SiO ₂	38.59		SiO ₂	38.54		SiO ₂	38.2		SiO ₂	38.51	
	K ₂ O	0.31	≤ 0.50	K ₂ O	0.44	≤ 0.50	K ₂ O	0.35	≤ 0.40	K ₂ O	0.27	≤ 0.50
	Na ₂ O	0.06	≤ 0.15	Na ₂ O	0.08	≤ 0.15	Na ₂ O	0.06	≤ 0.10	Na ₂ O	0.07	≤ 0.15
	MgO	0.05		MgO	0.09		MgO	0.11		MgO	0.14	
	CaO	0.14		CaO	0.24		CaO	0.12		CaO	0.13	
	TiO ₂	0.22		TiO ₂	0.27		TiO ₂	0.23		TiO ₂	0.13	
	MnO	0.02		MnO	0.01		MnO	0.01		MnO	0.01	
	P ₂ O ₅	0.05		P ₂ O ₅	0.06		P ₂ O ₅	0.03		P ₂ O ₅	0.05	
LOSS OF IGNITION	%	0.6	≤ 1.0	%	0.64	≤ 1.0	%	0.64	≤ 1.0	%	0.6	≤ 1.0
MASS DENSITY	g/cm ³	3.1	≥ 3.05									
MOISTURE	%	0.1	≤ 0.50	%	0.1	≤ 0.50	%	0.1	≤ 0.50	%	0.1	≤ 0.50
PARTICLE SIZE	+ 3.15mm	Tr	≤ 5	+ 8.00mm	Tr	≤ 5	+ 4.00mm	Tr	≤ 5	+ 1.0mm	Tr	≤ 5
	- 3.15 + 2.00mm	46		-8.0 +6.7mm	6		-4.0 +3.15mm	12		-1.0 +0.71mm	5	
	- 2.00 + 1.00mm	50		- 6.7 + 4.75mm	39		- 3.15 + 2.0mm	49		- 0.71+ 0.50mm	30	
	- 1.00 mm	4	≤ 10	-4.75 +4.0mm	24		-2.0 +1.7mm	11		-0.50 +0.106mm	59	
				-4.75 +4.0mm	9	≤ 10	-1.7 +1.0mm	24		-0.106mm	6	≤ 10
							-1.0mm	4	≤ 10			

ANEXO 4
TAMAÑO DE RUPTURA VS DIAMETRO DEL CICLON

