

**Universidad Católica de Santa María**  
**Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales**  
**Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica**  
**Eléctrica y Mecatrónica**



**“DISEÑO HIDRÁULICO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE Y CLASIFICACIÓN DE  
RELAVES PARA UNA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE CON UNA  
CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE 200 KTPD”**

Tesis Presentada por el Bachiller:

**Flores Vargas, Ivan**

Para Optar el Título Profesional de:

**Ingeniero Mecánico**

Asesor:

**Ing. Castro Valdivia, Jorge**

**Arequipa – Perú**

**2020**

UCSM-ERP

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA**  
**INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA**

**DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR DE TESIS**

Arequipa, 03 de Noviembre del 2020

**Dictamen: 002085-C-EPIMMEM-2020**

Visto el borrador de tesis del expediente 002085, presentado por:

**2010800871 - FLORES VARGAS IVAN**

Titulado:

**DISEÑO HIDRAULICO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE Y CLASIFICACIÓN DE RELAVES PARA  
UNA PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE CON UNA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE 200  
KTPD**

Nuestro dictamen es:

**APROBADO**

**1734 - ALVAREZ FLOREZ DARWIN REYNALDO  
DICTAMINADOR**



**1893 - CASTRO VALDIVIA JORGE LUIS  
DICTAMINADOR**





### **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mis padres David y Nancy por ser el mejor ejemplo de esfuerzo y dedicación, por su confianza y apoyo incondicional durante mi crecimiento y formación profesional.

A Magali por acompañarme y motivarme a ser cada vez mejor en todos los aspectos de la vida.

## RESUMEN

El presente trabajo detalla la utilización de métodos estandarizados y procedimientos para el diseño de un sistema de transporte y clasificación de relaves provenientes de una planta concentradora. Para ello se planteó un esquema de proceso con una capacidad de 200 mil toneladas por día el cual se describe a continuación:

El sistema iniciará desde la descarga del primer cajón distribuidor (CJ-01) el cual recibirá los relaves provenientes de los espesadores y contará con dos líneas de descarga.

La primera línea enviará por gravedad el 50% de los relaves directamente hacia un punto de descarga ubicado en el embalse de la presa de relaves. La segunda línea enviará por gravedad el resto de los relaves hacia el proceso de clasificación. El diseño de ambas líneas contempla la selección del diámetro y material de la tubería de transporte tomando en consideración las propiedades del relave y la pendiente de inclinación existente. El proceso de clasificación inicia con el cajón distribuidor CJ-02 el cual recibirá los relaves provenientes del primer cajón distribuidor (CJ-01) y un flujo de agua para dilución. El diseño del cajón contempla el dimensionamiento de sus cámaras y ventana de rebose tomando en consideración las condiciones de flujo y el tiempo de retención deseado para el mismo.

Aguas abajo del CJ-02 se encontrará la primera etapa de ciclones la cual contará con dos nidos de ciclones que serán alimentados por gravedad través de tuberías. El diseño de esta etapa contempla la selección del modelo y cantidad de ciclones, el análisis granulométrico del underflow y overflow de los ciclones además de la selección de los diámetros y material de tubería en base a la presión de diseño de la misma.

El underflow proveniente de la primera etapa de clasificación será enviado hacia el cajón CJ-03 el cual enviará los relaves clasificados a la segunda etapa de clasificación que constará de un nido de ciclones que será alimentado por gravedad a través de una tubería. El diseño de esta etapa se realizó siguiendo los mismos lineamientos de la primera etapa.

El underflow proveniente de la segunda etapa de clasificación será enviado hacia el cajón distribuidor CJ-04 el cual alimentará a una bomba de arenas que enviará los relaves gruesos hacia su descarga final en el terraplén de la presa de relaves. El diseño de esta etapa contempla el dimensionamiento del cajón, la selección del diámetro y material de tuberías y la selección del modelo de bomba y cálculo de potencia del motor eléctrico.

La selección de equipos de clasificación y bombeo se realizó en base a los procedimientos recomendados por los fabricantes.

Los cálculos hidráulicos para el transporte de relaves a través de tuberías se realizaron en base a los modelos y autores más utilizados en la industria.

Los cálculos de esfuerzos y selección de materiales en las tuberías de acero se realizaron de acuerdo al código ASME B31.4.

**PALABRAS CLAVE:** Transporte de relaves, Clasificación de pulpas, Presa de relaves.



## ABSTRACT

This work details the use of standardized methods and procedures for the design of a tailings transport and classification system from a concentrator plant. For this, it had been proposed a process scheme with a capacity of 200 thousand tons per day was proposed, which is described below:

This work details the methodology design of a tailings transport and classification system for a 200 thousand metric tons per day concentrator plant.

The system start on the discharge of the first distributor box (CJ-01), which receives the tailings coming from thickeners and has two discharge pipelines.

The first discharge pipeline will gravity deliver 50% of the tailings directly to a discharge point located in the tailing pond. The second line will send the rest of the tailings to the classification process by gravity. The design of both pipelines considered the diameter and material selection for them taking into account the tailing's properties and the existing slope. The classification process begins with the second distributor box (CJ-02) which receives the tailings coming from the first distributor box (CJ-01) and an additional flow of water. The distributor box design considered the sizing of its chambers and overflow window, taking into consideration the flow conditions and its desired retention time.

Downstream of the box CJ-02 is the first stage of cyclones which will have two nests of cyclones fed by gravity through a pipeline. The design of this stage includes the sizing, selection and definition of number of ciclones required, the granulometric analysis for underflow and overflow of the cyclones, as well as the diameter and material selection for pipelines based on their design pressure.

The underflow from the first classification stage will be sent to the box CJ-03, which will send the classified tailings to the second classification stage, the second stage consists on one nest of cyclones that will be fed by gravity through a pipeline. The design of this stage was developed following the same guidelines as the first stage.

The underflow from the second classification stage will be sent to the CJ-04 distributor box, which feeds a sand pump that will send the coarse tailings to its final discharge on the tailings dam's embankment. The design of this stage includes the sizing of the distributor box, the diameter and material selection for the pipelines, the pump model selection and power calculation for the electric motor.

Classification and pumping equipment selection was made based on the procedures recommended by the manufacturers.

The hydraulic calculations for the tailings pipelines were made based on the most used models and authors in the industry.

Stress calculation and material selection for steel pipes were made in accordance with the ASME B31.4 code.

**KEYWORDS:** Tailings transport, Slurry classification, Tailings Dam.



## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el Perú está catalogado como uno de los 3 países con mayor cantidad de reservas de cobre en el mundo, siendo el sur del Perú la zona que contiene la mayor cantidad de reservas de este mineral en el país.

La extracción de cobre puede realizarse por procesos de lixiviación o concentrado siendo este último el más utilizado actualmente en el Perú. El proceso de concentración de cobre implica la producción de relaves mineros que deben ser adecuadamente transportados y depositados empleando métodos que reduzcan su impacto en el medio ambiente. El método más empleado en compañías mineras del Perú consiste en clasificar los relaves en finos y gruesos para después depositarlos en presas o diques que permitan un adecuado almacenamiento de los relaves y recuperación de agua.

Los relaves finos son descargados en el embalse mientras que los relaves gruesos son depositados en el muro o terraplén y contribuyen al crecimiento de la presa.

Un correcto sistema de transporte, clasificación y descarga de relaves garantizará la continuidad de las operaciones en una concentradora. Por otro lado un sistema deficiente provocará fallas, paradas de producción y posibles incidentes ambientales que pueden terminar en sanciones y pérdidas monetarias para la compañía minera.

Debido a la importancia que tiene el transporte y disposición de relaves para la correcta operación de una planta concentradora es que se propone presentar la metodología y secuencia de procesos para el diseño de un sistema de transporte, clasificación y descarga de relaves para una planta concentradora de cobre de una capacidad de procesamiento de 200 mil toneladas métricas por día.

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTO .....	iii
RESUMEN .....	iv
ABSTRACT.....	vi
INTRODUCCIÓN .....	viii
CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN.....	1
1. Descripción del problema .....	2
2. Antecedentes.....	2
2.1 El proceso de concentración de cobre.....	2
2.2 Manejo de relaves mineros. ....	3
2.3 Disposición de relaves en presas o diques. ....	4
2.4 Características de la disposición en presas o diques.....	5
2.5 Tipos de presas de relaves.....	6
2.6 Consideraciones para la construcción de presas de relaves.....	8
3. Objetivos de la investigación.....	9
3.1 Objetivo General.....	9
3.2 Objetivos Específicos.....	9
4. Justificación .....	9
5. Alcances.....	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	11
1. Mecánica de suspensiones .....	12
1.1 Reología de suspensiones multifásicas .....	12
1.2 Fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo.....	13
1.3 Aspectos físicos de una suspensión .....	15
1.4 Movimiento de una partícula en un fluido.....	17

1.5 Número de Reynolds de la partícula.....	18
1.6 Velocidad terminal y coeficiente de arrastre de partículas esféricas .....	18
2. Características reológicas de una suspensión .....	20
2.1 Curva granulométrica.....	20
2.2 Concentración de sólidos .....	23
2.3 Densidad .....	24
2.4 Flujo másico y flujo volumétrico.....	25
2.5 Concentración de empaquetamiento.....	26
2.6 Viscosidad.....	26
2.7 Tensión de fluencia.....	29
2.8 Velocidad de flujo.....	31
2.9 Velocidad de deposición.....	36
3. Flujo de pulpas en canales .....	39
3.1 Propiedades geométricas de canales circulares.....	40
3.2 Ecuación de Manning .....	44
3.3 Estabilidad de flujo y número de Froude.....	45
3.4 Diseño de líneas de transporte con canales circulares .....	45
4. Pérdidas primarias en transporte de pulpas.....	46
4.1 Factor de fricción .....	47
4.2 Cálculo del factor de fricción para fluidos Newtonianos.....	47
4.3 Factor de fricción para pulpas (flujo homogéneo).....	48
4.4 Factor de fricción para pulpas (flujo heterogéneo).....	50
5. Pérdidas secundarias en transporte de pulpa.....	54
5.1 Longitud equivalente: .....	54
5.2 Coeficiente de pérdidas singulares: .....	55

6.	Transporte de pulpas en tuberías a presión.....	55
6.1	Transporte de pulpas por bombeo.....	55
6.2	Transporte de pulpas en tuberías a presión por gravedad.....	66
7.	Cajones de recolección y distribución.....	67
7.1	Modo de funcionamiento de cajones de distribución.....	67
7.2	Dimensionamiento de cajones de distribución.....	68
7.3	Volumen y tiempo de retención.....	74
8.	Ciclones.....	75
8.1	Principio de funcionamiento de un ciclón.....	75
8.2	Parámetros básicos para ciclones estándar.....	76
8.3	Descripción del proceso de clasificación.....	77
8.4	Selección del tamaño y cantidad de ciclones.....	81
9.	Tuberías para transporte de pulpas.....	84
9.1	Tuberías de acero al carbono.....	84
9.2	Análisis de esfuerzo de tuberías de acero.....	84
9.3	Conexiones en tuberías de acero al carbono.....	85
9.4	Revestimiento interno de tuberías de acero al carbono.....	87
9.5	Tuberías de HDPE.....	87
10.	Válvulas e instrumentos para manejo de pulpas.....	89
10.1	Válvulas modulantes para pulpas.....	90
10.2	Válvulas ON/FF.....	91
10.3	Instrumentos de control en el manejo de pulpas.....	92
CAPITULO III: DISEÑO DEL SISTEMA.....		95
1.	Descripción general del proceso.....	96
2.	Consideraciones y requisitos de diseño.....	97

2.1 Producción de relaves .....	97
2.2 Propiedades de los relaves totales.....	98
2.3 Requisitos mínimos para el sistema de clasificación de arenas.....	99
2.4 Condiciones ambientales .....	99
2.5 Requisitos para cajones de distribución.....	99
3. Diseño de canales principales de transporte .....	100
3.1 Diseño del canal de tuberías del CJ-01 hacia el CJ-02.....	100
3.2 Diseño del canal de tuberías del CJ-01 hacia el embalse.....	105
3.3 Soportería para canales de HDPE.....	106
3.4 Selección de válvulas y accesorios para las tuberías del corredor principal.....	107
4. Diseño del cajón distribuidor CJ-02 .....	108
4.1 Propiedades del relave en el CJ-02.....	108
4.2 Flujo volumétrico a la salida del cajón .....	110
4.3 Flujo requerido de agua para dilución .....	110
4.4 Dimensionamiento del cajón distribuidor CJ-02 .....	110
4.5 Resumen de resultados cajón CJ-02 .....	113
5. Selección de la primera etapa de ciclones.....	114
5.1 Presión de alimentación preliminar .....	114
5.2 Selección del diámetro adecuado para el ciclón .....	115
5.3 Presión mínima de alimentación.....	117
5.4 Cantidad requerida de ciclones y disposición.....	118
5.5 Análisis granulométrico del underflow y overflow .....	119
5.6 Flujo y características reológicas .....	133
5.7 Selección del diámetro de ápex.....	134
5.8 Especificaciones técnicas de los ciclones de la primera etapa.....	135

6.	Diseño de la línea de transporte desde el CJ-02 a la primera etapa de ciclones .....	135
6.1	Selección del material de tubería .....	137
6.2	Diámetros tentativos de tubería .....	138
6.3	Verificación de la velocidad de deposición .....	138
6.4	Pérdidas primarias en la línea .....	139
6.5	Pérdidas secundarias por accesorios .....	155
6.6	Presión de descarga.....	155
6.7	Selección del diámetro final de tubería.....	156
6.8	Uso de Software.....	157
6.9	Verificación del espesor de la tubería.....	157
6.10	Selección de válvulas y accesorios para las tuberías de acero.....	158
7.	Diseño canales de descarga del UF de ciclones hacia el CJ-03.....	159
7.1	Diseño del canal de tuberías del Nido-01 hacia el CJ-03 .....	160
7.2	Diseño del canal de tuberías del Nido-02 hacia el CJ-03 .....	162
7.3	Bridas y accesorios de conexión entre tuberías .....	163
8.	Diseño del cajón distribuidor CJ-03 .....	164
8.1	Propiedades del relave en el CJ-03 .....	164
8.2	Flujo volumétrico a la salida del cajón .....	166
8.3	Flujo requerido de agua para dilución .....	166
8.4	Dimensionamiento del cajón distribuidor CJ-03 .....	166
8.5	Resumen de resultados cajón CJ-03 .....	170
9.	Selección de la segunda etapa de ciclones .....	170
9.1	Presión de alimentación preliminar .....	170
9.2	Selección del diámetro adecuado para el ciclón .....	171
9.3	Presión mínima de alimentación.....	173

9.4 Cantidad requerida de ciclones y disposición .....	174
9.5 Análisis granulométrico del underflow y overflow .....	175
9.6 Flujo y características reológicas .....	189
9.7 Selección del diámetro de ápex.....	189
9.8 Especificaciones técnicas de los ciclones de la segunda etapa .....	190
10. Diseño de la línea de transporte desde el CJ-03 a la segunda etapa de ciclones .....	191
10.1 Selección del material de tubería .....	193
10.2 Diámetros tentativos de tubería .....	193
10.3 Verificación de la velocidad de deposición .....	193
10.4 Pérdidas primarias en la línea .....	194
10.5 Pérdidas secundarias por accesorios .....	196
10.6 Presión de descarga.....	197
10.7 Selección del diámetro final de tubería.....	198
10.8 Uso de Software.....	198
10.9 Verificación del espesor de la tubería.....	199
10.10 Selección de válvulas y accesorios para tuberías.....	199
11. Diseño canal de descarga del UF de ciclones hacia el CJ-04 .....	200
11.1 Diseño del canal de tuberías del Nido-01 hacia el CJ-04 .....	201
11.2 Bridas y accesorios de conexión entre tuberías .....	203
12. Diseño del cajón distribuidor CJ-04 .....	203
12.1 Propiedades del relave en el CJ-04 .....	203
12.2 Flujo volumétrico a la salida del cajón .....	205
12.3 Dimensionamiento del cajón distribuidor CJ-04 .....	205
12.4 Resumen de resultados cajón CJ-04 .....	207
13. Diseño de la línea de descarga del UF hacia la presa de relaves .....	208

13.1 Selección del material de tubería .....	210
13.2 Diámetros tentativos de tubería .....	210
13.3 Verificación de la velocidad de deposición .....	211
13.4 Gradiente hidráulico en la línea troncal .....	211
13.5 Selección del diámetro final de tubería.....	213
13.6 Análisis hidráulico del sistema .....	213
13.7 Selección de la bomba para pulpas .....	217
13.8 Verificación del espesor de la tubería.....	228
13.9 Selección de válvulas y accesorios para tuberías.....	230
14. Diseño de la línea de descarga del OF hacia la presa de relaves .....	232
14.1 Flujo y propiedades del relave .....	233
14.2 Selección del material de tubería .....	234
14.3 Diámetros tentativos de tubería .....	234
14.4 Verificación de la velocidad de deposición .....	235
14.5 Gradiente hidráulico en la línea .....	235
14.6 Selección del diámetro final de tubería.....	237
14.7 Análisis hidráulico del sistema .....	237
14.8 Verificación del espesor de la tubería.....	238
14.9 Selección de válvulas y accesorios para tuberías.....	239
15. Análisis de esfuerzos y diseño de soportes para tuberías de acero. ....	239
15.1 Casos de carga.....	240
15.2 Combinaciones de carga .....	241
15.3 Análisis de esfuerzos para tuberías de acero en software Bentley AutoPIPE .....	241
15.4 Análisis de esfuerzos para tuberías de agua de sello en software Bentley AutoPIPE ....	251
15.5 Diseño de soportes para tuberías de acero .....	252

CAPITULO IV: COSTOS .....	257
CONCLUSIONES .....	264
RECOMENDACIONES.....	265
REFERENCIAS.....	266



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Equivalencias de Malla Tyler a Pulgadas y Milímetros .....	21
Tabla 2: Fórmulas para calcular concentración y densidad de una pulpa .....	25
Tabla 3: Coeficientes C2 y N2 para tensión de fluencia según el modelo de Thomas. ....	30
Tabla 4: Coeficiente de Rugosidad de Manning en Unidades SI.....	44
Tabla 5: Formación de grupos de partícula para utilizar el método Wasp.....	52
Tabla 6: Valores de $b_2$ para determinar el ancho de un cajón de distribución.....	69
Tabla 7: Tabla de selección de largo de la cámara de recepción de un cajón distribuidor. ....	71
Tabla 8: Tabla de selección de largo de la cámara de recepción de un cajón distribuidor. ....	72
Tabla 9: Factor de corrección para tamaño de partícula requerido en el Overflow .....	82
Tabla 10: Factores de soldadura para diferentes tipos de tubería. ....	85
Tabla 11: Alternativas de diámetros para canal de tuberías desde CJ-01 hacia CJ-02 .....	101
Tabla 12: Velocidades de deposición para cada alternativa.....	102
Tabla 13: Resumen de resultados: canal de tubería de CJ-01 a CJ-02.....	104
Tabla 14: Resumen de resultados: canal de tubería de CJ-01 al Embalse .....	106
Tabla 15: Granulometría de los relaves totales de alimentación a la 1ra Etapa de Clasificación .....	120
Tabla 16: Flujo másico independiente por tamaño de partícula. ....	122
Tabla 17: Distribución de flujo másico al UF y OF por tamaño de partícula. ....	125
Tabla 18: Porcentajes independientes para el UF y OF por tamaño de partícula. ....	127
Tabla 19: Porcentajes acumulados para el UF y OF por tamaño de partícula. ....	129
Tabla 20: Características reológicas para la 1ra Etapa de clasificación.....	133
Tabla 21: Especificaciones técnicas para la 1ra Etapa de clasificación .....	135
Tabla 22: Alternativas de diámetro para la línea desde el CJ-02 a la 1ra Etapa de clasificación. ....	138
Tabla 23: Velocidades de deposición para cada alternativa.....	139
Tabla 24: Gradientes hidráulicos para flujo homogéneo. ....	143
Tabla 25: Grupos de partícula para cálculo de pérdidas por flujo heterogéneo de relaves totales.....	144
Tabla 26: Velocidad terminal y coeficiente de arrastre por grupo de partículas.....	145
Tabla 27: Concentración en volumen por grupo de partícula. ....	147
Tabla 28: Velocidad terminal por grupo de partículas – Segunda iteración. ....	148
Tabla 29: Fracciones de partículas en fase vehículo y cama móvil. ....	149
Tabla 30: Factor de fricción y gradiente hidráulico – Cama móvil. ....	150
Tabla 31: Fracción de partículas en fase vehículo y cama móvil. ....	152
Tabla 32: Factor de fricción y gradiente hidráulico para cama móvil. ....	153
Tabla 33: Gradiente hidráulico total para cada alternativa. ....	154
Tabla 34: Gradiente hidráulico y pérdidas primarias para cada alternativa. ....	154
Tabla 35: Cantidad de accesorios y coeficiente de pérdidas.....	155
Tabla 36: Pérdidas secundarias por alternativa.....	155

Tabla 37: Presión de descarga en la alimentación del ciclón.....	156
Tabla 38: Resumen de resultados finales para cada alternativa.....	156
Tabla 39: Resumen de resultados para canal de Nido-01 hacia el CJ-03.....	161
Tabla 40: Resumen de resultados para canal de Nido-02 hacia el CJ-03.....	163
Tabla 41: Granulometría UF de la 1ra Etapa de clasificación.....	175
Tabla 42: Flujo másico por tamaño de partícula UF.....	177
Tabla 43: Recuperación hacia el UF y OF de cada tamaño de partícula.....	180
Tabla 44: Distribución de flujo másico hacia el UF y OF.....	182
Tabla 45: Porcentajes independientes y acumulados al UF y OF.....	185
Tabla 46: Características reológicas para la 2da Etapa de clasificación.....	189
Tabla 47: Especificaciones técnicas para los ciclones de la 2da Etapa de clasificación.....	191
Tabla 48: Alternativas de diámetro para la línea desde el CJ-03 a la 2da Etapa de clasificación.....	193
Tabla 49: Velocidades de deposición para cada alternativa.....	193
Tabla 50: Gradiente hidráulico calculado para flujo homogéneo.....	194
Tabla 51: Grupos de partícula para cálculo de pérdidas por flujo heterogéneo de UF de ciclones 1ra Etapa.....	195
Tabla 52: Gradiente hidráulico total para cada alternativa.....	195
Tabla 53: Gradiente hidráulico y pérdidas primarias para cada alternativa.....	196
Tabla 54: Cantidad de accesorios y coeficiente de pérdidas.....	196
Tabla 55: Pérdidas secundarias por alternativa.....	197
Tabla 56: Presión de descarga en la alimentación del ciclón.....	197
Tabla 57: Resumen de resultados finales para cada alternativa.....	198
Tabla 58: Resumen de resultados para canal de la 2da Etapa de clasificación hacia el CJ-04.....	202
Tabla 59: Alternativas de diámetro para la línea desde el CJ-04 a la descarga final en la presa de relaves.....	210
Tabla 60: Velocidades de deposición para cada alternativa.....	211
Tabla 61: Gradiente hidráulico calculado para flujo homogéneo.....	211
Tabla 62: Grupos de partícula para cálculo de pérdidas por flujo heterogéneo.....	212
Tabla 63: Gradiente hidráulico total para cada alternativa.....	213
Tabla 64: Cantidad de accesorios y coeficiente de pérdidas.....	216
Tabla 65: Pérdidas por accesorios en la succión de la bomba.....	223
Tabla 66: Flujo y características del overflow total enviado a la presa de relaves.....	233
Tabla 67: Alternativas de diámetro para la línea del OF de ciclones hacia la presa de relaves.....	234
Tabla 68: Velocidades de deposición para cada alternativa.....	235
Tabla 69: Gradiente hidráulico calculado para flujo homogéneo.....	235
Tabla 70: Grupos de partícula para cálculo de pérdidas por flujo heterogéneo.....	236
Tabla 71: Gradiente hidráulico total para cada alternativa.....	236
Tabla 72: Casos de carga.....	240
Tabla 73: Combinaciones de carga.....	241

Tabla 74: Soportes de tubería para tuberías de alimentación a primera etapa de ciclones. ....	244
Tabla 75: Soportes de tubería para tuberías de alimentación a segunda etapa de ciclones. ....	245
Tabla 76: Soportes de tubería para tuberías del Underflow hacia la presa de relaves. ....	246
Tabla 77: Soportes de tubería para tuberías del Overflow hacia la presa de relaves. ....	248
Tabla 74: Fuerzas y reacciones en soportes de tubería para tuberías de alimentación a primera etapa de ciclones. .	252



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Esquema general de clasificación y descarga de relaves [2].	5
<b>Figura 2:</b> Esquema de construcción de presa de relaves por el método aguas arriba [1].	6
<b>Figura 3:</b> Esquema de construcción de presa de relaves por el método aguas abajo [1].	7
<b>Figura 4:</b> Esquema de construcción de presa de relaves por el método de línea central [1].	8
<b>Figura 5:</b> Deformación de un fluido en medio de dos planos paralelos [3].	12
<b>Figura 6:</b> Curvas reológicas de los diferentes tipos de fluidos.	15
<b>Figura 7:</b> Dimensiones triaxiales de un elipsoide.	16
<b>Figura 8:</b> Fuerzas que interactúan en una partícula inmersa en un fluido.	17
<b>Figura 9:</b> Curva granulométrica de una muestra [5].	22
<b>Figura 10:</b> Curva de Concentración VS Viscosidad [3].	26
<b>Figura 11:</b> Comparación de los modelos K&D y Thomas para un relave minero.	28
<b>Figura 12:</b> Curva de Concentración VS Tensión de fluencia [3].	29
<b>Figura 13:</b> Comparación de los modelos Heymann y Thomas para un relave minero.	31
<b>Figura 14:</b> Distribución de partículas para flujo con cama estacionaria.	32
<b>Figura 15:</b> Distribución de partículas para flujo con cama móvil.	33
<b>Figura 16:</b> Distribución de partículas para flujo asimétrico.	34
<b>Figura 17:</b> Distribución de partículas para flujo simétrico.	34
<b>Figura 18:</b> Regímenes de velocidad para el flujo de pulpas heterogéneas [7].	35
<b>Figura 19:</b> Factor $FL$ para el modelo de Durand & Condolios [7].	36
<b>Figura 20:</b> Factor $FL$ para el modelo de Mc Elvain y Cave [3].	37
<b>Figura 21:</b> Secciones típicas para canales.	40
<b>Figura 22:</b> Dimensiones para definir el flujo a través de un canal circular.	42
<b>Figura 23:</b> Pendiente de una recta.	43
<b>Figura 24:</b> Distribución de partículas para flujo heterogéneo.	51
<b>Figura 25:</b> Elevación de pulpas utilizando bombas centrífugas.	56
<b>Figura 26:</b> Curva típica para un sistema de transporte de pulpas.	57
<b>Figura 27:</b> Impulsor de una bomba centrífuga revestido con caucho [11].	58
<b>Figura 28:</b> Carcasa de una bomba de pulpas [11].	59
<b>Figura 29:</b> Tipos de erosión producido en superficies sólidas [10].	60
<b>Figura 30:</b> Curva de operación para una bomba Warman 8/6 AH [11].	61
<b>Figura 31:</b> Gráfico para estimar el coeficiente de presión y eficiencia de bombas Warman [10].	62
<b>Figura 32:</b> Curvas de operación y eficiencia corregidas [10].	63
<b>Figura 33:</b> Punto de operación real de una bomba centrífuga de pulpas.	64
<b>Figura 34:</b> Esquema típico de alimentación por gravedad a una batería de ciclones.	67
<b>Figura 35:</b> Sección típica de un cajón distribuidor.	68
<b>Figura 36:</b> Dimensiones utilizadas para estimar el ancho mínimo de un cajón.	69

<b>Figura 37:</b> Área equivalente entre una sección circular y rectangular.....	70
<b>Figura 38:</b> Esquema de funcionamiento y partes de un ciclón [14].....	76
<b>Figura 39:</b> Curvas de recuperación al underflow de un ciclón [13].....	78
<b>Figura 40:</b> Recuperación reducida al underflow de un ciclón [13].....	79
<b>Figura 41:</b> Baterías de ciclones de relaves en una minera del sur del Perú [16].....	83
<b>Figura 42:</b> Gráfico para selección de diámetro de Apex de un ciclón [13]. .....	83
<b>Figura 43:</b> Brida Slip On [18].....	86
<b>Figura 44:</b> Brida Welding Neck [18]. .....	86
<b>Figura 45:</b> Conexión ranurada tipo Victaulic [19].....	87
<b>Figura 46:</b> Accesorios de HDPE para termofusión [20]. .....	88
<b>Figura 47:</b> Flange adapter para conexión bridada de tuberías de HDPE [20].....	88
<b>Figura 48:</b> Backing Ring para conexión bridada de tuberías HDPE [20]. .....	89
<b>Figura 49:</b> Instalación de accesorios de HDPE [20].....	89
<b>Figura 50:</b> Válvula modulante tipo Pinch [21]. .....	90
<b>Figura 51:</b> Válvula modulante de bola [22].....	91
<b>Figura 52:</b> Válvula cuchilla tipo ON/OFF de accionamiento manual [23].....	92
<b>Figura 53:</b> Flujómetro magnético con display de revisión en campo [24]. .....	93
<b>Figura 54:</b> Manómetro analógico [25].....	93
<b>Figura 55:</b> Esquema de instalación y funcionamiento de un densímetro nuclear [26]. .....	94
<b>Figura 56:</b> Diagrama general del proceso de transporte y clasificación de relaves. ....	97
<b>Figura 57:</b> Curva granulométrica de relaves totales provenientes de espesadores. ....	98
<b>Figura 58:</b> Curvas de capacidad de ciclones Krebs. ....	115
<b>Figura 59:</b> Selección de modelo de ciclón para la primera etapa de clasificación.....	119
<b>Figura 60:</b> Granulometría del underflow - Primera etapa de clasificación.....	132
<b>Figura 61:</b> Granulometría del overflow - Primera etapa de clasificación.....	133
<b>Figura 62:</b> Selección de diámetro de Apex [13]. .....	134
<b>Figura 63:</b> Esquema de transporte de relaves desde CJ-02 hacia la primera etapa de clasificación. ....	136
<b>Figura 64:</b> Vista de planta - Esquema de transporte de relaves hacia la 1ra etapa de clasificación.....	137
<b>Figura 65:</b> Modelo del sistema de la 1ra etapa en AFT Fathom. ....	157
<b>Figura 66:</b> Esquema de descargas UF hacia CJ-03 – Elevaciones. ....	159
<b>Figura 67:</b> Esquema de descargas UF hacia CJ-03 – Vista de planta.....	160
<b>Figura 68:</b> Selección de modelo de ciclón – 2da Etapa de clasificación. ....	174
<b>Figura 69:</b> Granulometría del UF - 2da Etapa de clasificación. ....	188
<b>Figura 70:</b> Granulometría del OF - 2da Etapa de clasificación. ....	188
<b>Figura 71:</b> Selección del tamaño de Apex – Ciclones 2da Etapa. ....	190
<b>Figura 72:</b> Esquema de transporte de relaves desde CJ-03 hacia 2da Etapa de clasificación.....	192
<b>Figura 73:</b> Vista de planta - Esquema de transporte de relaves desde CJ-03 hacia 2da Etapa de clasificación.....	192

<b>Figura 74.</b> Modelo del sistema de la 2da etapa en AFT Fathom. ....	198
<b>Figura 75:</b> Esquema de descargas UF hacia CJ-04 – Elevaciones. ....	201
<b>Figura 76:</b> Esquema inicial transporte de arenas desde CJ-04 hacia presa de relaves. ....	209
<b>Figura 77.</b> Esquema de derivaciones de descarga de arenas. ....	209
<b>Figura 78:</b> Análisis del sistema de descarga de arenas en dos partes. ....	214
<b>Figura 79:</b> Modelado en AFT Fathom para una derivación de descarga de arenas. ....	214
<b>Figura 80:</b> Curva de operación – derivación de descarga de arenas. ....	215
<b>Figura 81:</b> Modelado de la zona cuatro de descarga de arenas. ....	215
<b>Figura 82:</b> Esquema final transporte de arenas desde CJ-04 hacia presa de relaves. ....	217
<b>Figura 83:</b> Gráfico de selección preliminar de Warman para modelos de bomba [11]. ....	219
<b>Figura 84:</b> Curva de operación bomba centrífuga Warman 12/10 AH [27]. ....	220
<b>Figura 85:</b> Estimación de los coeficientes de presión y eficiencia [10]. ....	221
<b>Figura 86:</b> Punto de operación de la bomba de arenas. ....	222
<b>Figura 87:</b> Esquema succión de la bomba de arenas. ....	223
<b>Figura 88:</b> Vista de planta Sistema de agua de sello. ....	225
<b>Figura 89:</b> Vista frontal Sistema de agua de sello. ....	226
<b>Figura 90:</b> Modelado del sistema de agua de sello en AFT Fathom. ....	226
<b>Figura 91:</b> Resultados para selección de bomba de agua de sello. ....	227
<b>Figura 92:</b> Curva de operación vs Curva del sistema de la bomba. ....	227
<b>Figura 93:</b> Perfil hidráulico del sistema de descarga de arenas. ....	228
<b>Figura 94:</b> Esquema de descarga de relaves finos OF en la presa de relaves. ....	232
<b>Figura 95:</b> Esquema de descarga de OF en el embalse. ....	232
<b>Figura 96:</b> Granulometría total del OF 1ra y 2da Etapa de clasificación. ....	234
<b>Figura 97:</b> Modelado de descarga de OF en presa de relaves. ....	237
<b>Figura 98:</b> Modelado de la línea de alimentación hacia la primera Etapa de ciclones. ....	242
<b>Figura 99:</b> Ubicación inicial de soportes de tubería primera Etapa de ciclones. ....	242
<b>Figura 100:</b> Tramos identificados con sobreesfuerzo en la tubería. ....	243
<b>Figura 101:</b> Análisis de esfuerzos luego de la modificación de soportes. ....	244
<b>Figura 102:</b> Modelado de la tubería de agua de sello. ....	251
<b>Figura 103:</b> Análisis de esfuerzos en la tubería de agua de sello. ....	252
<b>Figura 104.</b> Tipología para soportes tuberías mayores o iguales a 16". ....	253
<b>Figura 105.</b> Tipología para soportes de tuberías de agua de sello. ....	253
<b>Figura 106.</b> Simulación en Autodesk Inventor para soportes de tubería de 16". ....	254
<b>Figura 107.</b> Simulación en Autodesk Inventor para soportes de tubería de 30 y 32". ....	255
<b>Figura 108.</b> Simulación en Autodesk Inventor para soportes de tubería de 42". ....	255
<b>Figura 108.</b> Simulación en Autodesk Inventor para soportes de tubería de 2". ....	256



# CAPÍTULO I: FUNDAMENTACIÓN

## **1. Descripción del problema**

Un sistema de manejo de relaves debe garantizar la continuidad de las operaciones en una planta concentradora además de evitar impactos al medio ambiente por derrames o fallas en el sistema.

Las principales fallas en sistemas de transporte de relaves se producen por sedimentación de las líneas de tubería o por la inadecuada selección de materiales y equipos.

A diferencia del transporte de pulpas al interior de planta el transporte de relaves se caracteriza por involucrar largas distancias y altas concentraciones lo cual incrementa las pérdidas por fricción de las líneas de tubería incrementando el riesgo de sedimentación de las líneas.

Para diseñar correctamente un sistema de relaves es importante utilizar métodos comprobados que permitan seleccionar los materiales y equipos adecuados para garantizar una operación continua, eficiente y de bajo costo.

## **2. Antecedentes**

### **2.1 El proceso de concentración de cobre**

La concentración es uno de los procesos más empleados para la extracción de cobre. Este proceso consta de múltiples etapas las cuales tienen como objetivo reducir el tamaño del material minado hasta tamaños inferiores a 200 micras para luego extraer el concentrado de cobre por medio de un proceso físico-químico denominado flotación.

La primera etapa del proceso es el minado en el cual se extrae el material desde los yacimientos por medio de procesos de voladura y acarreo. El material minado es transportado por medio de camiones mineros hacia la planta de chancado primario, en la cual el tamaño del material se reduce hasta dimensiones nominales entre 6 y 8 pulgadas.

Luego de atravesar por el primer proceso de chancado, el mineral es transportado a través de fajas transportadoras hacia las plantas de chancado secundario y terciario, en donde el tamaño de partícula es reducido hasta tamaños del orden de los milímetros.

El último proceso de conminución es realizado por molinos de bolas, en los cuales se mezcla el mineral con grandes cantidades de agua para poder reducir su tamaño a tamices inferiores a un milímetro.

Luego de atravesado el proceso de molienda, la mezcla entre concentrado y agua es depositada en celdas de flotación en las que, a través de un proceso físico-químico a base de burbujas de aire y cal, el concentrado de cobre es extraído.

Luego de que el concentrado de cobre es extraído mediante el proceso de flotación, el material restante conocido como relave minero (el cual está compuesto generalmente por una mezcla entre arcilla y agua) es enviado al proceso de espesamiento en el cual se recupera una fracción del agua contenida en el relave y se envía de regreso hacia los tanques de agua de proceso por medio de sistemas de bombeo para así permitir su reutilización en la planta concentradora.

## **2.2 Manejo de relaves mineros.**

A través de los años, los métodos de manejo y disposición de los relaves mineros han ido cambiando, principalmente por cambios en las normativas ambientales y por la necesidad de recuperar la mayor cantidad de agua contenida en ellos.

Los relaves provenientes del proceso de concentración pueden ser dispuestos de diferentes maneras, algunas de ellas se mencionan a continuación:

### **Depósitos superficiales:**

Es el método más versátil y económico en la mayoría de operaciones. Se basa en la disposición hidráulica detrás de una presa o dique [1].

### **Disposición sub-aérea:**

En esta disposición el relave se deposita en finas capas que se van dejando secar bajo el sol [1].

### **Descarga espesada:**

Consiste en depositar los relaves con una concentración de sólidos entre 50% y 60%. Para que este sistema sea efectivo se requiere la separación previa entre relaves finos y gruesos [1].

### **Relaves deshidratados:**

Consisten en reducir la concentración de agua en la pulpa hasta en un 10%, permitiendo su transporte por medio de camiones o fajas transportadoras. Durante el proceso de deshidratación la

recuperación de agua es mayor ya que se eliminan del proceso las pérdidas de agua por evaporación [1].

### **Disposición submarina:**

Consiste en la descarga de los relaves hacia el océano, a una profundidad óptima para minimizar el impacto ambiental. Requieren de cámaras de mezcla previas para lograr una des-aireación y dilución en agua de mar. La ventaja de este método es que se eliminan los riesgos de licuefacción sísmica y de estabilidad que normalmente presentan los diques de relaves [1].

Determinar el método de disposición de relaves más adecuado para una operación en específico dependerá de los siguientes factores:

- La topografía del lugar.
- El método del minado.
- Las precipitaciones o presencia de lluvias en la zona.

El objetivo es disponer de los relaves con el menor costo posible y además, cumpliendo con todas las normativas ambientales. Adicionalmente, la recuperación del agua contenida en los relaves juega un papel muy importante al momento de decidir el método de disposición adecuado, ya que no solo es un recurso importante para el proceso de concentración, sino que el agua contenida en los relaves ya cuenta con las propiedades químicas que facilitan el proceso de flotación y molienda, significando un ahorro de costos adicional.

### **2.3 Disposición de relaves en presas o diques.**

En minas de tajo abierto es común disponer de los relaves empleando presas o diques. Esto debido a los grandes volúmenes de material minado provenientes de la operación. Siendo estos los más económicos en cuanto a su operación y que además permiten operar con un buen control de la polución medioambiental.

Es importante ubicar el depósito de relaves lo más cerca a la concentradora ya que esto disminuirá las distancias de descarga de relaves como las distancias a las que se deberá transportar el agua recuperada.

El diseño del depósito de relaves es una de las etapas fundamentales para la realización de cualquier nuevo proyecto minero de concentración de minerales.

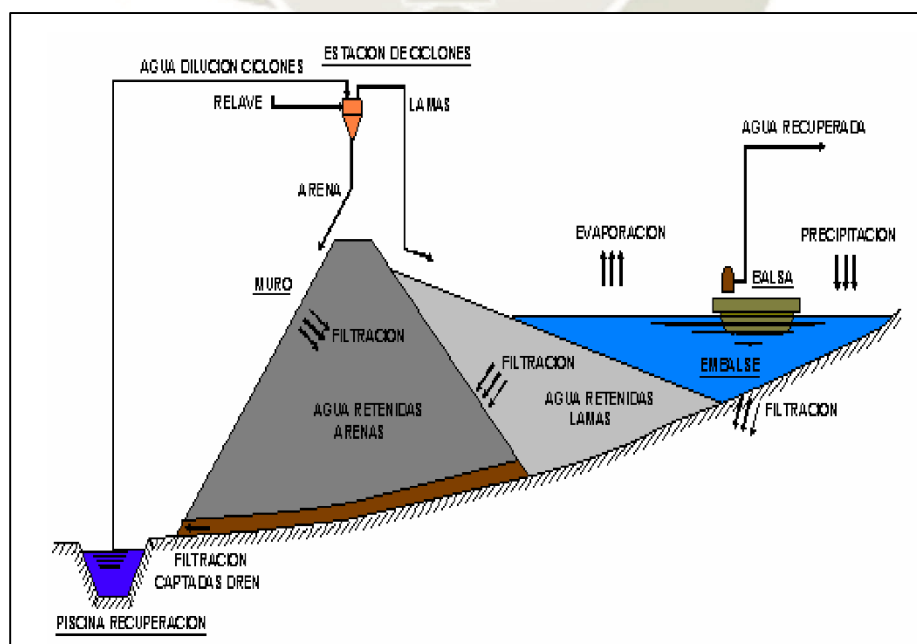
La base o núcleo del dique, conocida como presa de arranque debe ser estructuralmente fuerte y capaz de soportar el peso final del depósito. Generalmente la presa es ubicada en valles o quebradas, ya que esto facilita su construcción y crecimiento.

La disposición y el manejo de relaves adiciona costos operacionales, por lo tanto una buena disposición y diseño son cruciales para lograr que sea lo más rentable posible.

## 2.4 Características de la disposición en presas o diques

Los relaves procedentes del proceso de espesamiento atraviesan un proceso de clasificación utilizando ciclones, el cual consiste en separar las partículas más gruesas de las más finas. Luego de atravesar el proceso de clasificación los relaves son enviados a los depósitos finales conocidos como presas de relaves, en donde el material grueso previamente separado es depositado en el muro o terraplén y el material fino es depositado en el embalse, permitiendo el crecimiento controlado de la presa de relaves.

El agua contenida en los relaves depositados en la presa se separa debido a la sedimentación de los sólidos finos y es bombeada nuevamente a la planta concentradora para su reutilización en el proceso productivo, mejorando así la eficiencia en el consumo de agua.



**Figura 1:** Esquema general de clasificación y descarga de relaves [2].

Es una práctica común situar la presa de relaves en una quebrada que permita el correcto almacenamiento del material, además de permitir el crecimiento vertical y horizontal del terraplén de la presa.

Debido a las largas distancias de transporte del relave y a la diferencia de niveles entre la concentradora y la presa de relaves, se suele emplear el transporte hidráulico por gravedad a través de tuberías, lo cual significa una reducción significativa de costos en transporte en comparación a otros medios (camiones, fajas transportadoras, etc.)

El método más empleado es el transporte por tuberías a concentraciones entre el 40% y 70%, el relave se descarga en la parte superior del dique formando la playa y el embalse de agua para ser recuperada.

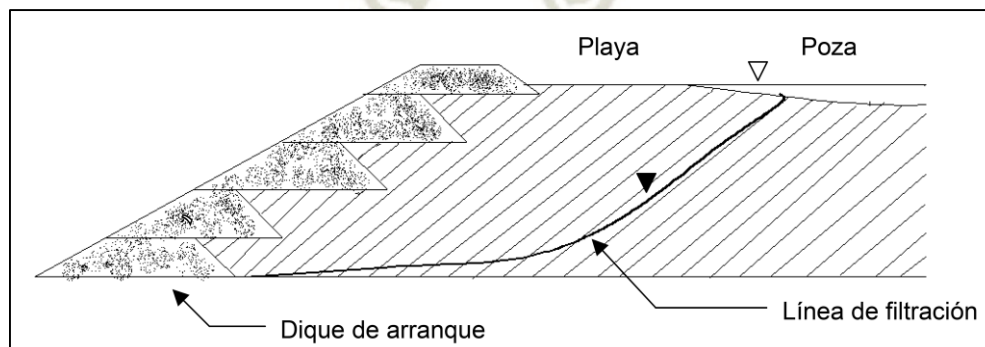
El material más grueso se asienta en la cresta y el más fino en el embalse, formándose zonas conocidas como arenas y lamas.

## 2.5 Tipos de presas de relaves.

Existen diferentes métodos para la conformación y construcción de presas de relaves:

### 2.5.1 Método de aguas arriba:

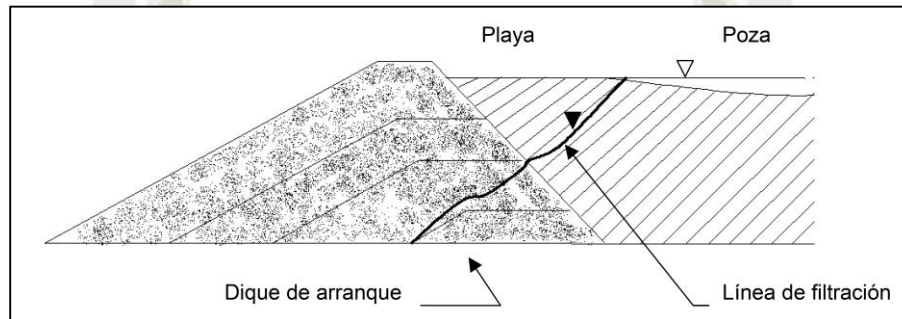
A este método se le conoce de esta manera porque el eje central del muro se mueve aguas arriba del dique. El crecimiento de la presa se da con el depósito de relaves gruesos a través de sistemas de tuberías y válvulas. La ventaja de este método es el bajo costo y la velocidad de crecimiento del dique. La desventaja es que no se pueden alcanzar grandes alturas ya que implican riesgos de estabilidad.



**Figura 2:** Esquema de construcción de presa de relaves por el método aguas arriba [1].

### 2.5.2 Método de aguas abajo:

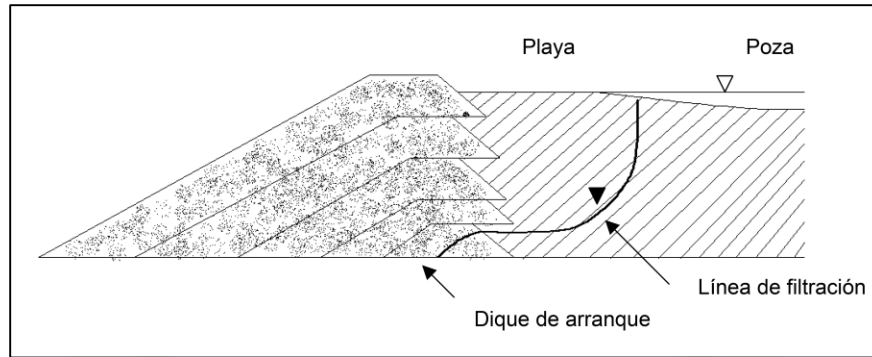
Al contrario que en el método de aguas arriba, el eje central del muro se mueve aguas debajo del dique. El crecimiento del dique se da con material de relleno seleccionado distinto al relave. La ventaja de este tipo de presa es que, al ser construida con material seleccionado, el muro posee mejores características estructurales. La desventaja de este método es que los costos de operación son más elevados.



**Figura 3:** Esquema de construcción de presa de relaves por el método aguas abajo [1].

### 2.5.3 Método de la línea central:

A diferencia de los métodos anteriores, en este método el eje central de la presa es fijo y el crecimiento se da de forma vertical. El material de relleno que puede ser material seleccionado o relave grueso clasificado es depositado tanto en el talud como en la corona o cresta de la presa. La ventaja de este método es que las características estructurales de la presa son similares a las del método aguas abajo, además de ser menos costosa ya que se emplea menos material de préstamo, pudiendo utilizarse el relave como material de relleno. La desventaja de este método es que se requiere la construcción de un sistema de tuberías y soportería que permitan la descarga del relave tanto en la corona como en el talud de la presa.



**Figura 4:** Esquema de construcción de presa de relaves por el método de línea central [1].

## 2.6 Consideraciones para la construcción de presas de relaves.

Debido a la importancia que tiene el agua en nuestra sociedad, los permisos y límites de consumo se ven reducidos para las operaciones mineras. Es por ello que en los últimos años se ha incrementado la necesidad de recuperar el agua contenida en los relaves.

En la mayoría de operaciones mineras de cobre se emplean espesadores, los cuales recuperan gran cantidad de agua contenida en los relaves. La ventaja del uso de relaves espesados es que estos poseen cantidades menores de agua y alcanzan buenos niveles de compactación cuando el agua que contienen es filtrada o evaporada.

Desde la etapa del diseño se debe considerar el ciclo de vida de una presa de relaves, la cual tendrá las siguientes etapas [1]:

- Selección del sitio y diseño de la instalación.
- Construcción.
- Operación.
- Retirada de servicio y cierre definitivo.

De la misma forma, durante la etapa de operación del depósito de relaves se deben implementar y tener en cuenta los siguientes aspectos [1]:

- Políticas.
- Planificación.
- Ejecución.
- Monitoreo.
- Mantenimiento continuo de todos los sistemas.

### **3. Objetivos de la investigación.**

#### **3.1 Objetivo General**

El objetivo del presente trabajo es presentar la metodología y procedimientos aplicables para diseñar un sistema de transporte y clasificación de relaves para ello se planteó una capacidad de procesamiento de 200 mil toneladas por día.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Mostrar la metodología para determinar los diámetros de tubería y seleccionar materiales adecuados para el transporte de relaves en cada etapa del proceso.
- Realizar el dimensionamiento de los cajones de distribución de acuerdo a las condiciones de flujo y tiempo de retención requeridos por el sistema.
- Seleccionar el modelo y cantidad de ciclones requeridos para cada etapa de clasificación.
- Seleccionar las bombas requeridas para el transporte de relaves.

### **4. Justificación**

En las últimas décadas se ha incrementado la implementación de nuevos proyectos mineros que pretenden extraer cobre por medio de plantas concentradoras. Este creciente desarrollo de proyectos mineros implica la construcción de nuevas concentradoras y en consecuencia de presas de relaves que cuenten con sistemas de transporte y clasificación que sean capaces de cumplir con las capacidades de producción y requerimientos mínimos de operación.

El diseño y análisis hidráulico de un sistema de transporte y clasificación de relaves juega un papel fundamental en la construcción de una presa de relaves. El presente trabajo responde a la necesidad de utilizar los métodos y códigos más adecuados para un correcto análisis y diseño de un sistema de transporte y clasificación de relaves para una planta concentradora.

### **5. Alcances**

A continuación se detallan los alcances del presente trabajo:

- Análisis de las propiedades reológicas del relave (densidad, concentración, viscosidad, etc.) a lo largo de las distintas etapas que atravesará por el proceso.
- Análisis de las velocidades de deposición del relave para cada condición de transporte.
- Selección de diámetros y materiales de tubería adecuados para el transporte a través de tuberías gravimétricas operando como canal.
- Selección de diámetros y materiales de las tuberías para el transporte de relaves a presión.
- Cálculo de pérdidas por fricción para flujo homogéneo o heterogéneo siguiendo los modelos más empleados en la industria.
- Análisis de esfuerzo en las tuberías a presión a causa de la presión interna de trabajo, cálculo de espesores de tubería mínimos de acuerdo al código ASME B31.4.
- Dimensionamiento de cajones de distribución de acuerdo a los flujos de entrada de agua y relave teniendo en cuenta el tiempo de retención requerido.
- Selección del tamaño y cantidad de ciclones de la primera y segunda etapa de clasificación.
- Cálculo de las presiones de alimentación mínimas requeridas para los ciclones en la primera y segunda etapa de clasificación.
- Análisis granulométrico del relave proveniente del underflow y overflow de la primera y segunda etapa de clasificación.
- Selección de bombas de relaves considerando los efectos de la concentración y tamaños de partícula del relave.



## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

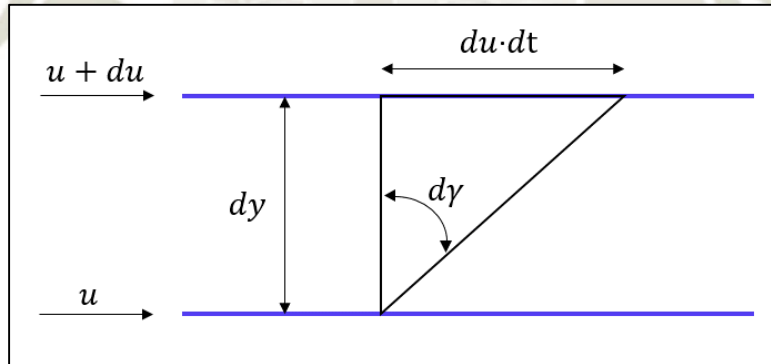
## 1. Mecánica de suspensiones

Una suspensión o pulpa es un fluido o mezcla multifásica, la cual consta de una fase líquida, constituida por el líquido portante (generalmente agua) y por las partículas sólidas en suspensión. Dependiendo de la concentración y de la composición de la mezcla esta puede clasificarse como fluido Newtoniano o como fluido no-Newtoniano [3].

La diferencia entre un fluido Newtoniano y un fluido no-Newtoniano radica en sus propiedades reológicas como la viscosidad. Para un fluido Newtoniano se considera una viscosidad constante, mientras que para un fluido no-Newtoniano la viscosidad varía dependiendo de su temperatura y la tensión de corte a la cual es sometido.

### 1.1 Reología de suspensiones multifásicas

La reología es la disciplina que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación de un fluido. Un método sencillo para analizar reológicamente un fluido puede hacerse considerando que el fluido es transportado a en medio de dos planos paralelos separados una distancia  $dy$  como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 5:** Deformación de un fluido en medio de dos planos paralelos [3].

Esta condición ocasionará que en el plano superior el fluido tenga una velocidad superior en  $du$  a la velocidad en el plano inferior, lo cual origina un esfuerzo cortante  $\tau$  que ocasiona una deformación angular  $dy$ . Por lo tanto, se tiene:

$$\frac{du}{dy} = \frac{du}{dy} = \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 2. 1})$$

Donde:

$dy$  : Distancia entre los planos paralelos.

$du$  : Diferencial de velocidades entre el plano superior e inferior.

$\dot{\gamma}$  : Velocidad de deformación angular.

Este esfuerzo cortante puede calcularse para diferentes valores de velocidades de deformación angular lo cual podría expresarse mediante la siguiente expresión:

$$\tau = f\left(\frac{du}{dy}\right) = f(\dot{\gamma}) \quad (\text{Ec. 2. 2})$$

Donde:

$\dot{\gamma}$  : Velocidad de deformación angular.

$\tau$  : Esfuerzo o tensión de corte.

Esta función se conoce como curva reológica del fluido. Dependiendo de su curva reológica, los fluidos no-Newtonianos pueden clasificarse en dos grandes grupos: Los fluidos no-Newtonianos dependientes del tiempo y los fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo [3].

## 1.2 Fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo

Dentro de los fluidos no-Newtonianos independientes del tiempo se tienen los siguientes tipos:

### 1.2.1 Plástico de Bingham:

Estos fluidos tienen la característica de poseer una curva reológica de tipo lineal y requieren de un mínimo nivel de tensión o esfuerzo para comenzar a fluir. Este nivel mínimo de tensión es conocido como tensión de fluencia ( $\tau_f$ ). A continuación, se muestra la ecuación general de un fluido plástico de Bingham.

$$\tau_w = \tau_f + n * \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 2. 3})$$

Donde:

$\tau_w$  : Tensión de corte.

$\tau_f$  : Tensión de fluencia.

$n$  : Coeficiente de rigidez o viscosidad.

$\dot{\gamma}$  : Velocidad de deformación angular.

### 1.2.2 Pseudoplásticos:

Para este tipo de fluido la tensión de corte disminuye conforme se incrementa la velocidad de deformación angular. A continuación, se muestra la ecuación general de un fluido pseudoplástico.

$$\tau_w = K * \dot{\gamma}^n \quad (\text{Ec. 2. 4})$$

Donde:

$\tau_w$  : Tensión de corte.

$K$  : Factor de consistencia.

$n$  : Índice de comportamiento del fluido (<1).

$\dot{\gamma}$  : Velocidad de deformación angular.

### 1.2.3 Dilatantes:

Para este tipo de fluido la tensión de corte incrementa conforme se incrementa la velocidad de deformación angular. A continuación, se muestra la ecuación general de un fluido dilatante.

$$\tau_w = K * \dot{\gamma}^n \quad (\text{Ec. 2. 5})$$

Donde:

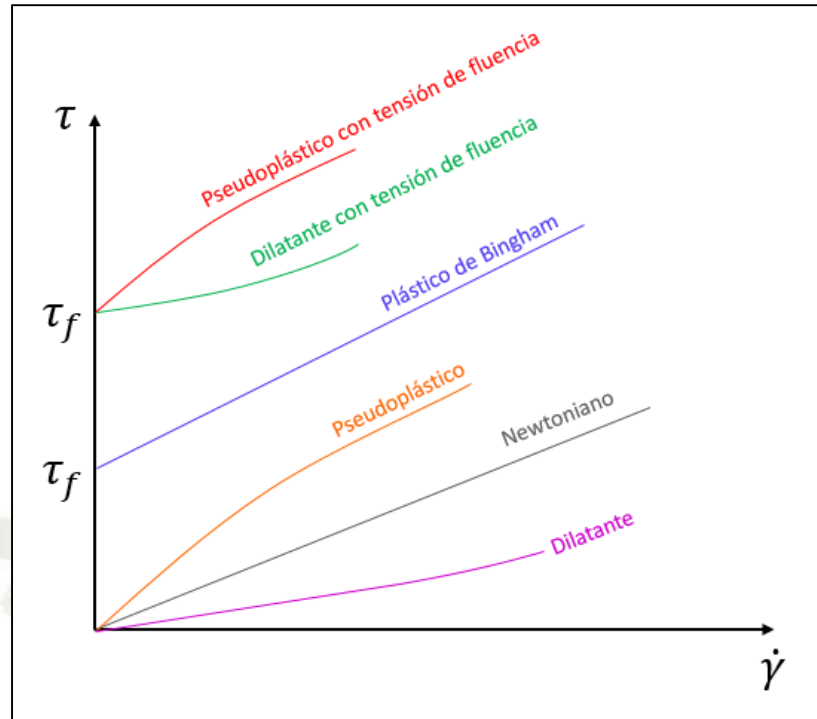
$\tau_w$  : Tensión de corte.

$K$  : Factor de consistencia.

$n$  : Índice de comportamiento del fluido (>1).

$\dot{\gamma}$  : Velocidad de deformación angular.

En la figura a continuación se muestran las curvas reológicas más frecuentes de los fluidos. Se incluyen además las variantes para los fluidos Pseudoplásticos y Dilatantes, las cuales requieren de una tensión mínima de fluencia para comenzar a fluir.



**Figura 6:** Curvas reológicas de los diferentes tipos de fluidos.

### 1.3 Aspectos físicos de una suspensión

Cuando se desea realizar el transporte de fluidos homogéneos e incompresibles como el agua, basta con conocer su densidad y viscosidad para así poder definir las propiedades del fluido. Sin embargo, cuando el transporte implica sólidos en suspensión se deben tener en cuenta los aspectos físicos de las partículas a transportar. Esta mezcla de propiedades entre el fluido portante (agua) y una concentración de partículas sólidas determinarán una serie de propiedades (densidad, viscosidad, tensión de fluencia) que ayudarán a definir la mezcla de una forma más detallada. El definir estas propiedades de forma precisa, permitirá poder diseñar el sistema de transporte de una forma eficiente.

A continuación se presentarán algunas de las propiedades físicas más importantes utilizadas para el cálculo de sistemas de transporte de sólidos en suspensión.

#### 1.3.1 Tamaño y forma de las partículas:

Como es de suponer, en casi todas las suspensiones y en especial en las suspensiones mineras, el tamaño y la forma de las partículas suspendidas es variable, esta variabilidad de las partículas hace

más complejo el diseño de sistemas de sólidos en suspensión. Sin embargo, es posible generalizar la forma y el tamaño de un grupo de partículas sin que esto signifique una variación importante en la exactitud de los cálculos. Algunas de las definiciones más utilizadas en la mecánica de suspensiones para definir el tamaño de partículas son las siguientes [3]:

### 1.3.2 Diámetro nominal:

Se denomina así al diámetro de una esfera que ocupa el mismo volumen de la partícula.

### 1.3.3 Diámetro de tamiz:

Es la longitud de abertura de una malla por la que una partícula pasa ajustada.

### 1.3.4 Forma de las partículas:

Al igual que con el tamaño, la forma de las partículas presenta variaciones que dependerán del proceso que haya atravesado el material (chancado, molienda, etc.)

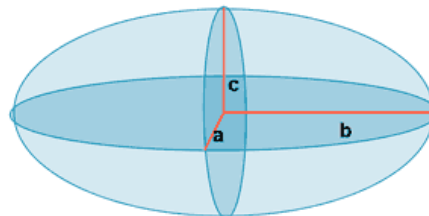
La forma de una partícula influye en su comportamiento al encontrarse inmersa o suspendida en un fluido. Por lo general para definir la forma de una partícula se emplean los siguientes términos:

### 1.3.5 Esfericidad:

Se define así a la relación entre el área nominal (como si se tratara de una esfera de igual volumen) y el área real de una partícula.

### 1.3.6 Factor de forma:

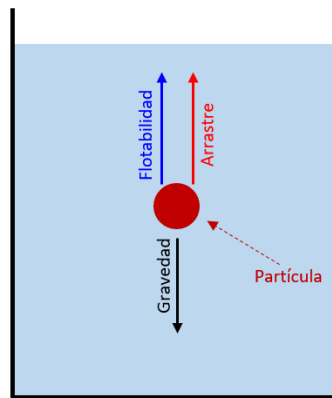
Es una relación que define la forma de la partícula en base a sus dimensiones triaxiales como si se tratara de un elipsoide.



**Figura 7:** Dimensiones triaxiales de un elipsoide.

### 1.4 Movimiento de una partícula en un fluido

Cuando una partícula cae libremente en un fluido interactúan en esta la fuerza de gravedad, la fuerza de flotabilidad y la fuerza de arrastre que se genera entre el fluido y la partícula.



**Figura 8:** Fuerzas que interactúan en una partícula inmersa en un fluido.

La fuerza de flotabilidad puede estimarse empleando el principio de Arquímedes:

$$F_{Flo} = \frac{\pi}{6} \cdot d_p^3 \cdot \rho_l \cdot g \quad (\text{Ec. 2. 6})$$

Donde:

$F_{Flo}$  : Fuerza de flotabilidad.

$d_p^3$  : Diámetro de la partícula (esférica).

$\rho_l$  : Densidad del fluido.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

La fuerza de arrastre para una partícula esférica está dada por la siguiente ecuación:

$$F_A = 0.5 \cdot C_D \cdot \rho_l \cdot V_t^2 \left( \frac{\pi \cdot d_p^2}{4} \right) \quad (\text{Ec. 2. 7})$$

Donde:

$F_A$  : Fuerza de arrastre.

$C_D$  : Coeficiente de arrastre.

$V_t$  : Velocidad terminal de la partícula.

$\rho_l$  : Densidad del fluido.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

$d_p$  : Diámetro de la partícula (esférica).

Se denomina velocidad terminal a la velocidad con la que la partícula se “asienta” en el fluido. Esta velocidad puede determinarse experimentalmente así como también utilizando modelos matemáticos.

### 1.5 Número de Reynolds de la partícula

Conociendo la velocidad terminal de la partícula podemos determinar el número de Reynolds de la misma:

$$Re_p = \frac{V_t \cdot d_p \cdot \rho_l}{\mu_l} \quad (\text{Ec. 2. 8})$$

Donde:

$Re_p$  : Número de Reynolds de la partícula.

$V_t$  : Velocidad terminal de la partícula.

$d_p$  : Diámetro de la partícula.

$\rho_l$  : Densidad del fluido.

$\mu_l$  : Viscosidad del fluido.

### 1.6 Velocidad terminal y coeficiente de arrastre de partículas esféricas

La velocidad terminal y el coeficiente de arrastre de las partículas son parámetros necesarios para el diseño de sistemas de transporte de pulpas mineras. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas para determinar el coeficiente de arrastre y la velocidad terminal de una partícula esférica.

#### 1.6.1 Esferas finas ( $Re_p < 1$ )

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (\text{Ec. 2. 9})$$

$$V_t = \frac{g(\rho_p - \rho_l)d_p^2}{18\mu_l} \quad (\text{Ec. 2. 10})$$

Donde:

$C_D$  : Coeficiente de arrastre de la partícula.

$Re_p$  : Número de Reynolds de la partícula.

$V_t$  : Velocidad terminal de la partícula.

$d_p$  : Diámetro de la partícula.

$\rho_p$  : Densidad de la partícula.

$\rho_l$  : Densidad del fluido.

$\mu_l$  : Viscosidad del fluido.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

### 1.6.2 Esferas intermedias ( $1 < Re_p < 1000$ )

$$C_D = \frac{4 \cdot g(\rho_p - \rho_l)d_p}{3 \cdot \rho_l \cdot V_t^2} \quad (\text{Ec. 2. 11})$$

$$V_t = 0.2 \cdot \left[ \frac{(\rho_p - \rho_l) \cdot g}{\rho_l} \right]^{0.72} \cdot \frac{d_p^{1.18}}{(\mu_l/\rho_p)^{0.45}} \quad (\text{Ec. 2. 12})$$

Donde:

$C_D$  : Coeficiente de arrastre de la partícula.

$V_t$  : Velocidad terminal de la partícula.

$d_p$  : Diámetro de la partícula.

$\rho_p$  : Densidad de la partícula.

$\rho_l$  : Densidad del fluido.

$\mu_l$  : Viscosidad del fluido.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

### 1.6.3 Esferas grandes ( $1000 < Re_p < 100\ 000$ )

$$C_D = 0.4 \quad (\text{Ec. 2. 13})$$

$$V_t = \frac{g(\rho_p - \rho_l)d_p^2}{18\mu_l} \quad (\text{Ec. 2. 14})$$

Donde:

- $C_D$  : Coeficiente de arrastre de la partícula.  
 $V_t$  : Velocidad terminal de la partícula.  
 $d_p$  : Diámetro de la partícula.  
 $\rho_p$  : Densidad de la partícula.  
 $\rho_l$  : Densidad del fluido.  
 $\mu_l$  : Viscosidad del fluido.  
 $g$  : Aceleración de la gravedad.

## 2. Características reológicas de una suspensión

### 2.1 Curva granulométrica

Como es lógico, todas las partículas que conforman una suspensión no poseen las mismas características de tamaño y forma. En los relaves mineros se presentan diversos tamaños de partícula cuya proporción determinará el comportamiento de la mezcla.

Una forma de mostrar gráficamente el rango de dimensiones de un conjunto de partículas es utilizando la curva granulométrica, la cual muestra el rango de dimensiones y el porcentaje de concentración de las partículas que conforman una muestra.

En una mezcla, los diámetros de partícula mayores definirán la velocidad de desgaste de las tuberías y accesorios empleados para el transporte de la suspensión.

Los diámetros de partícula menores influyen en el comportamiento reológico de la mezcla.

El diámetro intermedio o  $d_{50}$  es ampliamente utilizado para determinar otras propiedades.

La curva granulométrica de una muestra se puede obtener de diversas formas, las cuales dependerán de la gama de tamaños de partícula presentes en la muestra a analizar.

Para tamaños grandes, por encima de los centímetros, se pueden emplear medidas directas y conteo de partículas. Este no es el caso para los relaves mineros.

Para medidas del orden de las micras se puede emplear analizadores láser para medir la curva. Estos analizadores tienen la ventaja de medir con buena rapidez y precisión el tamaño y concentración de partículas en una muestra. Debido a su complejidad los analizadores láser son generalmente utilizados en laboratorios.

Sin embargo, el método más empleado por su sencillez y efectividad es el tamizado, el cual consiste en cernir la muestra a través de diferentes mallas, obteniendo así un porcentaje de

retención de muestra en cada tamiz lo cual ayuda a graficar la curva granulométrica. La simplicidad de este método permite que se puedan tomar muestras en campo durante la operación de un sistema y de esta forma ir monitoreando las posibles variaciones que puedan existir en la reología del relave. El sistema de mallas más empleado es el Tyler, cuyas equivalencias se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1: Equivalencias de Malla Tyler a Pulgadas y Milímetros

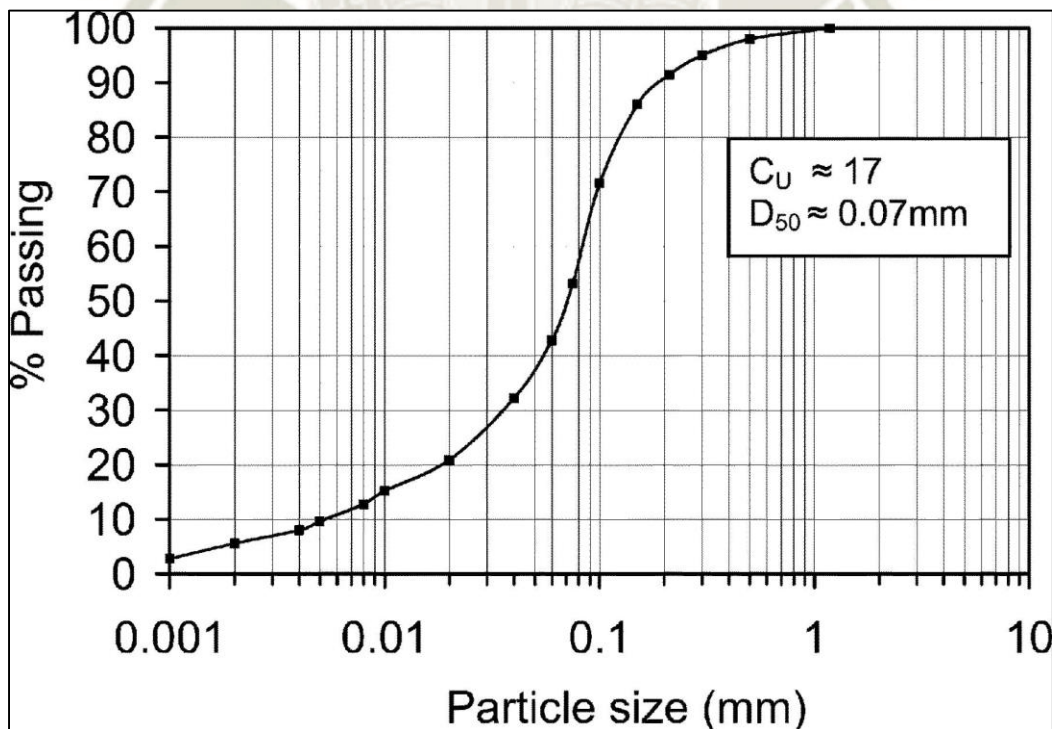
Malla Tyler	Pulgadas	Milímetros
3	0.2650	6.730
4	0.1870	4.760
5	0.1570	4.000
6	0.1320	3.360
7	0.1110	2.830
8	0.0937	2.380
10	0.0787	2.000
12	0.0661	1.680
14	0.0555	1.410
16	0.0469	1.190
18	0.0394	1.000
20	0.0331	0.841
25	0.0280	0.707
30	0.0232	0.595
35	0.0197	0.500
40	0.0165	0.400
45	0.0138	0.354
50	0.0117	0.297
60	0.0098	0.250
70	0.0083	0.210
80	0.0070	0.177

Tabla 1: Equivalencias de Malla Tyler a Pulgadas y Milímetros

Malla Tyler	Pulgadas	Milímetros
100	0.0059	0.149
120	0.0049	0.125
140	0.0041	0.105
170	0.0035	0.088
200	0.0029	0.074
230	0.0024	0.063
270	0.0021	0.053
325	0.0017	0.044
400	0.0015	0.037

**Nota.** Fuente: Adaptado de MINDU Minerales Industriales [4].

Luego de realizado el proceso de tamizado se obtiene la curva granulométrica de la muestra, la cual tendrá la apariencia de una curva “S”.



**Figura 9:** Curva granulométrica de una muestra [5].

De esta curva se pueden obtener diferentes diámetros nominales o característicos, los cuales determinarán el comportamiento y las propiedades del relave. Algunos de los diámetros característicos más empleados son:

- Diámetro de partícula al 85% o D85.
- Diámetro de partícula al 50% o D50.

## 2.2 Concentración de sólidos

Representa la proporción de partículas sólidas contenidas en una mezcla y se representa de dos formas:

### 2.2.1 Concentración de sólidos en volumen:

Es la relación entre el volumen total de la mezcla y el volumen ocupado por la fase sólida.

$$C_v = \frac{V_s}{V_m} \quad (\text{Ec. 2. 15})$$

Donde:

$V_m$  : Volumen ocupado por la mezcla.

$V_s$  : Volumen ocupado por las partículas sólidas.

$C_v$  : Concentración de sólidos en volumen.

### 2.2.2 Concentración de sólidos en peso:

Es la relación entre el peso total de la mezcla y el peso de la fase sólida.

$$C_p = \frac{W_s}{W_m} \quad (\text{Ec. 2. 16})$$

Donde:

$W_m$  : Peso total de la mezcla.

$W_s$  : Peso de las partículas sólidas.

$C_p$  : Concentración de sólidos en peso.

## 2.3 Densidad

Para poder determinar la densidad de una mezcla sólido-líquido se deberá conocer la densidad de cada una de las fases por separado.

### 2.3.1 Densidad de la fase sólida:

La densidad de las partículas sólidas puede variar dependiendo de la geología del yacimiento minero, sin embargo algunos autores indican que para el caso de los relaves mineros las densidades oscilan entre los 2000 y 3400 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.3.2 Densidad de la fase líquida:

Corresponde a la densidad del líquido que será utilizado en la mezcla, para el caso de los relaves el líquido a emplear es agua de proceso el cual tiene una densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.3.3 Densidad de la mezcla:

Es la densidad total de la mezcla (sólido y líquido) y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\rho_m = \rho_l + (\rho_s - \rho_l) * C_v \quad (\text{Ec. 2. 17})$$

Donde:

$\rho_m$  : Densidad de la mezcla.

$\rho_s$  : Densidad de las partículas sólidas.

$\rho_l$  : Densidad del fluido portante.

$C_v$  : Concentración de sólidos en volumen.

Es una práctica común expresar la densidad en términos de densidad relativa o gravedad específica, la cual es la resultante de dividir la densidad del fluido entre la densidad del agua.

$$S_m = \frac{\rho_m}{\rho_{H2O}} \quad (\text{Ec. 2. 18})$$

$$S_s = \frac{\rho_s}{\rho_{H2O}} \quad (\text{Ec. 2. 19})$$

$$S_l = \frac{\rho_l}{\rho_{H2O}} \quad (\text{Ec. 2. 20})$$

Donde:

$\rho_{H2O}$  : Densidad del agua.

$S_m$  : Densidad relativa de la mezcla.

$S_s$  : Densidad relativa de las partículas sólidas.

$S_l$  : Densidad relativa del líquido portante.

A partir de las ecuaciones anteriormente presentadas se pueden establecer diferentes ecuaciones que relacionen la densidad relativa, concentración en peso y concentración en volumen, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2: Fórmulas para calcular concentración y densidad de una pulpa

Variable a calcular	Fórmula 1	Fórmula 2
$C_v$	$C_v = \frac{C_p}{1 + (1 - C_p) \cdot (S_s - 1)}$	$C_v = \frac{S_m - 1}{S_s - 1}$
$C_p$	$C_p = \frac{C_v}{1 + (S_s - 1) \cdot C_v} \cdot S_s$	$C_p = \frac{(S_m - 1) \cdot S_s}{S_m \cdot S_s - 1}$
$S_m$	$S_m = 1 + (S_s - 1) \cdot C_v$	$S_m = \frac{S_s}{1 + (1 - C_p) \cdot (S_s - 1)}$

**Nota.** Fuente: Fluidodinámica aplicada a la minería – JRI [3].

## 2.4 Flujo másico y flujo volumétrico

El flujo de una pulpa puede expresarse en términos de flujo másico o flujo volumétrico.

Generalmente cuando se habla de flujo másico este se expresa en toneladas métricas por hora (t/h) de sólidos secos, es decir no se considera el flujo másico del agua.

Por otro lado, el flujo volumétrico (caudal) generalmente expresado en metros cúbicos por hora (m<sup>3</sup>/hr) se utiliza para representar el flujo total de pulpa (agua más sólidos).

Un método práctico para poder convertir el flujo másico de toneladas secas a flujo volumétrico de pulpa cuando el fluido de transporte es el agua se presenta en la siguiente ecuación:

$$Q_m = \frac{\dot{m}}{S_s \cdot C_v} \quad (\text{Ec. 2. 21})$$

Donde:

$Q_m$  : Flujo volumétrico de la pulpa (agua más sólidos) en (m<sup>3</sup>/hr).

$\dot{m}$  : Flujo másico de sólidos secos en (t/h).

$S_s$  : Densidad relativa de los sólidos.

$C_v$  : Concentración en volumen de la pulpa.

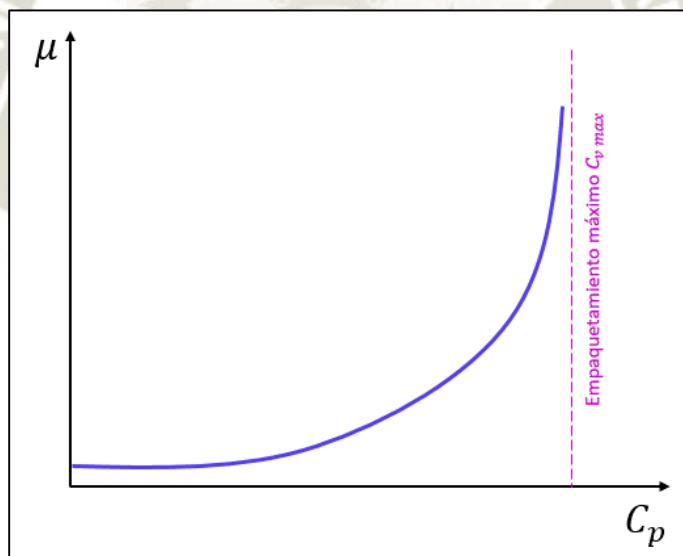
## 2.5 Concentración de empaquetamiento

Se denomina así a la máxima concentración volumétrica que puede alcanzar un conjunto de partículas indeformables. La concentración volumétrica máxima que puede alcanzar una mezcla dependerá directamente del tamaño y forma de las partículas.

La mejor forma de obtener esta concentración máxima para una muestra específica es mediante pruebas de laboratorio. De acuerdo a los ensayos y pruebas realizadas por varios autores, se estima que en el caso de pulpas mineras las concentraciones de empaquetamiento oscilan entre el 52% y el 74% [6].

## 2.6 Viscosidad

La viscosidad de una suspensión, es variable y depende directamente de la concentración de sólidos. A mayor concentración de sólidos mayor será la viscosidad de la mezcla. A continuación, se muestra como ejemplo una curva de viscosidad vs concentración de sólidos.



**Figura 10:** Curva de Concentración VS Viscosidad [3].

Como se puede apreciar en la gráfica, cuando la concentración se acerca a la concentración de empaquetamiento la viscosidad de la mezcla tiende al infinito.

La viscosidad de una mezcla particular, se determina generalmente de forma experimental. Los métodos experimentales existentes consisten en utilizar viscosímetros rotatorios. Con este equipo

se toman medidas de la viscosidad de una muestra a diferentes concentraciones, finalmente se grafican estos puntos en un reograma y se proyecta la curva de viscosidad vs concentración.

También existen métodos matemáticos aproximados para calcular la viscosidad de una mezcla en particular, estos diferentes métodos son aplicados dependiendo del tipo de pulpa que se esté analizando.

Algunos de los métodos matemáticos más empleados para el cálculo de la viscosidad en pulpas mineras son los siguientes:

### 2.6.1 Ecuaciones de Thomas:

Thomas en el año 1965 propuso dos ecuaciones para calcular la viscosidad en pulpas [7].

- Ecuación de Thomas para pulpas con  $C_v < 20\%$

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = 1 + 2.5C_v + 10.05C_v^2 \quad (\text{Ec. 2. 22})$$

Donde:

$\mu_m$  : Densidad absoluta de la mezcla.

$\mu_l$  : Densidad absoluta de la fase líquida.

$C_v$  : Concentración en volumen.

- Ecuación de Thomas para pulpas con  $C_v > 20\%$

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = 1 + 2.5C_v + 10.05C_v^2 + 0.00273 \exp(16.6C_v) \quad (\text{Ec. 2. 23})$$

Donde:

$\mu_m$  : Densidad absoluta de la mezcla.

$\mu_l$  : Densidad absoluta de la fase líquida.

$C_v$  : Concentración en volumen.

### 2.6.2 Ecuación de Krieger y Dougherty:

A diferencia de la ecuación de Thomas, este modelo requiere de datos experimentales previos ya que utiliza parámetros de ajuste que permiten obtener resultados con un mayor grado de exactitud [6].

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = \frac{1}{\left(1 - \frac{C_v}{C_{v\max}}\right)^{E \cdot C_{v\max}}} \quad (\text{Ec. 2. 24})$$

Donde:

$\mu_m$  : Densidad absoluta de la mezcla.

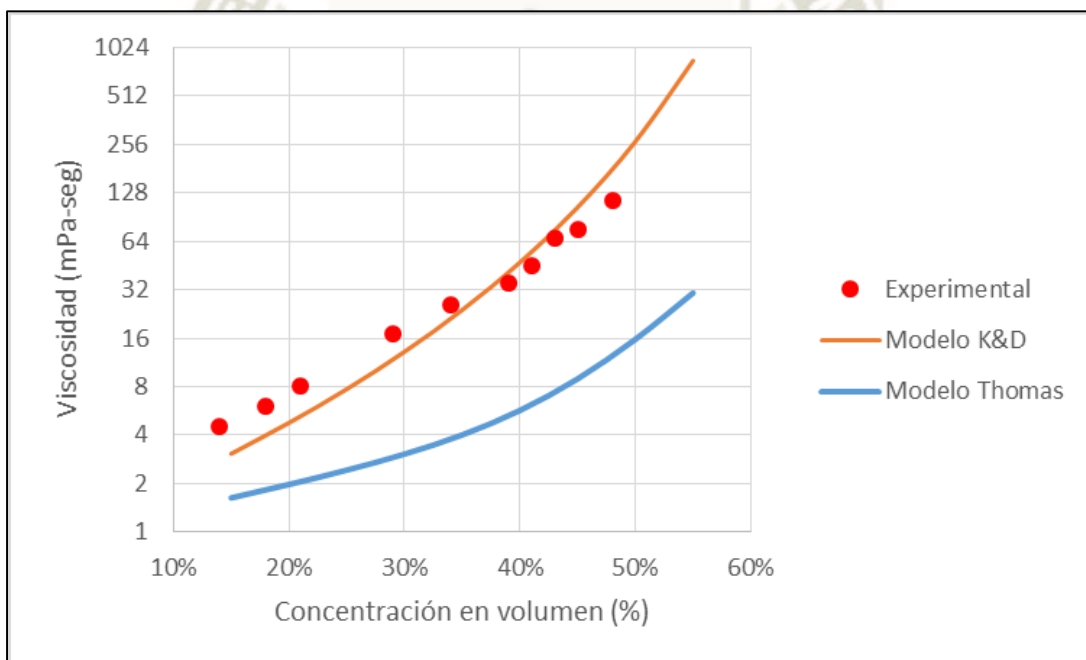
$\mu_l$  : Densidad absoluta de la fase líquida.

$C_v$  : Concentración en volumen.

$C_{v\max}$  : Concentración en volumen de empaquetamiento de una pulpa (parámetro de ajuste).

$E$  : Viscosidad intrínseca. Dependerá de la forma de las partículas (parámetro de ajuste).

A continuación se muestra un diagrama de viscosidad vs concentración para un relave minero en el cual se comparan los datos experimentales contra los modelos matemáticos presentados anteriormente.



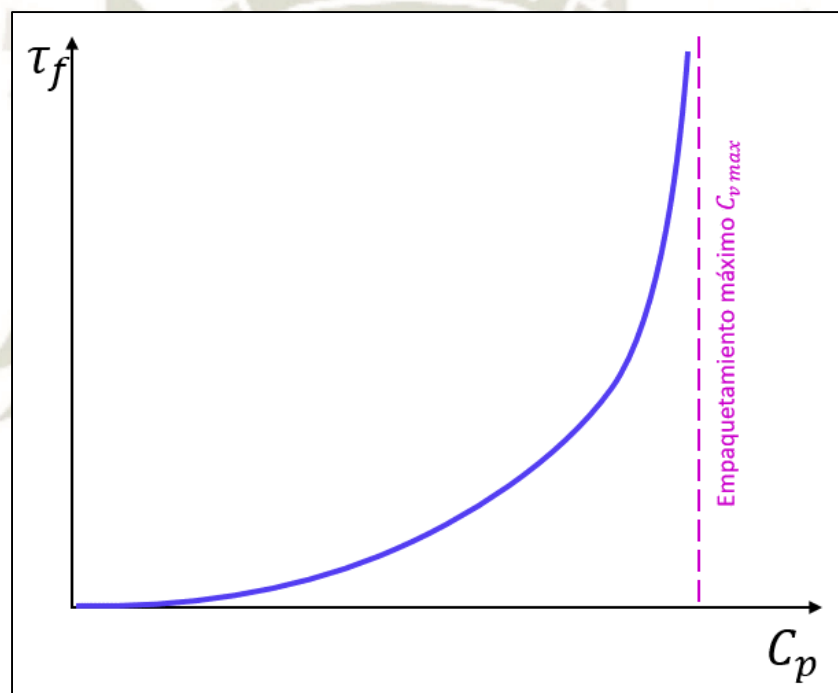
**Figura 11:** Comparación de los modelos K&D y Thomas para un relave minero.

Como se puede apreciar la ecuación de Thomas va subestimando el valor de la viscosidad conforme se incrementa la concentración en volumen. Mientras que el modelo de Krieger y Dougherty tiene mayor exactitud gracias a los parámetros de ajuste del modelo.

## 2.7 Tensión de fluencia

La tensión de fluencia es el mínimo nivel de esfuerzo que se requiere realizar a un fluido para que este comience a fluir.

Al igual que la viscosidad, la tensión de fluencia de una suspensión es variable y depende directamente de la concentración de sólidos. A una concentración de sólidos igual a cero, la tensión de fluencia es cero y va incrementando a medida que la concentración de sólidos se eleva, tendiendo hacia el infinito cuando la concentración se aproxima a la concentración de empaquetamiento. A continuación, se muestra como ejemplo una curva de tensión de fluencia vs concentración de sólidos.



**Figura 12:** Curva de Concentración VS Tensión de fluencia [3].

De forma similar a la viscosidad, la tensión de fluencia de una mezcla puede obtenerse mediante métodos experimentales y matemáticos. Dentro de los métodos experimentales más empleados está la medición de la tensión de fluencia a través de reómetros rotatorios.

Dentro de los métodos matemáticos más empleados se tienen los siguientes:

### 2.7.1 Modelo de Thomas:

El modelo propuesto por Thomas utiliza la expresión mostrada a continuación [3].

$$\tau_f = B \cdot C_v^3 \cdot \exp\left(\frac{2.7 \cdot C_v}{1 - C_v}\right) \quad (\text{Ec. 2. 25})$$

Donde:

$\tau_f$  : Tensión de fluencia.

$C_v$  : Concentración en volumen.

El factor B se calcula mediante la siguiente expresión:

$$B = \frac{C_2}{d_{50}^{N_2}} \quad (\text{Ec. 2. 26})$$

Donde:

$d_{50}$  : Diámetro de partícula al 50% en micras ( $\mu\text{m}$ ).

Los Factores  $C_2$  y  $N_2$  dependerán del tipo de pulpa a analizar y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3: Coeficientes C2 y N2 para tensión de fluencia según el modelo de Thomas.

Material	C2	N2
Mineral	11838.00	1.1713
Relave	3379.50	1.1211
Concentrado	497.52	0.6269

**Nota.** Fuente: Fluidodinámica aplicada a la minería – JRI [3].

### 2.7.2 Modelo de Heymann:

De forma similar al modelo de K&D para la viscosidad, el modelo de Heymann utiliza parámetros de ajuste que permiten adaptar la curva [6].

$$\tau_f = \left[ \frac{1}{\left(1 - \frac{C_v}{C_{v \max}}\right)^2} - 1 \right] \cdot \tau_0 \quad (\text{Ec. 2. 27})$$

Donde:

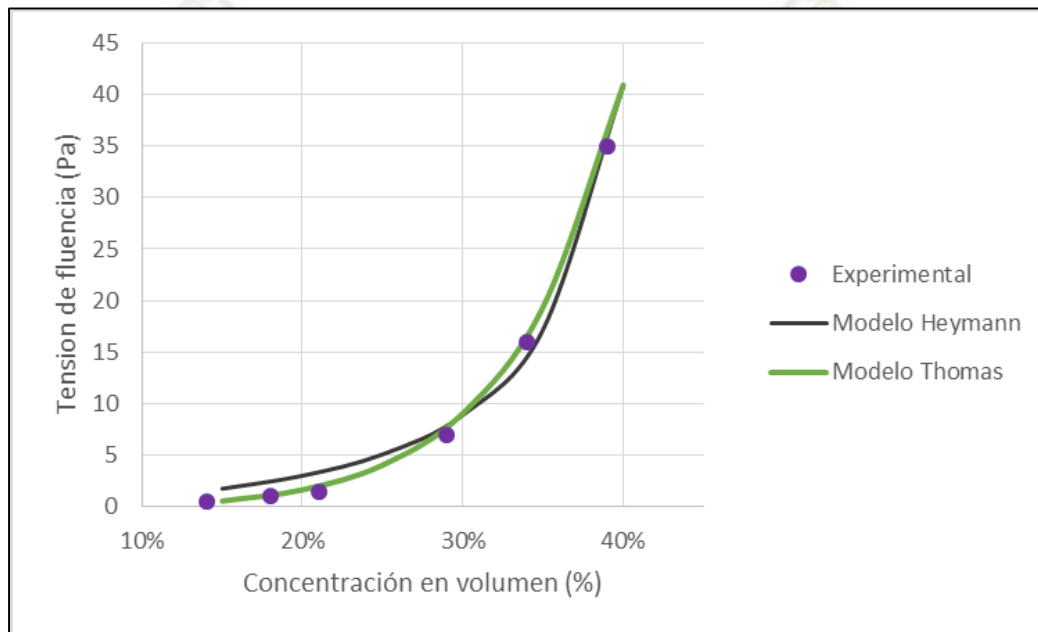
$\tau_f$  : Tensión de fluencia.

$\tau_0$  : Parámetro de ajuste, tal que  $\tau_f = \tau_0$  cuando  $C_v = 0.2929 \cdot C_{v\ max}$

$C_v$  : Concentración en volumen.

$C_{v\ max}$  : Concentración en volumen de empaquetamiento de la pulpa (parámetro de ajuste).

A continuación se muestra un diagrama de tensión de fluencia vs concentración para un relave minero en el cual se comparan los datos experimentales contra los modelos matemáticos presentados anteriormente.



**Figura 13:** Comparación de los modelos Heymann y Thomas para un relave minero.

Como se puede apreciar para este caso, ambos modelos presentan un buen ajuste. Sin embargo podemos apreciar un mayor nivel de exactitud para el modelo de Thomas.

## 2.8 Velocidad de flujo

La velocidad de flujo juega un papel vital cuando se trata de transporte de pulpas, ya que una velocidad demasiado baja puede provocar la sedimentación de sólidos en las tuberías y en consecuencia el colapso de las líneas de transporte. Por otro lado, una velocidad de flujo excesiva, puede provocar un desgaste prematuro de tuberías y accesorios.

Visto desde el tamaño y forma de las partículas, una mezcla puede clasificarse como homogénea o heterogénea. Se denomina a una mezcla homogénea cuando el tamaño de sus partículas es

uniforme o presenta variaciones insignificantes. Por otro lado, una mezcla heterogénea es la que posee partículas de diferentes tamaños.

Las pulpas mineras son en la mayoría de los casos mezclas heterogéneas, ya que poseen partículas de diferentes tamaños y formas.

Cuando se analiza el comportamiento de una pulpa heterogénea siendo transportada por una tubería horizontal podemos encontrar cuatro tipos de flujo los cuales están íntimamente ligados a su velocidad.

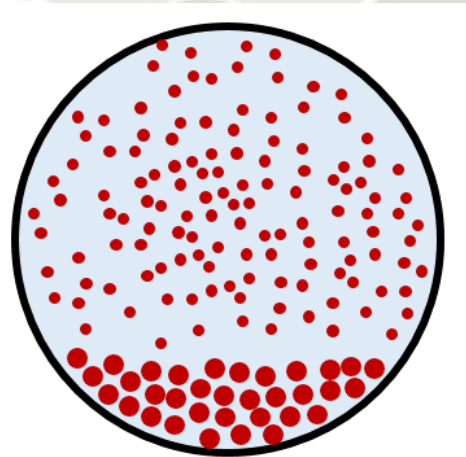
### 2.8.1 Flujo con cama estacionaria:

Cuando la velocidad de transporte es lenta, las partículas más grandes y pesadas se asentarán en el fondo de la tubería lo cual reducirá la sección de transporte efectiva e incrementará la presión necesaria en la línea para mantener el flujo de la pulpa [7].

Si la velocidad disminuye aún más hasta un valor  $v_1$  ocurrirá el fenómeno conocido como sedimentación o bloqueo de la tubería.

Por otro lado, si la velocidad se incrementa hasta un valor  $v_2$  las partículas asentadas en el fondo comenzarán a desplazarse.

En la figura a continuación, se muestra la sección transversal de una tubería transportando una pulpa heterogénea bajo la condición de Flujo con cama estacionaria.

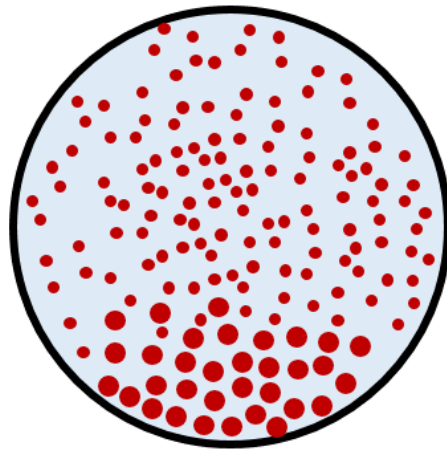


**Figura 14:** Distribución de partículas para flujo con cama estacionaria.

### 2.8.2 Flujo con cama móvil:

A medida que la velocidad de flujo se incrementa se empieza a observar movimiento en las partículas sedimentadas, lo cual ocasionará que la cama estacionaria comience a desplazarse a una velocidad por lo general menor a la velocidad promedio de las partículas más livianas. Conforme la velocidad alcance un valor  $v_3$  las partículas más pesadas comenzarán a suspenderse [7].

En la figura a continuación, se muestra la sección transversal de una tubería transportando una pulpa heterogénea bajo la condición de flujo con cama móvil.

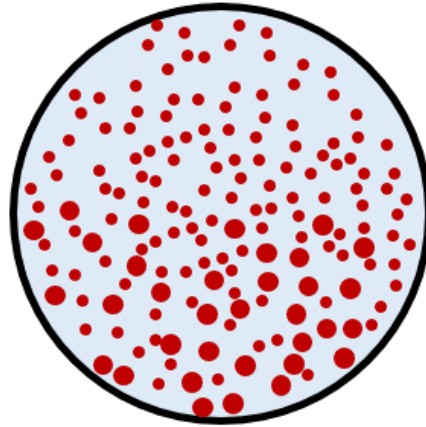


**Figura 15:** Distribución de partículas para flujo con cama móvil.

### 2.8.3 Flujo asimétrico:

Conforme se incrementa la velocidad por encima de  $v_3$  la turbulencia comienza a suspender aún más a las partículas más pesadas, bajo esta condición se puede observar que las partículas están completamente suspendidas, sin embargo se puede distinguir aún que las partículas más pesadas se encuentran suspendidas en la mitad inferior de la tubería [7].

En la a continuación, se muestra la sección transversal de una tubería transportando una pulpa heterogénea bajo la condición de Flujo asimétrico.

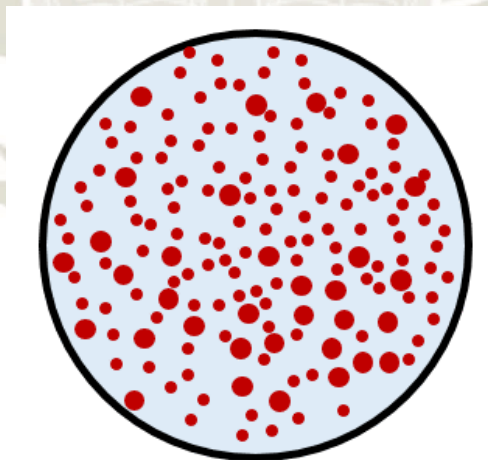


**Figura 16:** Distribución de partículas para flujo asimétrico.

#### 2.8.4 Flujo simétrico o pseudo-homogéneo:

Cuando la velocidad se incrementa aún más alcanzando un valor de  $v_4$ , todas las partículas están suspendidas y distribuidas por toda la tubería. Esta condición de flujo se conoce como flujo simétrico o pseudo-homogéneo [7].

A continuación, se muestra la sección transversal de una tubería transportando una pulpa heterogénea bajo la condición de flujo simétrico.

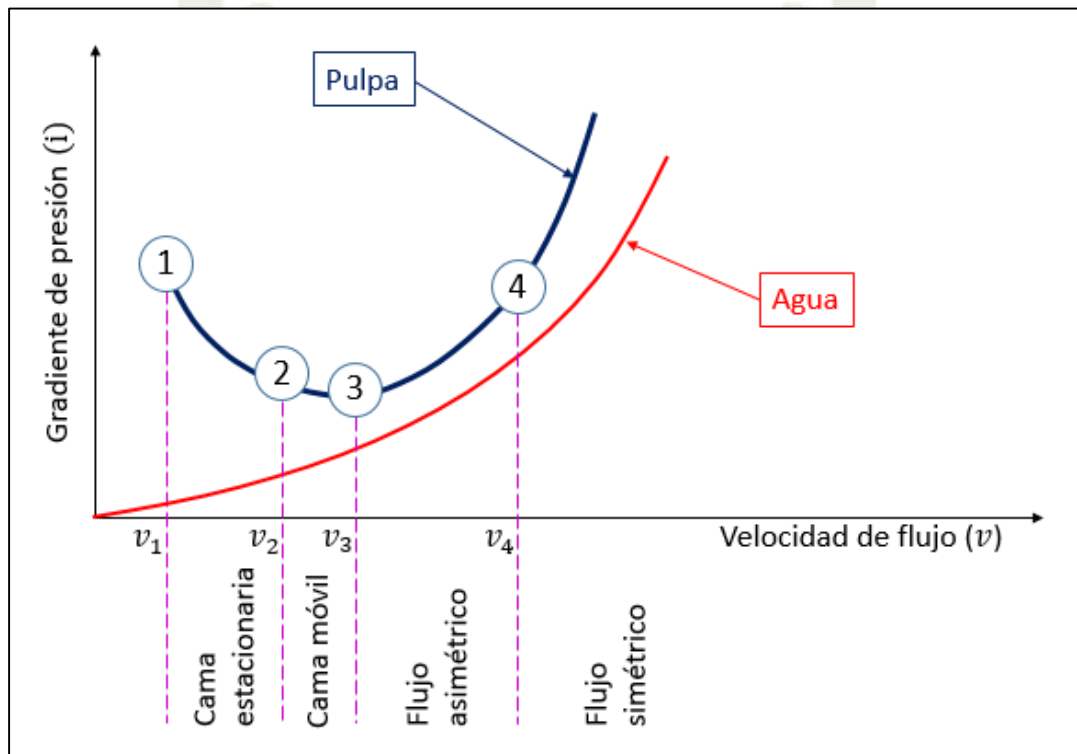


**Figura 17:** Distribución de partículas para flujo simétrico.

Las condiciones de flujo descritas pueden representarse en una gráfica de gradiente de presión vs velocidad de flujo como se muestra en la siguiente figura, aquí se pueden identificar las velocidades de transición descritas anteriormente.

Donde:

- $v_1$  : Velocidad a partir de la cual se presenta la condición de cama estacionaria.
- $v_2$  : Velocidad a partir de la cual se presenta la condición de cama móvil.
- $v_3$  : Velocidad a partir de la cual se presenta la condición de flujo asimétrico.
- $v_4$  : Velocidad a partir de la cual se presenta la condición de flujo pseudo-homogéneo.



**Figura 18:** Regímenes de velocidad para el flujo de pulpas heterogéneas [7].

Como se puede apreciar, para una velocidad de flujo igual a  $v_3$ , el gradiente hidráulico o de presión en el sistema se encuentra en su punto mínimo. Además es a partir de este punto donde se observa una suspensión de todas las partículas sólidas, mientras que si la velocidad de flujo se reduce las partículas más pesadas comenzarán a sedimentarse.

La velocidad  $v_3$  también es conocida como velocidad de deposición ( $v_D$ ) y es la velocidad de referencia utilizada para el diseño de líneas de transporte de pulpas.

## 2.9 Velocidad de deposición

Existen diferentes modelos para estimar la velocidad de deposición de una pulpa. La mayoría de ellos utilizan como parámetros fundamentales el diámetro de partícula al 50% ( $d_{50}$ ) y la concentración de sólidos en volumen, se sabe que para una misma granulometría de una pulpa la velocidad de deposición disminuirá conforme se incremente su concentración.

### 2.9.1 Modelo Durand & Condolios

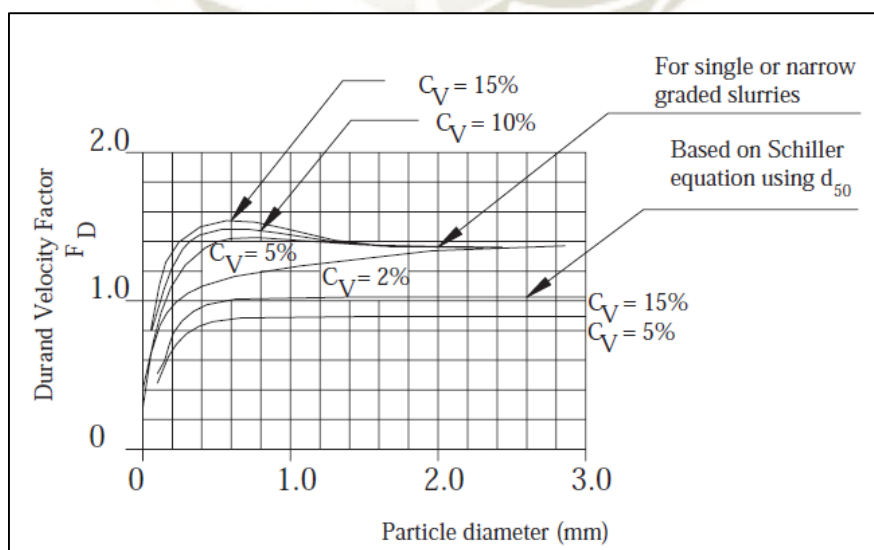
El modelo más antiguo para estimar la velocidad de deposición en una pulpa fue el elaborado por Durand & Condolios en 1952.

$$v_D = F_L \sqrt{2 \cdot g \cdot D_i (S_s - 1)} \quad (\text{Ec. 2. 28})$$

Donde:

- $v_D$  : Velocidad de deposición.
- $F_L$  : Factor de Durand.
- $g$  : Aceleración de la gravedad.
- $D_i$  : Diámetro interior de la tubería.
- $S_s$  : Densidad relativa de los sólidos.

El factor de Durand depende de la concentración en volumen y el tamaño de las partículas. De acuerdo al modelo original de Durand el factor  $F_L$  se obtiene gráficamente.

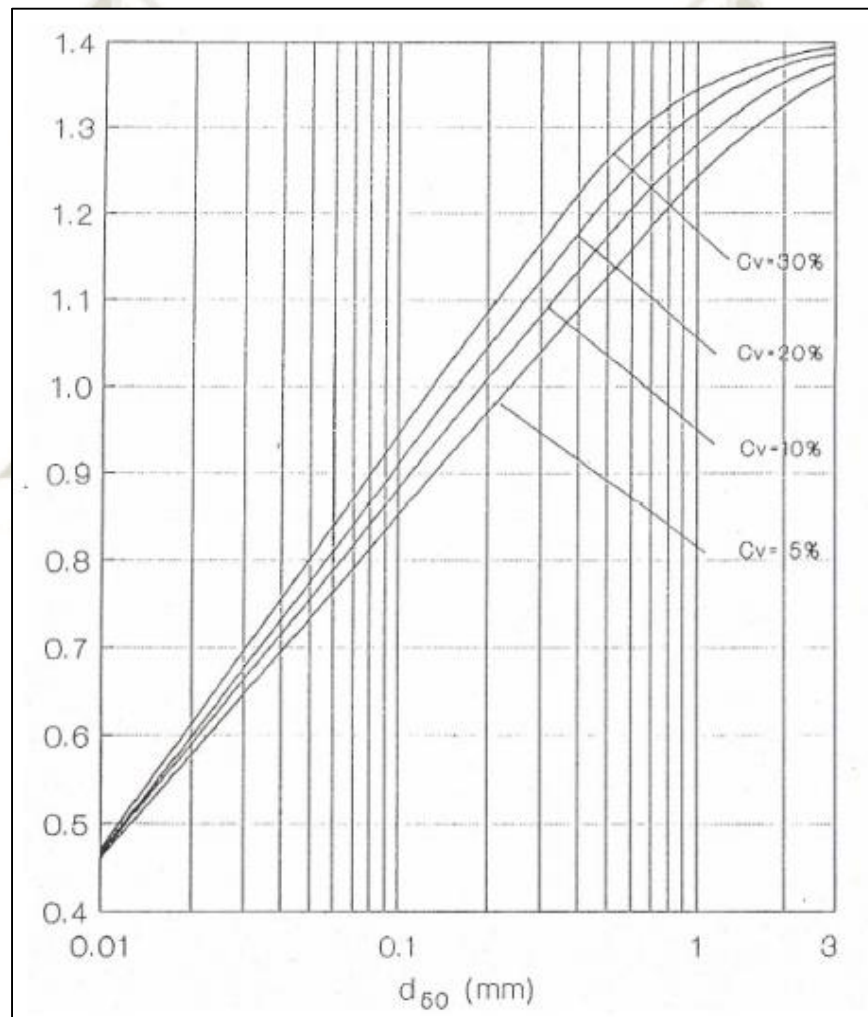


**Figura 19:** Factor  $F_L$  para el modelo de Durand & Condolios [7].

A partir del modelo de Durand y Condolios múltiples autores han presentado métodos alternativos menos conservadores, algunos de los cuales se presentan a continuación:

### 2.9.2 Modelo de Mc Elvain y Cave

Estos autores propusieron un gráfico alternativo para la estimación del factor de Durand el cual se muestra en la siguiente figura:



**Figura 20:** Factor  $F_L$  para el modelo de Mc Elvain y Cave [3].

### 2.9.3 Modelo de Schiller y Herbich

Este modelo propuso calcular el factor de Durand utilizando la siguiente ecuación:

$$F_L = (1.3 \cdot C_v^{0.125}) \cdot [1 - \exp(-6.9 \cdot d_{50})] \quad (\text{Ec. 2. 29})$$

Donde:

$F_L$  : Factor de Durand.

$C_v$  : Concentración de sólidos en volumen.

$d_{50}$  : Tamaño de partícula al 50%.

#### 2.9.4 Modelo de Wasp

Wasp propuso incluir a la ecuación original de Durand la relación entre el diámetro de partículas y el diámetro interior de la tubería de transporte, además propuso la utilización de un factor de Durand modificado ( $F'_L$ ) [8].

$$v_D = \left[ F'_L \sqrt{2 \cdot g \cdot D_i (S_s - 1)} \right] \cdot \left[ \frac{d_{50}}{D_i} \right]^{1/6} \quad (\text{Ec. 2. 30})$$

$$F'_L = 3.322 \cdot C_v^{0.21} \quad (\text{Ec. 2. 31})$$

Donde:

$v_D$  : Velocidad de deposición.

$F'_L$  : Factor de Durand modificado.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

$D_i$  : Diámetro interior de la tubería.

$S_s$  : Densidad relativa de los sólidos.

$d_{50}$  : Diámetro de partícula al 50%.

#### 2.9.5 Modelo de Juan Rayo

Este autor realizó modificaciones a la fórmula original de Durand para diferentes casos [3].

Para sólidos con granulometría fina y curva granulométrica angosta en tuberías de diámetro pequeño:

$$v_D = \left[ 1.1 \cdot F_L \sqrt{2 \cdot g \cdot D_i (S_s - 1)^{0.6}} \right] \quad (\text{Ec. 2. 32})$$

Para sólidos con granulometría gruesa y curva granulométrica ancha en tuberías de diámetro pequeño [3].

$$v_D = \left[ F_L \sqrt{2 \cdot g \cdot D_i (S_s - 1)} \right] \cdot \left[ \frac{d_{80}}{d_{50}} \right]^{0.1} \quad (\text{Ec. 2. 33})$$

Para sólidos de granulometría fina y curva granulométrica angosta en tuberías de gran diámetro [3].

$$v_D = [1.25 \cdot F_L^4 \sqrt{2 \cdot g \cdot D_i (S_s - 1)}] \quad (\text{Ec. 2. 34})$$

Donde:

$v_D$  : Velocidad de deposición.

$F_L$  : Factor de Durand hallado en base al modelo de Mc Elvain y Cave.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

$D_i$  : Diámetro interior de la tubería.

$S_s$  : Densidad relativa de los sólidos.

$d_{50}$  : Tamaño de partícula al 50%.

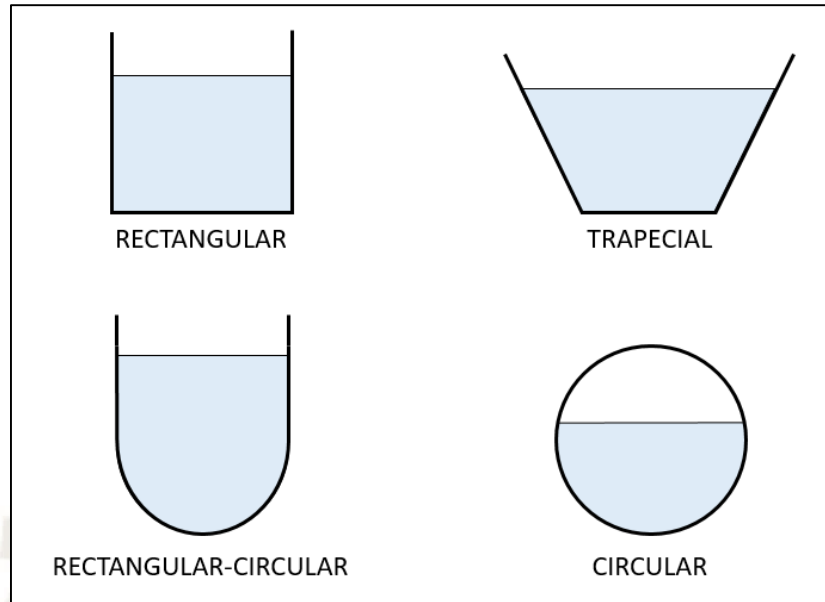
$d_{80}$  : Tamaño de partícula al 80%.

### 3. Flujo de pulpas en canales

El transporte de fluidos por medio de canales es ampliamente utilizado para múltiples propósitos. La principal ventaja de estos sistemas es que utilizan la diferencia de niveles para transportar un fluido entre dos puntos generalmente distanciados por longitudes considerables.

En minería el transporte por medio de canales es utilizado ampliamente para relaves, ya que existe una diferencia de niveles favorable entre la planta y el depósito de relaves, además de las distancias considerables entre cada uno.

En la figura a continuación, se muestran las secciones típicas más empleadas en canales.



**Figura 21:** Secciones típicas para canales.

En minería, específicamente para el transporte de relaves la sección más utilizada es la sección circular. Esto se debe a la hermeticidad que brinda dicha sección además de la facilidad de su instalación cuando se transportan relaves a largas distancias.

### 3.1 Propiedades geométricas de canales circulares

Cuando se tiene una sección circular parcialmente llena se pueden identificar algunas propiedades geométricas:

#### 3.1.1 Ángulo de llenado:

Es el ángulo generado por la sección llena.

#### 3.1.2 Área de la sección llena:

Representa el área de la sección que es ocupada por el fluido y se calcula con la siguiente expresión:

$$A = \frac{(\theta - \text{sen } \theta) \cdot D^2}{8} \quad (\text{Ec. 2. 35})$$

Donde:

$A$  : Área de la sección llena.

$\theta$  : Ángulo de llenado de la sección en radianes.

$D$  : Diámetro interior de la tubería.

### 3.1.3 Perímetro mojado:

Representa el perímetro de la sección ocupada por el fluido.

$$P = \frac{D \cdot \theta}{2} \quad (\text{Ec. 2. 36})$$

Donde:

$P$  : Perímetro mojado.

$\theta$  : Ángulo de llenado de la sección en radianes.

$D$  : Diámetro interior de la tubería.

### 3.1.4 Radio hidráulico:

Es la relación entre el área y el perímetro mojado.

$$R_h = \frac{A}{P} \quad (\text{Ec. 2. 37})$$

Donde:

$R_h$  : Radio hidráulico.

$A$  : Área de la sección llena.

$P$  : Perímetro mojado.

### 3.1.5 Ancho libre:

Es la dimensión de la sección que se encuentra expuesta a la atmósfera.

$$T = D \cdot \left( \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (\text{Ec. 2. 38})$$

Donde:

$T$  : Ancho libre.

$\theta$  : Ángulo de llenado de la sección en radianes.

$D$  : Diámetro interior de la tubería.

### 3.1.6 Altura de llenado:

Es la altura de la sección medida desde el ancho libre hasta el fondo de la tubería.

$$Y = \frac{D}{2} \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right); \text{ cuando } \theta > \pi \quad (\text{Ec. 2. 39})$$

$$Y = \frac{D}{2} \left( 1 + \cos \frac{2\pi - \theta}{2} \right); \text{ cuando } \theta < \pi \quad (\text{Ec. 2. 40})$$

Donde:

$Y$  : Altura de llenado.

$\theta$  : Ángulo de llenado de la sección en radianes.

$D$  : Diámetro interior de la tubería.

### 3.1.7 Tirante hidráulico:

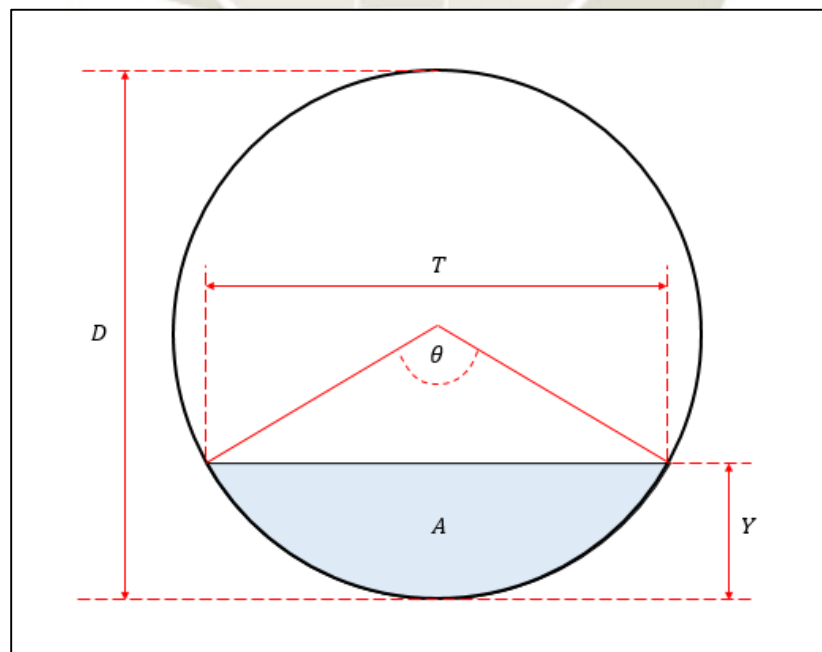
Es la relación entre la altura de llenado y el diámetro interior de la tubería. Se expresa normalmente de forma porcentual y representa el porcentaje de llenado de la sección

$$\text{Tirante} = \frac{Y}{D} \quad (\text{Ec. 2. 41})$$

Donde:

$Y$  : Altura de llenado.

$D$  : Diámetro interior de la tubería.



**Figura 22:** Dimensiones para definir el flujo a través de un canal circular.

Las propiedades geométricas anteriormente descritas con las que un fluido será transportado a través de un canal dependen directamente del caudal de flujo y de la pendiente de la tubería.

El caudal se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q = V \cdot A \quad (\text{Ec. 2. 42})$$

Donde:

$Q$  : Caudal transportado.

$V$  : Velocidad de flujo.

$A$  : Área de la sección llena.

La pendiente se conoce como el porcentaje de inclinación que posee el fondo del canal y puede determinarse de la siguiente forma:

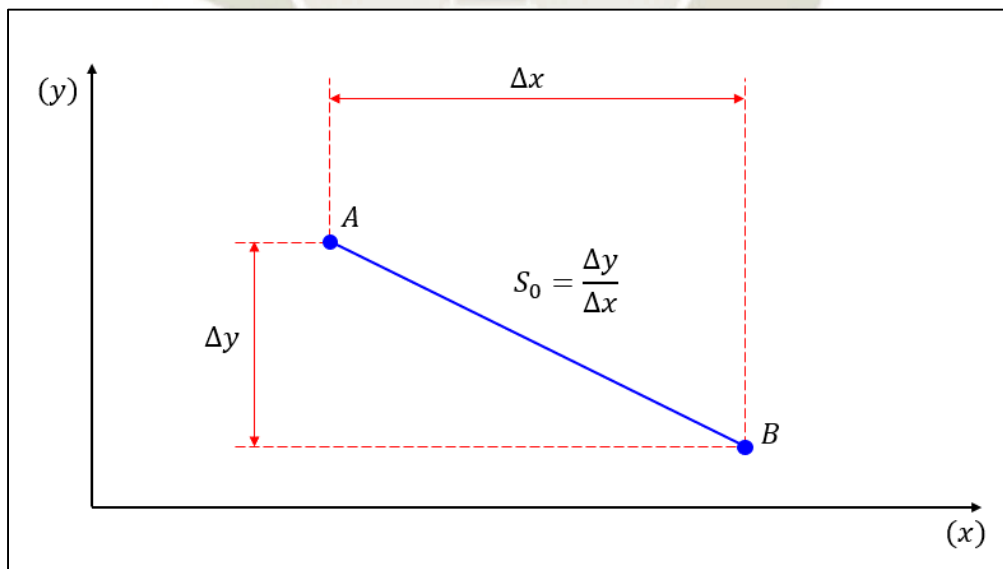
$$S_0 = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (\text{Ec. 2. 43})$$

Donde:

$S_0$  : Pendiente de fondo.

$\Delta y$  : Diferencia entre un punto A y un punto B en el eje y.

$\Delta x$  : Diferencia entre un punto A y un punto B en el eje x.



**Figura 23:** Pendiente de una recta.

### 3.2 Ecuación de Manning

La ecuación de Manning relaciona las propiedades geométricas de la sección de un canal con la pendiente y el caudal de flujo.

$$Q = \frac{A \cdot \sqrt{S_0} \cdot R_h^{2/3}}{n} \quad (\text{Ec. 2. 44})$$

Donde:

- $Q$  : Caudal.  
 $A$  : Área de la sección llena.  
 $S_0$  : Pendiente de fondo.  
 $R_h$  : Radio hidráulico.  
 $n$  : Coeficiente de rugosidad de Manning.

El coeficiente de rugosidad de Manning no es adimensional y varía dependiendo del material de la tubería y las propiedades del fluido.

Para pulpas mineras como los relaves, el coeficiente de Manning oscila entre 0.011 y 0.013.

Tabla 4: Coeficiente de Rugosidad de Manning en Unidades SI.

Material	n
Polietileno de alta densidad	0.011
Acero	0.012
Neopreno	0.013
Concreto	0.013
Caucho	0.013

**Nota.** Fuente: Modelamiento de flujos en cajones de distribución – Francisca Jalil [9].

Reemplazando las ecuaciones de área y radio hidráulico en la ecuación de Manning se tiene:

$$Q = \frac{\sqrt{S_0} \cdot (\theta - \text{sen}\theta)^{1.67} \cdot D^{3.33}}{20.16 \cdot n \cdot (D \cdot \theta)^{0.67}} \quad (\text{Ec. 2. 45})$$

Donde:

- $Q$  : Flujo.  
 $\theta$  : Ángulo de llenado de la sección en radianes.  
 $S_0$  : Pendiente de fondo.  
 $n$  : Coeficiente de rugosidad de Manning.  
 $D$  : Diámetro interior de la tubería.

### 3.3 Estabilidad de flujo y número de Froude

Para canales el número de Froude puede calcularse con la siguiente expresión:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{A \cdot g}{T}}} \quad (\text{Ec. 2. 46})$$

Este número adimensional indica la estabilidad con la que es transportado un fluido siendo:

- Flujo subcrítico cuando  $Fr < 1$
- Flujo crítico cuando  $Fr = 1$
- Flujo supercrítico cuando  $Fr > 1$

Para el diseño de canales se recomienda que el número de Froude se encuentre fuera del rango  $0.8 < Fr < 1.4$  debido a que cuando el flujo es crítico se vuelve inestable produciendo resaltos, salpicaduras y ondas [3].

### 3.4 Diseño de líneas de transporte con canales circulares

Cuando se desea diseñar una línea de tuberías para transportar relaves como canal se debe tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- La velocidad de flujo debe ser superior a la velocidad de deposición de las partículas, para asegurar un correcto funcionamiento de la línea.
- Para transporte a largas distancias, el recorrido de la línea y la pendiente dependerá directamente de la topografía de la zona buscando siempre optimizar los costos de tubería y los de movimiento de tierras.
- Para canales circulares se recomienda que el tirante de la sección no exceda el 60%, ya que al tratarse de canales cerrados se requiere un flujo constante y uniforme de aire en la parte superior de la tubería y un tirante excesivo podría generar un flujo inestable.

#### 4. Pérdidas primarias en transporte de pulpas

Para estimar las pérdidas primarias por fricción en un sistema de transporte de tuberías se utiliza la siguiente expresión:

$$h_{pp} = \frac{f_D \cdot L \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D} \quad (\text{Ec. 2. 47})$$

Donde:

$h_{pp}$  : Altura de pérdidas por fricción (pérdidas primarias).

$f_D$  : Factor de fricción de Darcy.

$L$  : Longitud de la tubería.

$V$  : Velocidad de flujo.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

$D$  : Diámetro interior de la tubería.

También es común emplear el término “gradiente hidráulico” o “pérdida unitaria de carga” la cual expresa las pérdidas en una tubería por unidad de longitud:

$$i = \frac{f_D \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D} \quad (\text{Ec. 2. 48})$$

Donde:

$i$  : Gradiente hidráulico.

$f_D$  : Factor de fricción de Darcy.

$V$  : Velocidad del fluido.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

$D$  : Diámetro interior de la tubería.

Otro parámetro ampliamente empleado para el cálculo de pérdidas en pulpas es la velocidad de fricción, la cual se determina mediante la siguiente expresión:

$$u^* = V \sqrt{\frac{f_N}{2}} \quad (\text{Ec. 2. 49})$$

Donde:

$V$  : Velocidad de flujo.

$f_N$  : Factor de fricción de Fanning.

Como se puede apreciar en las ecuaciones utilizadas para estimar las pérdidas por fricción es necesario conocer la velocidad del fluido, el diámetro de la tubería y el factor de fricción.

#### 4.1 Factor de fricción

Existen dos formas de expresar el factor de fricción:

- Factor de fricción de Fanning ( $f_N$ )
- Factor de fricción de Darcy ( $f_D$ )

La relación de ambos factores de fricción es la siguiente:

$$f_D = 4 \cdot f_N \quad (\text{Ec. 2. 50})$$

#### 4.2 Cálculo del factor de fricción para fluidos Newtonianos

Existen diferentes métodos y ecuaciones para determinar el factor de fricción para fluidos Newtonianos. Uno de ellos es utilizar la ecuación de Colebrook, para la cual es necesario utilizar iteraciones o métodos numéricos:

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log \frac{k}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_D}} \quad (\text{Ec. 2. 51})$$

Donde:

$f_D$  : Factor de fricción de Darcy.

$k$  : Rugosidad relativa ( $\varepsilon/D$ ).

$D$  : Diámetro interior de la tubería.

$Re$  : Número de Reynolds.

El número de Reynolds de cualquier fluido puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (\text{Ec. 2. 52})$$

Donde:

$Re$  : Número de Reynolds

$\rho$  : Densidad del fluido.

- $V$  : Velocidad de flujo.  
 $D$  : Diámetro interior de la tubería.  
 $\mu$  : Viscosidad dinámica del fluido.

#### 4.3 Factor de fricción para pulpas (flujo homogéneo)

Como se mencionó anteriormente, el flujo homogéneo corresponde al flujo en el cual todas las partículas se encuentran uniformemente distribuidas a lo largo de la sección de la tubería. Esta condición de flujo puede alcanzarse bajo los siguientes escenarios:

- Cuando se transportan pulpas en tuberías horizontales con tamaños de partícula uniforme (curva granulométrica estrecha) a una velocidad superior a  $V_D$ .
- Cuando se transportan pulpas con tamaños de partícula no uniformes (curva granulométrica extensa) en tuberías verticales o con pendientes pronunciadas.

La mayoría de las pulpas mineras homogéneas posee un comportamiento reológico de tipo plástico de Bingham [7]. Como se mencionó anteriormente este tipo de fluidos requieren de una tensión mínima de fluencia para comenzar a fluir.

A partir de la tensión de fluencia se puede definir el número de plasticidad de un fluido plástico de Bingham de la siguiente forma:

$$P_L = \frac{\tau_f \cdot D}{\mu_m \cdot V} \quad (\text{Ec. 2. 53})$$

Donde:

- $P_L$  : Número de plasticidad.  
 $\tau_f$  : Tensión de fluencia.  
 $D$  : Diámetro interior de la tubería en metros.  
 $\mu_m$  : Viscosidad de la pulpa.  
 $V$  : Velocidad de flujo.

Otro parámetro importante para poder definir un fluido plástico de Bingham es el Número de Hedstrom:

$$He = Re \cdot P_L = \frac{D^2 \cdot \rho_m \cdot \tau_f}{\mu_m^2} \quad (\text{Ec. 2. 54})$$

Donde:

- $He$  : Número de Hedstrom.  
 $Re$  : Número de Reynolds.  
 $P_L$  : Número de Plasticidad.  
 $D$  : Diámetro interior de la tubería.  
 $P_m$  : Densidad de la mezcla.  
 $\tau_f$  : Tensión de fluencia.  
 $\mu_m$  : Viscosidad de la mezcla.

Darby en 1992 propuso un método para el cálculo del factor de fricción de pulpas homogéneas de tipo plástico de Bingham el cual emplea la siguiente expresión [7]:

$$f_{N(liso)} = (f_{NL}^m + f_{NT}^m)^{1/m} \quad (\text{Ec. 2. 55})$$

Donde:

$f_{N(liso)}$  : Factor de fricción de Fanning en tubería lisa.

$f_{NL}$  : Factor de fricción de Fanning para flujo laminar en tubería lisa.

$f_{NT}$  : Factor de fricción de Fanning para flujo turbulento en tubería lisa.

$$m : 1.7 + \frac{40000}{Re}$$

El factor de fricción de Fanning para flujo laminar se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{NL} = \frac{16}{Re} \left[ 1 + \frac{He}{6 \cdot Re} - \frac{He^4}{3 \cdot f_{NL}^3 \cdot Re^7} \right] \quad (\text{Ec. 2. 56})$$

Donde:

$f_{NL}$  : Factor de fricción de Fanning para flujo laminar.

$He$  : Número de Hedstrom.

$Re$  : Número de Reynolds.

El factor de fricción de Fanning para flujo turbulento se calcula con la siguiente expresión:

$$f_{NT} = 10^a \cdot Re^b \quad (\text{Ec. 2. 57})$$

Donde:

$f_{NT}$  : Factor de fricción de Fanning para flujo turbulento.

$$a = -1.47[1 + 0.146 \cdot \exp(-2.9 \cdot 10^{-5} \cdot He)]$$

$$b = -0.193$$

Como se puede apreciar, el método Darby no considera los efectos de la rugosidad de la tubería para estimar el factor de fricción [7].

Para poder estimar los efectos de la rugosidad de la tubería se emplea un factor de corrección:

$$F_C = \frac{f_{rugoso}}{f_{liso}} \quad (\text{Ec. 2. 58})$$

Donde:

$F_C$  : Factor de corrección.

$f_{rugoso}$  : Factor de fricción de un flujo equivalente de agua considerando la rugosidad de la tubería.

$f_{liso}$  : Factor de fricción para un volumen equivalente de agua considerando tubería lisa.

Finalmente se multiplica el factor de corrección por el factor de fricción  $f_{N(liso)}$  calculado con el método Darby:

$$f_N = f_{N(liso)} \cdot F_C \quad (\text{Ec. 2. 59})$$

Donde:

$f_N$  : Factor de fricción de Fanning.

$F_C$  : Factor de corrección

$f_{N(liso)}$  : Factor de fricción de Fanning para tubería lisa.

#### 4.4 Factor de fricción para pulpas (flujo heterogéneo)

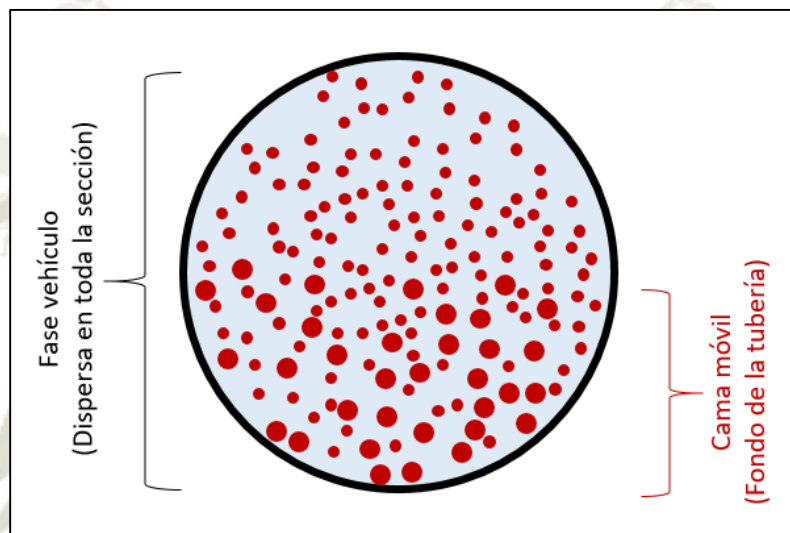
La condición de flujo heterogéneo puede presentarse bajo los siguientes escenarios:

- Transporte de sólidos con diferentes tamaños de partícula (curva granulométrica extensa) en tuberías horizontales o con pendiente mínima.
- Transporte de sólidos con diferentes tamaños de partícula (curva granulométrica extensa) bajo la condición de flujo asimétrico o cama móvil.

Diferentes autores han publicado métodos y fórmulas para determinar el factor de fricción para el transporte de pulpas heterogéneas, sin embargo el método más exacto y conocido es el método de Wasp [7].

Este método divide la sección de flujo en dos partes:

- **Parte homogénea o fase vehículo:** Se denomina así a la porción de la mezcla que se encuentra dispersa en toda la sección de la tubería y que tiene un comportamiento de fluido Newtoniano.
- **Parte heterogénea o cama móvil:** Se denomina así a la porción de la mezcla que se encuentra en la parte inferior de la tubería.



**Figura 24:** Distribución de partículas para flujo heterogéneo.

El método Wasp [8] es un método iterativo el cual consiste en calcular de forma independiente las pérdidas por fricción ocasionadas por la fase vehículo y la cama móvil. Luego de este cálculo se suman ambos componentes dando como resultado las pérdidas por fricción del sistema.

Los pasos para determinar el factor de fricción por este método se describen a continuación:

### **Primera iteración**

Inicialmente se asume que el cien por ciento de la mezcla se encuentra en fase vehículo y que además posee un comportamiento de fluido Newtoniano.

Con esta asunción se calculan los siguientes parámetros:

- Factor de fricción (convencional para fluido Newtoniano).
- Gradiente hidráulico.
- Velocidad de fricción.

## Segunda iteración

Posteriormente se emplean los datos granulométricos de los sólidos para formar grupos de tamaños de partículas, los cuales se analizarán de forma independiente. Por ejemplo de una curva granulométrica se puede clasificar los diferentes tamaños de partícula en 3 grupos como se ve en la siguiente tabla:

Tabla 5: Formación de grupos de partícula para utilizar el método Wasp.

Tamaños (mm)	Tamaño promedio	% Pasante
Entre 0.2 y 0.1	0.15	5
Entre 0.1 y 0.05	0.075	25
Inferiores a 0.05	0.025	70
<b>TOTAL</b>		<b>100</b>

**Nota.** Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber agrupado a los diferentes tamaños de partícula y obtener los tamaños representativos promedio debemos estimar (para cada grupo) la fracción de partículas que se encontrarán en la fase vehículo (homogénea) y la fracción de partículas que se encontrarán en la cama móvil (heterogénea) [8].

Para ello se emplea la siguiente ecuación:

$$\log\left(\frac{C}{C_A}\right) = -1.8 \cdot \frac{V_t}{\beta \cdot k \cdot u^*} \quad (\text{Ec. 2. 60})$$

Donde:

$C/C_A$  : Relación volumétrica entre las partículas uniformemente suspendidas (fase vehículo) y las partículas que se ubican en el fondo de la tubería (cama móvil) para un grupo de partículas de similar dimensión.

$V_t$  : Velocidad terminal de la partícula.

$\beta$  : Relación de coeficientes de transferencia de masa y momento.

$k$  : Constante de Von Karman.

$u^*$  : Velocidad de fricción.

Luego de obtenida la relación  $C/C_A$  determinamos la concentración en volumen que conforman la fase vehículo y la cama móvil para cada grupo de partículas.

$$C_{v(vehic)} = C/C_A \cdot C_v \quad (\text{Ec. 2. 61})$$

$$C_{v(cama)} = C_v - C_{v(vehic)} \quad (\text{Ec. 2. 62})$$

Posteriormente se calcula el coeficiente de arrastre para cada grupo de partículas empleando las ecuaciones indicadas en el Punto 2.1.6.

Luego se calcula el factor de fricción para cada grupo de partículas mediante la siguiente ecuación:

$$f_m = f_l \left[ K \left\{ \left( \frac{g \cdot D}{V^2} \right) \left( \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_L} \right) \frac{1}{\sqrt{C_D}} \right\}^{3/2} \cdot C_{v(cama)} \right] \quad (\text{Ec. 2. 63})$$

Donde:

$f_m$  : Factor de fricción de la cama móvil.

$f_l$  : Factor de fricción para un volumen equivalente de agua.

$K$  : Constante de Wasp (De 80 a 150).

$g$  : Aceleración de la gravedad.

$D$  : Diámetro interior de la tubería.

$V$  : Velocidad de flujo.

$\rho_S$  : Densidad de sólidos.

$\rho_L$  : Densidad de líquido.

$C_D$  : Coeficiente de arrastre de la partícula.

$C_{v(cama)}$ : Concentración en volumen del grupo de partículas que se encuentra en la cama móvil.

Luego de determinados los factores de fricción estos se suman y se estima el gradiente hidráulico ocasionado por la cama móvil.

Finalmente para determinar las pérdidas ocasionadas por la nueva fase vehículo se suman los valores de  $C_{v(vehic)}$  de cada grupo de partículas y se obtiene la concentración en volumen de la fase vehículo. Con esta nueva concentración se estiman el factor de fricción y el gradiente hidráulico con el método convencional para fluido Newtoniano.

Por último, se suman los gradientes hidráulicos, dando como resultado el gradiente hidráulico total de la mezcla y se compara este con el calculado en la primera iteración, de existir una variación mayor al 5 por ciento es necesario realizar una siguiente iteración.

### **Tercera iteración**

Con los valores de factor de fricción y gradiente hidráulico calculados en la segunda iteración se determina el valor para la velocidad de fricción y se repiten los pasos descritos en la segunda iteración hasta encontrar el nuevo gradiente hidráulico.

Finalmente se compara el gradiente hidráulico de la tercera iteración con el calculado en la segunda iteración, de existir una variación menor al 5% se asume el valor de la tercera iteración como el gradiente hidráulico final. De lo contrario se debe realizar nuevas iteraciones hasta alcanzar una variación por debajo del 5% [8].

## **5. Pérdidas secundarias en transporte de pulpa**

Se conocen como pérdidas secundarias a las pérdidas de energía producidas por accesorios de tubería como por ejemplo: Codos, Tees, Válvulas, Flujómetros, etc.

Existen dos maneras de representar las pérdidas secundarias ocasionadas por estos accesorios:

### **5.1 Longitud equivalente:**

Consiste en asignar una longitud de tubería equivalente para cada accesorio y emplear la longitud total en la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$H_{ps} = \sum \frac{f_D \cdot Le \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D} \quad (\text{Ec. 2. 64})$$

Donde:

$H_{ps}$  : Altura de pérdidas secundarias.

$f_D$  : Factor de fricción de Darcy.

$Le$  : Longitud equivalente.

$V$  : Velocidad del fluido.

$g$  : Aceleración de la gravedad.

$D$  : Diámetro interior de la tubería.

## 5.2 Coeficiente de pérdidas singulares:

Se utiliza un coeficiente de pérdidas  $K$  propio de cada accesorio, el cual es proporcionado generalmente por el fabricante. Finalmente se determinan las pérdidas secundarias para este método mediante la siguiente ecuación:

$$H_{ps} = \sum K \cdot \left( \frac{V^2}{2 \cdot g} \right) \quad (\text{Ec. 2. 65})$$

Donde:

- $H_{ps}$  : Altura de pérdidas secundarias.  
 $K$  : Coeficiente de pérdidas del accesorio.  
 $V$  : Velocidad del fluido.  
 $g$  : Aceleración de la gravedad.

## 6. Transporte de pulpas en tuberías a presión.

El transporte de fluidos en tuberías presurizadas es ampliamente utilizado en pulpas mineras y puede darse bajo las siguientes condiciones:

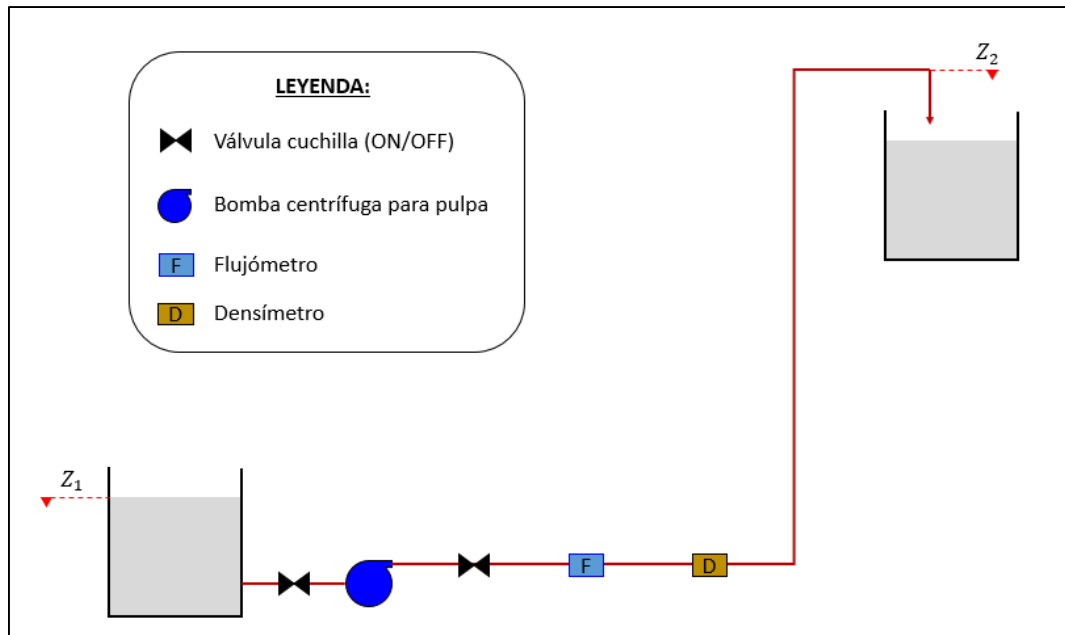
- Para transporte de pulpas por bombeo entre dos puntos a niveles similares.
- Transporte de pulpas por bombeo entre dos puntos a diferentes niveles siendo el punto final más elevado que el punto inicial.
- Transporte de pulpas por gravedad entre dos puntos a diferentes niveles siendo el punto final menos elevado que el punto inicial. Este método es preferible siempre y cuando la topografía de las instalaciones lo permita. En el caso de los relaves este método se emplea ampliamente en los sifones (en forma de U) para alimentación a las estaciones de ciclones.

### 6.1 Transporte de pulpas por bombeo

Como se indicó anteriormente se utilizan bombas para pulpas cuando se desea elevar la presión y transportar pulpas entre dos puntos de similares o desiguales niveles.

Las bombas más empleadas para la elevación de pulpas son las de tipo centrífuga y dependiendo de la abrasividad y la granulometría de la pulpa a transportar pueden carecer de revestimiento o ser revestidas con caucho o poliuretano.

A continuación, se muestra el esquema típico de un sistema de transporte de pulpa, utilizando bomba centrífuga.



**Figura 25:** Elevación de pulpas utilizando bombas centrífugas.

### 6.1.1 Curva de un sistema de bombeo de pulpas

El cálculo de un sistema de bombeo para pulpa es similar al cálculo empleado para un fluido Newtoniano como el agua, sin embargo existen algunas consideraciones a tomar en cuenta:

- Al momento de calcular la altura de la bomba las unidades deben ser consistentes (mcp o mca).
- De no conocer el régimen de flujo de la pulpa (homogéneo o heterogéneo) se recomienda considerar el régimen más crítico para calcular las pérdidas por fricción.
- Se debe considerar la presencia de accesorios (válvulas, codos, etc.) para estimar las pérdidas secundarias de acuerdo a los métodos descritos anteriormente.

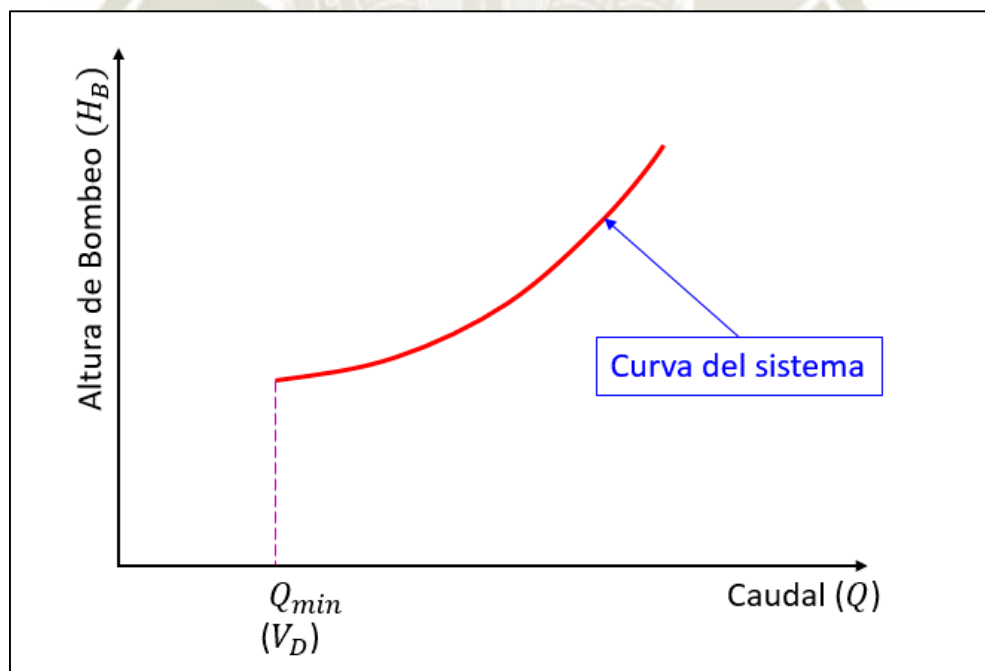
Aplicando la ecuación de Bernoulli se tiene:

$$H_B = (P_2 - P_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + H_{pp} + H_{ps} \quad (\text{Ec. 2. 66})$$

Donde:

- $H_B$  : Altura de la bomba en mcp
- $P_2$  : Presión requerida en el punto final en mcp
- $P_1$  : Presión en el punto inicial en mcp
- $V_2$  : Velocidad en el punto final en m/s.
- $V_1$  : Velocidad en el punto inicial en m/s.
- $g$  : Aceleración de la gravedad 9.81 m/s<sup>2</sup>.
- $Z_2$  : Elevación del punto final en mcp
- $Z_1$  : Elevación del punto inicial en mcp
- $H_{pp}$  : Altura de pérdidas primarias en mcp
- $H_{ps}$  : Altura de pérdidas secundarias en mcp

Con la ecuación de Bernoulli se grafica la curva del sistema a velocidades iguales o superiores a la velocidad de deposición.



**Figura 26:** Curva típica para un sistema de transporte de pulpas.

### 6.1.2 Bombas para pulpas

Las bombas son equipos altamente utilizados para el transporte de pulpas, estas pueden ser centrífugas o de desplazamiento positivo, siendo la primera más utilizada en manejo de pulpas mineras [10].

A diferencia de una bomba centrífuga para agua o líquidos claros, el diseño de una bomba para pulpa debe considerar los siguientes aspectos:

- Diseño y tamaño del impulsor.
- Cantidad de aletas o vanos.
- Tipo de sello del eje.
- Materiales resistentes al desgaste y la corrosión.
- Componentes principales de una bomba para pulpas.

#### Impulsor

El impulsor es el elemento rotatorio principal encargado de transmitir la energía centrífuga hacia el fluido a través de sus álabes los cuales pueden ser de tipo Francis o tipo plano.

La forma y la cantidad de los álabes del impulsor dependerán de las características de la pulpa a transportar (tamaño máximo de partícula y su abrasividad).



**Figura 27:** Impulsor de una bomba centrífuga revestido con caucho [11].

## Carcasa

La carcasa se caracteriza por poseer una forma de semi-voluta, además el juego que debe existir entre esta y el impulsor debe permitir el flujo continuo de partículas minimizando su desgaste.



**Figura 28:** Carcasa de una bomba de pulpas [11].

## Materiales y revestimiento

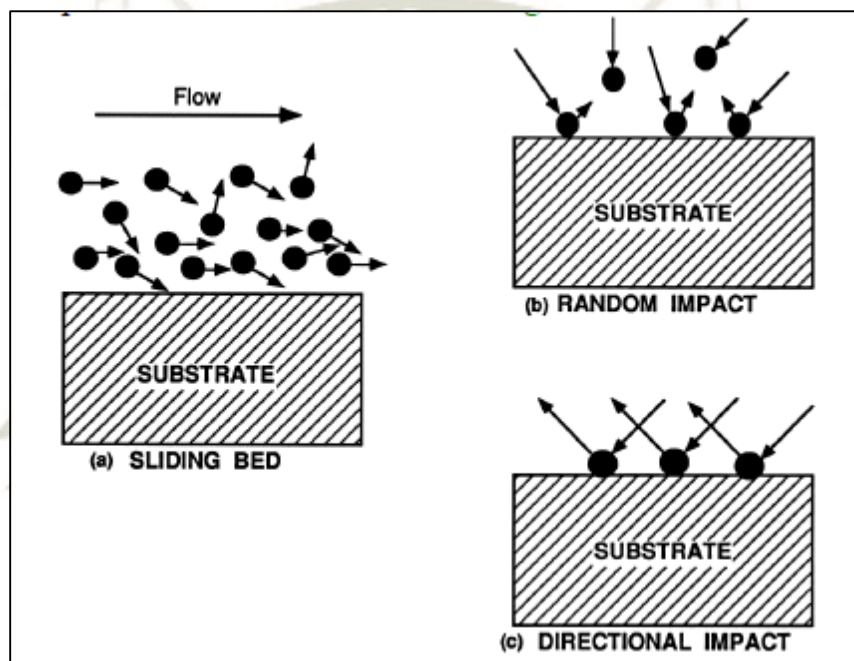
La necesidad o elección de los materiales de revestimiento a utilizar para la selección de una bomba depende de las características específicas de la pulpa a transportar.

Los materiales más utilizados para la construcción y revestimiento de bombas son:

- Aleaciones resistentes al desgaste y erosión.
- Caucho natural.
- Poliuretano.
- Polímeros especiales.

### 6.1.3 Consideraciones generales para la selección de bombas

- **Abrasión:** La abrasión ocurre cuando las partículas se deslizan sobre una superficie sólida. En una bomba centrífuga la abrasión puede por la fricción entre las partes móviles y las partes estacionarias de la bomba (Sellos, ejes, etc.) [10].
- **Erosión:** La erosión es el fenómeno de desgaste más común en bombas centrífugas. Esta se debe a la transferencia de energía cinética entre una partícula y una superficie sólida debido al impacto. Existen tres tipos de erosión: por cama deslizante, por impacto aleatorio y por impacto direccionado [10].



**Figura 29:** Tipos de erosión producido en superficies sólidas [10].

- **Corrosión:** Se presenta generalmente como una consecuencia de la erosión producida por el impacto de las partículas contra las partes de la bomba [10].

### Sistemas de sello del eje

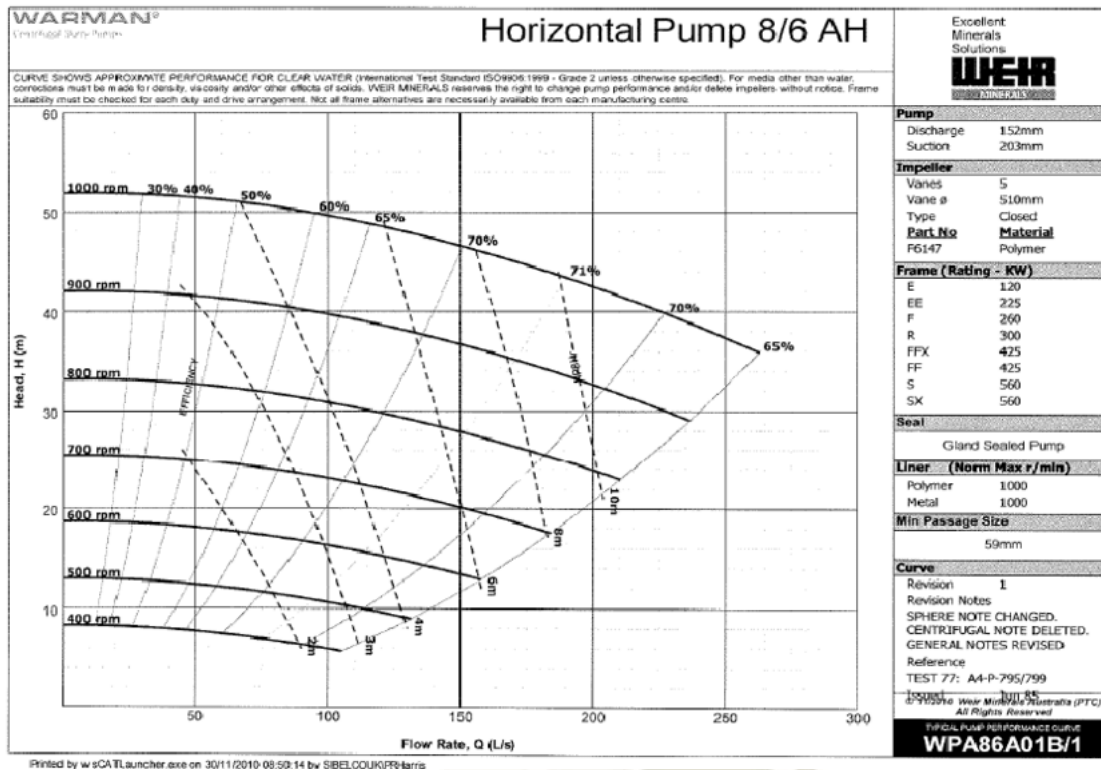
Uno de los sistemas más importantes para el correcto funcionamiento de una bomba centrífuga para pulpas es el sello del eje. Este sistema es el encargado de impedir fugas de pulpa entre el impulsor y el eje. Dentro de los tipos de sello para eje más utilizados se tienen [10]:

- Sello dinámico o centrífugo.
- Sello por prensa estopas.

- Sello mecánico.

### 6.1.4 Curva de operación de la bomba

La gran mayoría de fabricantes proveen catálogos de curvas de operación para diferentes modelos de bombas, sin embargo estas curvas son testeadas utilizando como fluido de prueba el agua pura.



**Figura 30:** Curva de operación para una bomba Warman 8/6 AH [11].

Generalmente, las curvas de operación de bombas para pulpas deben ser corregidas de acuerdo a las características de la pulpa a impulsar. El método para realizar esta corrección es planteado por cada fabricante.

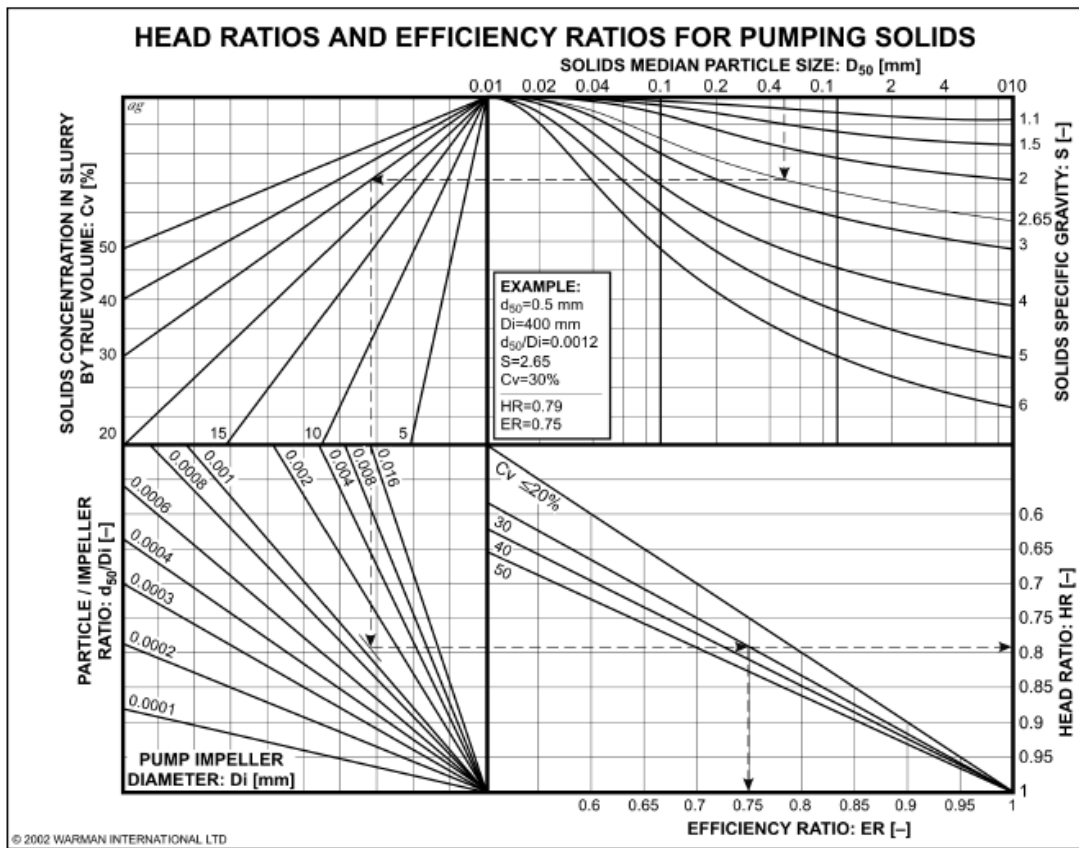
El método para la corrección de curvas de funcionamiento desarrollado por Warman es el más utilizado y consiste en determinar coeficientes de presión (HR) y coeficientes de eficiencia (ER).

Para ello se deben conocer los siguientes parámetros:

- Diámetro de partículas al 50%.
- Diámetro del impulsor de la bomba a emplear.
- Densidad relativa de las partículas sólidas.

- Concentración en volumen de la mezcla.

Conociendo estos datos, de acuerdo al ejemplo planteado en la siguiente figura se determinan los valores para los coeficientes de presión (HR) y eficiencia (ER).



**Figura 31:** Gráfico para estimar el coeficiente de presión y eficiencia de bombas Warman [10].

Luego de determinar dichos coeficientes, se deben corregir las curvas suministradas por el fabricante multiplicando cada valor de la curva por el coeficiente HR y ER según corresponda.

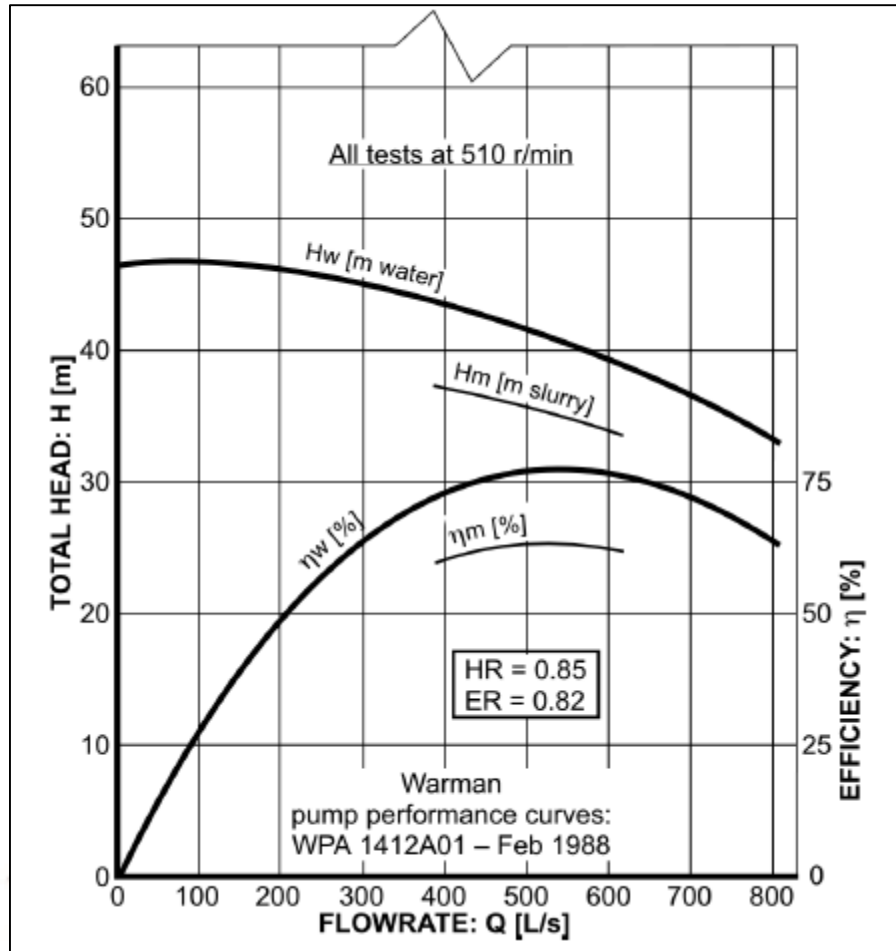


Figura 32: Curvas de operación y eficiencia corregidas [10].

### 6.1.5 Punto de operación del sistema

Para obtener el punto de operación de la bomba se intersectan la curva del sistema con la curva de operación corregida de la bomba para obtener el punto de operación del sistema.

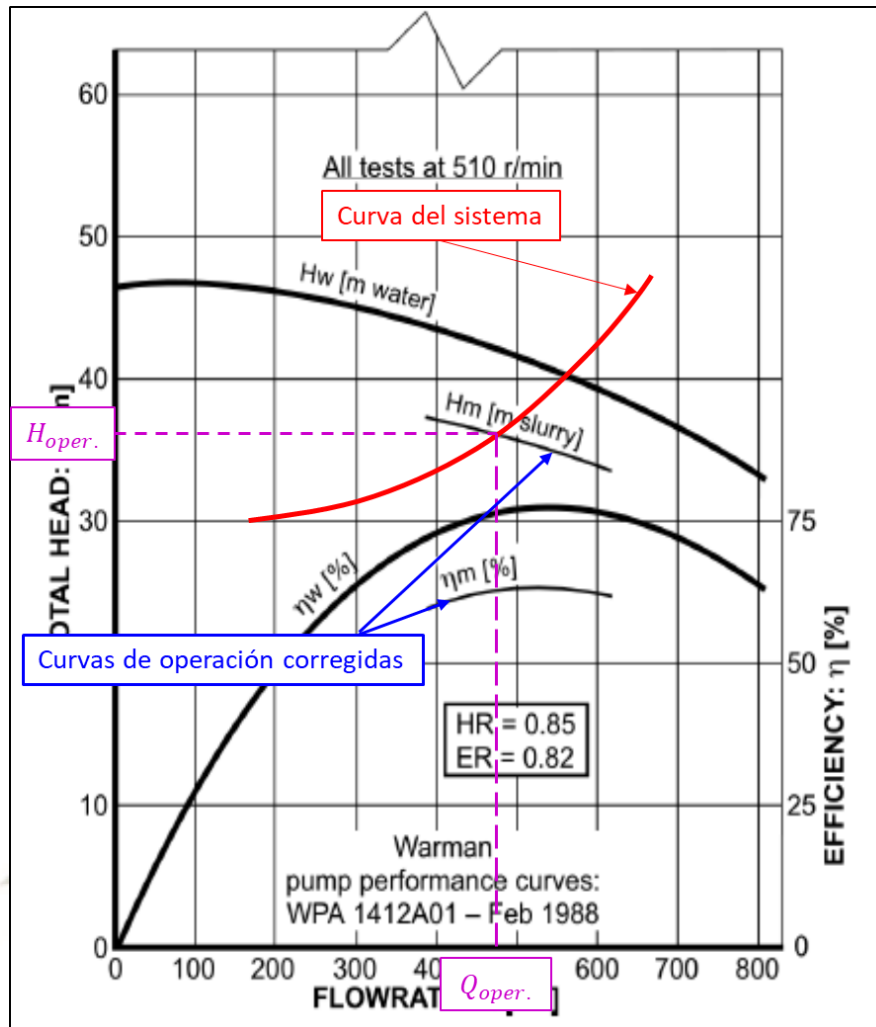


Figura 33: Punto de operación real de una bomba centrífuga de pulpas.

### 6.1.6 Verificación del NPSHr vs NPSHd

La cavitación es un fenómeno que puede afectar el correcto funcionamiento de una bomba y el sistema se debe diseñar evitando que esto ocurra. Para ello se deben comparar dos variables:

Altura neta positiva de succión requerida (NPSHr): Esta es la altura positiva que requiere la bomba como mínimo para que pueda trabajar sin cavitación. Este valor es provisto por el fabricante en la curva de operación de la bomba.

Altura neta positiva de succión disponible (NPSHd): Esta es la altura positiva que el sistema puede otorgarle a la bomba. Este valor puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$NPSH_d = P_{atm} - P_v - H_{psucción} + Z_{succión} \quad (Ec. 2. 67)$$

Donde:

- $NPSH_d$  : Altura neta positiva de succión disponible en mcp.  
 $P_{atm}$  : Presión atmosférica en mcp.  
 $P_v$  : Presión de vapor del fluido en mcp.  
 $H_{psucción}$  : Altura de pérdidas en el tramo de succión en mcp.  
 $Z_{succión}$  : Altura de succión en mcp.

Finalmente, para asegurar que no se producirá cavitación en la bomba por NPSH se debe cumplir la siguiente desigualdad:

$$NPSH_d > NPSH_r \quad (Ec. 2. 68)$$

Donde:

- $NPSH_d$  : Altura neta positiva de succión disponible.  
 $NPSH_r$  : Altura neta positiva de succión requerido.

### 6.1.7 Cálculo de potencia

Como último paso se debe estimar la potencia requerida por la bomba y la potencia del motor eléctrico que accionará la bomba.

La potencia requerida por la bomba se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$P_{Bomba} = \frac{Q \cdot H_B \cdot S_m \cdot g}{\eta} \quad (Ec. 2. 69)$$

Donde:

- $P_{Bomba}$  : Potencia requerida por la bomba en kW.  
 $Q$  : Flujo de operación.  
 $H_B$  : Altura de bombeo (corregida) en mca.  
 $S_m$  : Densidad relativa de la mezcla.  
 $\eta$  : Eficiencia de la bomba (corregida).

La potencia del motor eléctrico se estima mediante la siguiente expresión:

$$P_{Motor} = \frac{P_{Bomba}}{\eta_{Motor} \cdot F_{Der} \cdot \eta_{Trans}} \quad (Ec. 2. 70)$$

Donde:

- $P_{Motor}$  : Potencia del motor eléctrico en kW.

$P_{Bomba}$ : Potencia requerida por la bomba en kW.

$\eta_{Motor}$ : Eficiencia del motor eléctrico.

$F_{Der}$ : Factor de derating por altura del motor eléctrico.

$\eta_{Trans}$ : Eficiencia de la transmisión Motor-Bomba.

## 6.2 Transporte de pulpas en tuberías a presión por gravedad

El análisis de un sistema de transporte en tuberías a presión por gravedad puede realizarse aplicando la ecuación de Bernoulli para un sistema por bombeo.

Al ser un sistema por gravedad, se retira de la ecuación la variable altura de bombeo ( $H_B$ ).

Reacomodando la ecuación se tiene:

$$(Z_1 - Z_2) = (P_2 - P_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + H_{pp} + H_{ps} \quad (Ec. 2. 71)$$

Donde:

$Z_1$ : Elevación del punto inicial en mcp.

$Z_2$ : Elevación del punto final en mcp.

$P_2$ : Presión requerida en el punto final en mcp.

$P_1$ : Presión en el punto inicial en mcp.

$V_2$ : Velocidad en el punto final.

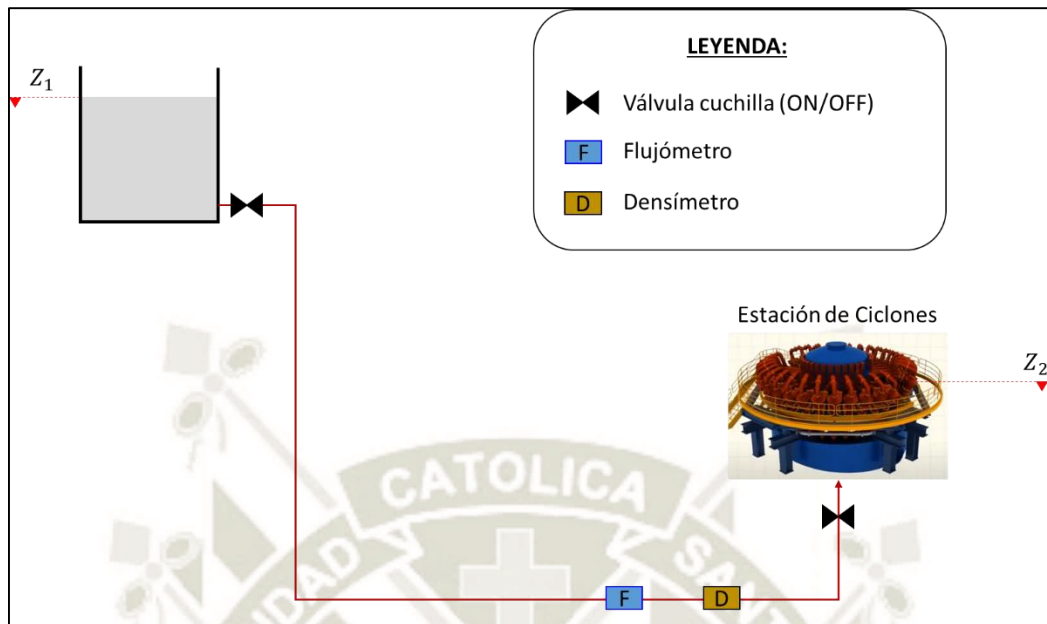
$V_1$ : Velocidad en el punto inicial.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$H_{pp}$ : Altura de pérdidas primarias en mcp.

$H_{ps}$ : Altura de pérdidas secundarias en mcp.

En la figura a continuación, se muestra un esquema muy utilizado para alimentación a una batería de ciclones a través de un sistema presurizado por gravedad.



**Figura 34:** Esquema típico de alimentación por gravedad a una batería de ciclones.

## 7. Cajones de recolección y distribución

Los cajones de recolección y distribución se utilizan ampliamente en el transporte de relaves y son empleados para diversos fines como por ejemplo:

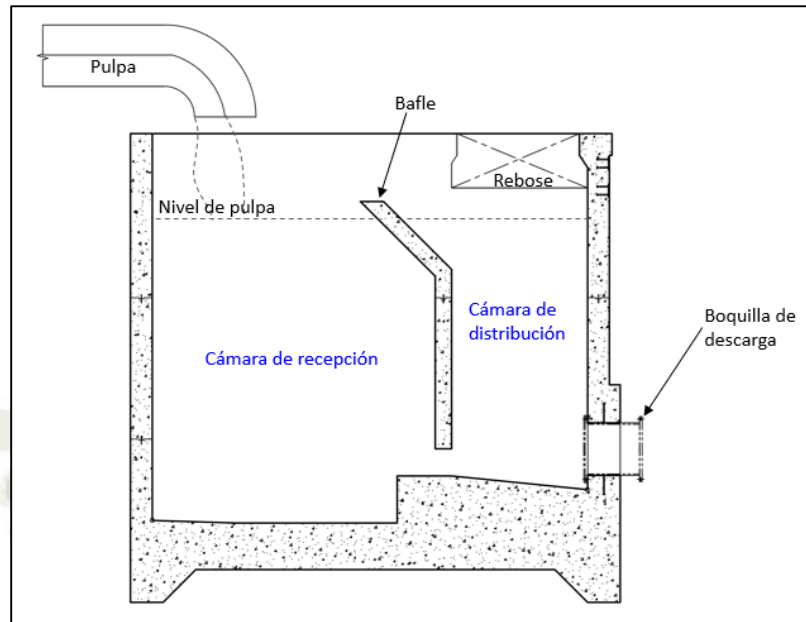
- Disipación de energía para relaves provenientes de canales.
- Garantizar un flujo de pulpa estable hacia un equipo (bomba o ciclón).
- Puntos de inyección de agua para dilución.
- Puntos de toma de muestras y control.
- Puntos de distribución y bifurcación de relaves.

### 7.1 Modo de funcionamiento de cajones de distribución

La pulpa es vertida por la parte superior a través de una tubería hacia la cámara de recepción que debe contar con las dimensiones mínimas necesarias (largo, ancho y profundidad) para asegurar una correcta disipación de energía que asegure un bajo desgaste de las paredes del cajón y evite reboses o salpicaduras hacia el ambiente.

La cámara de distribución está separada de la cámara de recepción por un baffle que ayuda a mantener una distribución homogénea de la pulpa hacia las boquillas de descarga.

Existe en la parte superior una ventana de rebose que permite evacuar la pulpa en caso de excesos de flujo de recepción u obstrucción en la boquilla de descarga o en la parte inferior del bafle.



**Figura 35:** Sección típica de un cajón distribuidor.

## 7.2 Dimensionamiento de cajones de distribución

### 7.2.1 Ancho del cajón distribuidor

El ancho recomendado de un cajón distribuidor se determina en base al ancho y altura de llenado del canal de alimentación rectangular según Linke [12].

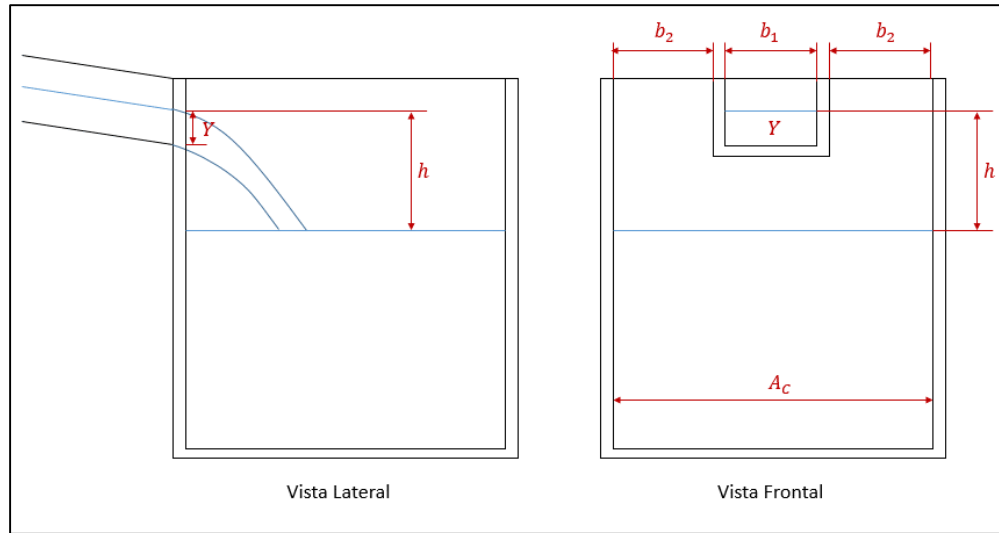
$$A_c = b_1 + 2 \cdot b_2 \quad (Ec. 2. 72)$$

Donde:

$A_c$  : Ancho recomendado del cajón.

$b_1$  : Ancho del canal rectangular de alimentación.

$b_2$  : Ancho adicional recomendado.



**Figura 36:** Dimensiones utilizadas para estimar el ancho mínimo de un cajón.

En la siguiente tabla se muestran los valores de  $b_2$  para un cajón distribuidor según Linke [12].

Tabla 6: Valores de  $b_2$  para determinar el ancho de un cajón de distribución.

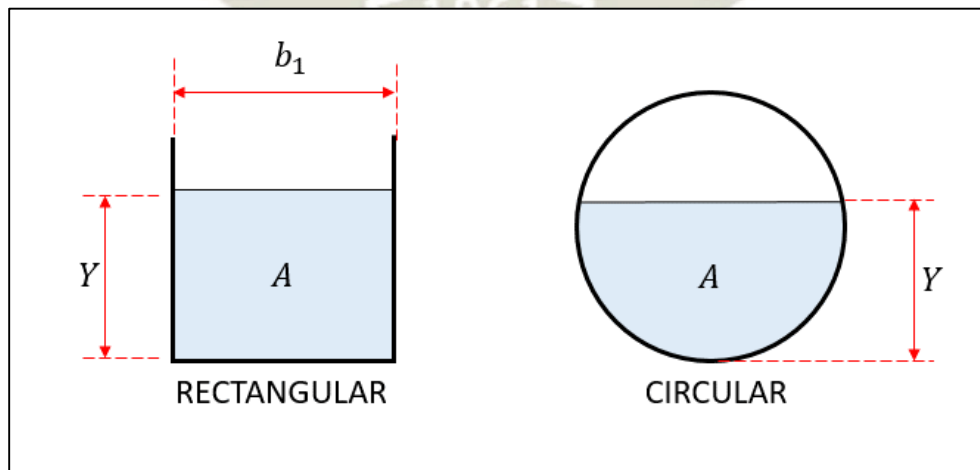
Altura de llenado del canal rectangular	Altura de caída de flujo $h$							
	1/2	1	2	4	8	16	32	64
Ancho adicional $b_2$ recomendado								
1/2	9	9.5	9.5	10	10.5	12	15	20
1	9	9.5	9.5	10.5	10.5	12.5	15.5	20
2	9	9.5	10	10.5	11	13	16	20.5
3	10	10	10	11	11.5	13.5	17	21
4	10	10	10.5	11	12	14	17.5	22.5
6	10	10.5	11	12	13	15	19	23.5
8	11	11	11.5	12.5	13.5	16.5	20.5	25

Tabla 6: Valores de  $b_2$  para determinar el ancho de un cajón de distribución.

Altura de llenado del canal rectangular	Altura de caída de flujo h							
	1/2	1	2	4	8	16	32	64
Ancho adicional $b_2$ recomendado								
9	11	11.5	12	13	14	17	21	25.5
12	11	12	12.5	13.5	14.5	18.5	23	27.5
16	12	12.5	13	14	16	20	25.5	30.5
24	12	13	13.5	15	18.5	24	30	36
32	12	13	14	16	21	28	36	42

**Notas:** Fuente: Launderers – Linke [12].  
Todas las dimensiones están en pulgadas.

Para casos en los que el canal de alimentación al cajón sea de sección circular se realizará una equivalencia de áreas entre un canal rectangular y un canal circular considerando la misma altura de llenado:



**Figura 37:** Área equivalente entre una sección circular y rectangular.

$$b_1 = A/Y$$

(Ec. 2. 73)

Donde:

$b_1$  : Ancho del canal rectangular de alimentación equivalente.

$A$  : Área llena de la sección circular.

$Y$  : Altura de llenado del canal circular.

### 7.2.2 Largo de la cámara de recepción

El largo recomendado para la cámara de recepción se puede determinar conociendo la altura de llenado y la velocidad de la pulpa en el canal de ingreso de acuerdo a los valores mostrados en la siguiente tabla según Linke [12].

Tabla 7: Tabla de selección de largo de la cámara de recepción de un cajón distribuidor.

Velocidad de ingreso	Altura de llenado	Altura de caída de flujo h							
		1/2	1	2	4	8	16	32	64
Largo de la cámara de recepción									
60	1/2	18	18	18	18	19	20	23	24
	2			18	18	19	20	23	24
250	1/2	18	18	18	18	20	24	31	42
	2			18	19	22	26	33	44
	4				21	23	27	34	45
	8					26	30	37	48
500	1/2	26	27	28	31	35	42	52	68
	2			31	33	37	44	54	70
	4				35	39	45	55	71
	8					43	49	59	75
	12					46	52	62	78
	16						55	65	81
	24						59	69	85
	32							75	91
750	2			51	57	63	72	85	

Tabla 7: Tabla de selección de largo de la cámara de recepción de un cajón distribuidor.

Velocidad de ingreso	Altura de llenado	Altura de caída de flujo h							
		1/2	1	2	4	8	16	32	64
		Largo de la cámara de recepción							
100	4			59	65	74	87		
	8					69	77	90	
	12					72	81	93	
	16						84	97	
	24						90	102	
	32							108	
	2			80	84	89	96		
	4				86	91	98		
	8					93	102		
	12					98	105		
	16						108		
	24						115	132	
	32							144	

**Notas.** Fuente: Launderers – Linke [12].

La velocidad de ingreso está en pies por minuto y las dimensiones en pulgadas.

### 7.2.3 Profundidad mínima del cajón distribuidor

De forma análoga a la longitud de la cámara de recepción, la profundidad mínima que debe poseer el cajón se puede determinar a partir de la siguiente tabla según Linke [12].

Tabla 8: Tabla de selección de largo de la cámara de recepción de un cajón distribuidor.

Velocidad de ingreso	Altura de llenado	Altura de caída de flujo h							
		1/2	1	2	4	8	16	32	64
		Altura mínima recomendada							
60	1/2	6	7	8	9	10	11	12	13
	2			8	9	10	11	12	13

Tabla 8: Tabla de selección de largo de la cámara de recepción de un cajón distribuidor.

Velocidad de ingreso	Altura de llenado	Altura de caída de flujo h							
		1/2	1	2	4	8	16	32	64
Altura mínima recomendada									
250	1/2	7	7	8	9	10	12	14	16
	2			9	10	11	14	16	18
	4				12	13	16	18	20
	8					15	18	20	22
500	1/2	8	9	10	11	13	17	21	24
	2			11	12	14	18	22	25
	4				13	15	19	23	27
	8					16	21	25	29
	12					18	22	27	30
	16						23	28	31
	24						24	29	32
750	2			16	19	22	26	30	
	4				20	23	27	31	
	8					24	28	33	
	12					25	29	34	
	16						30	36	
	24						32	39	
100	2			23	26	30	36		
	4				27	31	37		
	8					32	39		
	12					33	40		
	16						41		

Tabla 8: Tabla de selección de largo de la cámara de recepción de un cajón distribuidor.

Velocidad de ingreso	Altura de llenado	Altura de caída de flujo h							
		1/2	1	2	4	8	16	32	64
		Altura mínima recomendada							
	24						44	53	
	32							56	

**Notas.** Fuente: Launderers – Linke [12].

La velocidad de ingreso está en pies por minuto y las dimensiones en pulgadas.

### 7.2.4 Ventana de rebose

La ventana de rebose debe ser capaz de evacuar el flujo máximo de diseño en caso de falla en las boquillas de descarga del cajón distribuidor. El flujo de evacuación para una ventana de rebose se calcula según la siguiente ecuación propuesta por Linke [12].

$$Q = 3600 \cdot K \cdot (b - 0.2 \cdot h_v) \cdot h_v^{1.5} \quad (\text{Ec. 2. 74})$$

Donde:

- $Q$  : Flujo de evacuación del rebose (m<sup>3</sup>/hr)
- $K$  : Coeficiente de descarga por vertedero 1.84.
- $b$  : Ancho de la ventana de rebose (m).
- $h_v$  : Altura de vertedero en la ventana de rebose (m).

### 7.3 Volumen y tiempo de retención

El volumen efectivo de un cajón es el volumen de pulpa que puede almacenar y debe ser lo suficientemente grande para permitir que el cajón evacúe su contenido en un tiempo determinado. El tiempo de retención representa el tiempo en segundos que el cajón tardará en evacuar todo su contenido si se detiene el suministro de pulpa al mismo.

El volumen mínimo requerido para un cajón se puede estimar de la siguiente manera:

$$Vol_{min} = Q_m \cdot R_t \quad (\text{Ec. 2. 75})$$

Donde:

- $Vol_{min}$  : Volumen mínimo del cajón en m<sup>3</sup>.
- $Q_m$  : Flujo volumétrico de pulpa a la salida del cajón en m<sup>3</sup>/s.

$R_t$  : Tiempo mínimo de retención en segundos.

## 8. Ciclones

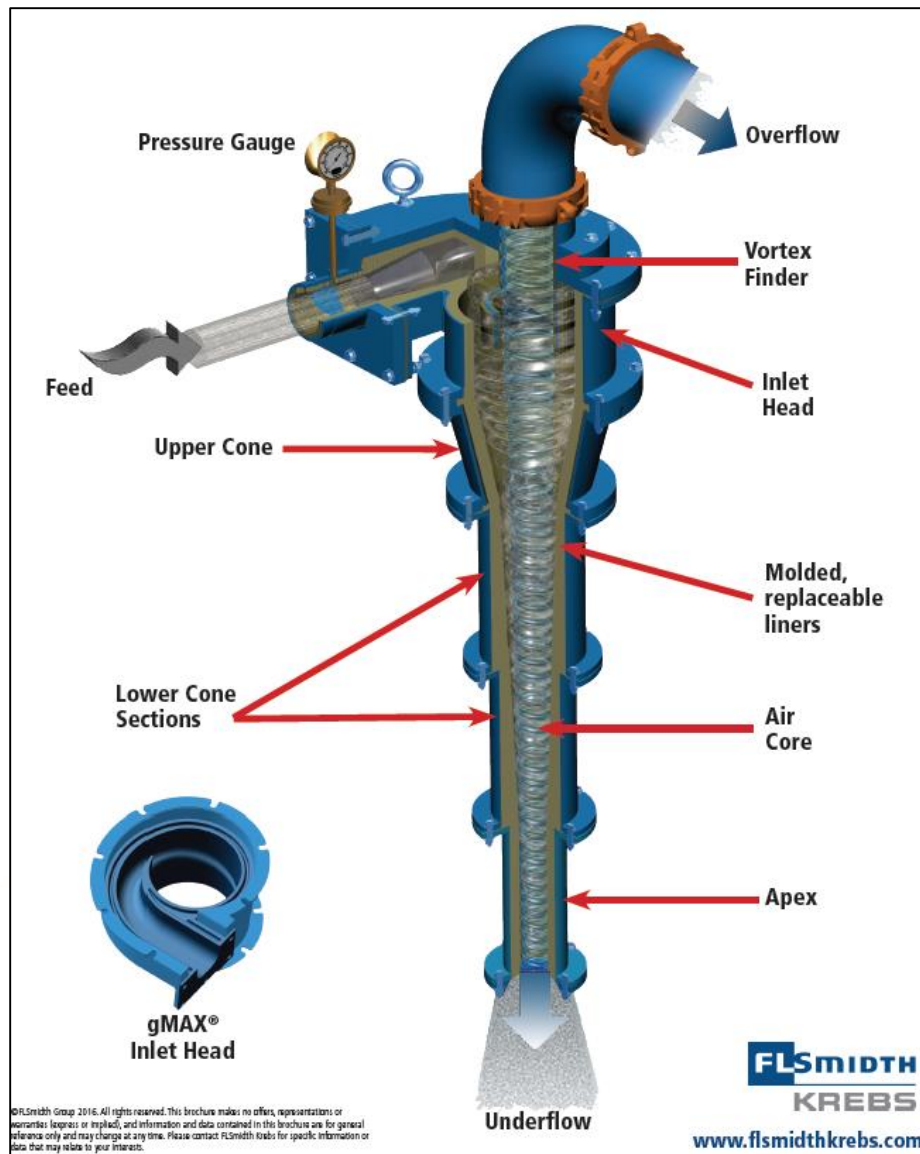
Los ciclones son equipos clasificadores de pulpas de funcionamiento continuo que utilizan la fuerza centrífuga para incrementar la velocidad de sedimentación de las partículas. Debido a su sencillo principio de funcionamiento y alta eficiencia son ampliamente utilizados en la industria minera [3].

### 8.1 Principio de funcionamiento de un ciclón

La pulpa ingresa a presión por la tubería de alimentación (feed) a través de una entrada ubicada en la cámara de alimentación (feed chamber). Debido a la forma involuta o tangencial con la que la pulpa ingresa en el ciclón se produce un movimiento rotatorio en su interior el cual ocasiona fuerzas centrífugas que empujan a las partículas más pesadas hacia las paredes del ciclón, las cuales descenden en espiral hacia el fondo del ciclón y son descargadas por la tubería del underflow (Apex) [13].

Por otro lado, las partículas menos pesadas tienden a ubicarse en el eje central del ciclón elevándose en forma de espiral hacia la parte superior del ciclón en donde son evacuadas por la tubería del overflow (Vortex finder).

Como consecuencia del proceso de clasificación se obtienen dos productos con características reológicas diferentes: Underflow (partículas gruesas) y Overflow (partículas finas).



**Figura 38:** Esquema de funcionamiento y partes de un ciclón [14].

## 8.2 Parámetros básicos para ciclones estándar

Se denomina “ciclón estándar” al ciclón que posee proporciones geométricas definidas entre sus dimensiones básicas como el diámetro, área de ingreso de pulpa, vórtex, ápex y longitud que proporcionen un tiempo de retención adecuado para la clasificación [13].

El parámetro principal de un ciclón es su diámetro que es el correspondiente al diámetro de la cámara de alimentación (Feed Chamber). Tomando como referencia el diámetro del ciclón se pueden especificar las dimensiones para el resto de componentes del ciclón [13]:

### **Área de ingreso de pulpa**

Es el área de la sección del orificio por el que la pulpa ingresa al ciclón, generalmente es de forma rectangular y es aproximadamente 0.05 veces el diámetro del ciclón al cuadrado.

### **Vortex finder**

Su función principal es controlar la correcta separación y el flujo de la pulpa durante la clasificación, debe tener una longitud lo suficientemente grande para evitar que la pulpa sea absorbida directamente por el Overflow sin haber realizado la clasificación. Su tamaño es aproximadamente 0.35 veces el diámetro del ciclón.

### **Sección cilíndrica**

Está ubicada entre la sección cónica y la cámara de admisión, su principal función es incrementar la longitud del ciclón para incrementar el tiempo de retención de la pulpa. Su longitud aproximada es igual al diámetro del ciclón.

### **Sección cónica**

El ángulo de un ciclón oscila entre los  $10^\circ$  y  $20^\circ$  y al igual que la sección cilíndrica ayuda a extender el tiempo de retención de la pulpa.

### **Apex**

Está ubicado en la parte final del ciclón y su función es la de asegurar una correcta descarga en el Underflow. Su diámetro oscila entre 10% y 35% del diámetro del ciclón.

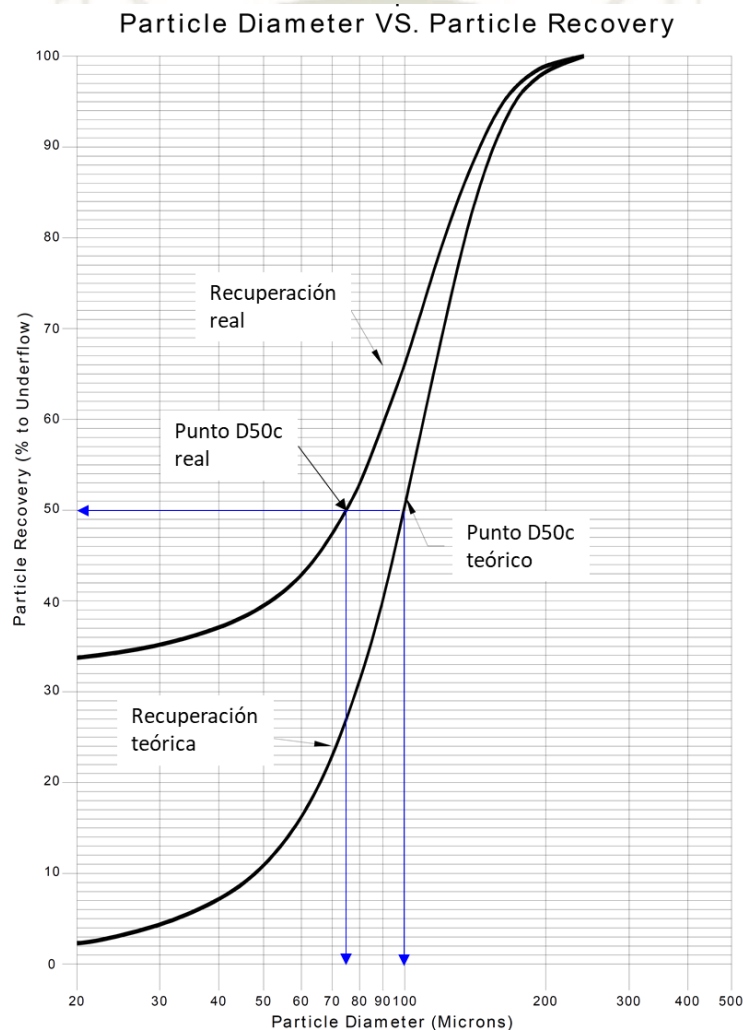
## **8.3 Descripción del proceso de clasificación**

Si analizamos el conjunto total de partículas que ingresan en el ciclón podemos deducir que una fracción de ellas (las más gruesas) serán recuperadas al underflow y la fracción restante serán recuperadas al overflow.

Por otro lado, si analizamos un tamaño de partícula en específico podemos decir que el porcentaje de recuperación para este grupo de partículas de tamaño “d” dependerá del tamaño de la misma, es decir a mayor sea el tamaño de la partícula una mayor fracción de estas serán recuperadas en el underflow. Esto se puede verificar en la curva de recuperación teórica mostrada en la Figura 40.

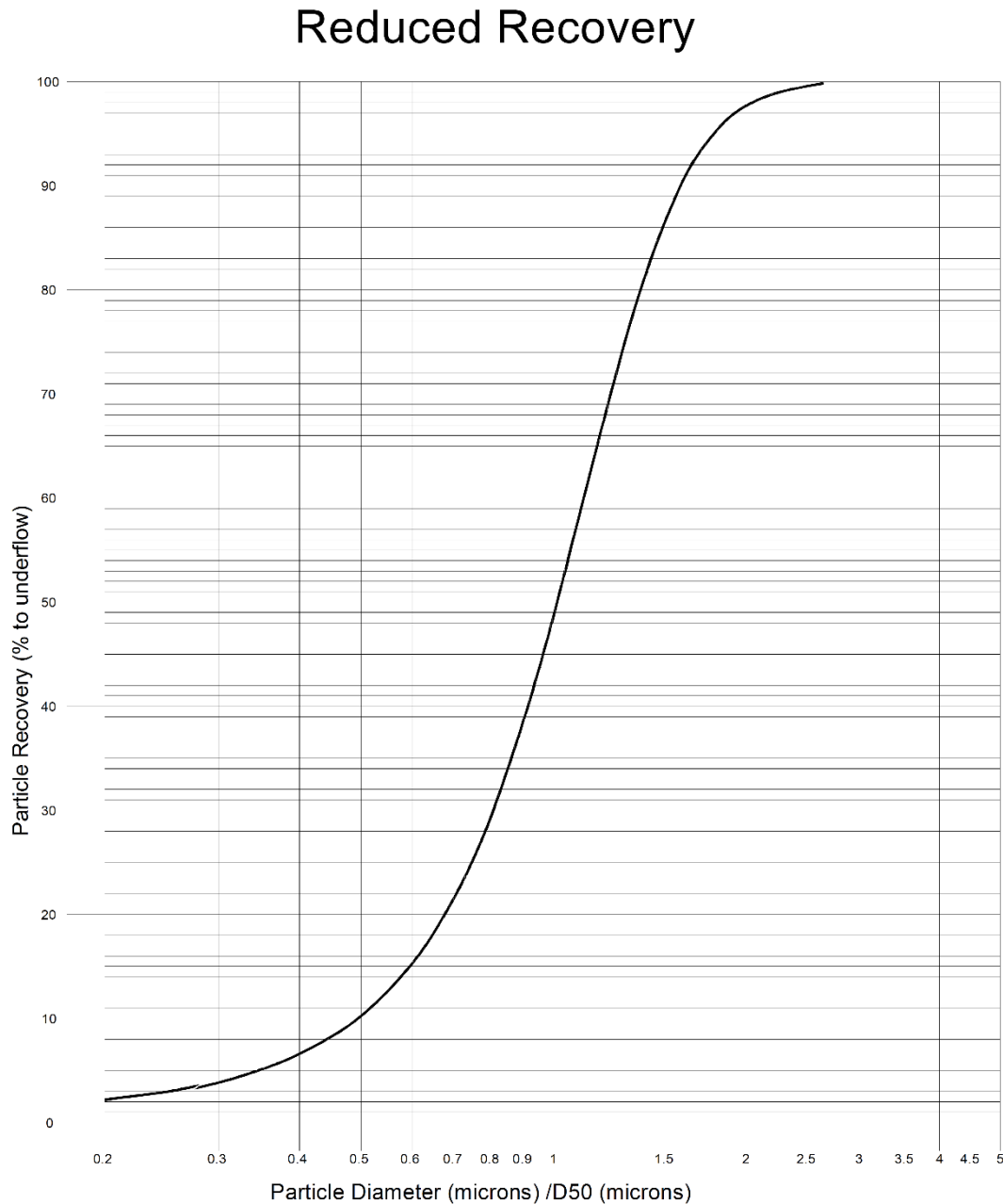
De la misma curva podemos identificar que existirá un tamaño de partícula para el cual el 50% de partículas del mismo tamaño será recuperado en el underflow y el 50% será recuperado en el overflow. Este tamaño de partícula teórico se conoce como  $D50_c$ .

De la curva teórica de recuperación se puede apreciar que para las partículas más finas el porcentaje de recuperación hacia el underflow tenderá a cero. Sin embargo, en la práctica el porcentaje de recuperación en el underflow de las partículas más finas suele ser mayor debido a que muchas de estas partículas finas son enviadas directamente hacia el underflow. La curva de recuperación real de la Figura 40 representa este fenómeno.



**Figura 39:** Curvas de recuperación al underflow de un ciclón [13].

Tomando en cuenta lo antes mencionado y estableciendo una relación entre los tamaños de partícula y el  $D50_c$  se puede graficar la curva reducida, la cual representa la curva de recuperación reducida del ciclón.



**Figura 40:** Recuperación reducida al underflow de un ciclón [13].

Para poder graficar esta curva utilizaremos la siguiente ecuación [13]:

$$R'_r = \frac{e^{4x} - 1}{e^{4x} + e^4 - 2} \quad (\text{Ec. 2. 76})$$

Donde:

$R'_r$  : Recuperación reducida al underflow.

$x$  : Relación diámetro de partícula /  $D50_c$

### Recuperación de agua en el underflow

Cuando la pulpa ingresa en el ciclón una fracción de agua será recuperada por el underflow lo que ocasionará que la curva de recuperación reducida en el underflow se vea afectada. Los efectos de la recuperación de agua en el underflow se pueden estimar corrigiendo la curva de recuperación reducida [15].

$$R_r = R'_r + R_{agua}(1 - R'_r) \quad (\text{Ec. 2. 77})$$

Donde:

$R'_r$  : Recuperación reducida al underflow.

$R_{agua}$  : Porcentaje de recuperación de agua en el underflow (de 19 a 23%).

$R_r$  : Recuperación real del ciclón.

#### 8.3.1 Punto de partición $D50_c$

Se puede determinar el punto  $D50_c$  estándar para un ciclón con la siguiente ecuación:

$$D50_c(base) = 2.84 \cdot D^{0.66} \quad (\text{Ec. 2. 78})$$

Donde:

$D50_c(base)$  : Punto de recuperación  $D50_c$  del ciclón estándar.

$D$  : Diámetro del ciclón.

La separación que un ciclón puede alcanzar dependerá de la influencia de otros parámetros como la densidad de las partículas, la concentración volumétrica de la alimentación y la caída de presión en el ciclón [13].

#### 8.3.2 Efectos de la concentración de sólidos

Los efectos producidos por la concentración de sólidos en la alimentación al ciclón se representan con el factor  $C_1$ .

$$C_1 = \left( \frac{53 - C_v}{53} \right)^{-1.43} \quad (\text{Ec. 2. 79})$$

### 8.3.3 Efectos de la caída de presión en el ciclón

Generalmente las descargas del overflow y underflow del ciclón se encuentran a presión atmosférica, por lo que la caída de presión en el ciclón puede considerarse igual a la presión en la tubería de alimentación. Los efectos de la caída de presión en el ciclón se representan con el factor  $C_2$ .

$$C_2 = 3.27 \cdot \Delta P^{-0.28} \quad (\text{Ec. 2. 80})$$

Donde:

$\Delta P$  : Caída de presión o presión de alimentación al ciclón.

### 8.3.4 Efectos de la densidad de las partículas

Los efectos de la densidad de las partículas sólidas se representan con el factor  $C_3$ .

$$C_3 = \left( \frac{1.65}{S_s - S_L} \right)^{0.5} \quad (\text{Ec. 2. 81})$$

Donde:

$S_s$  : Densidad relativa de los sólidos.

$S_L$  : Densidad relativa del líquido. 1 para el agua.

Finalmente el punto  $D50_c$  real que un ciclón estándar puede alcanzar se calcula con la siguiente ecuación:

$$D50_c(\text{real}) = D50_c(\text{base}) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \quad (\text{Ec. 2. 82})$$

## 8.4 Selección del tamaño y cantidad de ciclones

Los parámetros de entrada para la selección de un ciclón son los siguientes:

- Flujo y propiedades de pulpa en la alimentación.
- Diámetro de partícula y porcentaje pasante requerido en el overflow.

Con estos parámetros se debe determinar el  $D50_c$  real requerido para el ciclón.

$$D50_c(\text{real}) = fm \cdot dp \quad (\text{Ec. 2. 83})$$

Donde:

$dp$  : Diámetro de partícula al % pasante requerido (micras).

$fm$  : Factor multiplicador según % pasante requerido (Ver tabla 9)

Tabla 9: Factor de corrección para tamaño de partícula requerido en el Overflow

% Pasante requerido	Factor multiplicador $f_m$
98.8	0.54
95	0.73
90	0.91
80	1.25
70	1.67
60	2.08
50	2.78

**Nota.** Fuente: The sizing and selection of Hidrocyclones – Richard Arterburn [13].

Obtenido el punto  $D_{50C}$  real requerido para el ciclón calculamos los factores de corrección  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  descritos anteriormente para finalmente calcular el diámetro del ciclón de acuerdo a la Ec. 2.82.

Para determinar la cantidad de ciclones a utilizar se debe dividir el flujo total de pulpa a clasificar por la capacidad de flujo que puede procesar un ciclón.

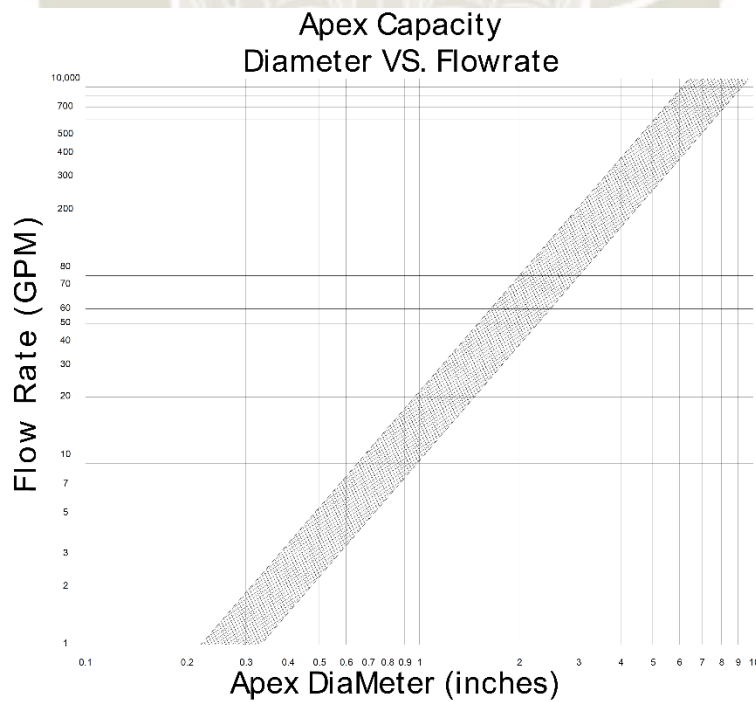
En base al diámetro de ciclón seleccionado y a su capacidad de flujo se estima la cantidad de ciclones a utilizar. La disposición de ciclones más empleada es la de tipo nido o batería que consiste en instalar los ciclones en un arreglo circular y alimentar cada uno a través de un manifold circular común que permite una mejor homogenización de la pulpa y una presión estable en la alimentación de cada ciclón [13].

Es recomendable agregar un 20% de ciclones adicionales en stand-by para garantizar la continuidad de la operación en caso de necesidades de mantenimiento [13].



**Figura 41:** Baterías de ciclones de relaves en una minera del sur del Perú [16].

Finalmente se puede seleccionar el diámetro del ápex de acuerdo a la siguiente gráfica.



**Figura 42:** Gráfico para selección de diámetro de Apex de un ciclón [13].

## 9. Tuberías para transporte de pulpas

Existen diversos materiales utilizados para la conducción de pulpas. Para poder realizar una correcta elección se deben evaluar ciertas condiciones como la presión de diseño de la línea y las características de la pulpa (Abrasión, corrosividad, etc.).

Los materiales más empleados para realizar el transporte de pulpas son las tuberías de acero al carbono (con y sin revestimiento) y tuberías de HDPE.

### 9.1 Tuberías de acero al carbono

Son las más utilizadas para el transporte de pulpas a presión. Existen diversos métodos y procedimientos de diseño y fabricación para tuberías de acero. Los códigos más empleados para tuberías en el manejo de pulpas son los siguientes:

- ASME B31.4 “Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries” Para transporte de líquidos y pulpas entre plantas.
- ASME B16.5 “Pipe Flange and Flanged Fittings” Para la selección y diseño de bridas y accesorios.
- ASTM A53 código para fabricación de tuberías de 1/8” a 26” para uso corriente.
- API 5L código para fabricación de tuberías de 3/8” hasta 80” de uso exigente.

Los procedimientos más empleados para la construcción de estas tuberías son FWP (Furnace Welded Pipe), ERW (Electric Resistance Welding), LSAW (Longitudinal submerged arc welded).

### 9.2 Análisis de esfuerzo de tuberías de acero

El análisis de esfuerzo consiste en seleccionar el material adecuado y determinar los espesores mínimos requeridos para una tubería presurizada. Para poder realizar este análisis se deben tener en cuenta todas las cargas y esfuerzos aplicados sobre una tubería.

#### 9.2.1 Cálculo del espesor de tubería.

El espesor de tubería mínimo para una tubería puede calcularse con la siguiente ecuación [17]:

$$t_n = \frac{P_i \cdot D}{20 \cdot F \cdot E \cdot S_y} + t_A \quad (\text{Ec. 2. 84})$$

Donde:

- $t_n$  : Espesor nominal de pared (mm).  
 $P_i$  : Presión interna de diseño de la tubería (bar).  
 $D$  : Diámetro exterior de la tubería (mm).  
 $F$  : Factor de diseño (para pulpa 0.8).  
 $E$  : Factor de soldadura (Ver tabla 10)  
 $S_y$  : Esfuerzo de fluencia del material de la tubería (MPa).  
 $t_A$  : Suma de tolerancias por corrosión y erosión.

El factor de soldadura dependerá del método con el que se haya fabricado la tubería, a continuación se presentan los valores para el factor de soldadura para las tuberías de acero al carbono más utilizadas en la industria.

Tabla 10: Factores de soldadura para diferentes tipos de tubería.

Tipo de tubería	Factor de soldadura, E
Tubería sin costura	1
Tubería ERW	1
Tubería EFW	0.8
Tubería SAW	1

**Notas.** Fuente: Código ASME B31.4 [17].

### 9.3 Conexiones en tuberías de acero al carbono

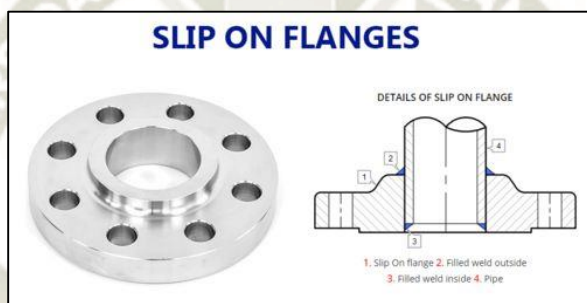
Pueden ser roscadas, bridadas o soldadas, siendo las dos últimas las más utilizadas para el transporte de pulpas.

### 9.3.1 Conexiones soldadas

La soldadura es el método más común debido a su bajo costo y confiabilidad. Cabe mencionar que para el caso de tuberías con revestimiento de goma este método no es recomendado por temas de seguridad y calidad.

### 9.3.2 Conexiones bridadas

Las uniones bridadas demandan mayor tiempo de instalación y resultan más costosas, sin embargo son necesarias para realizar la instalación de accesorios y válvulas en las líneas de transporte. Existen diferentes tipos de conexiones bridadas siendo las más conocidas y utilizadas las conexiones de tipo Slip On y Welding Neck.



**Figura 43.** Brida Slip On [18].



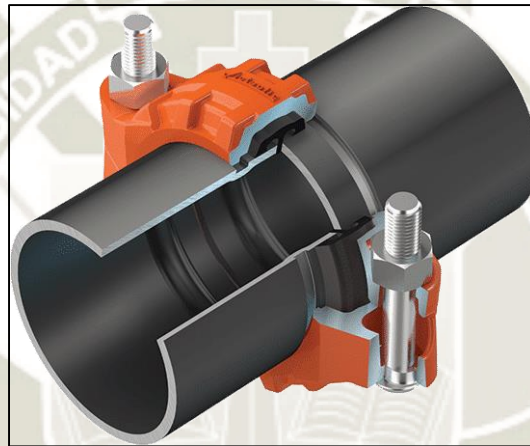
**Figura 44.** Brida Welding Neck [18].

Las bridas al igual que las tuberías deben cumplir con ciertos umbrales de presión y esfuerzo permitidos, los códigos utilizados para la clasificación de bridas son AWWA y ASME B16.5.

### 9.3.3 Conexiones ranuradas

Las uniones ranuradas tipo Victaulic utilizan pequeñas ranuras en los extremos de las tuberías que se desean unir para conectarse mediante un acople de fácil instalación y reducido número de pernos.

Estas uniones poseen gran versatilidad y son utilizadas sobre todo en instalaciones no permanentes que requieren periodos de desmontaje o mantenimiento cortos. Algunas de las ventajas de este tipo de uniones son su flexibilidad, rapidez de montaje y absorción de esfuerzos.



**Figura 45:** Conexión ranurada tipo Victaulic [19].

### 9.4 Revestimiento interno de tuberías de acero al carbono

En muchos casos es necesario aplicar revestimientos de goma internos a las tuberías de acero debido al nivel de corrosividad y desgaste que la pulpa posee.

### 9.5 Tuberías de HDPE

Las tuberías de HDPE poseen la ventaja de tener excelentes propiedades anticorrosión y antidesgaste, además de su facilidad y rapidez de montaje. Sin embargo, por la naturaleza propia del material solo se recomienda su uso en tuberías a baja presión o canales.

#### Montaje de tuberías HDPE

El montaje de estas tuberías se realiza regularmente por procesos de termofusión los cuales tienen un costo relativamente elevado por la complejidad de los equipos que se necesitan, sin embargo la versatilidad y adaptabilidad que poseen hacen que sus tiempos de instalación sean bastante cortos.

### 9.5.1 Conexiones especiales para tuberías de HDPE

Es posible la utilización de válvulas, accesorios e instrumentos para tuberías de HDPE, sin embargo estas requieren de accesorios adicionales que permitan su montaje.



**Figura 46.** Accesorios de HDPE para termofusión [20].



**Figura 47.** Flange adapter para conexión bridada de tuberías de HDPE [20].



**Figura 48.** Backing Ring para conexión bridada de tuberías HDPE [20].



**Figura 49:** Instalación de accesorios de HDPE [20].

### **10. Válvulas e instrumentos para manejo de pulpas**

Las válvulas juegan un papel importante en cualquier sistema de transporte de fluidos, ya que ayudan a controlar y regular el paso del flujo a través de las tuberías.

Las válvulas para pulpa se diferencian a las de agua en que estas utilizan mecanismos y materiales que ayuden a reducir fugas y desgaste de sus componentes. De forma general se pueden clasificar en válvulas modulantes y válvulas ON/OFF.

## 10.1 Válvulas modulantes para pulpas

### 10.1.1 Válvula pinch

Estas válvulas actúan por estrangulamiento utilizando mangas de goma flexible que reducen el área de flujo mediante mecanismos mecánicos o hidráulicos. Son generalmente empleadas para líneas a baja presión.

Su accionamiento puede ser por volante, electro mecánico o hidráulico.



**Figura 50:** Válvula modulante tipo Pinch [21].

### 10.1.2 Válvula de bola

Estas válvulas se utilizan en aplicaciones de alta presión. Su diseño se basa en formar un sello hermético entre la bola y los anillos de ajuste del cuerpo. Debido a lo complejo de su diseño y materiales que utilizan son normalmente más costosas. Generalmente requieren de accionamiento electromecánico o hidráulico [3].



**Figura 51:** Válvula modulante de bola [22].

## 10.2 Válvulas ON/FF

### 10.2.1 Válvulas cuchilla

Son ampliamente utilizadas en transporte de relaves y permiten el cierre y apertura total de una línea de transporte. Se utilizan ampliamente en la industria debido a su fácil diseño, instalación, mantenimiento y operación. Consisten en una hoja o cuchilla que obstruye completamente el paso de flujo a través de la tubería.

Su accionamiento puede ser por volante, electro mecánico o hidráulico.



**Figura 52:** Válvula cuchilla tipo ON/OFF de accionamiento manual [23].

### **10.3 Instrumentos de control en el manejo de pulpas**

Durante la operación de cualquier sistema de manejo de pulpas intervienen diferentes instrumentos que ayudan a monitorear y controlar el comportamiento del sistema. Algunas de las variables que comúnmente se miden en un sistema de transporte de pulpas son: Flujo, presión y densidad.

#### **10.3.1 Flujómetros**

Son instrumentos que miden el caudal con el que un fluido atraviesa una tubería. Para pulpas mineras se utilizan los flujómetros magnéticos.



**Figura 53:** Flujómetro magnético con display de revisión en campo [24].

### 10.3.2 Medidores de presión

Los instrumentos más utilizados son los manómetros que pueden ser analógicos o digitales.

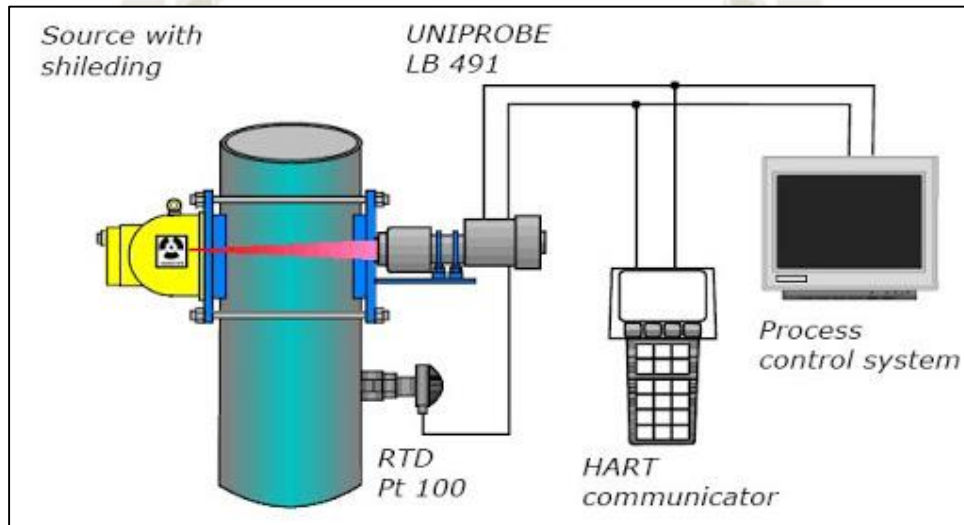


**Figura 54:** Manómetro analógico [25].

### 10.3.3 Densímetros

A diferencia de fluidos de densidad constante como el agua, cuando se transportan pulpas mineras es de vital importancia monitorear la densidad de la pulpa ya que cualquier cambio significativo afectará en el funcionamiento de cualquier componente del sistema.

Adicionalmente, con el valor medido de la densidad y conociendo la densidad de sólidos estos instrumentos puede mostrar la concentración el peso de la pulpa.



**Figura 55:** Esquema de instalación y funcionamiento de un densímetro nuclear [26].



## **CAPITULO III: DISEÑO DEL SISTEMA**

## 1. Descripción general del proceso

El sistema a analizar iniciará desde la descarga del cajón distribuidor de relaves CJ-01 el cual recibe los relaves totales provenientes de los espesadores con una concentración en peso del 55%. El cajón CJ-01 cuenta con dos líneas de descarga operativas. Una de las descargas enviará el 50% de los relaves totales directamente hacia el embalse de la presa a través de un canal de tuberías de 800 m de longitud. La otra descarga enviará el 50% de los relaves totales restantes hacia el cajón CJ-02 a través de un canal de tuberías de 4.06 km de longitud.

El cajón distribuidor CJ-02 será utilizado como alimentación al sistema de clasificación por ciclones y servirá como un punto de inyección de agua que modificará la concentración en peso de alimentación a los ciclones a 42%.

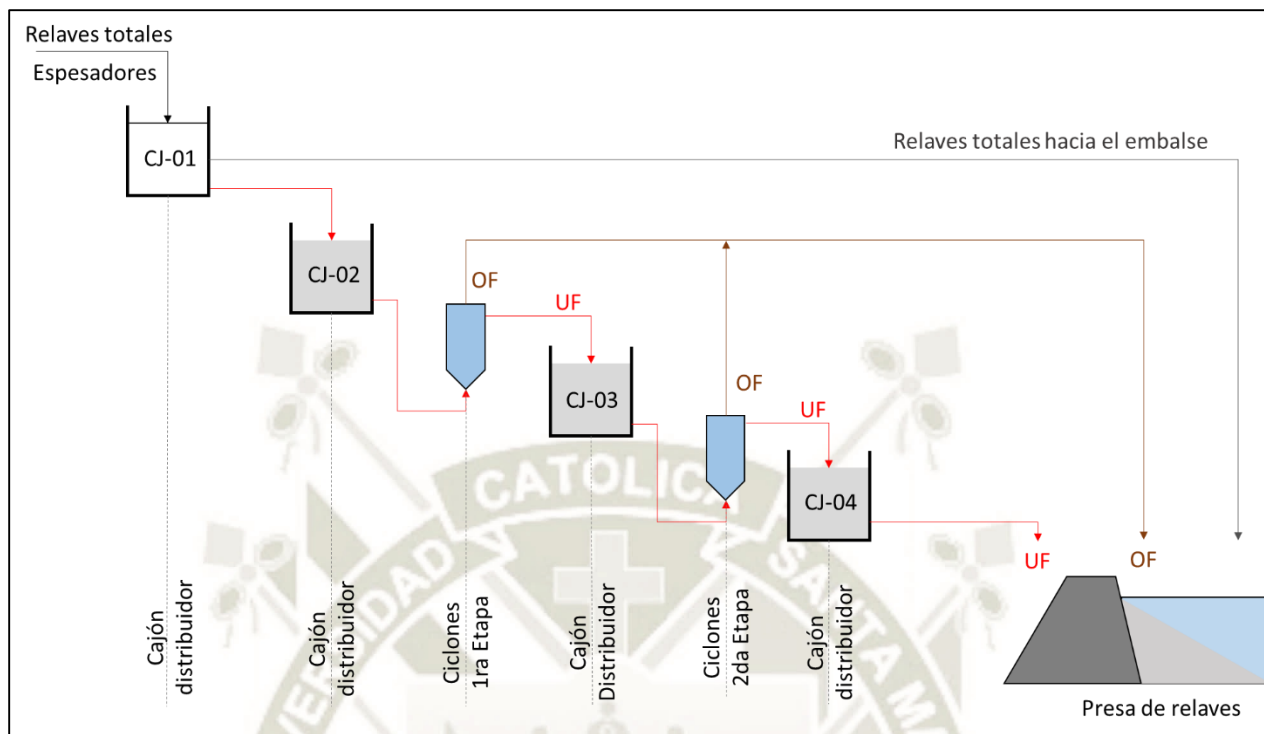
El sistema de clasificación constará de dos etapas. Los ciclones de la primera etapa tendrán como objetivo clasificar los relaves totales hasta obtener un tamaño de partícula  $d_{80}$  de 149  $\mu\text{m}$  en el underflow. El underflow obtenido en esta primera etapa será enviado hacia el cajón CJ-03 el cual servirá como alimentación para la segunda etapa de clasificación, además de un punto de inyección de agua para obtener una concentración en peso de 40%.

Los ciclones de la segunda etapa tendrán como objetivo clasificar los relaves provenientes del cajón CJ-03 hasta alcanzar un tamaño de partícula  $d_{80}$  de 167  $\mu\text{m}$  en el underflow. El underflow obtenido en la segunda etapa será enviado hacia el cajón CJ-04 y descargado por gravedad o bombeo hacia el sistema de descarga de arenas ubicado en la presa de relaves (Jacking Header UF).

El overflow, proveniente de la clasificación de ambas etapas será enviado por gravedad a través de una línea de tuberías hacia el sistema de descarga en la presa de relaves (Jacking Header OF).

El Jacking Header tendrá una longitud de 1 km. La descarga de arenas en el terraplén se realizará por cuatro zonas, debiéndose garantizar una descarga constante en la última de ellas.

A continuación se muestra un esquema general del proceso:



**Figura 56:** Diagrama general del proceso de transporte y clasificación de relaves.

## 2. Consideraciones y requisitos de diseño

A continuación se mencionarán las consideraciones y requerimientos que se tendrán en cuenta para el diseño del sistema:

### 2.1 Producción de relaves

El primer requisito que debemos identificar es la capacidad de producción de relaves de la concentradora, en nuestro caso la concentradora tendrá una capacidad nominal de 200 mil toneladas métricas por día que es igual a 4170 toneladas métricas por hora.

Este valor nominal debe multiplicarse por el porcentaje de recuperación de cobre de la concentradora y dividirse por la disponibilidad de planta.

En la siguiente tabla se muestran los valores de producción de relaves totales de diseño que serán enviados desde los espesadores considerando los ratios de disponibilidad y recuperación, además de un factor de diseño del 10%.

- Capacidad nominal de la concentradora : 8334 t/h (200 000 t/d)
- Disponibilidad de planta : 92.5 %

- Recuperación de cobre : 0.40 %
- Producción de relaves totales : 8974 t/h
- Factor de diseño : 1.10
- Producción de relaves de diseño : 9872 t/h

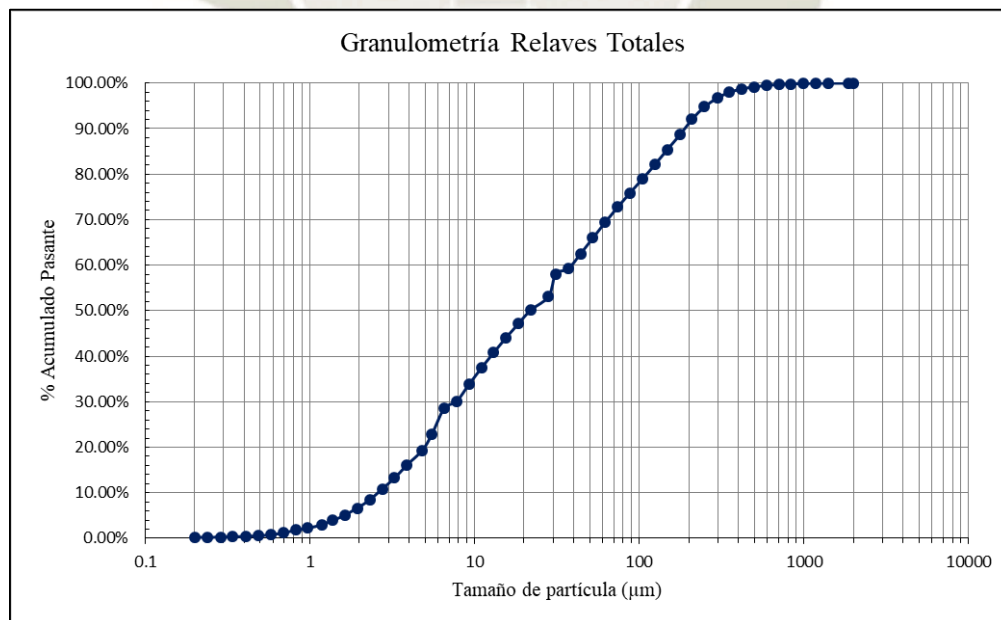
En base a estos resultados se establece la capacidad del sistema de manejo de relaves de 9872 t/h de los cuales el 50% pasarán por el proceso de clasificación y el 50% restante serán depositados directamente en la embalse de la presa de relaves.

## 2.2 Propiedades de los relaves totales

En la siguiente tabla se muestran las propiedades de los relaves totales entregados al sistema:

- Densidad relativa de sólidos : 2.70
- Concentración en peso : 55 %
- Tamaño de partícula d50 : 22  $\mu\text{m}$
- Tamaño de partícula d80 : 111  $\mu\text{m}$
- PH : 10 a 12
- Temperatura del relave : 3.5 °C a 30 °C

A continuación se muestra la curva granulométrica de los relaves totales:



**Figura 57:** Curva granulométrica de relaves totales provenientes de espesadores.

### 2.3 Requisitos mínimos para el sistema de clasificación de arenas

Para poder diseñar correctamente el sistema de clasificación, es necesario conocer la cantidad de arenas que se requiere producir para realizar un correcto crecimiento de la presa de relaves. Con este valor se puede estimar el porcentaje de recuperación requerido en todo el sistema de clasificación, es decir, la relación entre el total de sólidos enviados al proceso de clasificación y el total de sólidos obtenidos en el underflow de todo el sistema de clasificación.

- Producción de arenas mínima : 1450 t/h
- Flujo de sólidos en la alimentación : 4936 t/h
- Recuperación mínima en el UF : 29.4 %

También será necesario conocer el tamaño de partícula d80 deseado en el underflow (UF) y overflow (OF) para cada etapa de clasificación.

#### Primera etapa de clasificación

- Tamaño de partícula d80 OF : 43  $\mu\text{m}$
- Tamaño de partícula d80 UF : 160  $\mu\text{m}$

#### Segunda etapa de clasificación

- Tamaño de partícula d80 OF : 59  $\mu\text{m}$
- Tamaño de partícula d80 UF : 250  $\mu\text{m}$

### 2.4 Condiciones ambientales

- Temperatura máxima : 30 °C
- Temperatura mínima : 3.5°C
- Elevación promedio : 2700 m.s.n.m.
- Aceleración de la gravedad : 9.81 m/s<sup>2</sup>

### 2.5 Requisitos para cajones de distribución

Los requisitos para los cajones de distribución están orientados al tiempo de retención y a la capacidad máxima de rebose, esto con el fin de garantizar una correcta operación y evitar el

derrame de relaves en el ambiente. Para todos los cajones de distribución desarrollados en el presente trabajo se deben considerar los siguientes requisitos:

- Tiempo mínimo de retención : 60 s.
- Capacidad de rebose : Flujo máximo de ingreso.

### 3. Diseño de canales principales de transporte

#### 3.1 Diseño del canal de tuberías del CJ-01 hacia el CJ-02

Como se describió anteriormente el cajón distribuidor CJ-01 será el encargado de enviar los relaves totales hacia el canal de tubería que transportará los relaves hasta el cajón CJ-02. Conociendo la longitud de la línea, además de los niveles inicial y final podemos estimar la pendiente del canal empleando la Ec. 2.43

- Nivel inicial de la línea : 2650.10 msnm
- Nivel final de la línea : 2621.40 msnm
- Longitud del trazo de tubería : 4060 m
- Pendiente : 0.70 %

##### 3.1.1 Selección del material de la tubería

La tubería será instalada sobre terreno y la pendiente se mantendrá constante. Debido a la longitud de la línea y a que esta trabajará a presión atmosférica (como canal) se decidió emplear tuberías de HDPE por su rápida instalación, además de que esta podrá adaptarse fácilmente a las curvaturas o cambios de dirección que se presenten a lo largo de su trayectoria.

El espesor de pared de la tubería depende de la presión en la línea y la abrasividad que posea el material, en este caso al tratarse de sólidos inferiores a 0.2 mm con una concentración en peso de 55% se empleó un espesor intermedio SDR-21 ya que es el espesor más comercial para este tipo de tuberías.

##### 3.1.2 Propiedades de la pulpa

Primero debemos determinar las propiedades reológicas del relave a transportar. A continuación se muestran los resultados de las propiedades para los relaves totales:

- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>

- Concentración de sólidos ( $C_p$ ) : 55%
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 31%
- Densidad de la mezcla ( $\rho_s$ ) : 1529 kg/m<sup>3</sup>
- Flujo másico (toneladas secas) : 4936 t/h
- Caudal de la pulpa ( $Q$ ) : 5867 m<sup>3</sup>/h

### 3.1.3 Selección del diámetro de tubería

Para poder identificar el diámetro más apropiado para la tubería se analizaron 3 alternativas, para las cuales se evaluaron los siguientes parámetros:

- Velocidad de deposición
- Velocidad de flujo.
- Número de Froude.
- Tirante hidráulico.

Los tres diámetros de tubería evaluados fueron los siguientes:

Tabla 11: Alternativas de diámetros para canal de tuberías desde CJ-01 hacia CJ-02

N° Alternativa	Diámetro nominal	Diámetro interior
Alternativa 1	42 pulg	959 mm
Alternativa 2	48 pulg	1096 mm
Alternativa 3	54 pulg	1233 mm

**Nota.** Fuente: Elaboración propia  
Todas las tuberías son de HDPE SDR-21

### Velocidad de deposición

Como primera parte del análisis se estimaron las velocidades de deposición para cada alternativa por el método de Wasp. A continuación se muestra el procedimiento de cálculo para la Alternativa 1.

De acuerdo a las Ec. 2.30 y 2.31

$$v_D = \left[ F'_L \sqrt{2 \cdot g \cdot D_i (S_s - 1)} \right] \cdot \left[ \frac{d_{50}}{D_i} \right]^{1/6}$$

$$F'_L = 3.322 \cdot C_v^{0.21}$$

Donde:

- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 31 %
- Diámetro interior de la tubería ( $D_i$ ) : 0.959 m
- Densidad relativa de sólidos ( $S_s$ ) : 2.7
- Tamaño de partícula ( $d_{50}$ ) : 0.000022 m (22  $\mu$ m)

Se obtuvo que la velocidad de deposición para la alternativa 1 es de 1.66 m/s.

En el siguiente cuadro se muestran las velocidades de deposición obtenidas para cada alternativa comparada con la velocidad de diseño.

Tabla 12: Velocidades de deposición para cada alternativa.

N° Alternativa	Velocidad de deposición (m/s)
Alternativa 1	2.48
Alternativa 2	2.59
Alternativa 3	2.70

**Nota.** Fuente: Elaboración propia.

### Ángulo de llenado

Para calcular el ángulo de llenado se utilizó la Ec. 2.44

$$Q = \frac{\sqrt{S_0} \cdot (\theta - \text{sen}\theta)^{1.67} \cdot D^{3.33}}{20.16 \cdot n \cdot (D \cdot \theta)^{0.67}}$$

Donde:

- Pendiente de la tubería ( $S_0$ ) : 0.70 %
- Flujo volumétrico ( $Q$ ) : 1.63 m<sup>3</sup>/s (5867 m<sup>3</sup>/h)
- Diámetro interior de la tubería ( $D$ ) : 0.959 m

Obteniendo un ángulo de llenado de la sección de 3.782 rad (216.67 °).

### Área llena y velocidad de flujo

El área llena se calculó de acuerdo a la Ec. 2.35

$$A = \frac{(\theta - \text{sen } \theta) \cdot D^2}{8}$$

Donde:

- Ángulo de llenado de sección ( $\theta$ ) : 3.782 rad
- Diámetro interior de la tubería ( $D$ ) : 0.959 m

Obteniendo que el área llena de la sección es de 0.503 m<sup>2</sup>.

La velocidad de flujo se calculó de acuerdo a la Ec. 2.42

$$Q = V \cdot A$$

Donde:

- Flujo volumétrico ( $Q$ ) : 1.63 m<sup>3</sup>/s
- Área de llenado ( $A$ ) : 0.503 m<sup>2</sup>

Obteniendo que la velocidad de flujo es de 3.24 m/s.

### Altura de llenado y tirante hidráulico

La altura de llenado se calculó de acuerdo a la Ec. 2.39

$$Y = \frac{D}{2} \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right)$$

Donde:

- Diámetro interior de la tubería ( $D$ ) : 0.959 m
- Ángulo de llenado de sección ( $\theta$ ) : 3.782 rad

Obteniendo que la altura de llenado es de 0.630 m.

Luego de haber calculado la altura de llenado, el tirante hidráulico se calculó utilizando la Ec. 2.41

$$\text{Tirante} = \frac{Y}{D}$$

Donde:

- Diámetro interior de la tubería ( $D$ ) : 0.959 m
- Altura de llenado ( $Y$ ) : 0.959 m

Obteniendo como resultado que el tirante hidráulico para la alternativa 1 es de 66 %.

### Ancho libre y número de Froude

El ancho libre se calculó de acuerdo a la Ec. 2.38

$$T = D \cdot \left( \text{sen} \frac{\theta}{2} \right)$$

Donde:

- Diámetro interior de la tubería ( $D$ ) : 0.959 m
- Ángulo de llenado de sección ( $\theta$ ) : 3.782 rad

Obteniendo como resultado que el ancho libre de flujo es de 0.910 m.

El número de Froude se calculó de acuerdo a la Ec. 2.46

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{A \cdot g}{T}}}$$

Donde:

- Velocidad de flujo ( $V$ ) : 0.959 m
- Área de llenado ( $A$ ) : 3.782 rad
- Ancho libre de flujo ( $T$ ) : 0.910 m

Obteniendo como resultado que el número de Froude es igual a 1.39.

A continuación, se muestra el resumen de resultados para cada alternativa siguiendo el procedimiento de cálculo anteriormente descrito:

Tabla 13: Resumen de resultados: canal de tubería de CJ-01 a CJ-02

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro interior (mm)	Velocidad Deposición (m/s)	Velocidad (m/s)	Relación Velocidades (V/VD)	Número de Froud	Tirante (%)
42	959	2.48	3.24	1.31	1.39	66%
48	1096	2.59	3.27	1.26	1.55	52%
54	1233	2.70	3.26	1.21	1.63	44%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados obtenidos observamos que con la tubería de 42 pulgadas la velocidad de flujo es mayor que la velocidad de deposición, sin embargo el número de Froude está por debajo

de 1.4 lo cual puede ocasionar inestabilidad en el flujo, también se observa que el tirante está por encima del tirante recomendado (60%).

Las tuberías de 48 y 54 pulgadas cumplen con los parámetros mínimos de velocidad, número de Froude y tirante hidráulico. Sin embargo, la tubería de 54 pulgadas tendrá un costo significativamente mayor en comparación a la tubería de 48 pulgadas. Por lo tanto se seleccionó la tubería de 48 pulgadas.

### 3.2 Diseño del canal de tuberías del CJ-01 hacia el embalse

De manera análoga al canal de tuberías partiendo de los puntos inicial y final de la tubería estableceremos la pendiente de la misma:

- Nivel inicial de la línea : 2650.10 msnm
- Nivel final de la línea : 2640.50 msnm
- Longitud del trazo de tubería : 800 m
- Pendiente : 1.20 %

#### 3.2.1 Selección del material de la tubería

La tubería estará apoyada sobre el terreno y al tratarse del mismo relave la selección del material de la tubería se mantendrá en tubería de HDPE SDR-21.

#### 3.2.2 Propiedades de la pulpa

Las propiedades del relave y el flujo de diseño son las mismas a las calculadas para el primer canal de tuberías ya que la misma cantidad de los relaves totales serán enviados directamente al embalse de la presa.

- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Concentración de sólidos ( $C_p$ ) : 55%
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 31%
- Densidad de la mezcla ( $\rho_m$ ) : 1529 kg/m<sup>3</sup>
- Flujo másico de sólidos secos ( $\dot{m}$ ) : 4936 t/h
- Flujo volumétrico de la pulpa ( $Q_m$ ) : 5867 m<sup>3</sup>/h

### 3.2.3 Selección del diámetro de tubería

Al igual que en el caso anterior se analizaron 3 alternativas, para las cuales se determinaron los siguientes parámetros:

- Velocidad de deposición.
- Velocidad de flujo.
- Número de Froude.
- Tirante hidráulico.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para cada alternativa:

Tabla 14: Resumen de resultados: canal de tubería de CJ-01 al Embalse

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro interior (mm)	Velocidad Deposición (m/s)	Velocidad (m/s)	Relación Velocidades (V/VD)	Número de Froude	Tirante (%)
36	822	2.36	3.92	1.66	1.66	73%
42	959	2.48	4	1.61	1.95	52%
48	1096	2.59	4	2.29	2.09	45%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar que la tubería de 36 pulgadas no cumple con los requerimientos de tirante, mientras que las tuberías de 42 y 48 pulgadas cumplen con todos los requisitos, por lo tanto de forma similar seleccionamos la tubería de 42 pulgadas que implicará un menor costo de compra e instalación.

### 3.3 Soportería para canales de HDPE

Como se indicó anteriormente la tubería estará apoyada sobre el terreno en toda su trayectoria por lo cual no se necesitan soportes. Sin embargo, al tratarse de tuberías de HDPE que poseen una alta flexibilidad es recomendable instalar topes para evitar movimiento de las tuberías por la acción del flujo o por dilatación térmica. Los métodos más empleados son los topes tipo bolardo o tipo lomo de toro. Una recomendación práctica es instalar estos soportes cada 15 metros en toda la trayectoria de la tubería.

### 3.4 Selección de válvulas y accesorios para las tuberías del corredor principal

#### 3.4.1 Válvulas cuchilla

Ambos corredores contarán con válvulas cuchilla en el punto inicial y descargarán libremente el relave hacia sus extremos finales. Las tuberías trabajarán a presión atmosférica por lo cual las válvulas se seleccionaron considerando el rating de presión mínimo según las especificaciones del fabricante.

A continuación se muestran las especificaciones técnicas para las válvulas de las líneas del corredor principal.

- Marca / Modelo : Clarkson / KGA
- Servicio : On /Off
- Tipo de conexión : Bridada
- Rating de presión : NPS 48 (50 psi)
- Manga : Caucho natural standard
- Material de la cuchilla : Acero inox 316
- Actuador : Pistón hidráulico

El pistón hidráulico de accionamiento de las válvulas cuchilla será accionado a través de Unidades Hidráulicas Centralizadas (HPUs) las cuales están compuestas por un sistema de bombas, válvulas y mangueras que se conectan en el pistón hidráulico de la válvula y permiten el accionamiento de las cuchillas. La ventaja de estas unidades es que pueden conectarse al sistema de control de la planta y permiten realizar el accionamiento desde el cuarto de control. Para el corredor principal de tuberías se consideró instalar una unidad hidráulica por cada válvula cuchilla.

Los HPUs son suministrados por el proveedor de las válvulas y normalmente se venden por separado.

#### 3.4.2 Bridas y accesorios de conexión entre tuberías

En los tramos iniciales del corredor principal se utilizarán tuberías de acero lo cual permitirá que las válvulas se encuentren correctamente instaladas, posteriormente se instalarán las tuberías de HDPE termofusionadas.

Para realizar la transición entre tubería de acero y tubería de HDPE se seleccionaron los siguientes accesorios:

- Flange Adapter : Material HDPE SDR-21.
- Back up ring : AWWA C207 D / Hierro Dúctil
- Bridas Slip On : AWWA C207 D

#### 4. Diseño del cajón distribuidor CJ-02

El cajón CJ-02 recibirá los relaves totales provenientes del canal de tuberías desde el CJ-01. Este cajón contará con un ingreso de agua que permitirá disminuir la concentración de sólidos en el cajón.

##### 4.1 Propiedades del relave en el CJ-02

De acuerdo a los requerimientos de diseño la concentración en peso en el cajón debe bajar de 55% a 42%. Con esta nueva concentración se calcularon la concentración en volumen y la densidad de la pulpa en el CJ-02.

##### 4.1.1 Concentración en volumen

De la Tabla 2 se utilizó la siguiente igualdad:

$$C_v = \frac{C_p}{1 + (1 - C_p) \cdot (S_s - 1)}$$

Donde:

- Concentración en peso ( $C_p$ ) : 42%
- Densidad relativa de sólidos ( $S_s$ ) : 2.7

Obteniendo como resultado:

- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 21.15%

##### 4.1.2 Densidad de la pulpa

Luego de determinada la concentración en volumen la densidad de la pulpa se calculó utilizando la Ec. 2.17

$$\rho_m = \rho_l + (\rho_s - \rho_l) * C_v$$

Donde:

- Concentración en peso ( $C_v$ ) : 21.15%
- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>

- Densidad del agua ( $\rho_l$ ) : 1000 kg/m<sup>3</sup>

Obteniendo como resultado:

- Densidad de la mezcla ( $\rho_m$ ) : 1360 kg/m<sup>3</sup>

#### 4.1.3 Viscosidad

Para el cálculo de la viscosidad se utilizó el método K&D de acuerdo a la Ec. 2.24

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = \frac{1}{\left(1 - \frac{C_v}{C_{v \max}}\right)^{E \cdot C_{v \max}}}$$

Donde:

- Densidad del agua ( $\mu_l$ ) : 0.001 Pa · s
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 21 %
- Concentración máxima ( $C_{v \max}$ ) : 100 %
- Viscosidad intrínseca ( $E$ ) : 7

Obteniendo como resultado:

- Viscosidad dinámica de la pulpa ( $\mu_m$ ) : 0.00521 Pa · s.

#### 4.1.4 Tensión de fluencia

Para el cálculo de la tensión de fluencia se utilizó el modelo de Thomas de acuerdo a las Ec. 2.25 y 2.26:

$$\tau_f = B \cdot C_v^3 \cdot \exp\left(\frac{2.7 \cdot C_v}{1 - C_v}\right)$$

$$B = \frac{C_2}{d_{50}^{N_2}}$$

Donde:

- Factor  $C_2$  para relaves : 3379.5
- Factor  $N_2$  para relaves : 1.1211
- Tamaño de partícula ( $d_{50}$ ) : 22  $\mu$ m
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 21 %

Obteniendo como resultado:

- Tensión de fluencia de la pulpa ( $\tau_f$ ) : 2.06 Pa

## 4.2 Flujo volumétrico a la salida del cajón

Para calcular el flujo volumétrico de la pulpa a la salida del cajón se utilizó la Ec. 2.21

$$Q_m = \frac{\dot{m}}{S_s \cdot C_v}$$

Donde:

- Flujo másico de sólidos secos ( $\dot{m}$ ) : 4036 t/h
- Densidad relativa de sólidos ( $S_s$ ) : 2.7
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 21%

Obteniendo como resultado:

- Flujo volumétrico de salida ( $Q_m$ ) : 8645 m<sup>3</sup>/h

## 4.3 Flujo requerido de agua para dilución

La diferencia entre el flujo de pulpa de ingreso y el flujo de pulpa de salida nos dará como resultado el flujo requerido de agua para dilución:

$$8645 - 5867 = 2778 \text{ m}^3/\text{h}$$

Esto quiere decir que debido a la inyección de agua para dilución el flujo de ingreso al cajón se incrementará en 47%. Este valor se utilizó más adelante para incrementar las dimensiones mínimas calculadas en base al ingreso de pulpa en el cajón.

## 4.4 Dimensionamiento del cajón distribuidor CJ-02

### 4.4.1 Volumen mínimo del CJ-02

Para calcular el volumen mínimo que debe tener el cajón distribuidor CJ-02 se tomó en consideración el tiempo mínimo de retención requerido para el cajón así como el flujo volumétrico de la pulpa. De acuerdo a la Ec. 2.75 tenemos:

$$Vol_{min} = Q_m \cdot R_t$$

Donde:

- Flujo volumétrico de descarga ( $Q_m$ ) : 2.40 m<sup>3</sup>/s
- Tiempo mínimo de retención ( $R_t$ ) : 60 s

Obteniendo como resultado:

- Volumen efectivo mínimo ( $Vol_{min}$ ) : 144 m<sup>3</sup>

#### 4.4.2 Ancho mínimo del cajón CJ-02

Para determinar el ancho mínimo del cajón se debe conocer el ancho del canal rectangular de alimentación. Como en este caso el canal de alimentación es circular se determinó el ancho equivalente para un canal rectangular de acuerdo a la Ec. 2.73.

$$b_1 = A/Y$$

Donde:

- Área de la sección llena ( $A$ ) : 0.50 m<sup>2</sup>
- Altura de llenado ( $Y$ ) : 0.572 m

Obteniendo como resultado:

- Ancho equivalente ( $b_1$ ) : 0.874 m (34 pulg)

Finalmente los datos de entrada para seleccionar el ancho mínimo serán:

- Altura de caída de flujo : 1.50 m (60 pulg)
- Altura de llenado del canal : 0.572 m (9 pulg)

De la Tabla 6 se obtuvo:

- Ancho adicional por lado  $b_2$  : 1.105 m (43.5 pulg)

Por lo tanto el ancho mínimo recomendado para el cajón se calcula de acuerdo a la Ec. 2.72.

$$A_c = b_1 + 2 \cdot b_2$$

Donde:

- Ancho de canal rectangular ( $b_1$ ) : 0.874 m
- Ancho adicional recomendado ( $b_2$ ) : 1.105 m

Obteniendo como resultado:

- Ancho mínimo del cajón ( $A_c$ ) : 3.10 m

El ancho mínimo obtenido de la Tabla 6 no considera el flujo de ingreso de agua de dilución. Para tomar en cuenta el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución se multiplicó el ancho mínimo por el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución. Por lo tanto el ancho mínimo del cajón será:

$$3.10 \cdot (1 + 0.47) = 4.6 \text{ m}$$

#### 4.4.3 Largo mínimo de la cámara de recepción

Considerando los siguientes datos de entrada:

- Velocidad de ingreso : 3.27 m/s (644 pies/min)
- Altura de llenado del canal : 0.572 m (23 pulg)
- Altura de caída de flujo : 1.50 m (60 pulg)

De acuerdo a la Tabla 7 se obtuvo:

- Largo mínimo cámara de recepción : 3.0 m (118 pulg)

El largo mínimo obtenido de la Tabla 7 no considera el flujo de ingreso de agua de dilución. Para tomar en cuenta el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución se multiplicó el largo mínimo por el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución. Por lo tanto el largo mínimo del cajón será:

$$3 \cdot (1 + 0.47) = 4.4 \text{ m}$$

#### 4.4.4 Profundidad mínima del cajón CJ-02

Considerando los siguientes datos de entrada:

- Velocidad de ingreso : 3.27 m/s (644 pies/min)
- Altura de llenado del canal : 0.572 m (23 pulg)
- Altura de caída de flujo : 1.50 m (60 pulg)

De acuerdo a la Tabla 8 se obtuvo:

- Profundidad mínima del cajón : 1.10 m (42 pulg)

La profundidad obtenida de la Tabla 8 no considera el flujo de ingreso de agua de dilución. Para tomar en cuenta el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución se multiplicó profundidad por el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución. Por lo tanto la profundidad mínima del cajón será:

$$1.1 \cdot (1 + 0.47) = 1.62 \text{ m}$$

#### 4.4.5 Dimensiones de la ventana de rebose

Para dimensionar el ancho de la ventana de rebose se estableció que la altura del vertedero que se formará en la ventana de rebose en caso sea necesario evacuar la totalidad de flujo no deberá exceder de 0.85 metros.

Para determinar el ancho de la ventana de rebose se utilizó la Ec. 2.74.

$$Q = 3600 \cdot K \cdot (b - 0.2 \cdot h_v) \cdot h_v^{1.5}$$

Donde:

- Flujo de evacuación del rebose ( $Q$ ) : 8645 m<sup>3</sup>/h
- Coef. de descarga por vertedero ( $K$ ) : 1.84
- Altura de vertedero en la ventana ( $h_v$ ) : 0.85 m

Obteniendo como resultado:

- Ancho de la ventana de rebose ( $b$ ) : 1.85 m

Para el diseño del cajón se consideró que el ancho del rebose será igual al ancho de la cámara de distribución.

#### 4.4.6 Verificación de dimensiones del cajón CJ-02

El cálculo del volumen efectivo del cajón se realizó de acuerdo a las dimensiones estimadas anteriormente:

- Ancho del cajón : 4.6 m
- Largo de la cámara de recepción : 4.4 m
- Largo de la cámara de distribución : 1.85 m
- Profundidad del cajón : 1.62 m

Dando como resultado que el volumen efectivo del cajón CJ-02 es de 46.58 m<sup>3</sup> lo cual es muy inferior al volumen mínimo requerido de 144 m<sup>3</sup>.

Para poder cumplir con el requisito del volumen mínimo se determinó la profundidad mínima del cajón para alcanzar los 144 m<sup>3</sup> de volumen efectivo, esto se consigue con una profundidad mínima de 5 metros.

#### 4.5 Resumen de resultados cajón CJ-02

A continuación se muestran las especificaciones finales obtenidas para el cajón CJ-02:

- Ancho del cajón : 4.6 m
- Largo de la cámara de recepción : 4.4 m
- Largo de la cámara de distribución : 1.85 m
- Profundidad mínima del cajón : 5 m
- Volumen efectivo : 144 m<sup>3</sup>

- Tiempo de retención : 60 s

De igual manera se listan las características del relave a la salida del cajón:

- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Concentración de sólidos en peso ( $C_p$ ) : 42 %
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 21.15%
- Densidad de la mezcla ( $\rho_m$ ) : 1360 kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad dinámica ( $\mu_m$ ) : 0.00521 Pa · s
- Tensión de fluencia ( $\tau_f$ ) : 2.06 Pa
- Flujo másico (toneladas secas) : 4936 t/h
- Flujo volumétrico ( $Q_m$ ) : 8645 m<sup>3</sup>/h

## 5. Selección de la primera etapa de ciclones

### 5.1 Presión de alimentación preliminar

La presión requerida por un ciclón para una correcta clasificación depende del fabricante y el modelo del mismo, en este caso se seleccionará ciclones de la marca FLSmidth Krebs. En el gráfico a continuación se muestran los rangos de flujo y presión de alimentación que manejan cada uno de sus modelos:

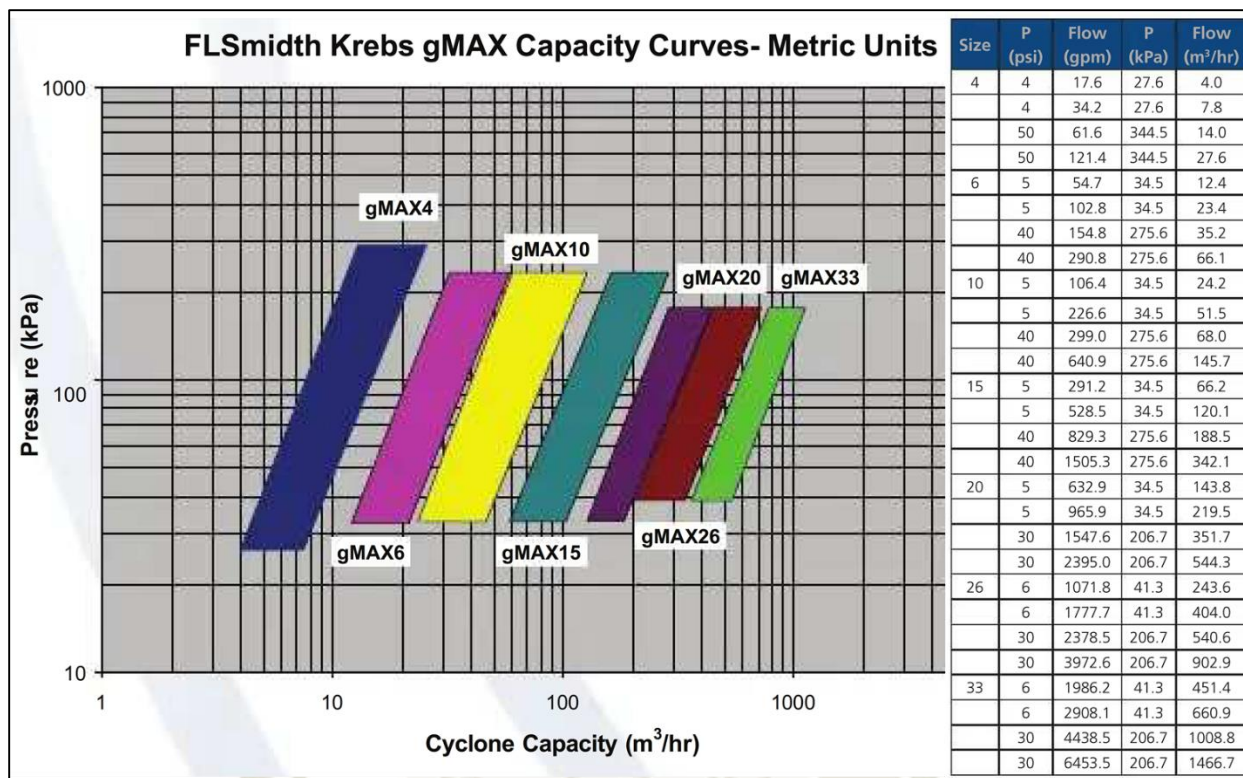


Figura 58: Curvas de capacidad de ciclones Krebs.

Como se puede observar los rangos de presión para todos los modelos oscilan entre 40 y 200 kPa mientras que sus capacidades por ciclón varían dependiendo de su diámetro. Con el objetivo de que el ciclón seleccionado trabaje a una capacidad entre 50% y 80% se estableció que la presión de entrada en el ciclón puede oscilar entre 80 y 160 kPa.

## 5.2 Selección del diámetro adecuado para el ciclón

### 5.2.1 Cálculo del D50c requerido

De acuerdo a los requerimientos del proceso el overflow de la primera etapa de ciclones debe poseer un tamaño de partícula d80 máximo de 43 µm.

El D50c requerido o real se calculó de acuerdo a la Ec. 2.83

$$D50_c(real) = fm \cdot dp$$

Donde:

- Factor multiplicador para d80 (*fm*) : 1.25 de la Tabla 9
- Tamaño de partícula requerido (*dp*) : 43 µm

Obteniendo como resultado:

- D50 requerido : 54  $\mu\text{m}$

### 5.2.2 Cálculo de factores de corrección

El cálculo del factor de corrección por concentración  $C_1$  se realizó de acuerdo a la Ec. 2.79

$$C_1 = \left( \frac{53 - C_v}{53} \right)^{-1.43}$$

Donde:

- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 21.15%

Obteniendo como resultado:

- Factor de corrección  $C_1$  : 2.07

El factor de corrección por caída de presión  $C_2$  se calculó considerando una caída de presión mínima de 80kPa y máxima de 160 kPa como se mencionó anteriormente. De acuerdo a la Ec. 2.80

$$C_2 = 3.27 \cdot \Delta P^{-0.28}$$

Donde:

- Presión mínima en el ciclón ( $\Delta P$ ) : 80 kPa
- Presión máxima en el ciclón ( $\Delta P$ ) : 160 kPa

Obteniendo como resultado:

- Factor de corrección de presión  $C_2$  : 0.96 (presión mínima)
- Factor de corrección de presión  $C_2$  : 0.79 (presión máxima)

Finalmente, El cálculo del factor de corrección por densidad  $C_3$  se realizó de acuerdo a la Ec. 2.81

$$C_3 = \left( \frac{1.65}{S_s - S_L} \right)^{0.5}$$

Donde:

- Densidad relativa de sólidos ( $S_s$ ) : 2.7
- Densidad relativa del líquido ( $S_L$ ) : 1.0

Obteniendo como resultado:

- Factor de corrección por densidad  $C_3$  : 0.99

### 5.2.3 Cálculo del D50c base

Habiendo obtenido los factores  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  podemos calcular el D50c teórico o base a partir de la Ec. 2.82

$$D50_c(real) = D50_c(base) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$$

Donde:

- D50c requerido : 54  $\mu\text{m}$
- Factor de corrección ( $C_1$ ) : 2.07
- Factor de corrección ( $C_2$ ) -  $\Delta P_{max}$  : 0.96
- Factor de corrección ( $C_2$ ) -  $\Delta P_{min}$  : 0.79
- Factor de corrección ( $C_3$ ) : 0.99

Obteniendo como resultados:

- D50c base para presión mínima : 28  $\mu\text{m}$
- D50c base para presión máxima : 34  $\mu\text{m}$

### 5.2.4 Cálculo del diámetro óptimo

Después de determinar el D50c base máximo y mínimo se calcularon los diámetros más adecuados para el ciclón de acuerdo a la Ec. 2.78

$$D50_c(base) = 2.84 \cdot D^{0.66}$$

Donde:

- D50c base presión mínima : 28  $\mu\text{m}$
- D50c base presión máxima : 34  $\mu\text{m}$

Obteniendo como resultado:

- Diámetro para presión mínima : 32 cm (13 pulg)
- Diámetro para presión máxima : 43 cm (17 pulg)

El diámetro promedio es de 15 pulgadas. De acuerdo a la curva del fabricante podemos observar que el modelo más adecuado para ambos escenarios es el gMAX 15 (15 pulg de diámetro).

### 5.3 Presión mínima de alimentación

Para determinar la presión mínima de alimentación al ciclón se realizó el procedimiento inverso. Volviendo a la Ec. 2.78.

$$D50_c(base) = 2.84 \cdot D^{0.66}$$

Donde:

- Diámetro del ciclón ( $D$ ) : 38 cm (15 pulg)

Obteniendo como resultado:

- D50c base nominal : 31  $\mu$ m

Con el D50c base nominal se determinó el factor de corrección por caída de presión utilizando la Ec. 2.82.

$$D50_c(real) = D50_c(base) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$$

Donde:

- D50c requerido : 54  $\mu$ m
- Factor de corrección ( $C_1$ ) : 2.07
- Factor de corrección ( $C_3$ ) : 0.99
- D50c base final : 31  $\mu$ m

Obteniendo como resultado:

- Factor de corrección  $C_2$  nominal : 0.85

Finalmente, despejando la presión de ingreso de la Ec. 2.80.

$$C_2 = 3.27 \cdot \Delta P^{-0.28}$$

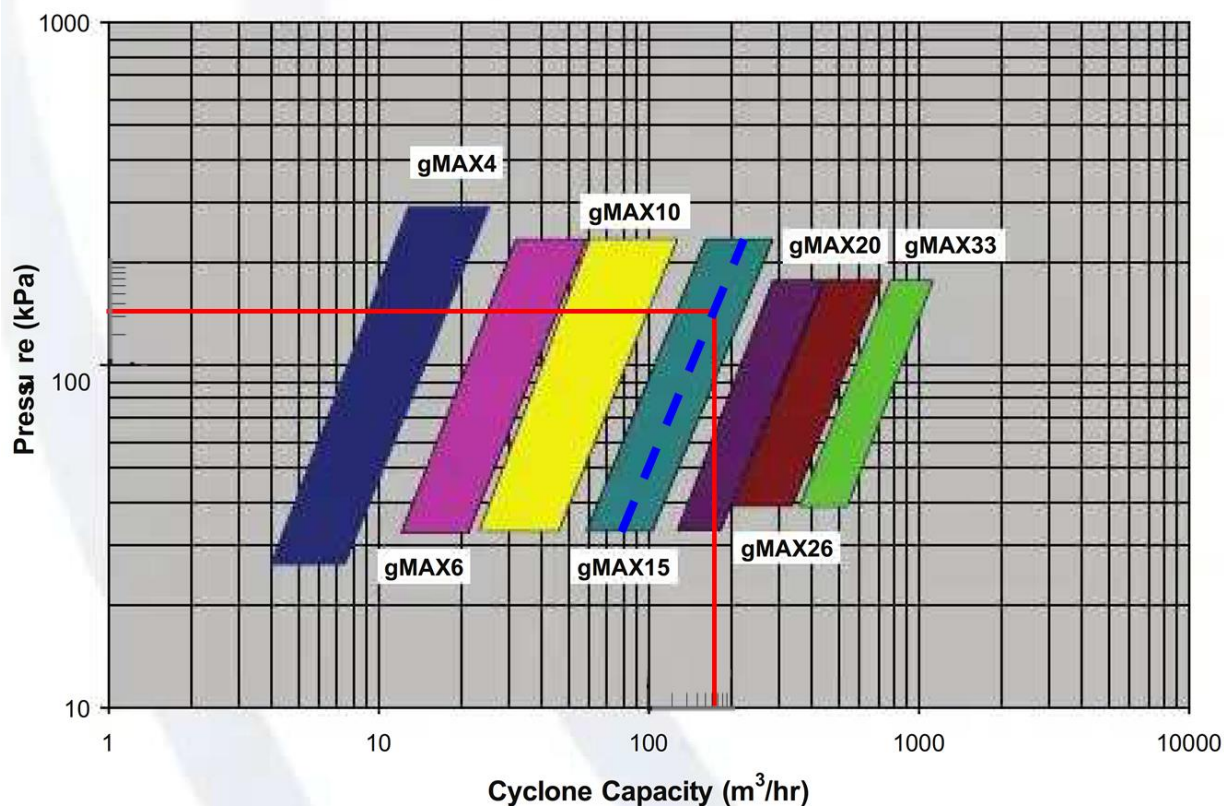
Se obtuvo como resultado una presión de ingreso de 123 kPa. Esta será la presión mínima que se debe garantizar al ingreso del ciclón.

#### 5.4 Cantidad requerida de ciclones y disposición

Para poder determinar la cantidad de ciclones a emplear necesitamos establecer la capacidad que tendrá cada ciclón, para ello se utilizó la curva de operación provista por el fabricante con los siguientes parámetros de entrada:

- Diámetro del ciclón : 15 pulg
- Presión de ingreso : 18 psi (123 kPa)

### FLSmidth Krebs gMAX Capacity Curves- Metric Units



**Figura 59:** Selección de modelo de ciclón para la primera etapa de clasificación.

Obteniendo una capacidad de 160 m<sup>3</sup>/h por ciclón. Finalmente la cantidad de ciclones se obtiene dividiendo el flujo total (8645 m<sup>3</sup>/h) por la capacidad por ciclón, lo cual resulta en un total de 54 ciclones operativos.

Por recomendación a esta cantidad se le agregó el 20% de ciclones en stand-by para facilidades de mantenimiento, por lo tanto la cantidad total de ciclones a instalar será de 64 ciclones de los cuales 54 estarán operativos y 10 en stand-by.

Debido a la cantidad obtenida de ciclones requeridos para la primera etapa de clasificación se decidió utilizar dos nidos de ciclones con 32 ciclones cada uno.

## 5.5 Análisis granulométrico del underflow y overflow

### 5.5.1 Granulometría de alimentación

Luego de determinar el modelo de ciclón a utilizar y sus características principales se realizó el análisis de las características granulométricas que se obtendrán en el underflow y overflow. Para

esto se tabuló la curva granulométrica de los relaves totales de alimentación a ciclones. Los datos se obtuvieron de la curva granulométrica presentada en la Figura 58.

Tabla 15: Granulometría de los relaves totales de alimentación a la 1ra Etapa de Clasificación

Tamaño (µm)	Pasante Acumulado (%)	Pasante Independiente (%)
2000	100.00%	0.00%
1874	100.00%	0.00%
1408	100.00%	0.02%
1184	99.98%	0.05%
995.5	99.93%	0.09%
837.1	99.84%	0.14%
703.9	99.70%	0.20%
591.9	99.50%	0.33%
497.8	99.17%	0.45%
418.8	98.72%	0.75%
352	97.97%	1.24%
298	96.73%	1.94%
248.9	94.79%	2.72%
209.3	92.07%	3.28%
178	88.79%	3.38%
148	85.41%	3.32%
124.4	82.09%	3.11%
104.8	78.98%	3.08%
87.99	75.90%	3.13%
73.99	72.77%	3.32%
62.22	69.45%	3%
52.32	65.98%	3.47%
44	62.51%	3.31%
37	59.20%	1.10%

Tabla 15: Granulometría de los relaves totales de alimentación a la 1ra Etapa de Clasificación

Tamaño (µm)	Pasante Acumulado (%)	Pasante Independiente (%)
31.11	58.10%	4.97%
28.18	53.13%	2.94%
22	50.19%	3.00%
18.5	47.19%	3.10%
15.55	44.09%	3.25%
13.08	40.84%	3.42%
11	37.42%	3.60%
9.25	33.82%	3.72%
7.78	30.10%	1.58%
6.54	28.52%	5.69%
5.5	22.83%	3.48%
4.82	19.35%	3.20%
3.89	16.15%	2.90%
3.27	13.25%	2.37%
2.75	10.88%	2.41%
2.31	8.47%	1.83%
1.94	6.64%	1.50%
1.64	5.14%	1.19%
1.38	3.95%	0.96%
1.18	2.99%	0.77%
0.97	2.22%	0.41%
0.82	1.81%	0.66%
0.69	1.15%	0.35%
0.58	0.80%	0.23%
0.49	0.57%	0.15%
0.41	0.42%	0.09%

Tabla 15: Granulometría de los relaves totales de alimentación a la 1ra Etapa de Clasificación

Tamaño (µm)	Pasante Acumulado (%)	Pasante Independiente (%)
0.34	0.33%	0.05%
0.29	0.28%	0.04%
0.24	0.24%	0.06%
0.2	0.18%	0.18%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 15 se muestran los porcentajes acumulados e independientes para cada tamaño de partícula.

### 5.5.2 Flujo másico por tamaño de partícula

En base a los porcentajes independientes de cada partícula se determinó el flujo másico que aporta cada una, para esto se multiplicaron el flujo másico total (4936 t/h) por el porcentaje independiente de cada tamaño de partícula. Los resultados se muestran en la siguiente Tabla.

Tabla 16: Flujo másico independiente por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Pasante Independiente (%)	Flujo másico (t/h)
2000	0.00%	0.00
1874	0.00%	0.00
1408	0.02%	0.99
1184	0.05%	2.47
995.5	0.09%	4.44
837.1	0.14%	6.91
703.9	0.20%	9.87
591.9	0.33%	16.29
497.8	0.45%	22.21
418.8	0.75%	37.02
352	1.24%	61.21

Tabla 16: Flujo másico independiente por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Pasante Independiente (%)	Flujo másico (t/h)
298	1.94%	95.76
248.9	2.72%	134.26
209.3	3.28%	161.90
178	3.38%	166.84
148	3.32%	163.88
124.4	3.11%	153.51
104.8	3.08%	152.03
87.99	3.13%	154.50
73.99	3.32%	163.88
62.22	3%	171.28
52.32	3.47%	171.28
44	3.31%	163.38
37	1.10%	54.30
31.11	4.97%	245.32
28.18	2.94%	145.12
22	3.00%	148.08
18.5	3.10%	153.02
15.55	3.25%	160.42
13.08	3.42%	168.81
11	3.60%	177.70
9.25	3.72%	183.62
7.78	1.58%	77.99
6.54	5.69%	280.86
5.5	3.48%	171.77
4.82	3.20%	157.95
3.89	2.90%	143.14

Tabla 16: Flujo másico independiente por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Pasante Independiente (%)	Flujo másico (t/h)
3.27	2.37%	116.98
2.75	2.41%	118.96
2.31	1.83%	90.33
1.94	1.50%	74.04
1.64	1.19%	58.74
1.38	0.96%	47.39
1.18	0.77%	38.01
0.97	0.41%	20.24
0.82	0.66%	32.58
0.69	0.35%	17.28
0.58	0.23%	11.35
0.49	0.15%	7.40
0.41	0.09%	4.44
0.34	0.05%	2.47
0.29	0.04%	1.97
0.24	0.06%	2.96
0.2	0.18%	8.88
<b>TOTAL</b>		<b>4936</b>

Notas. Fuente: Elaboración propia

### 5.5.3 Recuperación hacia el underflow

Luego de obtener el flujo másico de cada tamaño de partícula se determinó el porcentaje de recuperación hacia el underflow utilizando las Ec. 2.76 y 2.77.

$$R'_r = \frac{e^{4x} - 1}{e^{4x} + e^4 - 2}$$

$$R_r = R'_r + R_{agua}(1 - R'_r)$$

Donde:

- D50c requerido : 54  $\mu\text{m}$
- Recuperación de agua en el UF : 20 %

Los resultados obtenidos para cada tamaño de partícula se muestran a continuación:

Tabla 17: Distribución de flujo másico al UF y OF por tamaño de partícula.

Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Flujo másico (t/h)	Recuperación al UF (%)	Flujo másico UF (t/h)	Flujo másico OF (t/h)
2000	0.00	100.00%	0.00	0.00
1874	0.00	100.00%	0.00	0.00
1408	0.99	100.00%	0.99	0.00
1184	2.47	100.00%	2.47	0.00
995.5	4.44	100.00%	4.44	0.00
837.1	6.91	100.00%	6.91	0.00
703.9	9.87	100.00%	9.87	0.00
591.9	16.29	100.00%	16.29	0.00
497.8	22.21	100.00%	22.21	0.00
418.8	37.02	100.00%	37.02	0.00
352	61.21	100.00%	61.21	0.00
298	95.76	100.00%	95.76	0.00
248.9	134.26	100.00%	134.26	0.00
209.3	161.90	100.00%	161.90	0.00
178	166.84	99.99%	166.82	0.01
148	163.88	99.93%	163.75	0.12
124.4	153.51	99.58%	152.86	0.65
104.8	152.03	98.22%	149.32	2.71
87.99	154.50	94.12%	145.42	9.08
73.99	163.88	85.35%	139.86	24.01
62.22	171.28	71.97%	123.27	48.01
52.32	171.28	57.47%	98.43	72.85
44	163.38	45.47%	74.28	89.10

Tabla 17: Distribución de flujo másico al UF y OF por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Flujo másico (t/h)	Recuperación al UF (%)	Flujo másico UF (t/h)	Flujo másico OF (t/h)
37	54.30	37.03%	20.11	34.19
31.11	245.32	31.52%	77.33	167.99
28.18	145.12	29.32%	42.54	102.58
22	148.08	25.69%	38.04	110.04
18.5	153.02	24.16%	36.96	116.05
15.55	160.42	23.10%	37.06	123.36
13.08	168.81	22.37%	37.76	131.05
11	177.70	21.84%	38.80	138.89
9.25	183.62	21.44%	39.37	144.25
7.78	77.99	21.15%	16.49	61.50
6.54	280.86	20.92%	58.75	222.10
5.5	171.77	20.74%	35.63	136.14
4.82	157.95	20.64%	32.59	125.36
3.89	143.14	20.50%	29.34	113.81
3.27	116.98	20.41%	23.87	93.11
2.75	118.96	20.34%	24.19	94.77
2.31	90.33	20.28%	18.32	72.01
1.94	74.04	20.23%	14.98	59.06
1.64	58.74	20.19%	11.86	46.88
1.38	47.39	20.16%	9.55	37.83
1.18	38.01	20.14%	7.65	30.35
0.97	20.24	20.11%	4.07	16.17
0.82	32.58	20.09%	6.55	26.03
0.69	17.28	20.08%	3.47	13.81
0.58	11.35	20.07%	2.28	9.07
0.49	7.40	20.06%	1.48	5.92

Tabla 17: Distribución de flujo másico al UF y OF por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Flujo másico (t/h)	Recuperación al UF (%)	Flujo másico UF (t/h)	Flujo másico OF (t/h)
0.41	4.44	20.05%	0.89	3.55
0.34	2.47	20.04%	0.49	1.97
0.29	1.97	20.03%	0.40	1.58
0.24	2.96	20.03%	0.59	2.37
0.2	8.88	20.02%	1.78	7.11
<b>TOTAL</b>	<b>4936</b>	<b>-</b>	<b>2440.55</b>	<b>2495.45</b>

Notas. Fuente: Elaboración propia.

#### 5.5.4 Granulometría underflow y overflow

Luego de obtener la distribución de los flujos másicos para cada tamaño de partícula se obtuvieron los porcentajes independientes para cada tamaño de partícula dividiendo el flujo másico de cada tamaño por el flujo másico de recuperación total.

Tabla 18: Porcentajes independientes para el UF y OF por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Flujo másico UF (t/h)	Porcentaje independiente UF (%)	Flujo másico OF (t/h)	Porcentaje independiente OF (%)
2000	0.00	0.00%	0.00	0.00%
1874	0.00	0.00%	0.00	0.00%
1408	0.99	0.04%	0.00	0.00%
1184	2.47	0.10%	0.00	0.00%
995.5	4.44	0.18%	0.00	0.00%
837.1	6.91	0.28%	0.00	0.00%
703.9	9.87	0.40%	0.00	0.00%
591.9	16.29	0.67%	0.00	0.00%
497.8	22.21	0.91%	0.00	0.00%
418.8	37.02	1.52%	0.00	0.00%
352	61.21	2.51%	0.00	0.00%
298	95.76	3.92%	0.00	0.00%

Tabla 18: Porcentajes independientes para el UF y OF por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Flujo másico UF (t/h)	Porcentaje independiente UF (%)	Flujo másico OF (t/h)	Porcentaje independiente OF (%)
248.9	134.26	5.50%	0.00	0.00%
209.3	161.90	6.63%	0.00	0.00%
178	166.82	6.84%	0.01	0.00%
148	163.75	6.71%	0.12	0.00%
124.4	152.86	6.26%	0.65	0.03%
104.8	149.32	6.12%	2.71	0.11%
87.99	145.42	5.96%	9.08	0.36%
73.99	139.86	5.73%	24.01	0.96%
62.22	123.27	5.05%	48.01	1.92%
52.32	98.43	4.03%	72.85	2.92%
44	74.28	3.04%	89.10	3.57%
37	20.11	0.82%	34.19	1.37%
31.11	77.33	3.17%	167.99	6.73%
28.18	42.54	1.74%	102.58	4.11%
22	38.04	1.56%	110.04	4.41%
18.5	36.96	1.51%	116.05	4.65%
15.55	37.06	1.52%	123.36	4.94%
13.08	37.76	1.55%	131.05	5.25%
11	38.80	1.59%	138.89	5.57%
9.25	39.37	1.61%	144.25	5.78%
7.78	16.49	0.68%	61.50	2.46%
6.54	58.75	2.41%	222.10	8.90%
5.5	35.63	1.46%	136.14	5.46%
4.82	32.59	1.34%	125.36	5.02%
3.89	29.34	1.20%	113.81	4.56%
3.27	23.87	0.98%	93.11	3.73%

Tabla 18: Porcentajes independientes para el UF y OF por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Flujo másico UF (t/h)	Porcentaje independiente UF (%)	Flujo másico OF (t/h)	Porcentaje independiente OF (%)
2.75	24.19	0.99%	94.77	3.80%
2.31	18.32	0.75%	72.01	2.89%
1.94	14.98	0.61%	59.06	2.37%
1.64	11.86	0.49%	46.88	1.88%
1.38	9.55	0.39%	37.83	1.52%
1.18	7.65	0.31%	30.35	1.22%
0.97	4.07	0.17%	16.17	0.65%
0.82	6.55	0.27%	26.03	1.04%
0.69	3.47	0.14%	13.81	0.55%
0.58	2.28	0.09%	9.07	0.36%
0.49	1.48	0.06%	5.92	0.24%
0.41	0.89	0.04%	3.55	0.14%
0.34	0.49	0.02%	1.97	0.08%
0.29	0.40	0.02%	1.58	0.06%
0.24	0.59	0.02%	2.37	0.09%
0.2	1.78	0.07%	7.11	0.28%
<b>TOTAL</b>	<b>2440.55</b>	<b>100%</b>	<b>2495.45</b>	<b>100%</b>

Notas. Fuente: Elaboración propia.

Luego de obtener los porcentajes independientes para cada tamaño en el underflow y el overflow se tabularon los porcentajes acumulados en el underflow y overflow.

Tabla 19: Porcentajes acumulados para el UF y OF por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Porcentaje independiente UF (%)	Porcentaje acumulado UF (%)	Porcentaje independiente OF (%)	Porcentaje acumulado OF (%)
2000	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%
1874	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%

Tabla 19: Porcentajes acumulados para el UF y OF por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Porcentaje independiente UF (%)	Porcentaje acumulado UF (%)	Porcentaje independiente OF (%)	Porcentaje acumulado OF (%)
1408	0.04%	100.00%	0.00%	100.00%
1184	0.10%	99.96%	0.00%	100.00%
995.5	0.18%	99.86%	0.00%	100.00%
837.1	0.28%	99.68%	0.00%	100.00%
703.9	0.40%	99.39%	0.00%	100.00%
591.9	0.67%	98.99%	0.00%	100.00%
497.8	0.91%	98.32%	0.00%	100.00%
418.8	1.52%	97.41%	0.00%	100.00%
352	2.51%	95.89%	0.00%	100.00%
298	3.92%	93.39%	0.00%	100.00%
248.9	5.50%	89.46%	0.00%	100.00%
209.3	6.63%	83.96%	0.00%	100.00%
178	6.84%	77.33%	0.00%	100.00%
148	6.71%	70.49%	0.00%	100.00%
124.4	6.26%	63.78%	0.03%	99.99%
104.8	6.12%	57.52%	0.11%	99.97%
87.99	5.96%	51.40%	0.36%	99.86%
73.99	5.73%	45.44%	0.96%	99.50%
62.22	5.05%	39.71%	1.92%	98.53%
52.32	4.03%	34.66%	2.92%	96.61%
44	3.04%	30.63%	3.57%	93.69%
37	0.82%	27.58%	1.37%	90.12%
31.11	3.17%	26.76%	6.73%	88.75%
28.18	1.74%	23.59%	4.11%	82.02%
22	1.56%	21.85%	4.41%	77.91%
18.5	1.51%	20.29%	4.65%	73.50%

Tabla 19: Porcentajes acumulados para el UF y OF por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Porcentaje independiente UF (%)	Porcentaje acumulado UF (%)	Porcentaje independiente OF (%)	Porcentaje acumulado OF (%)
15.55	1.52%	18.78%	4.94%	68.85%
13.08	1.55%	17.26%	5.25%	63.90%
11	1.59%	15.71%	5.57%	58.65%
9.25	1.61%	14.12%	5.78%	53.09%
7.78	0.68%	12.51%	2.46%	47.31%
6.54	2.41%	11.83%	8.90%	44.84%
5.5	1.46%	9.42%	5.46%	35.94%
4.82	1.34%	7.96%	5.02%	30.49%
3.89	1.20%	6.63%	4.56%	25.46%
3.27	0.98%	5.43%	3.73%	20.90%
2.75	0.99%	4.45%	3.80%	17.17%
2.31	0.75%	3.46%	2.89%	13.37%
1.94	0.61%	2.71%	2.37%	10.49%
1.64	0.49%	2.09%	1.88%	8.12%
1.38	0.39%	1.61%	1.52%	6.24%
1.18	0.31%	1.22%	1.22%	4.73%
0.97	0.17%	0.90%	0.65%	3.51%
0.82	0.27%	0.73%	1.04%	2.86%
0.69	0.14%	0.47%	0.55%	1.82%
0.58	0.09%	0.32%	0.36%	1.27%
0.49	0.06%	0.23%	0.24%	0.90%
0.41	0.04%	0.17%	0.14%	0.66%
0.34	0.02%	0.13%	0.08%	0.52%
0.29	0.02%	0.11%	0.06%	0.44%
0.24	0.02%	0.10%	0.09%	0.38%

Tabla 19: Porcentajes acumulados para el UF y OF por tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Porcentaje independiente UF (%)	Porcentaje acumulado UF (%)	Porcentaje independiente OF (%)	Porcentaje acumulado OF (%)
0.2	0.07%	0.07%	0.28%	0.28%

Notas. Fuente: Elaboración propia.

### 5.5.5 Curvas granulométricas underflow y overflow

A continuación se muestran las curvas granulométricas obtenidas en el underflow y overflow para la primera etapa de clasificación.

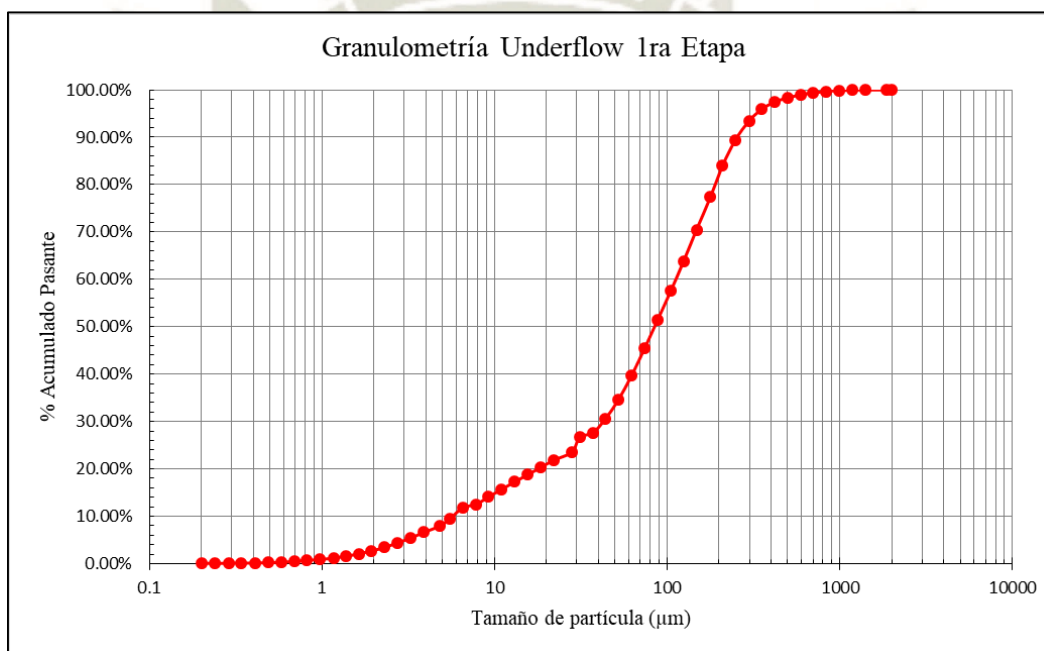
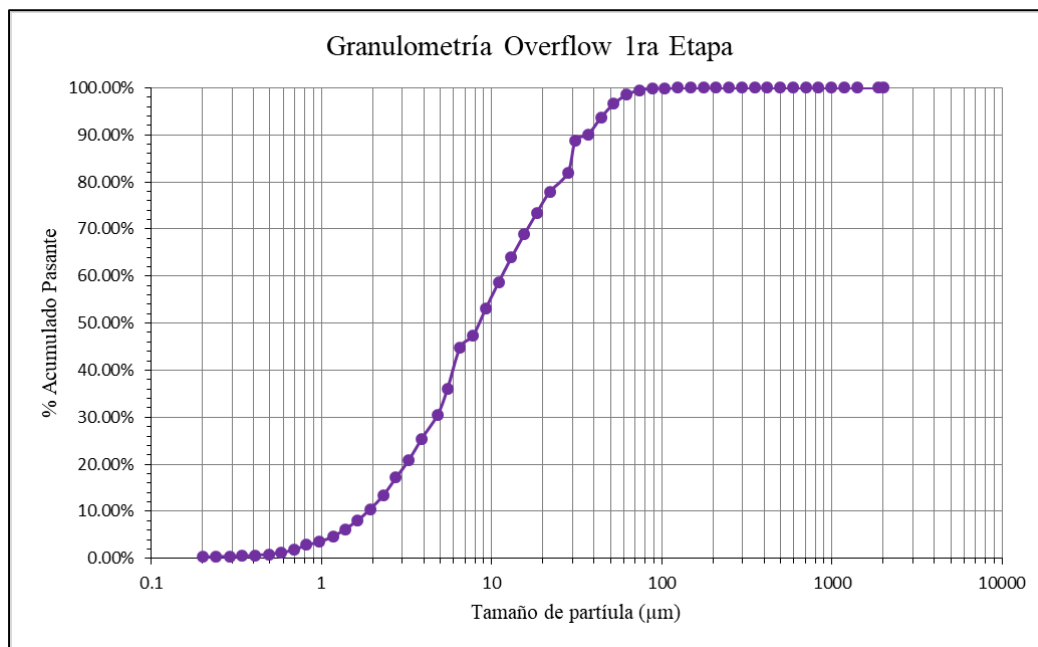


Figura 60: Granulometría del underflow - Primera etapa de clasificación.



**Figura 61:** Granulometría del overflow - Primera etapa de clasificación.

### 5.6 Flujo y características reológicas

Después de haber determinado la distribución másica y granulométrica en el underflow y overflow se pueden determinar las características reológicas del relave después de la primera etapa de clasificación. A continuación se muestra un cuadro resumen de los resultados.

Tabla 20: Características reológicas para la 1ra Etapa de clasificación.

Descripción	Alimentación	Overflow	Underflow
Flujo másico sólidos secos	4936 t/h	2495.45 t/h	2440.55 t/h
Porcentaje de recuperación	N/A	51%	49%
Flujo volumétrico de agua	6816 m3/h	5453 m3/h	1363 m3/h
Recuperación de agua	N/A	80%	20%
Flujo volumétrico de pulpa	8645 m3/h	6368 m3/h	2277 m3/h
Concentración en peso	42 %	31 %	64 %
Concentración en volumen	21 %	15%	40 %
Densidad de la pulpa	1360 kg/m3	1247 kg/m3	1678 kg/m3
Tamaño de partículas d50	22 µm	8.5 µm	85 µm

Tamaño de partículas d80

111  $\mu\text{m}$

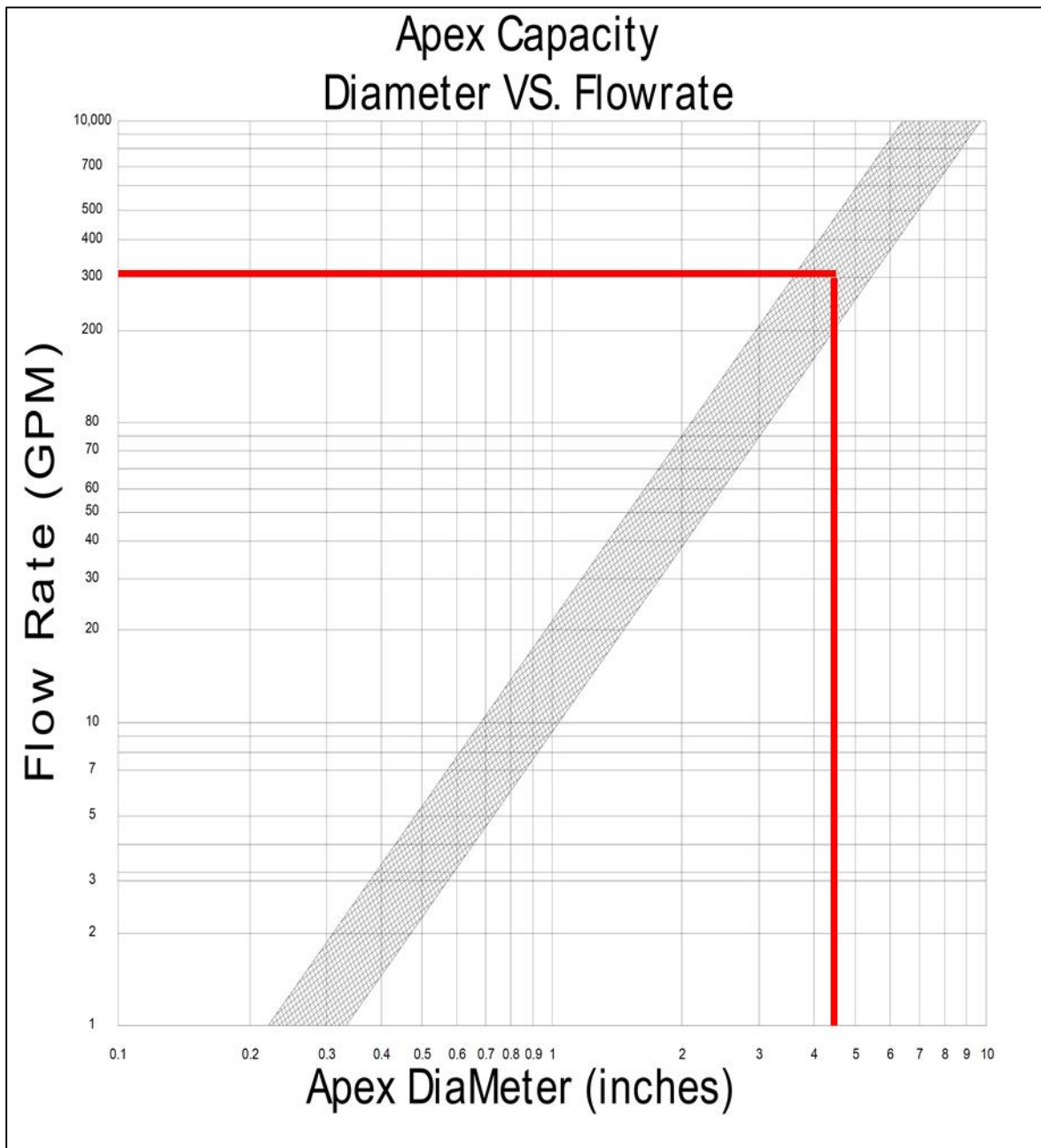
25  $\mu\text{m}$

190  $\mu\text{m}$

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 5.7 Selección del diámetro de ápex

Por último determinaremos el diámetro del ápex de acuerdo al gráfico de selección.



**Figura 62:** Selección de diámetro de Apex [13].

De acuerdo a la gráfica el diámetro de ápex más adecuado para un flujo volumétrico en el underflow de  $71 \text{ m}^3/\text{h}$  (313 GPM) está entre 4 y 5 pulg. En este caso utilizaremos un diámetro de 5 pulg.

### 5.8 Especificaciones técnicas de los ciclones de la primera etapa

A continuación se muestra un resumen de las especificaciones para los ciclones de la primera etapa de clasificación:

Tabla 21: Especificaciones técnicas para la 1ra Etapa de clasificación

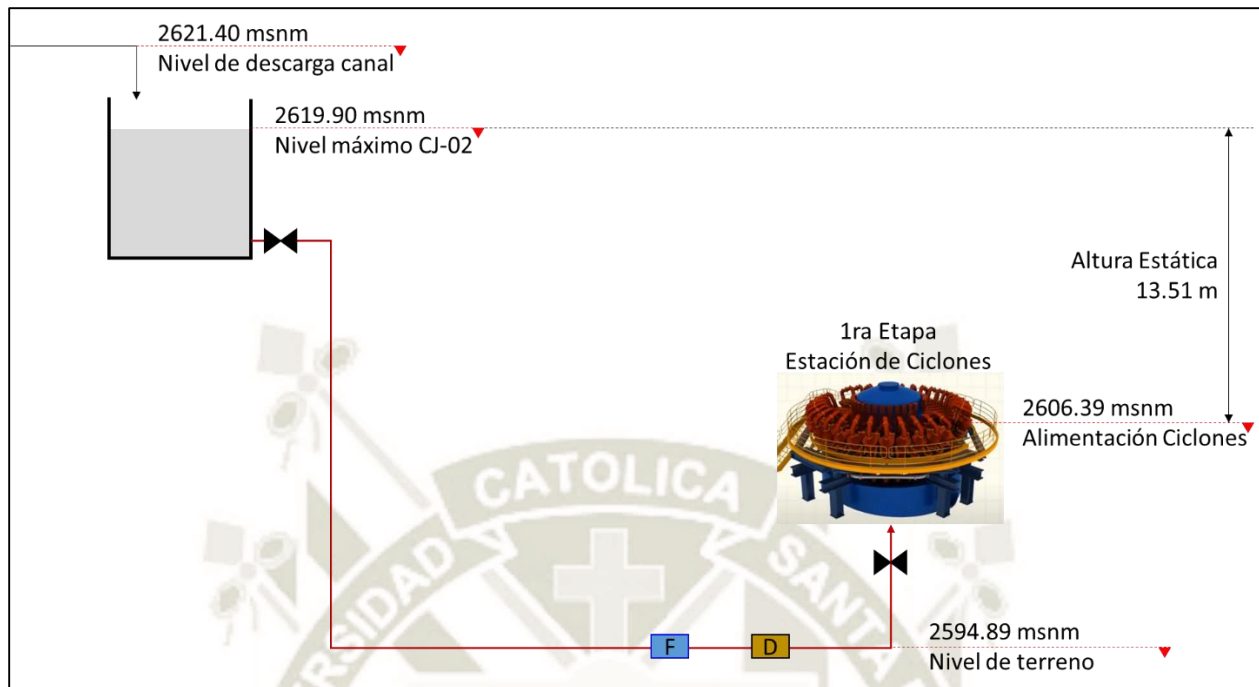
Descripción	Nido 01	Nido 02
Marca / Modelo	Krebs / gMAX 15	Krebs / gMAX 15
Diámetro	15 pulg	15 pulg
Capacidad	160 m <sup>3</sup> /h	160 m <sup>3</sup> /h
Presión mínima en alimentación	123 kPa	123 kPa
Cantidad total	32	32
Cantidad en operación	27	27
Cantidad en Stand-by	5	5
Diámetro de Apex	5 pulg	5 pulg

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 6. Diseño de la línea de transporte desde el CJ-02 a la primera etapa de ciclones

La línea que alimentará de relaves a la primera etapa de ciclones aprovechará la diferencia de niveles existente entre la descarga del cajón CJ-02 y los ciclones de la primera etapa para enviar los relaves por gravedad.

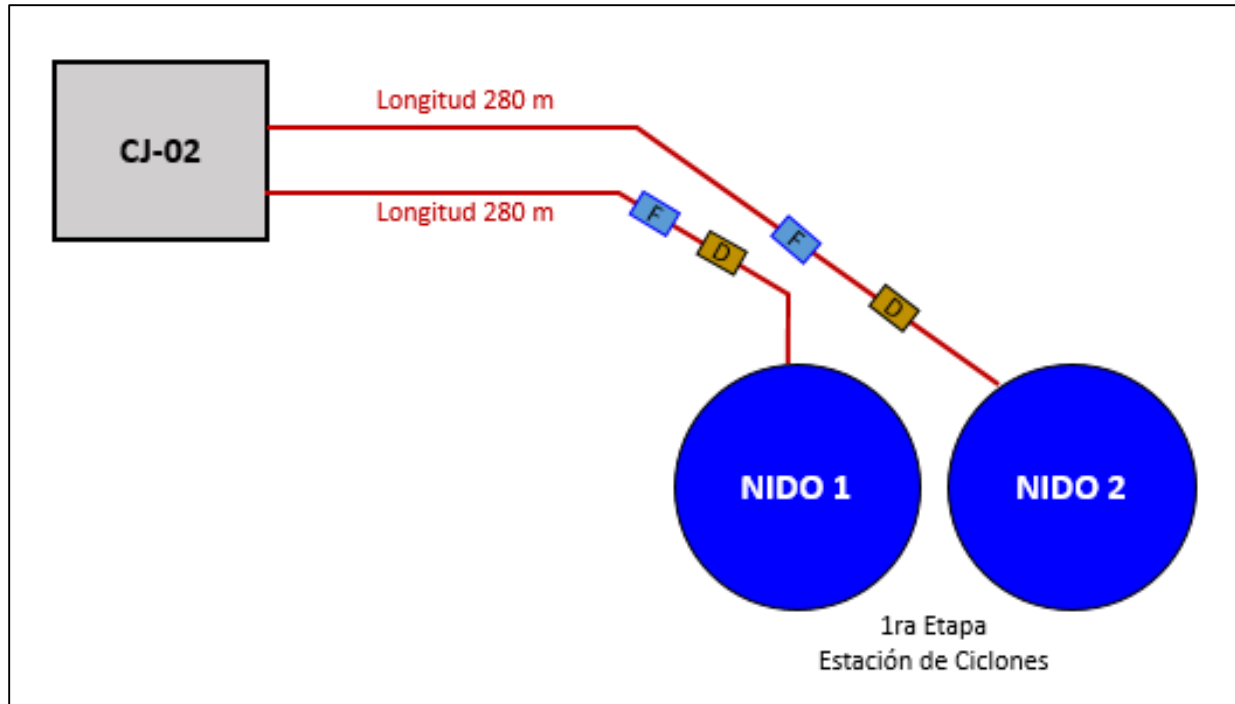
El esquema de transporte con niveles se muestra a continuación:



**Figura 63:** Esquema de transporte de relaves desde CJ-02 hacia la primera etapa de clasificación.

El nivel de pulpa en el CJ-02 será 2619.90 msnm, mientras que el nivel de ingreso a cada ciclón será 2606.39 msnm existiendo una altura estática de 13.51 m.c.p.

Como se determinó anteriormente, el sistema de clasificación operará con dos nidos de ciclones los cuales estarán ubicados al mismo nivel. Cada nido contará con una tubería de alimentación independiente, ambas líneas de tubería tendrán un recorrido similar y una longitud aproximada de 280 metros como se ve en la vista de planta a continuación:



**Figura 64:** Vista de planta - Esquema de transporte de relaves hacia la 1ra etapa de clasificación.

### 6.1 Selección del material de tubería

En este caso la tubería debe ser rígida ya que deberá contar con cambios de dirección. Por estos motivos se descarta el uso de tuberías de HDPE puesto que estas no poseen la rigidez necesaria y un cambio de dirección demasiado brusco en ellas podría ocasionar el estrangulamiento de la línea. Se seleccionaron preliminarmente tuberías de acero electro soldadas (ERW) API 5L grado A25 de clase STD (espesor de pared 9.53 mm) con revestimiento interno de 12 mm de caucho para reducir el desgaste. El espesor del revestimiento de caucho se calculó estimando una tasa de desgaste de 0.37 mm/año [7]. Este valor fue obtenido en base a ratios de desgaste presentados por Abulnaga para pulpas provenientes de plantas concentradoras de cobre. En base a esta tasa de desgaste se puede asegurar un tiempo de vida de las tuberías de 30 años.

Luego de determinar la presión de operación y el diámetro adecuado se realizará la verificación del material y el espesor de la tubería.

## 6.2 Diámetros tentativos de tubería

El flujo total proveniente del cajón CJ-02 es de 8645 m<sup>3</sup>/h y será enviado a través de dos líneas que alimentarán al primer y segundo nido de ciclones respectivamente, por lo tanto el flujo de diseño para cada línea será de: 4322.5 m<sup>3</sup>/h.

Inicialmente se plantearon tres alternativas de diámetro para ambas líneas, las cuales se determinaron buscando una velocidad de flujo entre 2.5 y 3.5 m/s.

Las alternativas planteadas y sus velocidades de flujo se muestran a continuación:

Tabla 22: Alternativas de diámetro para la línea desde el CJ-02 a la 1ra Etapa de clasificación.

Nº Alternativa	Diámetro nominal	Diámetro interior	Espesor revestimiento	Diámetro interior final	Velocidad
Alternativa 1	28 pulg	692 mm	12 mm	668 mm	3.43 m/s
Alternativa 2	30 pulg	743 mm	12 mm	719 mm	2.96 m/s
Alternativa 3	32 pulg	794 mm	12 mm	770 mm	2.58 m/s

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

## 6.3 Verificación de la velocidad de deposición

Posteriormente se realizó la verificación de la velocidad de deposición para cada alternativa utilizando el método Wasp. A continuación se muestra el procedimiento de cálculo para la Alternativa 1.

De acuerdo a las Ec. 2.30 y 2.31

$$v_D = \left[ F'_L \sqrt{2 \cdot g \cdot D_i (S_s - 1)} \right] \cdot \left[ \frac{d_{50}}{D_i} \right]^{1/6}$$

$$F'_L = 3.322 \cdot C_v^{0.21}$$

Donde:

- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 21.15 %
- Diámetro interior de la tubería ( $D_i$ ) : 0.668 m
- Densidad relativa de sólidos ( $S_s$ ) : 2.7
- Tamaño de partícula ( $d_{50}$ ) : 0.000022 m (22 μm)

Obteniendo como resultado:

- Velocidad de deposición ( $v_D$ ) : 2.03 m/s

En el siguiente cuadro se muestran las velocidades de deposición obtenidas para cada alternativa comparada con la velocidad de flujo.

Tabla 23: Velocidades de deposición para cada alternativa.

Nro Alternativa	Velocidad de flujo	Velocidad de deposición	Relación V/Vd
Alternativa 1	3.43 m/s	2.03 m/s	1.69
Alternativa 2	2.96 m/s	2.08 m/s	1.42
Alternativa 3	2.58 m/s	2.12 m/s	1.21

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse las tres alternativas tienen una velocidad de flujo superior a su velocidad de deposición.

## 6.4 Pérdidas primarias en la línea

Las pérdidas primarias en la línea dependen directamente del gradiente hidráulico, debido a esto evaluó primero el método más adecuado para calcular el gradiente hidráulico, para ello se realizaron dos tipos de análisis: el primero considerando flujo homogéneo y el segundo considerando flujo heterogéneo para cada alternativa. Luego de este análisis se compararon ambas condiciones y se consideró la más crítica.

### 6.4.1 Gradiente hidráulico para flujo homogéneo

A continuación, se muestra el procedimiento de cálculo empleado para determinar el gradiente hidráulico de la Alternativa 1.

#### Número de plasticidad y número de Reynolds

Como primer paso se calculó el número de Reynolds y el número de plasticidad de acuerdo a las Ec. 2.52 y 2.53

$$Re = \frac{\rho_m \cdot V \cdot D}{\mu_m}$$

$$P_L = \frac{\tau_f \cdot D}{\mu_m \cdot V}$$

Donde:

- Densidad de la pulpa ( $\rho_m$ ) : 1360 kg/m<sup>3</sup>
- Velocidad de flujo ( $V$ ) : 3.43 m/s
- Diámetro interior ( $D$ ) : 0.668 m
- Viscosidad dinámica ( $\mu_m$ ) : 0.00521 Pa · s
- Tensión de fluencia ( $\tau_f$ ) : 2.06 Pa

Obteniendo como resultados:

- Número de Reynolds ( $Re$ ) : 597 157
- Número de plasticidad ( $P_L$ ) : 77.15

### Número de Hedstrom

Posteriormente se calculó el número de Hedstrom de acuerdo a la Ec. 2.54

$$He = Re \cdot P_L$$

Donde:

- Número de Reynolds ( $Re$ ) : 597 157
- Número de plasticidad ( $P_L$ ) : 77.15

Obteniendo como resultado:

- Número de Hedstrom ( $He$ ) : 46 070 575

### Factor de fricción para tubería lisa

Después de haber obtenido el número de Hedstrom se calculó la componente laminar del factor de fricción de Fanning para tubería lisa de acuerdo a la Ec. 2.56

$$f_{NL} = \frac{16}{Re} \left[ 1 + \frac{He}{6 \cdot Re} - \frac{He^4}{3 \cdot f_{NL}^3 \cdot Re^7} \right]$$

Donde:

- Número de Reynolds ( $Re$ ) : 597 157
- Número de Hedstrom ( $He$ ) : 46 070 575

Obteniendo como resultado:

- Factor de fricción laminar ( $f_{NL}$ ) : 0.000201

Posteriormente se calculó la componente turbulenta del factor de fricción de Fanning de acuerdo a la Ec. 2.57

$$f_{NT} = 10^a \cdot Re^b$$

Donde:

- $a = -1.47[1 + 0.146 \cdot \exp(-2.9 \cdot 10^{-5} \cdot He)]$
- $b = -0.193$
- Número de Reynolds ( $Re$ ) : 597 157
- Número de Hedstrom ( $He$ ) : 46 070 575

Obteniendo como resultado:

- Factor de fricción turbulento ( $f_{NT}$ ) : 0.0026

Luego de haber determinado los componentes laminar y turbulento para el factor de fricción se procedió a calcular el factor de fricción de Fanning para tubería lisa de acuerdo a la Ec. 2.55

$$f_{N(liso)} = (f_{NL}^m + f_{NT}^m)^{1/m}$$

Donde:

- Factor de fricción turbulento ( $f_{NT}$ ) : 0.0026
- Factor de fricción laminar ( $f_{NL}$ ) : 0.000201
- $m = 1.7 + 40000/Re$

Obteniendo como resultado:

- Factor de fricción tubería lisa ( $f_{NT}$ ) : 0.00262

### Factor de corrección para tubería rugosa

Para poder adicionar los efectos de rugosidad de la tubería se calculó el factor de fricción para un flujo de agua equivalente utilizando la ecuación de Colebrook considerando tubería lisa (rugosidad igual a cero) y considerando la rugosidad de la tubería (0.2 mm para caucho).

El número de Reynolds para un flujo equivalente de agua se calculó utilizando la Ec. 2.52

$$Re = \frac{\rho_L \cdot V \cdot D}{\mu_L}$$

Donde:

- Densidad del agua ( $\rho_L$ ) : 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Velocidad de flujo ( $V$ ) : 3.43 m/s
- Diámetro interior ( $D$ ) : 0.668 m
- Viscosidad dinámica ( $\mu_L$ ) : 0.001 Pa · s

Obteniendo como resultado:

- Número de Reynolds agua ( $Re$ ) : 2 288 450

Utilizando la ecuación de Colebrook de acuerdo a la Ec. 2.51

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log \frac{k}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_D}}$$

Donde:

- Rugosidad relativa tubería lisa ( $k$ ) : 0
- Rugosidad relativa caucho ( $k$ ) : 0.2 / 668
- Número de Reynolds ( $Re$ ) : 2 288 450

Obteniendo como resultados:

- Factor de fricción tubo liso ( $f_D$ ) agua : 0.0101
- Factor de fricción rugoso ( $f_D$ ) agua : 0.0153

Finalmente, el factor de corrección por rugosidad se determinó de acuerdo a la Ec. 2.58

$$F_C = \frac{f_{rugoso}}{f_{liso}}$$

Donde:

- Factor de fricción rugoso para agua : 0.0153
- Factor de fricción liso para agua : 0.0101

Obteniendo como resultado:

- Factor de corrección por rugosidad ( $F_C$ ) : 1.5

### Factor de fricción corregido

El cálculo del factor de fricción real se realizó de acuerdo a la Ec. 2.59

$$f_D = 4 \cdot f_{N(liso)} \cdot F_C$$

Donde:

- Factor de fricción liso ( $f_{N(liso)}$ ) : 0.00262
- Factor de corrección por rugosidad ( $F_C$ ) : 1.5

Obteniendo como resultado:

- Factor de fricción de Darcy ( $f_D$ ) : 0.0158

### Gradiente hidráulico

Para calcular el gradiente hidráulico para flujo homogéneo se utilizó la Ec. 2.48

$$i = \frac{f_D \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

Donde:

- Factor de fricción real ( $f_D$ ) : 0.0158
- Velocidad de flujo ( $V$ ) : 3.43 m/s
- Diámetro interior ( $D$ ) : 0.668 m

Obteniendo como resultado:

- Gradiente hidráulico alternativa 1 : 0.014 mcp/m

### Resumen de resultados

En el siguiente cuadro se muestran los gradientes hidráulicos obtenidos para cada alternativa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo descrito para la alternativa 1.

Tabla 24: Gradientes hidráulicos para flujo homogéneo.

Nº Alternativa	Factor de fricción $f_D$	Gradiente hidráulico (mcp/m)
Alternativa 1	0.0158	0.014
Alternativa 2	0.0157	0.010
Alternativa 3	0.0156	0.007

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 6.4.2 Gradiente hidráulico para flujo heterogéneo

El análisis de flujo heterogéneo se realizó de acuerdo al método desarrollado por Wasp. A continuación, se muestra el procedimiento de cálculo empleado para determinar el gradiente hidráulico para flujo heterogéneo de la Alternativa 1.

#### Grupos de partícula

Para realizar este análisis se dividió la granulometría de los relaves provenientes del CJ-02 en tres grupos. Los grupos de tamaños fueron basados en los tamices de la malla Tyler presentados en la Tabla 1.

Tabla 25: Grupos de partícula para cálculo de pérdidas por flujo heterogéneo de relaves totales.

Malla Tyler	Tamaño promedio	% Pasante
Menor a 100	0.149 mm	14.59 %
De 100 a 200	0.112 mm	12.64 %
Mayor a 200	0.074 mm	72.77 %
	TOTAL	100%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

#### Cálculo de coeficientes de arrastre

Luego de haber formado los grupos de partícula se calculó la velocidad terminal para cada grupo de partículas considerando las propiedades del agua como fase vehículo utilizando la Ec. 2.10

$$V_t = \frac{g(\rho_p - \rho_l)d_p^2}{18\mu_l}$$

Donde:

- Densidad de sólidos ( $\rho_p$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Diámetro de partícula 1 ( $d_p$ ) : 149  $\mu$ m
- Diámetro de partícula 2 ( $d_p$ ) : 122  $\mu$ m
- Diámetro de partícula 3 ( $d_p$ ) : 74  $\mu$ m
- Densidad la fase vehículo ( $\rho_l$ ) : 1000 kg/m<sup>3</sup>

- Viscosidad fase vehículo ( $\mu_l$ ) : 0.001 Pa · s

Obteniendo como resultados:

- Velocidad terminal diámetro 1 : 0.0206 m/s
- Velocidad terminal diámetro 2 : 0.0116 m/s
- Velocidad terminal diámetro 3 : 0.0051 m/s

Luego de haber obtenido la velocidad terminal se calcularon los coeficientes de arrastre para cada grupo de partículas utilizando la Ec. 2.11

$$C_D = \frac{4 \cdot g(\rho_p - \rho_l)d_p}{3 \cdot \rho_l \cdot V_t^2}$$

Donde:

- Densidad de partícula ( $\rho_p$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Diámetro de partícula 1 ( $d_p$ ) : 149  $\mu$ m
- Diámetro de partícula 2 ( $d_p$ ) : 122  $\mu$ m
- Diámetro de partícula 3 ( $d_p$ ) : 74  $\mu$ m
- Densidad la fase vehículo ( $\rho_l$ ) : 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Velocidad terminal para diámetro 1 : 0.0206 m/s
- Velocidad terminal para diámetro 2 : 0.0116 m/s
- Velocidad terminal para diámetro 3 : 0.0051 m/s

Obteniendo como resultados:

- Coeficiente de arrastre para diámetro 1 : 7.83
- Coeficiente de arrastre para diámetro 2 : 18.44
- Coeficiente de arrastre para diámetro 3 : 63.92

A continuación se muestra un cuadro resumen de los resultados obtenidos para velocidad terminal y coeficiente de arrastre para cada grupo de partículas:

Tabla 26: Velocidad terminal y coeficiente de arrastre por grupo de partículas.

Tamaño promedio	Velocidad Terminal	Coeficiente de Arrastre
0.149 mm	0.0206 m/s	7.83
0.112 mm	0.0116 m/s	18.44

0.074 mm

0.0051 m/s

63.92

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### Primera iteración

La primera iteración del método Wasp consiste en analizar el flujo como si el cien por ciento de las partículas se encontraran en fase vehículo esto ocasionaría que la pulpa tenga un comportamiento similar a la de un fluido Newtoniano.

El número de Reynolds es el mismo al calculado para la condición de flujo homogéneo, es decir:

- Número de Reynolds ( $Re$ ) : 597 157

En base a estos datos se calcularon los factores de fricción de Darcy y Fanning de acuerdo a las Ec. 2.51 y 2.50

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log \frac{k}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_D}}$$

$$f_D = 4 \cdot f_N$$

Donde:

- Rugosidad relativa caucho ( $k$ ) : 0.2 mm / 668 mm
- Diámetro interior de tubería ( $D$ ) : 0.668 m
- Número de Reynolds ( $Re$ ) : 597 157

Obteniendo como resultados:

- Factor de fricción de Darcy ( $f_D$ ) : 0.0161
- Factor de fricción de Fanning ( $f_N$ ) : 0.00402

Posteriormente se calculó la velocidad de fricción para la primera iteración utilizando la Ec. 2.49.

$$u^* = V \sqrt{\frac{f_N}{2}}$$

Donde:

- Velocidad de flujo ( $V$ ) : 3.43 m/s
- Factor de fricción de Fanning ( $f_N$ ) : 0.00398

Obteniendo como resultado:

- Velocidad de fricción ( $u^*$ ) : 0.1536 m/s

Finalmente, se calculó el gradiente hidráulico para la primera iteración de acuerdo a la Ec. 2.48

$$i = \frac{f_D \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

Donde:

- Factor de fricción de Darcy ( $f_D$ ) : 0.0159
- Velocidad de flujo ( $V$ ) : 3.43 m/s
- Diámetro interior ( $D$ ) : 0.668 m

Obteniendo como resultado:

- Gradiente hidráulico (1ra iteración) : 0.0144 mcp/m (0.0196 mca/m).

### Segunda iteración

Como primer paso para la segunda iteración se determinó la concentración en volumen independiente para cada grupo de partículas. Esto se consiguió multiplicando la concentración en volumen de la pulpa (21 %) por el porcentaje pasante de cada grupo de partículas:

Tabla 27: Concentración en volumen por grupo de partícula.

Tamaño promedio	% Pasante	Concentración en volumen total
0.149 mm	14.59 %	3.06 %
0.112 mm	12.64 %	2.65 %
0.074 mm	72.77 %	15.28 %
	TOTAL	21%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber obtenido la concentración en volumen total para cada grupo de partículas se estimó la velocidad terminal para cada grupo de partículas considerando las propiedades de la pulpa como fase vehículo. De la Ec. 2.10

$$V_t = \frac{g(\rho_p - \rho_l)d_p^2}{18\mu_l}$$

Donde:

- Densidad de partícula ( $\rho_p$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>

- Diámetro de partícula ( $d_p$ ) : 149  $\mu\text{m}$ , 122  $\mu\text{m}$ , 74  $\mu\text{m}$
- Densidad fase vehículo ( $\rho_l$ ) : 1360 kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad fase vehículo ( $\mu_l$ ) : 0.00521 Pa · s

En el siguiente cuadro se muestran los resultados obtenidos para la velocidad terminal de cada grupo de partículas:

Tabla 28: Velocidad terminal por grupo de partículas – Segunda iteración.

Tamaño promedio	Velocidad terminal
0.149 mm	0.00311 m/s
0.112 mm	0.00176 m/s
0.074 mm	0.00077 m/s

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Luego de haber obtenido la concentración en volumen y la velocidad terminal para cada grupo de partículas se calculó la fracción de las partículas de cada grupo que se encuentran en fase vehículo y las partículas que se encuentran en la cama móvil utilizando las Ec. 2.60, 2.61 y 2.62.

$$\log\left(\frac{C}{C_A}\right) = -1.8 \cdot \frac{V_t}{\beta \cdot k \cdot u^*}$$

$$C_{v(vehic)} = C/C_A \cdot C_v$$

$$C_{v(cama)} = C_v - C_{v(vehic)}$$

Donde:

- Coeficiente ( $\beta$ ) : 1
- Constante de Von Karman ( $k$ ) : 0.4

En el siguiente cuadro se muestran los resultados obtenidos para las fracciones de partículas que se encuentran en fase vehículo y cama móvil:

Tabla 29: Fracciones de partículas en fase vehículo y cama móvil.

Tamaño promedio	Relación $C/C_A$	Fase vehículo	Cama móvil
0.149 mm	0.8106	2.48 %	0.58 %
0.112 mm	0.8881	2.36 %	0.30 %
0.074 mm	0.9495	14.51 %	0.77 %
	Total	19.35 %	1.65 %

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

De los resultados se deduce que la fase vehículo tendrá una concentración en volumen de 19.35% mientras que la cama móvil tendrá una concentración en volumen de 1.65%. La suma de ambas concentraciones es igual al 21% de concentración en volumen total de la pulpa.

Luego de haber estimado las concentraciones de cama móvil para cada grupo de partículas se calcularon los factores de fricción y gradiente hidráulico para la cama móvil de cada grupo de partículas utilizando la Ec. 2.63.

$$f_D = f_l \left[ K \left\{ \left( \frac{g \cdot D}{V^2} \right) \left( \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_L} \right) \frac{1}{\sqrt{C_D}} \right\}^{3/2} \cdot C_{v(cama)} \right]$$

$$i = \frac{f_D \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

Donde:

- Factor de fricción para el agua ( $f_l$ ) : 0.0153
- Constante de Wasp ( $K$ ) : 82
- Densidad de sólidos ( $\rho_S$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Densidad del agua ( $\rho_L$ ) : 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Diámetro interior de tubería ( $D$ ) : 0.668 m
- Velocidad de flujo ( $V$ ) : 3.43 m/s
- Coeficientes de arrastre : 7.83 – 18.44 – 63.92
- Concentraciones en volumen  $C_{v(cama)}$  : 0.58% - 0.3% - 0.77%

Los resultados obtenidos para el factor de fricción y el gradiente hidráulico de la cama móvil se muestran en la tabla a continuación:

Tabla 30: Factor de fricción y gradiente hidráulico – Cama móvil.

Tamaño promedio	Factor de fricción $f_D$ de la cama movil	Gradiente hidráulico (mca/m)
0.149 mm	0.00144	0.00129
0.112 mm	0.00038	0.00034
0.074 mm	0.00039	0.00035
TOTAL		0.00198

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar el gradiente hidráulico total provocado por la cama móvil es de 0.00198 mca/m

Seguidamente, se calculó la densidad para la fase vehículo utilizando la Ec. 2.17

$$\rho_m = \rho_l + (\rho_s - \rho_l) * C_v$$

Donde:

- Densidad del agua ( $\rho_l$ ) : 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 19.35 %

Obteniendo como resultado:

- Densidad de la fase vehículo : 1329 kg/m<sup>3</sup>

La viscosidad de la fase vehículo se calculó de acuerdo a la Ec. 2.24

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = \frac{1}{\left(1 - \frac{C_v}{C_{v\max}}\right)^{E * C_{v\max}}}$$

Donde

- Densidad del agua ( $\mu_l$ ) : 0.001 Pa · s
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 19.35 %
- Concentración máxima ( $C_{v\max}$ ) : 100 %
- Viscosidad intrínseca ( $E$ ) : 7

Obteniendo como resultado:

- Viscosidad de la fase vehículo : 0.00451 Pa · s.

Luego de calcular la densidad y viscosidad de la fase vehículo se procedió a calcular el número de Reynolds para la fase vehículo utilizando la Ec. 2.52

$$Re = \frac{\rho_m \cdot V \cdot D}{\mu_m}$$

Donde:

- Densidad de la fase vehículo ( $\rho_m$ ) : 1000 kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad de la fase vehículo ( $\mu_m$ ) : 0.00451 Pa · s

Obteniendo como resultado:

- Número de Reynolds : 674 278

Luego de haber obtenido el número de Reynolds de la fase vehículo se calculó el factor de fricción y el gradiente hidráulico para la fase vehículo utilizando las Ec. 2.51, 2.48.

$$\frac{1}{\sqrt{f_D}} = -2 \log \frac{k}{3.7 \cdot D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f_D}}$$

$$i = \frac{f_D \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

Donde:

- Rugosidad relativa caucho ( $k$ ) : 0.2 mm / 668 mm
- Diámetro interior de tubería (D) : 0.668 m
- Número de Reynolds ( $Re$ ) : 674 278

Obteniendo los siguientes resultados:

- Factor de fricción de Darcy ( $f_D$ ) : 0.0160
- Gradiente hidráulico ( $i$ ) : 0.01429 mcp/m (0.019 mca/m)

Finalmente, al sumar el gradiente hidráulico provocado por la cama móvil (0.00195 mca/m) y el gradiente hidráulico provocado por la fase vehículo (0.019 mca/m) se obtuvo un gradiente hidráulico total igual 0.02097 mca/m el cual difiere en más del 5% al calculado en la primera iteración, lo cual indica que es necesaria realizar una tercera iteración.

Ahora calculamos el factor de fricción de Fanning de la pulpa utilizando las Ec. 2.48 y 2.50

$$i = \frac{f_D \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

$$f_D = 4 \cdot f_N$$

Donde:

- Gradiente hidráulico total ( $i$ ) : 0.01542 mcp/m (0.02097 mca/m)
- Velocidad de flujo ( $V$ ) : 3.43 m/s
- Diámetro interior de la tubería ( $D$ ) : 0.668 m

Obteniendo los siguientes resultados:

- Factor de fricción Darcy total ( $f_D$ ) : 0.01723
- Factor de fricción Fanning total ( $f_N$ ) : 0.00430

Por último, se calculó el valor de la velocidad de fricción de la fase vehículo utilizando la Ec. 2.49.

$$u^* = V \sqrt{\frac{f_N}{2}}$$

Donde:

- Velocidad de flujo ( $V$ ) : 3.43 m/s
- Factor de fricción de Fanning ( $f_N$ ) : 0.00430

Obteniendo como resultado:

- Velocidad de fricción ( $u^*$ ) : 0.159 m/s

### Tercera iteración

Siguiendo el mismo procedimiento de cálculo que en la segunda iteración se obtuvo que la fracción de las partículas de cada grupo que se encuentran en fase vehículo y las partículas que se encuentran en la cama móvil variaron según se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 31: Fracción de partículas en fase vehículo y cama móvil.

Tamaño promedio	Relación $C/C_A$	Fase vehículo	Cama móvil
0.149 mm	0.7868	2.41 %	0.65 %
0.112 mm	0.8733	2.32 %	0.34 %
0.074 mm	0.9426	14.40 %	0.88 %

Tabla 31: Fracción de partículas en fase vehículo y cama móvil.

Tamaño promedio	Relación $C/C_A$	Fase vehículo	Cama móvil
	Total	19.13 %	1.87 %

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

De los resultados podemos deducir que la fase vehículo tendrá una concentración en volumen de 19.13% mientras que la cama móvil tendrá una concentración en volumen de 1.87%. La suma de ambas concentraciones es igual al 21% de concentración en volumen total de la pulpa.

Posteriormente se calculó el factor de fricción y el gradiente hidráulico para cada grupo de partículas obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 32: Factor de fricción y gradiente hidráulico para cama móvil.

Tamaño promedio	Factor de fricción $f_D$ de la cama móvil	Gradiente hidráulico (mca/m)
0.149 mm	0.00162	0.00145
0.112 mm	0.00044	0.00039
0.074 mm	0.00045	0.00040
	TOTAL	0.00224

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, se calcularon los valores de densidad, viscosidad y número de Reynolds de la fase vehículo para estimar el factor de fricción y el gradiente hidráulico obteniendo los siguientes resultados:

- Factor de fricción de Darcy ( $f_D$ ) : 0.0159
- Gradiente hidráulico ( $i$ ) : 0.01428 mcp/m (0.01893 mca/m)

Para finalizar la tercera iteración se sumaron los gradientes hidráulicos de la fase vehículo y la cama móvil dando como resultado un gradiente hidráulico total de 0.0212 mca/m el cual difiere del valor calculado en la segunda iteración en 1% lo cual indica que el gradiente hidráulico final para flujo heterogéneo de la Alternativa 1 es de 0.0212 mca/m.

## Resumen de resultados

En el siguiente cuadro se muestran los gradientes hidráulicos obtenidos para cada alternativa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo descrito para la alternativa 1.

Tabla 33: Gradiente hidráulico total para cada alternativa.

N° Alternativa	Factor de fricción $fD$	Gradiente hidráulico (mcp/m)	Gradiente hidráulico (mca/m)
Alternativa 1	0.0174	0.0156	0.0212
Alternativa 2	0.0189	0.0117	0.0160
Alternativa 3	0.0217	0.0095	0.0130

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Haciendo una comparación entre los resultados de flujo homogéneo vs los resultados de flujo heterogéneo se puede observar que la condición de flujo heterogéneo presenta mayores gradientes hidráulicos lo que se reflejará en mayores pérdidas primarias en el sistema. Por lo tanto se asumirá esta condición para la selección final del diámetro de tubería.

### 6.4.3 Cálculo de pérdidas primarias

Habiendo calculado el gradiente hidráulico para cada alternativa las pérdidas primarias se calcularon multiplicando el gradiente hidráulico por la longitud de la tubería. En este caso cada línea tendrá una longitud de 280 metros.

Tabla 34: Gradiente hidráulico y pérdidas primarias para cada alternativa.

N° Alternativa	Gradiente hidráulico (mcp/m)	Pérdidas primarias (mcp)
Alternativa 1	0.0156	4.37
Alternativa 2	0.0117	4.47
Alternativa 3	0.0095	3.63

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

## 6.5 Pérdidas secundarias por accesorios

Para calcular las pérdidas de carga debido a los accesorios se utilizó el método de los coeficientes de pérdida, para ello se muestran a continuación la lista de accesorios a utilizar en la línea así como sus coeficientes de pérdida.

Tabla 35: Cantidad de accesorios y coeficiente de pérdidas.

Accesorio	Cantidad	Coficiente de pérdidas por accesorio (k)
Boquilla de descarga de CJ-02	1	0.5
Codo de 45°	12	0.07
Codo de 90° 5D	1	0.13
Válvula cuchilla	2	0.03

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Para determinar las pérdidas ocasionadas por cada accesorio se utilizó la Ec. 2.65

$$H_{ps} = \sum K \cdot \left( \frac{V^2}{2 \cdot g} \right)$$

En el siguiente cuadro se muestran las pérdidas secundarias ocasionadas por los accesorios de la línea para cada alternativa.

Tabla 36: Pérdidas secundarias por alternativa.

N° Alternativa	Pérdidas secundarias mcp
Alternativa 1	1.10
Alternativa 2	0.82
Alternativa 3	0.62

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

## 6.6 Presión de descarga

Para poder determinar la presión que se tendrá en la descarga utilizaremos la adaptación de la ecuación de Bernoulli para transporte de tuberías por gravedad de acuerdo a la Ec. 2.71

$$(Z_1 - Z_2) = (P_2 - P_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + H_{pp} + H_{ps}$$

Donde:

- Diferencia de niveles ( $Z_1 - Z_2$ ) : 13.51 mcp
- Presión en el punto inicial ( $P_1$ ) : 0 mcp
- Velocidad en el punto inicial ( $V_1$ ) : 0 m/s
- Velocidad en el punto de descarga ( $V_2$ ) : Variable en m/s
- Pérdidas primarias por fricción ( $H_{pp}$ ) : Variable en mcp
- Pérdidas por accesorios ( $H_{ps}$ ) : Variable en mcp

A continuación se muestran los resultados para cada alternativa:

Tabla 37: Presión de descarga en la alimentación del ciclón.

N° Alternativa	Presión de descarga (mcp)	Presión de descarga (mca)	Presión de descarga (kPa)
Alternativa 1	7.44	10.12	99.04
Alternativa 2	8.95	12.17	119.14
Alternativa 3	9.88	13.43	131.45

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

## 6.7 Selección del diámetro final de tubería

En el cuadro a continuación se muestra el resumen de los resultados obtenidos para cada alternativa.

Tabla 38: Resumen de resultados finales para cada alternativa.

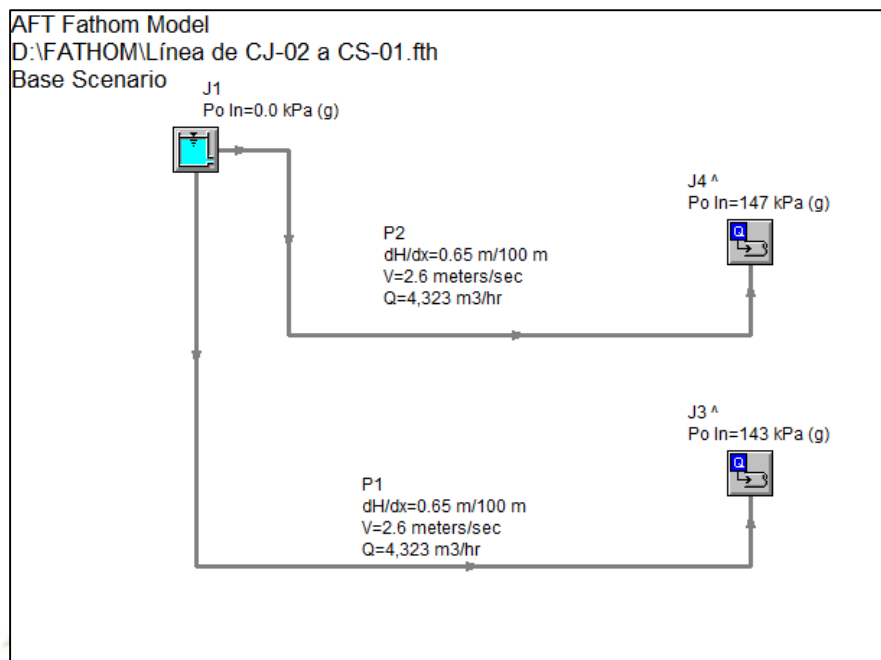
Diámetro Nominal	Velocidad de flujo	Velocidad deposición	V/VD	Presión Descarga	Mín. Presión Requerida
28	3.43	2.03	1.69	99.04	123
30	2.96	2.08	1.42	119.14	123
32	2.58	2.12	1.21	131.45	123

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Se seleccionó la alternativa 3 ya que es la única que cumple con el requisito de presión mínima de descarga garantizando que los ciclones operarán con una presión mayor a 123 kPa.

## 6.8 Uso de Software

Con la alternativa seleccionada se realizó un modelo del sistema utilizando el Software AFT Fathom Versión 7.0. A continuación se muestra el modelo y el resumen de los resultados obtenidos para la presión al ingreso del ciclón.



**Figura 65.** Modelo del sistema de la 1ra etapa en AFT Fathom.

Como se puede apreciar en los resultados la presión de ingreso en el ciclón para el flujo de diseño es de 143 KPa. Lo cual representa una diferencia de menos del 8% respecto a la presión de descarga calculada por el método Wasp.

## 6.9 Verificación del espesor de la tubería

Luego de determinar el diámetro y la presión de operación de las líneas, se verificó que el espesor y el material escogido soporten la presión máxima que se pueda presentar durante la operación.

La presión de operación de ambas líneas es de 132 kPa (1.32 bar) como se determinó anteriormente. Adicionalmente sabemos que la altura estática que tendrá la línea será de 13.5 m.c.p, multiplicando ese valor por la densidad relativa de la pulpa (1.36) obtenemos una presión estática máxima de 18.36 m.c.a. (1.80 bar). De ambos casos se escogió el peor escenario para verificar el espesor mínimo de la tubería de acuerdo a la Ec. 2.84.

$$t_n = \frac{P_i \cdot D}{20 \cdot F \cdot E \cdot S_y} + t_A$$

Donde:

- Presión de diseño de la tubería ( $P_i$ ) : 1.80 bar
- Diámetro exterior de la tubería ( $D$ ) : 813 mm
- Factor de diseño ( $F$ ) : 0.8
- Factor de soldadura ( $E$ ) : 1
- Esfuerzo de fluencia acero ( $S_y$ ) : 172 MPa (API 5L gr A25)
- Tolerancia por corrosión y erosión ( $t_A$ ) : 1.5 mm

Se obtuvo que el espesor mínimo recomendado para la tubería es de 2.5 mm el cual es inferior al espesor seleccionado de 9.53 mm. Por lo tanto la tubería escogida no presentará problemas por presión en la línea.

## 6.10 Selección de válvulas y accesorios para las tuberías de acero.

### 6.10.1 Válvulas cuchilla

A continuación se muestran las especificaciones técnicas para las válvulas cuchilla empleadas en la primera etapa de clasificación:

- Marca / Modelo : Clarkson / KGA
- Servicio : On /Off
- Tipo de conexión : Wafer
- Rating de presión : NPS 48 (50 psi)
- Manga : Caucho natural standard
- Material de la cuchilla : Acero inox 316
- Actuator : Pistón hidráulico

De manera similar al corredor principal de tuberías se consideró una unidad hidráulica por cada válvula cuchilla.

### 6.10.2 Fluómetros y densímetros

Se seleccionaron fluómetros magnéticos con visores para lectura en campo y con transmisores de señal. A continuación se muestran las especificaciones de los fluómetros seleccionados:

- Marca/Modelo : Rosemount/8732

- Flujo de operación : 4336 m<sup>3</sup>/hr
- Velocidad de operación : 2.58 m/s
- Tipo de conexión : Bridada
- Rating de presión : CL#150

Por otro lado se seleccionaron densímetros nucleares de la marca RONAN modelo X96S los cuales son de tipo no intrusivo, es decir se instalan en la parte exterior de las tuberías.

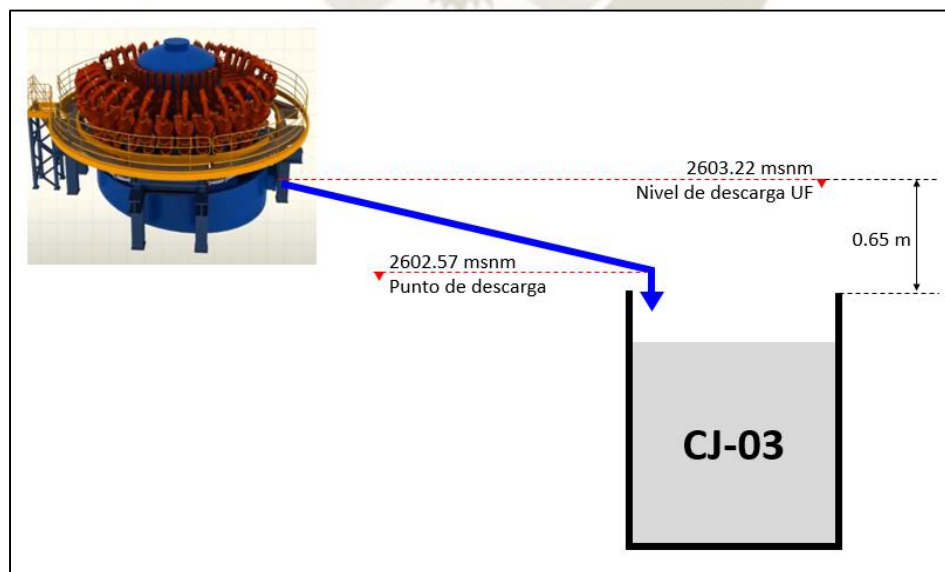
### 6.10.3 Bridas y accesorios de conexión entre tuberías

Se determinó que la unión entre spools de acero se realizará utilizando bridas de tipo Slip On AWWA C207 D.

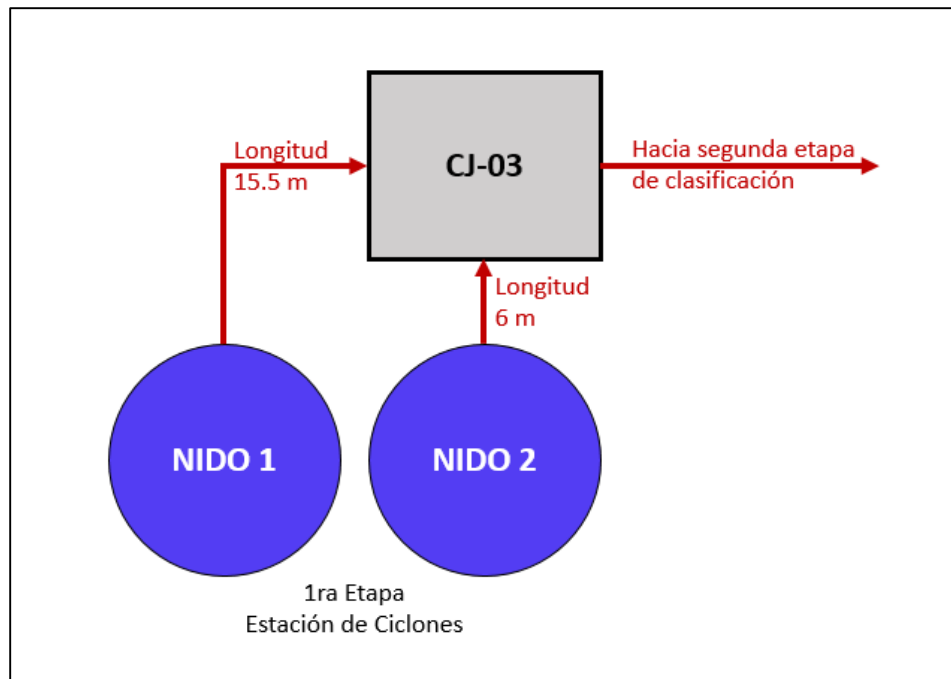
En los spools de conexión hacia los nidos de ciclones se consideraron acoples flexibles Victaulic los cuales facilitarán el montaje y desmontaje del tramo final de tuberías.

### 7. Diseño canales de descarga del UF de ciclones hacia el CJ-03

El underflow de los ciclones será enviado hacia una tina provista por el fabricante, sin embargo esta tina será sólo de contención y se necesitará seleccionar un diámetro de tubería adecuado que permita transportar el underflow desde la tina hacia el cajón distribuidor CJ-03. La descarga de la tina del underflow se encontrará en el nivel 2603.22 m.s.n.m. mientras que el punto de descarga hacia el cajón CJ-03 se encontrará en el nivel 2602.57 m.s.n.m. además la distancia a recorrer entre el nido de ciclones más alejado y el cajón será de 15.5 metros.



**Figura 66:** Esquema de descargas UF hacia CJ-03 – Elevaciones.



**Figura 67:** Esquema de descargas UF hacia CJ-03 – Vista de planta.

### 7.1 Diseño del canal de tuberías del Nido-01 hacia el CJ-03

A continuación se muestran las características del canal de descarga del Nido-01 hacia el CJ-03:

- Nivel inicial de la línea : 2603.22 msnm
- Nivel final de la línea : 2602.57 msnm
- Longitud del trazo de tubería : 15.5 m
- Pendiente : 4.2 %

#### 7.1.1 Selección del material de la tubería

En este caso la tubería debe ser rígida ya que estará suspendida en el aire por tal motivo se descarta el uso de tuberías de HDPE.

Al tratarse de un canal la tubería no tendrá presión interior, por lo tanto se seleccionará el material más liviano y comercial como son las tuberías de acero STD con revestimiento interno de 12 mm de caucho para reducir el desgaste.

### 7.1.2 Propiedades de la pulpa

A continuación se muestran las propiedades del underflow de ciclones calculadas anteriormente:

- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Concentración de sólidos ( $C_p$ ) : 64 %
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 40 %
- Densidad de la mezcla ( $\rho_S$ ) : 11678 kg/m<sup>3</sup>
- Tamaño de partícula d50 : 85  $\mu$ m
- Tamaño de partícula d80 : 190  $\mu$ m

### 7.1.3 Flujo de diseño

- Flujo másico (toneladas secas) : 1220.3 t/h
- Caudal de la pulpa ( $Q$ ) : 1139 m<sup>3</sup>/h

### 7.1.4 Selección del diámetro de tubería

Para poder identificar el diámetro más apropiado para la tubería se analizaron 3 alternativas, para las cuales se evaluaron los siguientes parámetros:

- Velocidad de deposición
- Velocidad de flujo.
- Número de Froude.
- Tirante hidráulico.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada alternativa:

Tabla 39: Resumen de resultados para canal de Nido-01 hacia el CJ-03.

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro interior (mm)	Velocidad Deposición (m/s)	Velocidad (m/s)	Relación Velocidades	Número de Froude	Tirante (%)
18	414	2.47	3.74	1.52	2.62	60%
20	465	2.57	3.76	1.47	2.82	50%
24	567	2.74	3.74	1.36	3.04	37%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Se descartó la tubería de 18 pulgadas ya que posee un tirante de 60% el cual está en el límite de lo recomendado. Las otras dos alternativas cumplen con todos los requisitos mínimos, sin embargo la tubería de 20 pulgadas representará un menor costo de materiales e instalación. Por lo tanto se seleccionó la tubería de 20 pulgadas.

## 7.2 Diseño del canal de tuberías del Nido-02 hacia el CJ-03

A continuación se muestran las características del canal de descarga del Nido-01 hacia el CJ-03:

- Nivel inicial de la línea : 2603.22 msnm
- Nivel final de la línea : 2602.57 msnm
- Longitud del trazo de tubería : 6 m
- Pendiente : 10.8 %

### 7.2.1 Selección del material de la tubería

En este caso la tubería debe ser rígida ya que estará suspendida en el aire por tal motivo se descarta el uso de tuberías de HDPE.

Al tratarse de un canal la tubería no tendrá presión interior, por lo tanto se seleccionará el material más liviano y comercial como son las tuberías de acero STD con revestimiento interno de 12 mm de caucho para reducir el desgaste.

### 7.2.2 Propiedades de la pulpa

A continuación se muestran las propiedades del underflow de ciclones calculadas anteriormente:

- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Concentración de sólidos ( $C_p$ ) : 64 %
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 40 %
- Densidad de la mezcla ( $\rho_S$ ) : 11678 kg/m<sup>3</sup>
- Tamaño de partícula d50 : 85  $\mu$ m
- Tamaño de partícula d80 : 190  $\mu$ m

### 7.2.3 Flujo de diseño

- Flujo másico (toneladas secas) : 1220.3 t/h
- Caudal de la pulpa ( $Q$ ) : 1139 m<sup>3</sup>/h

### 7.2.4 Selección del diámetro de tubería

Para poder identificar el diámetro más apropiado para la tubería se analizaron 3 alternativas, para las cuales se evaluaron los siguientes parámetros:

- Velocidad de deposición
- Velocidad de flujo.
- Número de Froude.
- Tirante hidráulico.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada alternativa:

Tabla 40: Resumen de resultados para canal de Nido-02 hacia el CJ-03.

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro interior (mm)	Velocidad Deposición (m/s)	Velocidad (m/s)	Relación Velocidades	Número de Froude	Tirante (%)
18	414	2.47	5.39	2.18	4.56	45%
20	465	2.57	5.32	2.07	4.68	38%
24	567	2.74	5.23	1.91	4.86	29%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Para este caso todas las alternativas cumplen con los requerimientos mínimos. A pesar de que la tubería de 18 pulgadas será capaz de transportar la totalidad del flujo se decidió mantener el diámetro de 20 pulgadas para esta línea con el objetivo de mantener uniformidad en ambas líneas de ingreso al cajón. Además debido a la corta longitud de la línea esta no representará una mayor adición a los costos de materiales e instalación.

### 7.3 Bridas y accesorios de conexión entre tuberías

Se determinó que la unión entre spools de acero se realizará utilizando bridas de tipo Slip On AWWA C207 D.

En los spools de conexión hacia los nidos de ciclones se consideraron acoples flexibles Victaulic los cuales facilitarán el montaje y desmontaje del tramo final de tuberías.

## 8. Diseño del cajón distribuidor CJ-03

El cajón CJ-03 recibirá los relaves provenientes del underflow de los Nidos de ciclones 01 y 02 de la primera etapa de clasificación. Este cajón contará además con un ingreso de agua que permitirá disminuir la concentración de sólidos en el relave para luego ser enviado hacia la segunda etapa de clasificación.

### 8.1 Propiedades del relave en el CJ-03

De acuerdo a los requerimientos de diseño la concentración en peso en el cajón debe bajar de 64% a 40%. Con esta nueva concentración se calcularon las propiedades que tendrá el relave a la salida del cajón.

#### 8.1.1 Concentración en volumen

De la Tabla 2 se utilizó la siguiente igualdad:

$$C_v = \frac{C_p}{1 + (1 - C_p) \cdot (S_s - 1)}$$

Donde:

- Concentración en peso ( $C_p$ ) : 40 %
- Densidad relativa de sólidos ( $S_s$ ) : 2.7

Obteniendo como resultado:

- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 19.8 %

#### 8.1.2 Densidad de la pulpa

Luego de determinada la concentración en volumen la densidad de la pulpa se calculó utilizando la Ec. 2.17

$$\rho_m = \rho_l + (\rho_s - \rho_l) * C_v$$

Donde:

- Concentración en peso ( $C_v$ ) : 19.8 %
- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Densidad del agua ( $\rho_l$ ) : 1000 kg/m<sup>3</sup>

Obteniendo como resultado:

- Densidad de la mezcla ( $\rho_m$ ) : 1337 kg/m<sup>3</sup>

### 8.1.3 Viscosidad

Para el cálculo de la viscosidad se utilizó el método K&D de acuerdo a la Ec. 2.24

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = \frac{1}{\left(1 - \frac{C_v}{C_{v \max}}\right)^{E \cdot C_{v \max}}}$$

Donde:

- Densidad del agua ( $\mu_l$ ) : 0.001 Pa · s
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 19.8 %
- Concentración máxima ( $C_{v \max}$ ) : 100 %
- Viscosidad intrínseca ( $E$ ) : 7

Obteniendo como resultado:

- Viscosidad dinámica de la pulpa ( $\mu_m$ ) : 0.00477 Pa · s.

### 8.1.4 Tensión de fluencia

Para el cálculo de la tensión de fluencia se utilizó el modelo de Thomas de acuerdo a las Ec. 2.25 y 2.26

$$\tau_f = B \cdot C_v^3 \cdot \exp\left(\frac{2.7 \cdot C_v}{1 - C_v}\right)$$

$$B = \frac{C_2}{d_{50}^{N_2}}$$

Donde:

- Factor  $C_2$  para relaves : 3379.5
- Factor  $N_2$  para relaves : 1.1211
- Tamaño de partícula ( $d_{50}$ ) : 85  $\mu$ m
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 19.8 %

Obteniendo como resultado:

- Tensión de fluencia de la pulpa ( $\tau_f$ ) : 0.35 Pa

## 8.2 Flujo volumétrico a la salida del cajón

Para calcular el flujo volumétrico de la pulpa a la salida del cajón se utilizó la Ec. 2.21

$$Q_m = \frac{\dot{m}}{S_s \cdot C_v}$$

Donde:

- Flujo másico de sólidos secos ( $\dot{m}$ ) : 2440.55 t/h
- Densidad relativa de sólidos ( $S_s$ ) : 2.7
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 19.8 %

Obteniendo como resultado:

- Flujo volumétrico de salida ( $Q_m$ ) : 4565 m<sup>3</sup>/h

## 8.3 Flujo requerido de agua para dilución

La diferencia entre el flujo de pulpa de ingreso y el flujo de pulpa de salida nos dará como resultado el flujo requerido de agua para dilución:

$$4565 - 2277 = 2288 \text{ m}^3/\text{h}$$

Esto quiere decir que debido a la inyección de agua para dilución el flujo de ingreso al cajón se incrementará en 100%. Este valor se utilizó más adelante para incrementar las dimensiones mínimas calculadas en base al ingreso de pulpa en el cajón.

## 8.4 Dimensionamiento del cajón distribuidor CJ-03

### 8.4.1 Volumen mínimo del cajón

Para calcular el volumen mínimo que debe tener el cajón distribuidor CJ-03 se tomó en consideración el tiempo mínimo de retención requerido para el cajón así como el flujo volumétrico de la pulpa. De acuerdo a la Ec. 2.75 tenemos:

$$Vol_{min} = Q_m \cdot R_t$$

Donde:

- Flujo volumétrico de descarga ( $Q_m$ ) : 1.27 m<sup>3</sup>/s
- Tiempo mínimo de retención ( $R_t$ ) : 60 s

Obteniendo como resultado:

- Volumen efectivo mínimo ( $Vol_{min}$ ) : 76.2 m<sup>3</sup>

### 8.4.2 Ancho mínimo del cajón

Para determinar el ancho mínimo del cajón se debe conocer el ancho del canal rectangular de alimentación. En este caso se contará con dos canales de alimentación circular, por lo tanto se determinó el ancho equivalente para cada canal rectangular de acuerdo a la Ec. 2.73

$$b_1 = A/Y$$

Donde:

- Área de la sección llena Canal 1 ( $A$ ) : 0.084 m<sup>2</sup>
- Altura de llenado Canal 1 ( $Y$ ) : 0.231 m
- Área de la sección llena Canal 2 ( $A$ ) : 0.060 m<sup>2</sup>
- Altura de llenado Canal 2 ( $Y$ ) : 0.177 m

Obteniendo como resultados:

- Ancho equivalente Canal 1 ( $b_1$ ) : 0.364 m (14.5 pulg)
- Ancho equivalente Canal 2 ( $b_1$ ) : 0.339 m (13.5 pulg)
- Ancho equivalente total : 0.703 m (28 pulg)

Finalmente los datos de entrada para seleccionar el ancho mínimo serán:

- Altura de caída de flujo : 0.85 m (32 pulg)
- Altura de llenado del canal promedio : 0.204 m (8 pulg)

De la Tabla 6 se obtuvo:

- Ancho adicional por lado  $b_2$  : 0.521 m (20.5 pulg)

Por lo tanto el ancho mínimo recomendado para el cajón se calcula de acuerdo a la Ec. 2.72

$$A_c = b_1 + 2 \cdot b_2$$

Donde:

- Ancho de canal rectangular ( $b_1$ ) : 0.703 m
- Ancho adicional recomendado ( $b_2$ ) : 0.521 m

Obteniendo como resultado:

- Ancho mínimo del cajón ( $A_c$ ) : 1.745 m

El ancho mínimo obtenido de la Tabla 6 no considera el flujo de ingreso de agua de dilución. Para tomar en cuenta el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución se multiplicó el ancho mínimo por el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución. Por lo tanto el ancho mínimo del cajón será:

$$1.745 \cdot (1 + 1) = 3.49 \text{ m} \approx 3.5 \text{ m}$$

### 8.4.3 Largo mínimo de la cámara de recepción

Considerando los siguientes datos de entrada:

- Velocidad de ingreso promedio : 4.54 m/s (894 pies/min)
- Altura de llenado del canal promedio : 0.204 m (8 pulg)
- Altura de caída de flujo : 0.85 m (32 pulg)

De acuerdo a la Tabla 7 por interpolación se obtuvo:

- Largo mínimo cámara de recepción : 2.72 m (107 pulg)

El largo mínimo obtenido de la Tabla 7 no considera el flujo de ingreso de agua de dilución. Para tomar en cuenta el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución se multiplicó el largo mínimo por el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución. Por lo tanto el largo mínimo del cajón será:

$$2.72 \cdot (1 + 1) = 5.44 \text{ m} \approx 5.5 \text{ m}$$

### 8.4.4 Profundidad mínima del cajón

Considerando los siguientes datos de entrada:

- Velocidad de ingreso promedio : 4.54 m/s (894 pies/min)
- Altura de llenado del canal promedio : 0.204 m (8 pulg)
- Altura de caída de flujo : 0.85 m (32 pulg)

De acuerdo a la Tabla 8 se obtuvo:

- Profundidad mínima del cajón : 0.965 m (38 pulg)

La profundidad obtenida de la Tabla 8 no considera el flujo de ingreso de agua de dilución. Para tomar en cuenta el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución se multiplicó

profundidad por el incremento de flujo ocasionado por el agua de dilución. Por lo tanto la profundidad mínima del cajón será:

$$0.965 \cdot (1 + 1) = 1.93 \text{ m}$$

#### 8.4.5 Dimensiones de la ventana de rebose

Para dimensionar el ancho de la ventana de rebose se estableció que la altura del vertedero que se formará en la ventana de rebose en caso sea necesario evacuar la totalidad de flujo no deberá exceder de 0.50 metros.

Para determinar el ancho de la ventana de rebose se utilizó la Ec. 2.74

$$Q = 3600 \cdot K \cdot (b - 0.2 \cdot h_v) \cdot h_v^{1.5}$$

Donde:

- Flujo de evacuación del rebose ( $Q$ ) : 4565 m<sup>3</sup>/h
- Coef. de descarga por vertedero ( $K$ ) : 1.84
- Altura de vertedero en la ventana ( $h_v$ ) : 0.4 m

Obteniendo como resultado:

- Ancho de la ventana de rebose ( $b$ ) : 2.8 m

Para el diseño del cajón se consideró que el ancho del rebose será igual al ancho de la cámara de distribución.

#### 8.4.6 Verificación de dimensiones del cajón

El cálculo del volumen efectivo del cajón se realizó de acuerdo a las dimensiones estimadas anteriormente:

- Ancho del cajón : 3.5 m
- Largo de la cámara de recepción : 5.5 m
- Largo de la cámara de distribución : 2.8 m
- Profundidad del cajón : 1.93 m

Dando como resultado que el volumen efectivo del cajón CJ-03 es de 56.07 m<sup>3</sup> el cual es inferior al volumen mínimo requerido de 76.2 m<sup>3</sup>.

La base del cajón distribuidor CJ-03 estará al nivel de la plataforma de la primera etapa de clasificación por lo cual la profundidad final del cajón será de 7 metros teniendo así un volumen efectivo de  $203.35 \text{ m}^3$  el cual supera el volumen mínimo requerido.

### 8.5 Resumen de resultados cajón CJ-03

A continuación se muestran las especificaciones finales definidas para el cajón CJ-03:

- Ancho del cajón : 3.5 m
- Largo de la cámara de recepción : 5.5 m
- Largo de la cámara de distribución : 2.8 m
- Profundidad del cajón : 7 m
- Volumen efectivo :  $203.35 \text{ m}^3$
- Tiempo de retención : 157 s

De igual manera se listan las características del relave a la salida del cajón:

- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) :  $2700 \text{ kg/m}^3$
- Concentración de sólidos en peso ( $C_p$ ) : 40 %
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 19.8 %
- Densidad de la mezcla ( $\rho_m$ ) :  $1337 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidad dinámica ( $\mu_m$ ) :  $0.00477 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- Tensión de fluencia ( $\tau_f$ ) : 0.35 Pa.
- Flujo másico (toneladas secas) : 2440.55 t/h
- Flujo volumétrico ( $Q_m$ ) :  $4565 \text{ m}^3/\text{h}$

## 9. Selección de la segunda etapa de ciclones

### 9.1 Presión de alimentación preliminar

De manera similar al procedimiento de selección de la primera etapa de clasificación y con el objetivo de que el ciclón seleccionado trabaje a una capacidad entre 50% y 80% se estableció que la presión de entrada en el ciclón puede oscilar entre 80 y 160 kPa.

## 9.2 Selección del diámetro adecuado para el ciclón

### 9.2.1 Cálculo del D50c requerido

De acuerdo a los requerimientos del proceso el overflow de la segunda etapa de ciclones debe poseer un tamaño de partícula  $d_{80}$  máximo de  $59 \mu\text{m}$ .

El D50c requerido o real se calculó de acuerdo a la Ec. 2.83

$$D50_c(\text{real}) = fm \cdot dp$$

Donde:

- Factor multiplicador para  $d_{80}$  ( $fm$ ) : 1.25 de la Tabla 9
- Tamaño de partícula requerido ( $dp$ ) :  $59 \mu\text{m}$

Obteniendo como resultado:

- D50 requerido :  $74 \mu\text{m}$

### 9.2.2 Cálculo de factores de corrección

El cálculo del factor de corrección por concentración  $C_1$  se realizó de acuerdo a la Ec. 2.79

$$C_1 = \left( \frac{53 - C_v}{53} \right)^{-1.43}$$

Donde:

- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 19.8%

Obteniendo como resultado:

- Factor de corrección  $C_1$  : 1.95

El factor de corrección por caída de presión  $C_2$  se calculó considerando una caída de presión mínima de  $80\text{kPa}$  y máxima de  $160 \text{kPa}$  como se mencionó anteriormente. De acuerdo a la Ec. 2.80

$$C_2 = 3.27 \cdot \Delta P^{-0.28}$$

Donde:

- Presión mínima en el ciclón ( $\Delta P$ ) :  $80 \text{kPa}$
- Presión máxima en el ciclón ( $\Delta P$ ) :  $160 \text{kPa}$

Obteniendo como resultado:

- Factor de corrección de presión  $C_2$  : 0.96 (presión mínima)
- Factor de corrección de presión  $C_2$  : 0.79 (presión máxima)

Finalmente, El cálculo del factor de corrección por densidad  $C_3$  se realizó de acuerdo a la Ec. 2.81

$$C_3 = \left( \frac{1.65}{S_S - S_L} \right)^{0.5}$$

Donde:

- Densidad relativa de sólidos ( $S_S$ ) : 2.7
- Densidad relativa del líquido ( $S_L$ ) : 1.0

Obteniendo como resultado:

- Factor de corrección por densidad  $C_3$  : 0.99

### 9.2.3 Cálculo del D50c base

Habiendo obtenido los factores  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$  podemos calcular el D50c teórico o base a partir de la Ec. 2.82

$$D50_C(\text{real}) = D50_C(\text{base}) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$$

Donde:

- D50c requerido : 74  $\mu\text{m}$
- Factor de corrección ( $C_1$ ) : 1.95
- Factor de corrección ( $C_2$ ) -  $\Delta P_{max}$  : 0.96
- Factor de corrección ( $C_2$ ) -  $\Delta P_{min}$  : 0.79
- Factor de corrección ( $C_3$ ) : 0.99

Obteniendo como resultados:

- D50c base para presión mínima : 40  $\mu\text{m}$
- D50c base para presión máxima : 49  $\mu\text{m}$

### 9.2.4 Cálculo del diámetro óptimo

Después de determinar el D50c base máximo y mínimo se calcularon los diámetros más adecuados para el ciclón de acuerdo a la Ec. 2.78

$$D50_C(\text{base}) = 2.84 \cdot D^{0.66}$$

Donde:

- D50c base presión mínima : 40  $\mu\text{m}$

- D50c base presión máxima : 49  $\mu\text{m}$

Obteniendo como resultado:

- Diámetro para presión mínima : 55 cm (22 pulg)
- Diámetro para presión máxima : 74 cm (29 pulg)

El promedio de ambos resultados es 26 pulgadas. De acuerdo a la Figura 59 podemos observar que el modelo más adecuado para ambos escenarios es el gMAX 26 (26 pulg de diámetro).

### 9.3 Presión mínima de alimentación

Para determinar la presión mínima de alimentación al ciclón se realizó el procedimiento inverso. Volviendo a la Ec. 2.78

$$D50_c(base) = 2.84 \cdot D^{0.66}$$

Donde:

- Diámetro del ciclón ( $D$ ) : 66 cm (26 pulg)

Obteniendo como resultado:

- D50c base nominal : 45  $\mu\text{m}$

Con el D50c base nominal se determinó el factor de corrección por caída de presión utilizando la Ec. 2.82

$$D50_c(real) = D50_c(base) \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$$

Donde:

- D50c requerido : 74  $\mu\text{m}$
- Factor de corrección ( $C_1$ ) : 1.95
- Factor de corrección ( $C_3$ ) : 0.99
- D50c base nominal : 45  $\mu\text{m}$

Obteniendo como resultado:

- Factor de corrección  $C_2$  nominal : 0.85

Finalmente, despejando la presión de ingreso de la Ec. 2.80

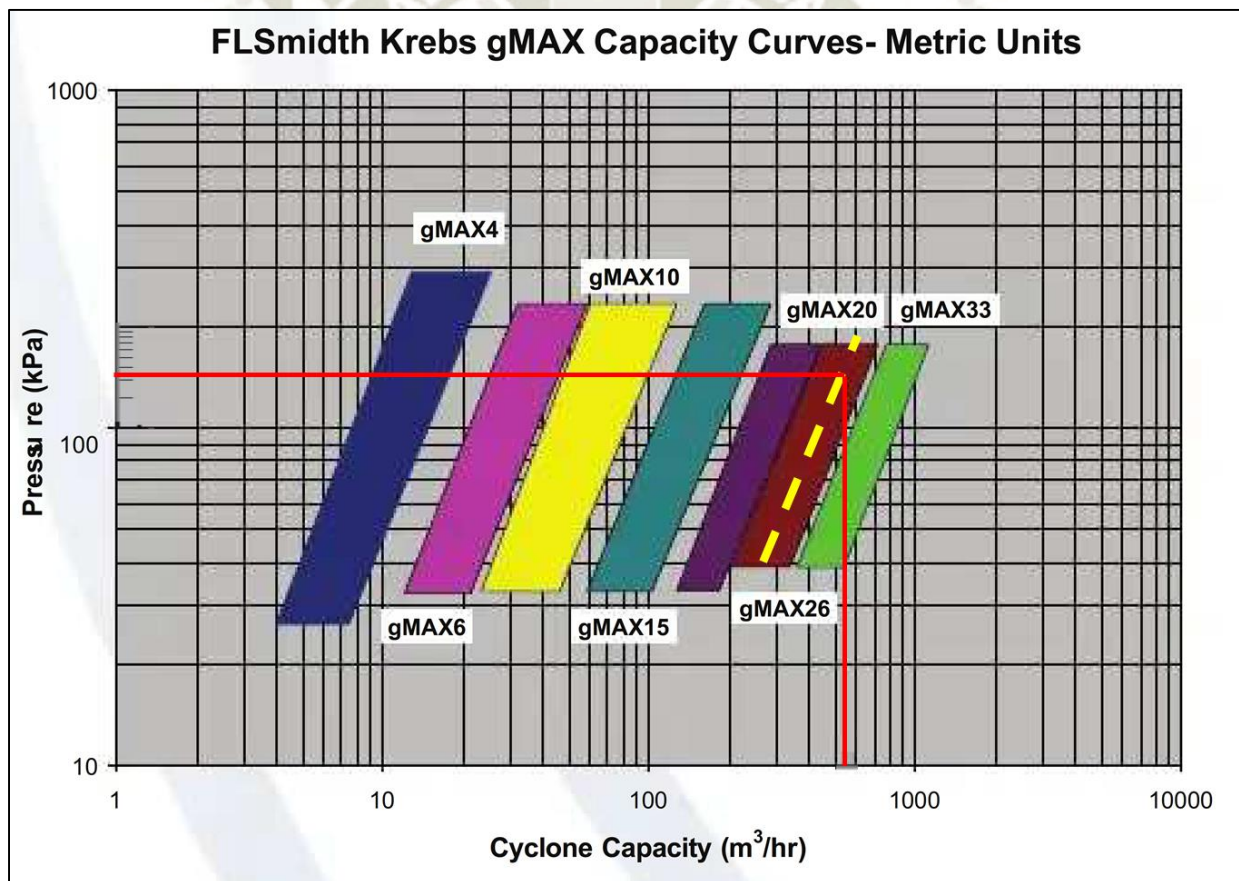
$$C_2 = 3.27 \cdot \Delta P^{-0.28}$$

Se obtuvo como resultado una presión de ingreso de 123 kPa. Esta será la presión mínima que se debe garantizar al ingreso del ciclón.

#### 9.4 Cantidad requerida de ciclones y disposición

Para poder determinar la cantidad de ciclones a emplear necesitamos establecer la capacidad que tendrá cada ciclón, para ello se utilizó la curva de operación provista por el fabricante con los siguientes parámetros de entrada:

- Diámetro del ciclón : 26 pulg
- Presión de ingreso : 18 psi (123 kPa)



**Figura 68:** Selección de modelo de ciclón – 2da Etapa de clasificación.

Obteniendo una capacidad de  $520\text{m}^3/\text{h}$  por ciclón. Finalmente la cantidad de ciclones se obtiene dividiendo el flujo total ( $8645\text{ m}^3/\text{h}$ ) por la capacidad por ciclón, lo cual resulta en un total de 17 ciclones operativos.

Por recomendación a esta cantidad se le agregó el 20% para facilidades de mantenimiento, por lo tanto la cantidad total de ciclones a instalar será de 21 ciclones de los cuales 17 estarán operativos y 4 en stand-by.

En este caso solo será necesario utilizar una batería o nido de ciclones.

## 9.5 Análisis granulométrico del underflow y overflow

### 9.5.1 Granulometría de alimentación

Luego de determinar el modelo de ciclón a utilizar y sus características principales se realizó el análisis de las características granulométricas que se obtendrán en el underflow y overflow. Para esto se utilizó la granulometría de los relaves provenientes del CJ-03 (underflow primera etapa).

Tabla 41: Granulometría UF de la 1ra Etapa de clasificación.

Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Pasante Acumulado (%)	Pasante Independiente %
2000	100.00%	0.00%
1874	100.00%	0.00%
1408	100.00%	0.04%
1184	99.96%	0.10%
995.5	99.86%	0.18%
837.1	99.68%	0.28%
703.9	99.39%	0.40%
591.9	98.99%	0.67%
497.8	98.32%	0.91%
418.8	97.41%	1.52%
352	95.89%	2.51%
298	93.39%	3.92%
248.9	89.46%	5.50%

Tabla 41: Granulometría UF de la 1ra Etapa de clasificación.

Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Pasante Acumulado (%)	Pasante Independiente %
209.3	83.96%	6.63%
178	77.33%	6.84%
148	70.49%	6.71%
124.4	63.78%	6.26%
104.8	57.52%	6.12%
87.99	51.40%	5.96%
73.99	45.44%	5.73%
62.22	39.71%	5.05%
52.32	34.66%	4.03%
44	30.63%	3.04%
37	27.58%	0.82%
31.11	26.76%	3.17%
28.18	23.59%	1.74%
22	21.85%	1.56%
18.5	20.29%	1.51%
15.55	18.78%	1.52%
13.08	17.26%	1.55%
11	15.71%	1.59%
9.25	14.12%	1.61%
7.78	12.51%	0.68%
6.54	11.83%	2.41%
5.5	9.42%	1.46%
4.82	7.96%	1.34%
3.89	6.63%	1.20%
3.27	5.43%	0.98%
2.75	4.45%	0.99%

Tabla 41: Granulometría UF de la 1ra Etapa de clasificación.

Tamaño (µm)	Pasante Acumulado (%)	Pasante Independiente %
2.31	3.46%	0.75%
1.94	2.71%	0.61%
1.64	2.09%	0.49%
1.38	1.61%	0.39%
1.18	1.22%	0.31%
0.97	0.90%	0.17%
0.82	0.73%	0.27%
0.69	0.47%	0.14%
0.58	0.32%	0.09%
0.49	0.23%	0.06%
0.41	0.17%	0.04%
0.34	0.13%	0.02%
0.29	0.11%	0.02%
0.24	0.10%	0.02%
0.2	0.07%	0.07%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 9.5.2 Flujo másico por tamaño de partícula

De los resultados obtenidos para el underflow de la primera etapa de clasificación obtenemos el flujo másico que aporta cada partícula en la alimentación de la segunda etapa de clasificación.

Tabla 42: Flujo másico por tamaño de partícula UF.

Tamaño (µm)	Pasante Independiente (%)	Flujo másico (t/h)
2000	0.00%	0.00
1874	0.00%	0.00
1408	0.04%	0.99
1184	0.10%	2.47

Tabla 42: Flujo másico por tamaño de partícula UF.

Tamaño (µm)	Pasante Independiente (%)	Flujo másico (t/h)
995.5	0.18%	4.44
837.1	0.28%	6.91
703.9	0.40%	9.87
591.9	0.67%	16.29
497.8	0.91%	22.21
418.8	1.52%	37.02
352	2.51%	61.21
298	3.92%	95.76
248.9	5.50%	134.26
209.3	6.63%	161.90
178	6.84%	166.82
148	6.71%	163.75
124.4	6.26%	152.86
104.8	6.12%	149.32
87.99	5.96%	145.42
73.99	5.73%	139.86
62.22	5.05%	123.27
52.32	4.03%	98.43
44	3.04%	74.28
37	0.82%	20.11
31.11	3.17%	77.33
28.18	1.74%	42.54
22	1.56%	38.04
18.5	1.51%	36.96
15.55	1.52%	37.06
13.08	1.55%	37.76

Tabla 42: Flujo másico por tamaño de partícula UF.

Tamaño (µm)	Pasante Independiente (%)	Flujo másico (t/h)
11	1.59%	38.80
9.25	1.61%	39.37
7.78	0.68%	16.49
6.54	2.41%	58.75
5.5	1.46%	35.63
4.82	1.34%	32.59
3.89	1.20%	29.34
3.27	0.98%	23.87
2.75	0.99%	24.19
2.31	0.75%	18.32
1.94	0.61%	14.98
1.64	0.49%	11.86
1.38	0.39%	9.55
1.18	0.31%	7.65
0.97	0.17%	4.07
0.82	0.27%	6.55
0.69	0.14%	3.47
0.58	0.09%	2.28
0.49	0.06%	1.48
0.41	0.04%	0.89
0.34	0.02%	0.49
0.29	0.02%	0.40
0.24	0.02%	0.59
0.2	0.07%	1.78
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>2440.55</b>

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 9.5.3 Recuperación hacia el underflow

Luego de obtener el flujo másico de cada tamaño de partícula se determinó el porcentaje de recuperación hacia el underflow utilizando las Ec. 2.76 y 2.77

$$R'_r = \frac{e^{4x} - 1}{e^{4x} + e^4 - 2}$$

$$R_r = R'_r + R_{agua}(1 - R'_r)$$

Donde:

- D50c requerido : 74  $\mu\text{m}$
- Recuperación de agua en el UF : 20 %

Los resultados obtenidos para cada partícula se muestran a continuación:

Tabla 43: Recuperación hacia el UF y OF de cada tamaño de partícula.

Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Flujo másico (t/h)	Recuperación al UF (%)	Flujo másico UF (t/h)	Flujo másico OF (t/h)
2000	0.00	100.00%	0.00	0.00
1874	0.00	100.00%	0.00	0.00
1408	0.99	100.00%	0.99	0.00
1184	2.47	100.00%	2.47	0.00
995.5	4.44	100.00%	4.44	0.00
837.1	6.91	100.00%	6.91	0.00
703.9	9.87	100.00%	9.87	0.00
591.9	16.29	100.00%	16.29	0.00
497.8	22.21	100.00%	22.21	0.00
418.8	37.02	100.00%	37.02	0.00
352	61.21	100.00%	61.21	0.00
298	95.76	100.00%	95.76	0.00
248.9	134.26	99.99%	134.25	0.01
209.3	161.90	99.95%	161.81	0.08
178	166.82	99.72%	166.35	0.47

Tabla 43: Recuperación hacia el UF y OF de cada tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Flujo másico (t/h)	Recuperación al UF (%)	Flujo másico UF (t/h)	Flujo másico OF (t/h)
148	163.75	98.59%	161.44	2.31
124.4	152.86	95.16%	145.45	7.41
104.8	149.32	87.43%	130.55	18.77
87.99	145.42	74.61%	108.50	36.92
73.99	139.86	59.99%	83.90	55.96
62.22	123.27	47.38%	58.40	64.87
52.32	98.43	38.31%	37.71	60.71
44	74.28	32.35%	24.03	50.25
37	20.11	28.52%	5.73	14.37
31.11	77.33	26.04%	20.13	57.20
28.18	42.54	25.02%	10.64	31.90
22	38.04	23.27%	8.85	29.19
18.5	36.96	22.49%	8.31	28.65
15.55	37.06	21.92%	8.12	28.94
13.08	37.76	21.51%	8.12	29.64
11	38.80	21.19%	8.22	30.58
9.25	39.37	20.96%	8.25	31.12
7.78	16.49	20.77%	3.43	13.07
6.54	58.75	20.63%	12.12	46.63
5.5	35.63	20.51%	7.31	28.32
4.82	32.59	20.44%	6.66	25.93
3.89	29.34	20.35%	5.97	23.37
3.27	23.87	20.29%	4.84	19.03
2.75	24.19	20.24%	4.90	19.30
2.31	18.32	20.20%	3.70	14.62
1.94	14.98	20.16%	3.02	11.96

Tabla 43: Recuperación hacia el UF y OF de cada tamaño de partícula.

Tamaño (µm)	Flujo másico (t/h)	Recuperación al UF (%)	Flujo másico UF (t/h)	Flujo másico OF (t/h)
1.64	11.86	20.14%	2.39	9.47
1.38	9.55	20.12%	1.92	7.63
1.18	7.65	20.10%	1.54	6.12
0.97	4.07	20.08%	0.82	3.25
0.82	6.55	20.07%	1.31	5.23
0.69	3.47	20.06%	0.70	2.77
0.58	2.28	20.05%	0.46	1.82
0.49	1.48	20.04%	0.30	1.19
0.41	0.89	20.03%	0.18	0.71
0.34	0.49	20.03%	0.10	0.40
0.29	0.40	20.02%	0.08	0.32
0.24	0.59	20.02%	0.12	0.47
0.2	1.78	20.02%	0.36	1.42
TOTAL	2240.55	N/A	1618.17	822.38

Notas. Fuente: Elaboración propia.

#### 9.5.4 Granulometría underflow y overflow

Luego de obtener la distribución de los flujos másicos para cada tamaño de partícula se obtuvieron los porcentajes independientes para cada tamaño de partícula dividiendo el flujo másico de cada tamaño por el flujo másico de recuperación total.

Tabla 44: Distribución de flujo másico hacia el UF y OF.

Tamaño (µm)	Flujo másico UF (t/h)	Porcentaje independiente UF (%)	Flujo másico OF (t/h)	Porcentaje independiente OF (%)
2000	0.00	0.00%	0.00	0.00%
1874	0.00	0.00%	0.00	0.00%
1408	0.99	0.06%	0.00	0.00%
1184	2.47	0.15%	0.00	0.00%

Tabla 44: Distribución de flujo másico hacia el UF y OF.

Tamaño (µm)	Flujo másico UF (t/h)	Porcentaje independiente UF (%)	Flujo másico OF (t/h)	Porcentaje independiente OF (%)
995.5	4.44	0.27%	0.00	0.00%
837.1	6.91	0.43%	0.00	0.00%
703.9	9.87	0.61%	0.00	0.00%
591.9	16.29	1.01%	0.00	0.00%
497.8	22.21	1.37%	0.00	0.00%
418.8	37.02	2.29%	0.00	0.00%
352	61.21	3.78%	0.00	0.00%
298	95.76	5.92%	0.00	0.00%
248.9	134.25	8.30%	0.01	0.00%
209.3	161.81	10.00%	0.08	0.01%
178	166.35	10.28%	0.47	0.06%
148	161.44	9.98%	2.31	0.28%
124.4	145.45	8.99%	7.41	0.90%
104.8	130.55	8.07%	18.77	2.28%
87.99	108.50	6.71%	36.92	4.49%
73.99	83.90	5.18%	55.96	6.80%
62.22	58.40	3.61%	64.87	7.89%
52.32	37.71	2.33%	60.71	7.38%
44	24.03	1.49%	50.25	6.11%
37	5.73	0.35%	14.37	1.75%
31.11	20.13	1.24%	57.20	6.95%
28.18	10.64	0.66%	31.90	3.88%
22	8.85	0.55%	29.19	3.55%
18.5	8.31	0.51%	28.65	3.48%
15.55	8.12	0.50%	28.94	3.52%
13.08	8.12	0.50%	29.64	3.60%

Tabla 44: Distribución de flujo másico hacia el UF y OF.

Tamaño (µm)	Flujo másico UF (t/h)	Porcentaje independiente UF (%)	Flujo másico OF (t/h)	Porcentaje independiente OF (%)
11	8.22	0.51%	30.58	3.72%
9.25	8.25	0.51%	31.12	3.78%
7.78	3.43	0.21%	13.07	1.59%
6.54	12.12	0.75%	46.63	5.67%
5.5	7.31	0.45%	28.32	3.44%
4.82	6.66	0.41%	25.93	3.15%
3.89	5.97	0.37%	23.37	2.84%
3.27	4.84	0.30%	19.03	2.31%
2.75	4.90	0.30%	19.30	2.35%
2.31	3.70	0.23%	14.62	1.78%
1.94	3.02	0.19%	11.96	1.45%
1.64	2.39	0.15%	9.47	1.15%
1.38	1.92	0.12%	7.63	0.93%
1.18	1.54	0.10%	6.12	0.74%
0.97	0.82	0.05%	3.25	0.40%
0.82	1.31	0.08%	5.23	0.64%
0.69	0.70	0.04%	2.77	0.34%
0.58	0.46	0.03%	1.82	0.22%
0.49	0.30	0.02%	1.19	0.14%
0.41	0.18	0.01%	0.71	0.09%
0.34	0.10	0.01%	0.40	0.05%
0.29	0.08	0.00%	0.32	0.04%
0.24	0.12	0.01%	0.47	0.06%
0.2	0.36	0.02%	1.42	0.17%
<b>TOTAL</b>	<b>1618.17</b>	<b>100%</b>	<b>822.38</b>	<b>100%</b>

Tabla 44: Distribución de flujo másico hacia el UF y OF.

Tamaño (µm)	Flujo másico UF (t/h)	Porcentaje independiente UF (%)	Flujo másico OF (t/h)	Porcentaje independiente OF (%)
-------------	-----------------------	---------------------------------	-----------------------	---------------------------------

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Luego de obtener los porcentajes independientes para cada tamaño en el underflow y el overflow se tabularon los porcentajes acumulados en el underflow y overflow.

Tabla 45: Porcentajes independientes y acumulados al UF y OF.

Tamaño (µm)	Porcentaje independiente UF (%)	Porcentaje acumulado UF (%)	Porcentaje independiente OF (%)	Porcentaje acumulado OF (%)
2000	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%
1874	0.00%	100.00%	0.00%	100.00%
1408	0.06%	100.00%	0.00%	100.00%
1184	0.15%	99.94%	0.00%	100.00%
995.5	0.27%	99.79%	0.00%	100.00%
837.1	0.43%	99.51%	0.00%	100.00%
703.9	0.61%	99.08%	0.00%	100.00%
591.9	1.01%	98.47%	0.00%	100.00%
497.8	1.37%	97.47%	0.00%	100.00%
418.8	2.29%	96.10%	0.00%	100.00%
352	3.78%	93.81%	0.00%	100.00%
298	5.92%	90.03%	0.00%	100.00%
248.9	8.30%	84.11%	0.00%	100.00%
209.3	10.00%	75.81%	0.01%	100.00%
178	10.28%	65.81%	0.06%	99.99%
148	9.98%	55.53%	0.28%	99.93%
124.4	8.99%	45.55%	0.90%	99.65%
104.8	8.07%	36.57%	2.28%	98.75%
87.99	6.71%	28.50%	4.49%	96.47%

Tabla 45: Porcentajes independientes y acumulados al UF y OF.

Tamaño (µm)	Porcentaje independiente UF (%)	Porcentaje acumulado UF (%)	Porcentaje independiente OF (%)	Porcentaje acumulado OF (%)
73.99	5.18%	21.79%	6.80%	91.98%
62.22	3.61%	16.61%	7.89%	85.17%
52.32	2.33%	13.00%	7.38%	77.29%
44	1.49%	10.67%	6.11%	69.90%
37	0.35%	9.18%	1.75%	63.79%
31.11	1.24%	8.83%	6.95%	62.04%
28.18	0.66%	7.58%	3.88%	55.09%
22	0.55%	6.93%	3.55%	51.21%
18.5	0.51%	6.38%	3.48%	47.66%
15.55	0.50%	5.87%	3.52%	44.18%
13.08	0.50%	5.36%	3.60%	40.66%
11	0.51%	4.86%	3.72%	37.05%
9.25	0.51%	4.35%	3.78%	33.34%
7.78	0.21%	3.84%	1.59%	29.55%
6.54	0.75%	3.63%	5.67%	27.96%
5.5	0.45%	2.88%	3.44%	22.29%
4.82	0.41%	2.43%	3.15%	18.85%
3.89	0.37%	2.02%	2.84%	15.70%
3.27	0.30%	1.65%	2.31%	12.85%
2.75	0.30%	1.35%	2.35%	10.54%
2.31	0.23%	1.05%	1.78%	8.19%
1.94	0.19%	0.82%	1.45%	6.42%
1.64	0.15%	0.63%	1.15%	4.96%
1.38	0.12%	0.49%	0.93%	3.81%
1.18	0.10%	0.37%	0.74%	2.88%
0.97	0.05%	0.27%	0.40%	2.14%

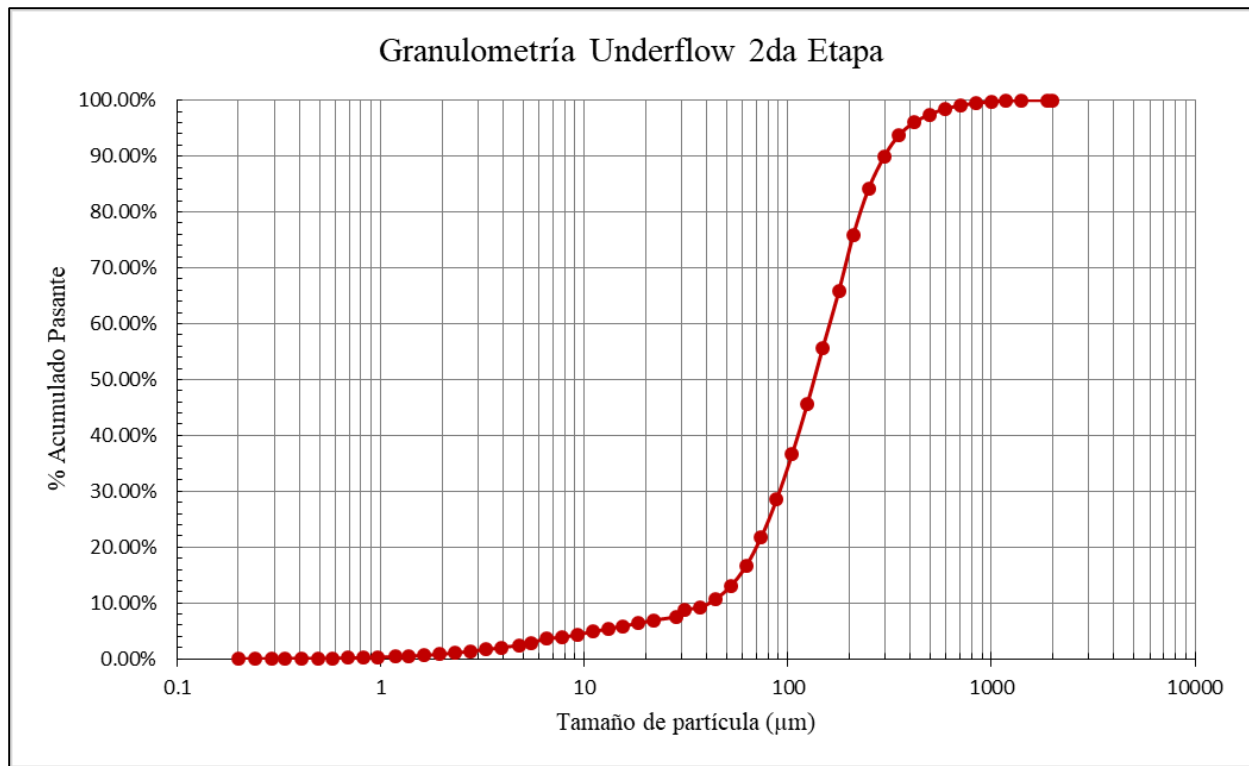
Tabla 45: Porcentajes independientes y acumulados al UF y OF.

Tamaño (µm)	Porcentaje independiente UF (%)	Porcentaje acumulado UF (%)	Porcentaje independiente OF (%)	Porcentaje acumulado OF (%)
0.82	0.08%	0.22%	0.64%	1.74%
0.69	0.04%	0.14%	0.34%	1.11%
0.58	0.03%	0.10%	0.22%	0.77%
0.49	0.02%	0.07%	0.14%	0.55%
0.41	0.01%	0.05%	0.09%	0.40%
0.34	0.01%	0.04%	0.05%	0.32%
0.29	0.00%	0.03%	0.04%	0.27%
0.24	0.01%	0.03%	0.06%	0.23%
0.2	0.02%	0.02%	0.17%	0.17%

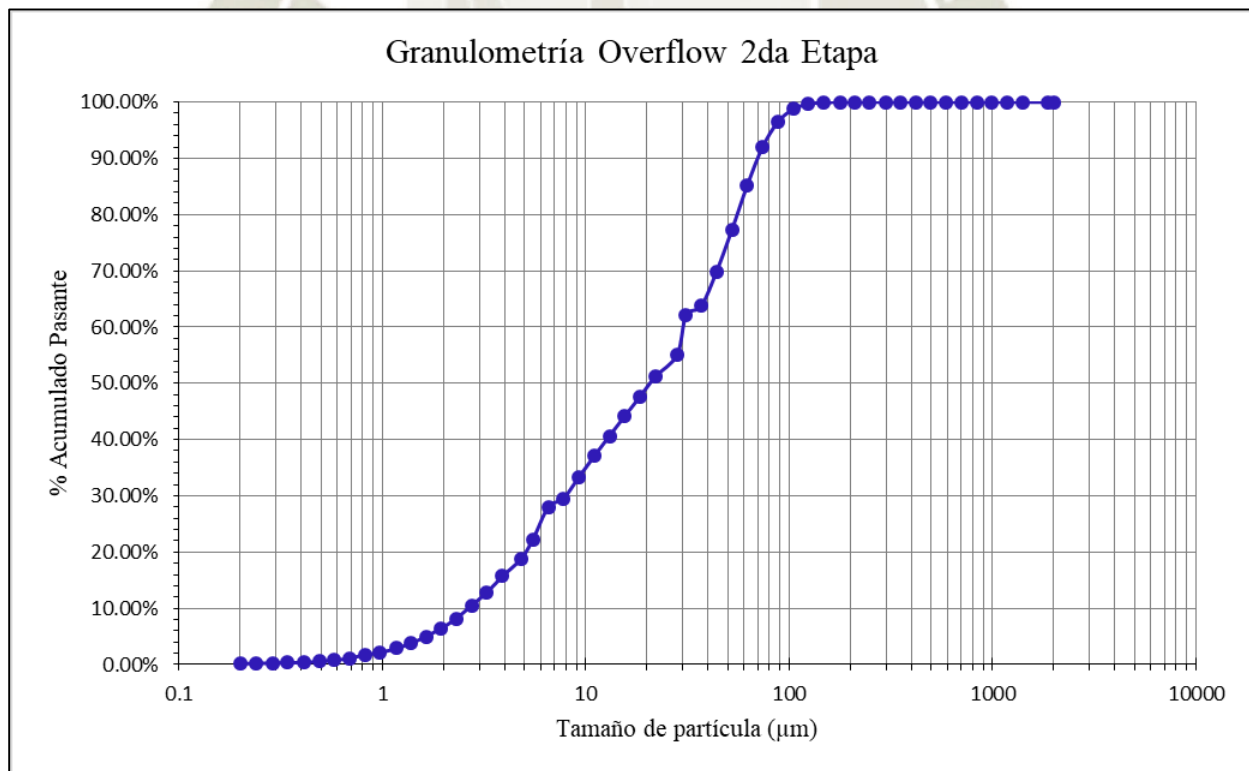
**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 9.5.5 Curvas granulométricas underflow y overflow

A continuación se muestran las curvas granulométricas obtenidas en el underflow y overflow para la segunda etapa de clasificación.



**Figura 69:** Granulometría del UF - 2da Etapa de clasificación.



**Figura 70:** Granulometría del OF - 2da Etapa de clasificación.

## 9.6 Flujo y características reológicas

Después de haber determinado la distribución másica y granulométrica en el underflow y overflow se pueden determinar las características reológicas del relave después de la segunda etapa de clasificación. A continuación se muestra un cuadro resumen de los resultados.

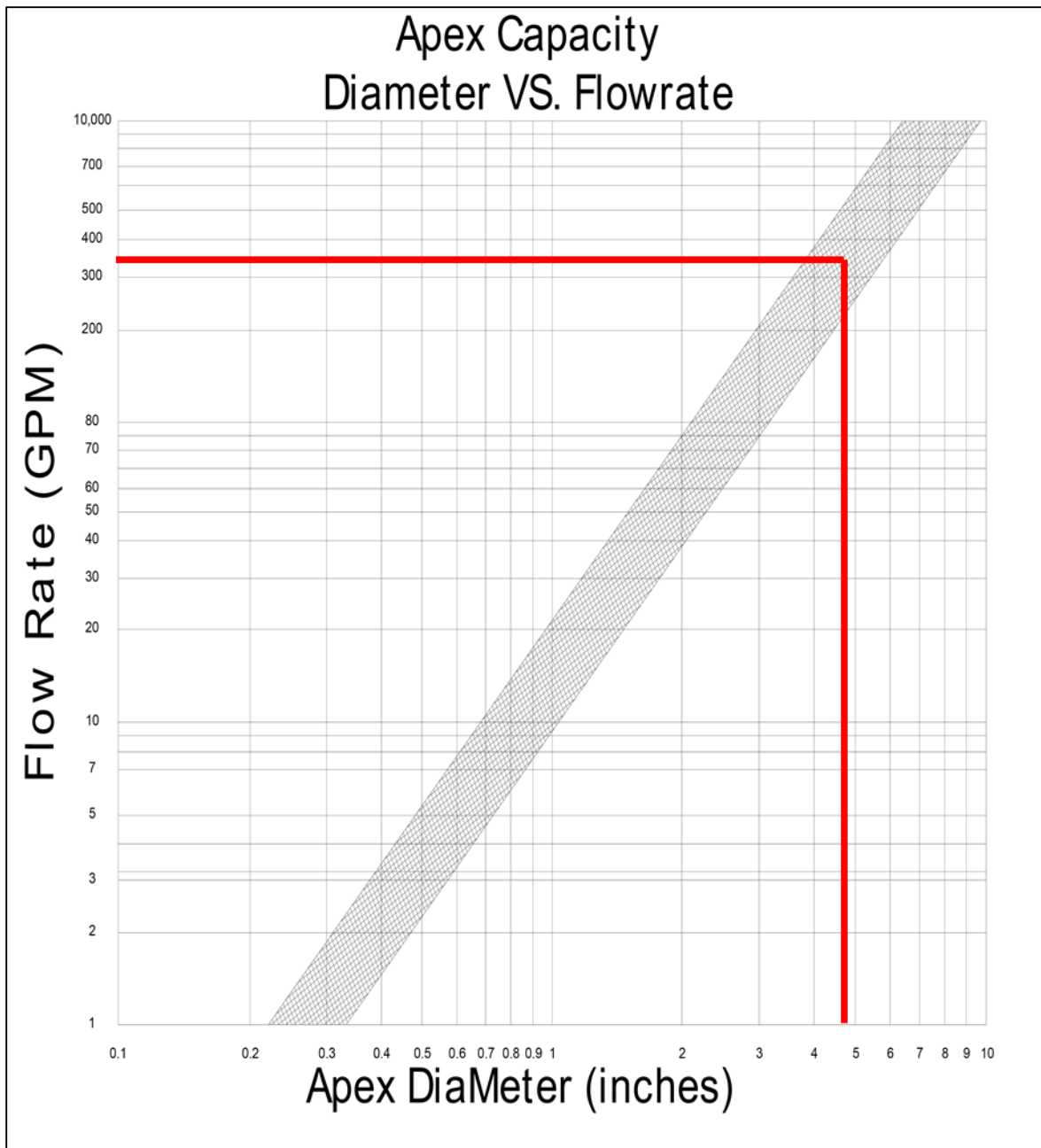
Tabla 46: Características reológicas para la 2da Etapa de clasificación.

Descripción	Alimentación	Overflow	Underflow
Flujo másico sólidos secos	2440.55 t/h	822.38 t/h	1618.17 t/h
Porcentaje de recuperación	N/A	33.7%	66.3%
Flujo volumétrico de agua	3660 m <sup>3</sup> /hr	2928 m <sup>3</sup> /hr	732 m <sup>3</sup> /hr
Recuperación de agua	N/A	80%	20%
Flujo volumétrico de pulpa	4565 m <sup>3</sup> /hr	3239 m <sup>3</sup> /hr	1326 m <sup>3</sup> /hr
Concentración en peso	40 %	22 %	69 %
Concentración en volumen	19.8 %	9.4 %	45.2 %
Densidad de la pulpa	1360 kg/m <sup>3</sup>	1160 kg/m <sup>3</sup>	1768 kg/m <sup>3</sup>
Tamaño de partículas d <sub>50</sub>	85 μm	21 μm	135 μm
Tamaño de partículas d <sub>80</sub>	190 μm	56 μm	230 μm

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

## 9.7 Selección del diámetro de ápex

Por último determinaremos el diámetro del ápex de acuerdo al gráfico de selección.



**Figura 71:** Selección del tamaño de Apex – Ciclones 2da Etapa.

De acuerdo a la gráfica el diámetro de ápex más adecuado para un flujo volumétrico en el underflow de  $78 \text{ m}^3/\text{h}$  (343 GPM) es de 5 pulg.

### 9.8 Especificaciones técnicas de los ciclones de la segunda etapa

A continuación se muestra un resumen de las especificaciones para los ciclones de la segunda etapa de clasificación:

Tabla 47: Especificaciones técnicas para los ciclones de la 2da Etapa de clasificación.

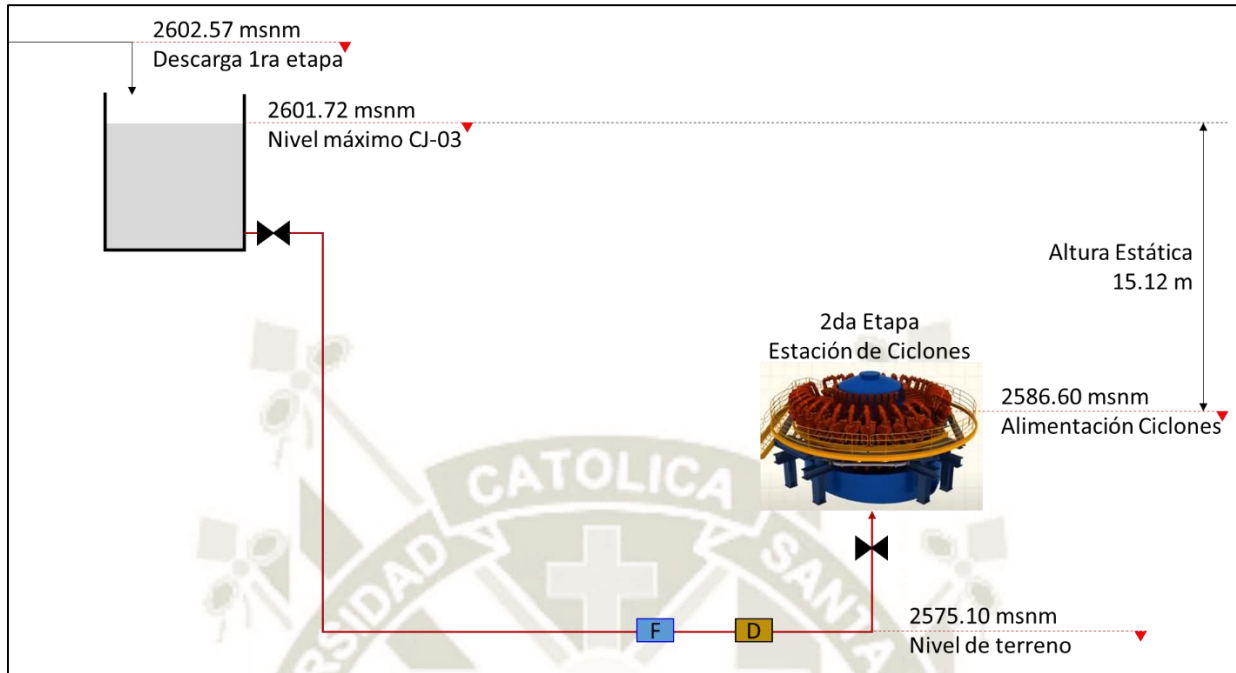
Descripción	Nido 01
Marca / Modelo	Krebs / gMAX 26
Diámetro	26 pulg
Capacidad	520 m <sup>3</sup> /hr
Presión mínima en alimentación	123 kPa
Cantidad total	21
Cantidad en operación	17
Cantidad en Stand-by	4
Diámetro de Apex	5 pulg

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 10. Diseño de la línea de transporte desde el CJ-03 a la segunda etapa de ciclones

Al igual que en la primera etapa de clasificación. La línea que alimentará de relaves a la segunda etapa de ciclones aprovechará la diferencia de niveles existente entre la descarga del cajón CJ-03 y los ciclones de la segunda etapa para enviar los relaves por gravedad.

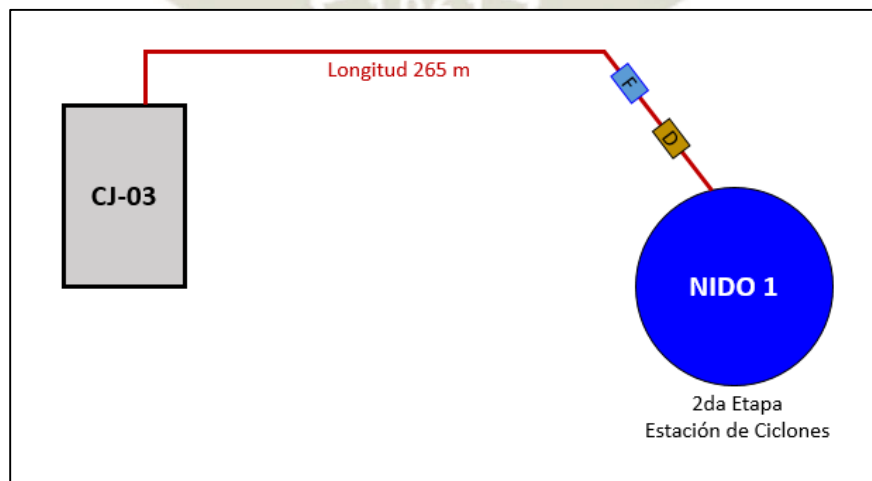
El esquema de transporte con niveles se muestra a continuación:



**Figura 72:** Esquema de transporte de relaves desde CJ-03 hacia 2da Etapa de clasificación.

El nivel de pulpa en el CJ-03 será 2601.72 msnm, mientras que el nivel de ingreso a cada ciclón será 2586.60 msnm existiendo una altura estática de 15.12 m.c.p.

Como se determinó anteriormente, el sistema de clasificación operará con dos nidos de ciclones los cuales estarán ubicados al mismo nivel. Cada nido contará con una tubería de alimentación independiente, ambas líneas de tubería tendrán un recorrido similar y una longitud aproximada de 265 metros como se ve en la vista de planta a continuación:



**Figura 73:** Vista de planta - Esquema de transporte de relaves desde CJ-03 hacia 2da Etapa de clasificación.

### 10.1 Selección del material de tubería

Al igual que en el caso de la primera etapa de clasificación se seleccionaron preliminarmente tuberías de acero electro soldadas (ERW) API 5L grado A25 de clase STD (espesor de pared 9.53 mm) con revestimiento interno de 12 mm de caucho para reducir el desgaste. Luego de determinar la presión de operación y el diámetro adecuado se realizará la verificación del material y el espesor de la tubería.

### 10.2 Diámetros tentativos de tubería

En este caso se contará con una sola línea que alimentará al Nido 01 de la segunda etapa de clasificación. El flujo de diseño será el flujo total proveniente del cajón CJ-03 (4565 m<sup>3</sup>/h).

Inicialmente se plantearon tres alternativas de diámetro para la línea, las cuales se determinaron buscando una velocidad de flujo entre 2.5 y 3.5 m/s.

Las alternativas planteadas y sus velocidades de flujo se muestran a continuación:

Tabla 48: Alternativas de diámetro para la línea desde el CJ-03 a la 2da Etapa de clasificación.

Nº Alternativa	Diámetro nominal	Diámetro interior	Espesor revestimiento	Diámetro interior final	Velocidad
Alternativa 1	28 pulg	692 mm	12 mm	668 mm	3.62 m/s
Alternativa 2	30 pulg	743 mm	12 mm	719 mm	3.12 m/s
Alternativa 3	32 pulg	794 mm	12 mm	770 mm	2.72 m/s

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 10.3 Verificación de la velocidad de deposición

Posteriormente se realizó la verificación de la velocidad de deposición para cada alternativa utilizando el método Wasp.

En el siguiente cuadro se muestran las velocidades de deposición obtenidas para cada alternativa comparada con la velocidad de flujo.

Tabla 49: Velocidades de deposición para cada alternativa.

Nº Alternativa	Velocidad de flujo	Velocidad de deposición	Relación V/Vd
Alternativa 1	3.62 m/s	2.50 m/s	1.45

Alternativa 2	3.12 m/s	2.57 m/s	1.22
Alternativa 3	2.72 m/s	2.62 m/s	1.04

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse las tres alternativas tienen una velocidad de flujo superior a su velocidad de deposición.

#### 10.4 Pérdidas primarias en la línea

Al igual que en la línea de transporte de la primera etapa se realizaron dos tipos de análisis: el primero considerando flujo homogéneo y el segundo considerando flujo heterogéneo para cada alternativa. Luego de este análisis se compararon ambas condiciones y se consideró la más crítica.

##### 10.4.1 Gradiente hidráulico para flujo homogéneo

En el siguiente cuadro se muestran los gradientes hidráulicos obtenidos para cada alternativa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo descrito en el cálculo realizado para la línea de la primera etapa de clasificación.

Tabla 50: Gradiente hidráulico calculado para flujo homogéneo.

Nº Alternativa	Factor de fricción $f_D$	Gradiente hidráulico (mcp/m)
Alternativa 1	0.0154	0.015
Alternativa 2	0.0152	0.011
Alternativa 3	0.0151	0.007

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

##### 10.4.2 Gradiente hidráulico para flujo heterogéneo

El análisis de flujo heterogéneo se realizó de acuerdo al método desarrollado por Wasp.

#### Grupos de partícula

Los grupos de partícula fueron los mismos a los grupos empleados para el diseño de la línea hacia la primera etapa de ciclones. Sin embargo, al utilizar la granulometría del underflow de la primera etapa los porcentajes pasantes variaron como se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla 51: Grupos de partícula para cálculo de pérdidas por flujo heterogéneo de UF de ciclones 1ra Etapa.

Malla Tyler	Tamaño promedio	% Pasante
Menor a 100	0.149 mm	29.51 %
De 100 a 200	0.112 mm	30.78 %
Mayor a 200	0.074 mm	39.71 %
TOTAL		100%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el cuadro existe una mayor proporción de partículas gruesas, esto como consecuencia del primer proceso de clasificación.

### Resumen de resultados

En el siguiente cuadro se muestran los gradientes hidráulicos obtenidos bajo la condición de flujo heterogéneo para cada alternativa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo descrito para la línea de alimentación hacia la primera etapa de ciclones.

Tabla 52: Gradiente hidráulico total para cada alternativa.

Nro Alternativa	Factor de fricción fD	Gradiente hidráulico (mcp/m)
Alternativa 1	0.0182	0.0182
Alternativa 2	0.0208	0.144
Alternativa 3	0.0251	0.0123

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Haciendo una comparación entre los resultados de flujo homogéneo vs los resultados de flujo heterogéneo se puede observar que la condición de flujo heterogéneo presenta mayores gradientes hidráulicos lo que se reflejará en mayores pérdidas primarias en el sistema. Por lo tanto se asumirá esta condición para la selección final del diámetro de tubería.

### 10.4.3 Cálculo de pérdidas primarias

Habiendo calculado el gradiente hidráulico para cada alternativa las pérdidas primarias se calcularon multiplicando el gradiente hidráulico por la longitud de la tubería. En este caso la línea tendrá una longitud de 265 metros.

Tabla 53: Gradiente hidráulico y pérdidas primarias para cada alternativa.

N° Alternativa	Gradiente hidráulico (mcp/m)	Pérdidas primarias (mcp)
Alternativa 1	0.0182	4.84
Alternativa 2	0.144	3.81
Alternativa 3	0.0123	3.26

Notas. Fuente: Elaboración propia.

### 10.5 Pérdidas secundarias por accesorios

Para calcular las pérdidas de carga debido a los accesorios se utilizó el método de los coeficientes de pérdida, para ello se muestran a continuación la lista de accesorios a utilizar en la línea así como sus coeficientes de pérdida.

Tabla 54: Cantidad de accesorios y coeficiente de pérdidas.

Accesorio	Cantidad	Coefficiente de pérdidas por accesorio (k)
Boquilla de descarga de CJ-03	1	0.5
Codo de 45°	7	0.07
Codo de 90° 5D	2	0.13
Válvula cuchilla	2	0.03

Notas. Fuente: Elaboración propia.

Para determinar las pérdidas ocasionadas por cada accesorio se utilizó la Ec. 2.65

$$H_{ps} = \sum K \cdot \left( \frac{V^2}{2 \cdot g} \right)$$

En el siguiente cuadro se muestran las pérdidas secundarias ocasionadas por los accesorios de la línea para cada alternativa.

Tabla 55: Pérdidas secundarias por alternativa.

Nº Alternativa	Pérdidas secundarias mcp
Alternativa 1	1.08
Alternativa 2	0.81
Alternativa 3	0.61

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 10.6 Presión de descarga

Para poder determinar la presión que se tendrá en la descarga utilizaremos la adaptación de la ecuación de Bernoulli para transporte de tuberías por gravedad de acuerdo a la Ec. 2.71

$$(Z_1 - Z_2) = (P_2 - P_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + H_{pp} + H_{ps}$$

Donde:

- Diferencia de niveles ( $Z_1 - Z_2$ ) : 15.12 mcp
- Presión en el punto inicial ( $P_1$ ) : 0 mca
- Velocidad en el punto inicial ( $V_1$ ) : 0 m/s
- Velocidad en el punto de descarga ( $V_2$ ) : Variable en m/s
- Pérdidas primarias por fricción ( $H_{pp}$ ) : Variable en mcp
- Pérdidas por accesorios ( $H_{ps}$ ) : Variable en mcp

A continuación se muestran los resultados para cada alternativa:

Tabla 56: Presión de descarga en la alimentación del ciclón.

Nº Alternativa	Presión de descarga (mcp)	Presión de descarga (mca)	Presión de descarga (kPa)
Alternativa 1	8.54	11.41	111.69
Alternativa 2	10.01	13.37	130.88
Alternativa 3	10.87	14.53	142.16

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 10.7 Selección del diámetro final de tubería

En el cuadro a continuación se muestra el resumen de los resultados obtenidos para cada alternativa.

Tabla 57: Resumen de resultados finales para cada alternativa.

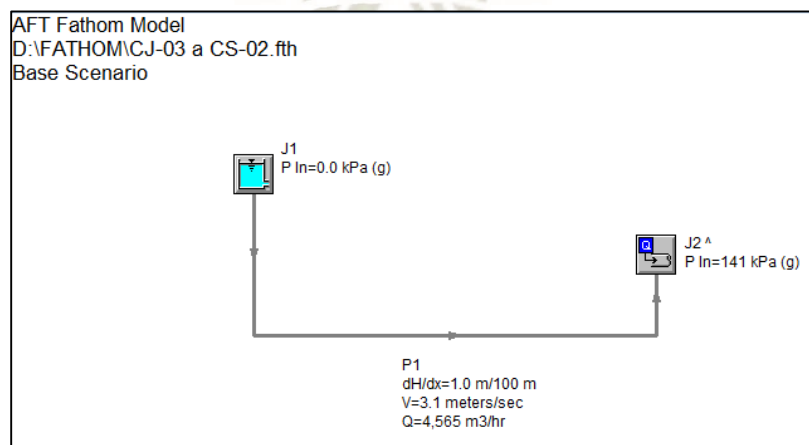
Diámetro Nominal	Velocidad de flujo	Velocidad deposición	V/VD	Presión Descarga	Mín. Presión Requerida
28	3.62	2.50	1.45	111.69	123
30	3.12	2.57	1.22	130.88	123
32	2.72	2.62	1.04	142.16	123

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

La alternativa 1 quedó descartada por no cumplir con la presión mínima requerida. Las alternativas 2 y 3 cumplen con el requerimiento de presión mínima en la descarga. Por otro lado la alternativa 2 representará un menor costo, adicional a ello la velocidad de flujo de la alternativa 2 está 20% por encima de su velocidad de deposición. En cambio la alternativa 3 representará un mayor costo y su velocidad de flujo está solo 4% por encima de su velocidad de deposición. Por estos motivos se seleccionó la alternativa 2 es decir instalar una línea de 30 pulgadas.

### 10.8 Uso de Software

Con la alternativa seleccionada se realizó un modelo del sistema utilizando el Software AFT Fathom Versión 7.0. A continuación se muestra el modelo y el resumen de los resultados obtenidos para la presión al ingreso del ciclón.



**Figura 74.** Modelo del sistema de la 2da etapa en AFT Fathom.

Como se puede apreciar en los resultados la presión de ingreso en el ciclón para el flujo de diseño es de 141 KPa. Lo cual representa una diferencia de menos del 8% respecto a la presión de descarga calculada por el método Wasp.

### 10.9 Verificación del espesor de la tubería

Luego de determinar el diámetro y la presión de operación de las líneas, se verificó que el espesor y el material escogido soporten la presión máxima que se pueda presentar durante la operación.

La presión de operación de ambas líneas es de 130.88 kPa (1.3 bar) como se determinó anteriormente. Adicionalmente sabemos que la altura estática que tendrá la línea será de 15.12 m.c.p, multiplicando ese valor por la densidad relativa de la pulpa (1.337) obtenemos una presión estática máxima de 20.21 m.c.a. (1.98 bar). De ambos casos se escogió el peor escenario para verificar el espesor mínimo de la tubería de acuerdo a la Ec. 2.84

$$t_n = \frac{P_i \cdot D}{20 \cdot F \cdot E \cdot S_y} + t_A$$

Donde:

- Presión de diseño de la tubería ( $P_i$ ) : 1.98 bar
- Diámetro exterior de la tubería ( $D$ ) : 762 mm
- Factor de diseño ( $F$ ) : 0.8
- Factor de soldadura ( $E$ ) : 1
- Esfuerzo de fluencia acero ( $S_y$ ) : 172 MPa (API 5L gr A25)
- Tolerancia por corrosión y erosión ( $t_A$ ) : 1.5 mm

Se obtuvo que el espesor mínimo recomendado para la tubería es de 2.1 mm el cual es inferior al espesor seleccionado de 9.53 mm. Por lo tanto la tubería escogida no presentará problemas por presión en la línea.

### 10.10 Selección de válvulas y accesorios para tuberías.

#### 10.10.1 Válvulas cuchilla

A continuación se muestran las especificaciones técnicas para las válvulas cuchilla empleadas en la línea de transporte hacia la segunda etapa de clasificación:

- Marca / Modelo : Clarkson / KGA
- Servicio : On /Off
- Tipo de conexión : Wafer
- Rating de presión : NPS 48 (50 psi)
- Manga : Caucho natural standard
- Material de la cuchilla : Acero inox 316
- Actuador : Pistón hidráulico

De manera similar al corredor principal de tuberías se consideró una unidad hidráulica por cada válvula cuchilla.

### 10.10.2 Flujómetros y densímetros

Se seleccionaron flujómetros magnéticos con visores para lectura en campo y con transmisores de señal. A continuación se muestran las especificaciones de los flujómetros seleccionados:

- Marca/Modelo : Rosemount/8732
- Flujo de operación : 4565 m<sup>3</sup>/hr
- Velocidad de operación : 3.12 m/s
- Tipo de conexión : Bridada
- Rating de presión : CL#150

Por otro lado se seleccionaron densímetros nucleares de la marca RONAN modelo X96S los cuales son de tipo no intrusivo, es decir se instalan en la parte exterior de las tuberías.

### 10.10.3 Bridas y accesorios de conexión entre tuberías

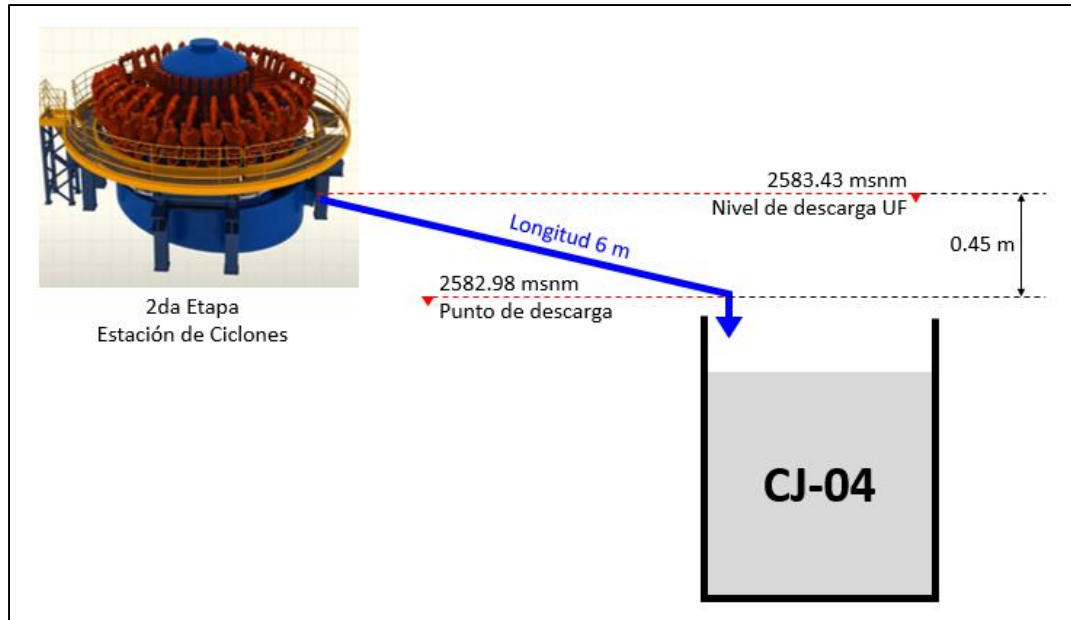
Se determinó que la unión entre spools de acero se realizará utilizando bridas de tipo Slip On AWWA C207 D.

En los spools de conexión hacia los nidos de ciclones se consideraron acoples flexibles Victaulic los cuales facilitarán el montaje y desmontaje del tramo final de tuberías.

## 11. Diseño canal de descarga del UF de ciclones hacia el CJ-04

El underflow de los ciclones de la segunda etapa será enviado hacia una tina provista por el fabricante, sin embargo esta tina será sólo de contención y se necesitará seleccionar un diámetro

de tubería adecuado que permita transportar el underflow desde la tina hacia el cajón distribuidor CJ-04. La descarga de la tina del underflow se encontrará en el nivel 2583.43 m.s.n.m. mientras que el punto de descarga hacia el cajón CJ-04 se encontrará en el nivel 2582.98 m.s.n.m. además la distancia a recorrer desde la boquilla de descarga de la tina del UF hacia el cajón CJ-04 es de 6 metros.



**Figura 75:** Esquema de descargas UF hacia CJ-04 – Elevaciones.

### 11.1 Diseño del canal de tuberías del Nido-01 hacia el CJ-04

A continuación se muestran las características del canal de descarga del Nido-01 hacia el CJ-03:

- Nivel inicial de la línea : 2583.43 msnm
- Nivel final de la línea : 2582.98 msnm
- Longitud del trazo de tubería : 6 m
- Pendiente : 7.5 %

#### 11.1.1 Selección del material de la tubería

Al igual que en el caso anterior la tubería debe ser rígida ya que estará soportada por una estructura aérea por tal motivo se descarta el uso de tuberías de HDPE.

Al tratarse de un canal la tubería no tendrá presión manométrica interior, por lo tanto se seleccionará el material más liviano y comercial como son las tuberías de acero STD con revestimiento interno de 12 mm de caucho para reducir el desgaste.

### 11.1.2 Propiedades de la pulpa

A continuación se muestran las propiedades del underflow de ciclones calculadas anteriormente:

- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Concentración de sólidos ( $C_p$ ) : 69 %
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 45.2 %
- Densidad de la mezcla ( $\rho_s$ ) : 1768 kg/m<sup>3</sup>
- Tamaño de partícula d50 : 135  $\mu$ m
- Tamaño de partícula d80 : 230  $\mu$ m

### 11.1.3 Flujo de diseño

- Flujo másico (toneladas secas) : 1618.17 t/h
- Flujo volumétrico ( $Q$ ) : 1326 m<sup>3</sup>/h

### 11.1.4 Selección del diámetro de tubería

Para poder identificar el diámetro más apropiado para la tubería se analizaron 3 alternativas, para las cuales se evaluaron los siguientes parámetros:

- Velocidad de deposición
- Velocidad de flujo.
- Número de Froude.
- Tirante hidráulico.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada alternativa:

Tabla 58: Resumen de resultados para canal de la 2da Etapa de clasificación hacia el CJ-04.

Díámetro nominal (pulg)	Díámetro interior (mm)	Velocidad Deposición (m/s)	Velocidad (m/s)	Relación Velocidades	Número de Froude	Tirante (%)
18	414	2.74	4.88	1.78	3.64	55%

20	465	2.84	4.88	1.71	3.86	46%
24	567	3.04	4.82	1.58	4.08	34%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse todas las alternativas cumplen con los requisitos mínimos para transportar el flujo necesario. Por tal motivo se escogió la alternativa 1 de 18 pulgadas al ser la tubería de menor diámetro.

### 11.2 Bridas y accesorios de conexión entre tuberías

Se determinó que la unión entre spools de acero se realizará utilizando bridas de tipo Slip On AWWA C207 D.

En los spools de conexión hacia los nidos de ciclones se consideraron acoples flexibles Victaulic los cuales facilitarán el montaje y desmontaje del tramo final de tuberías.

## 12. Diseño del cajón distribuidor CJ-04

El cajón CJ-04 recibirá los relaves provenientes del underflow del Nido de ciclones 01 de la segunda etapa de clasificación. A diferencia de los cajones CJ-02 y CJ-03 este cajón no contará con ingresos de agua de dilución ya que el relave será enviado con la misma concentración hacia el underflow de la presa de relaves.

### 12.1 Propiedades del relave en el CJ-04

Las propiedades del relave en el cajón CJ-04 serán las mismas a las del UF de la segunda etapa de ciclones:

- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Concentración de sólidos ( $C_p$ ) : 69 %
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 45.2 %
- Densidad de la mezcla ( $\rho_s$ ) : 1768 kg/m<sup>3</sup>
- Tamaño de partícula d50 : 135  $\mu$ m
- Tamaño de partícula d80 : 230  $\mu$ m

### 12.1.1 Viscosidad

Para el cálculo de la viscosidad se utilizó el método K&D de acuerdo a la Ec. 2.24

$$\frac{\mu_m}{\mu_l} = \frac{1}{\left(1 - \frac{C_v}{C_{v \max}}\right)^{E \cdot C_{v \max}}}$$

Donde:

- Densidad del agua ( $\mu_l$ ) : 0.001 Pa · s
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 45.2 %
- Concentración máxima ( $C_{v \max}$ ) : 100 %
- Viscosidad intrínseca ( $E$ ) : 7

Obteniendo como resultado:

- Viscosidad dinámica de la pulpa ( $\mu_m$ ) : 0.0673 Pa · s.

### 12.1.2 Tensión de fluencia

Para el cálculo de la tensión de fluencia se utilizó el modelo de Thomas de acuerdo a las Ec. 2.25 y 2.26

$$\tau_f = B \cdot C_v^3 \cdot \exp\left(\frac{2.7 \cdot C_v}{1 - C_v}\right)$$

$$B = \frac{C_2}{d_{50}^{N_2}}$$

Donde:

- Factor  $C_2$  para relaves : 3379.5
- Factor  $N_2$  para relaves : 1.1211
- Tamaño de partícula ( $d_{50}$ ) : 135  $\mu\text{m}$
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 45.2 %

Obteniendo como resultado:

- Tensión de fluencia de la pulpa ( $\tau_f$ ) : 11.81 Pa

## 12.2 Flujo volumétrico a la salida del cajón

El flujo volumétrico a la salida del cajón será el mismo que el flujo proveniente del UF de la segunda etapa de ciclones:

- Flujo volumétrico de salida ( $Q$ ) : 1326 m<sup>3</sup>/h

## 12.3 Dimensionamiento del cajón distribuidor CJ-04

### 12.3.1 Volumen mínimo del cajón

Para calcular el volumen mínimo que debe tener el cajón distribuidor CJ-04 se tomó en consideración el tiempo mínimo de retención requerido para el cajón así como el flujo volumétrico de la pulpa. De acuerdo a la Ec. 2.75 tenemos:

$$Vol_{min} = Q_m \cdot R_t$$

Donde:

- Flujo volumétrico de descarga ( $Q_m$ ) : 0.37 m<sup>3</sup>/s
- Tiempo mínimo de retención ( $R_t$ ) : 60 s

Obteniendo como resultado:

- Volumen efectivo mínimo ( $Vol_{min}$ ) : 22.2 m<sup>3</sup>

### 12.3.2 Ancho mínimo del cajón

Para determinar el ancho mínimo del cajón se debe conocer el ancho del canal rectangular de alimentación. En este caso se contará con dos canales de alimentación circular, por lo tanto se determinó el ancho equivalente para cada canal rectangular de acuerdo a la Ec. 2.73.

$$b_1 = A/Y$$

Donde:

- Área de la sección llena Canal ( $A$ ) : 0.077 m<sup>2</sup>
- Altura de llenado Canal ( $Y$ ) : 0.194 m

Obteniendo como resultados:

- Ancho equivalente canal ( $b_1$ ) : 0.397 m (15.6 pulg)

Finalmente los datos de entrada para seleccionar el ancho mínimo serán:

- Altura de caída de flujo : 0.85 m (32 pulg)

- Altura de llenado del canal : 0.194 m (8 pulg)

De la Tabla 6 se obtuvo:

- Ancho adicional por lado  $b_2$  : 0.521 m (20.5 pulg)

Por lo tanto el ancho mínimo recomendado para el cajón se calcula de acuerdo a la Ec. 2.72

$$A_c = b_1 + 2 \cdot b_2$$

Donde:

- Ancho de canal rectangular ( $b_1$ ) : 0.397 m
- Ancho adicional recomendado ( $b_2$ ) : 0.521 m

Obteniendo como resultado:

- Ancho mínimo del cajón ( $A_c$ ) : 1.44 m

### 12.3.3 Largo mínimo de la cámara de recepción

Considerando los siguientes datos de entrada:

- Velocidad de ingreso : 4.88 m/s (960 pies/min)
- Altura de llenado del canal : 0.194 m (8 pulg)
- Altura de caída de flujo : 0.85 m (32 pulg)

De acuerdo a la Tabla 7 por interpolación se obtuvo:

- Largo mínimo cámara de recepción : 2.95 m (116 pulg)

### 12.3.4 Profundidad mínima del cajón

Considerando los siguientes datos de entrada:

- Velocidad de ingreso promedio : 4.88 m/s (960 pies/min)
- Altura de llenado del canal : 0.194 m (8 pulg)
- Altura de caída de flujo : 0.85 m (32 pulg)

De acuerdo a la Tabla 8 se obtuvo:

- Profundidad mínima del cajón : 1.016 m (40 pulg)

### 12.3.5 Dimensiones de la ventana de rebose

Para dimensionar el ancho de la ventana de rebose se estableció que la altura del vertedero que se formará en la ventana de rebose en caso sea necesario evacuar la totalidad de flujo no deberá exceder de 0.30 metros.

Para determinar el ancho de la ventana de rebose se utilizó la Ec. 2.74

$$Q = 3600 \cdot K \cdot (b - 0.2 \cdot h_v) \cdot h_v^{1.5}$$

Donde:

- Flujo de evacuación del rebose ( $Q$ ) : 1326 m<sup>3</sup>/h
- Coef. de descarga por vertedero ( $K$ ) : 1.84
- Altura de vertedero en la ventana ( $h_v$ ) : 0.3 m

Obteniendo como resultado:

- Ancho de la ventana de rebose ( $b$ ) : 1.27 m  $\approx$  1.3 m

Para el diseño del cajón se consideró que el ancho del rebose será igual al ancho de la cámara de distribución.

### 12.3.6 Verificación de dimensiones del cajón

El cálculo del volumen efectivo del cajón se realizó de acuerdo a las dimensiones estimadas anteriormente:

- Ancho del cajón : 1.44 m
- Largo de la cámara de recepción : 2.95 m
- Largo de la cámara de distribución : 1.27 m
- Profundidad del cajón : 1.02 m

Dando como resultado que el volumen efectivo del cajón CJ-04 es de 5.8 m<sup>3</sup> el cual es inferior al volumen mínimo requerido de 22.2 m<sup>3</sup>.

Para poder cumplir con el requisito del volumen mínimo se realizaron variaciones a la profundidad y al ancho del cajón.

## 12.4 Resumen de resultados cajón CJ-04

A continuación se muestran las especificaciones finales obtenidas para el cajón CJ-04:

- Ancho del cajón : 3 m
- Largo de la cámara de recepción : 3 m
- Largo de la cámara de distribución : 1.3 m
- Profundidad del cajón : 6 m
- Volumen efectivo : 77.4 m<sup>3</sup>
- Tiempo de retención : 210 s

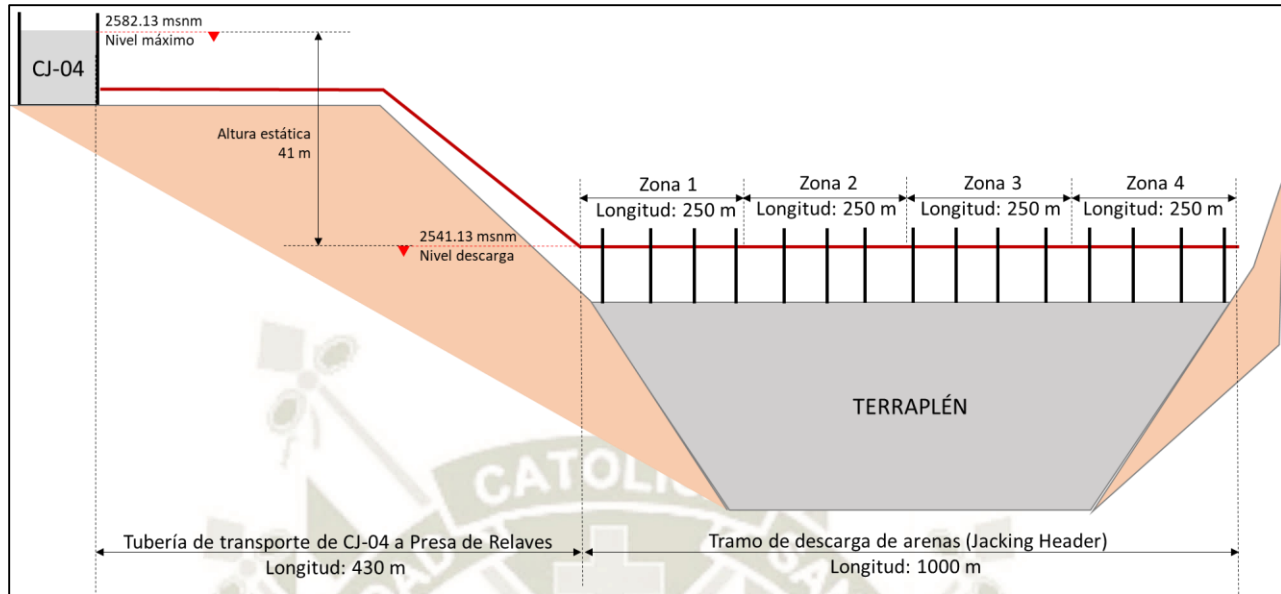
De igual manera se listan las características del relave a la salida del cajón:

- Densidad de sólidos ( $\rho_s$ ) : 2700 kg/m<sup>3</sup>
- Concentración de sólidos en peso ( $C_p$ ) : 69 %
- Concentración en volumen ( $C_v$ ) : 45.2 %
- Densidad de la mezcla ( $\rho_m$ ) : 1768 kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad dinámica ( $\mu_m$ ) : 0.06729 Pa · s
- Tensión de fluencia ( $\tau_f$ ) : 11.81 Pa.
- Flujo másico (toneladas secas) : 1618.17 t/h
- Flujo volumétrico ( $Q_m$ ) : 1326 m<sup>3</sup>/h

### 13. Diseño de la línea de descarga del UF hacia la presa de relaves

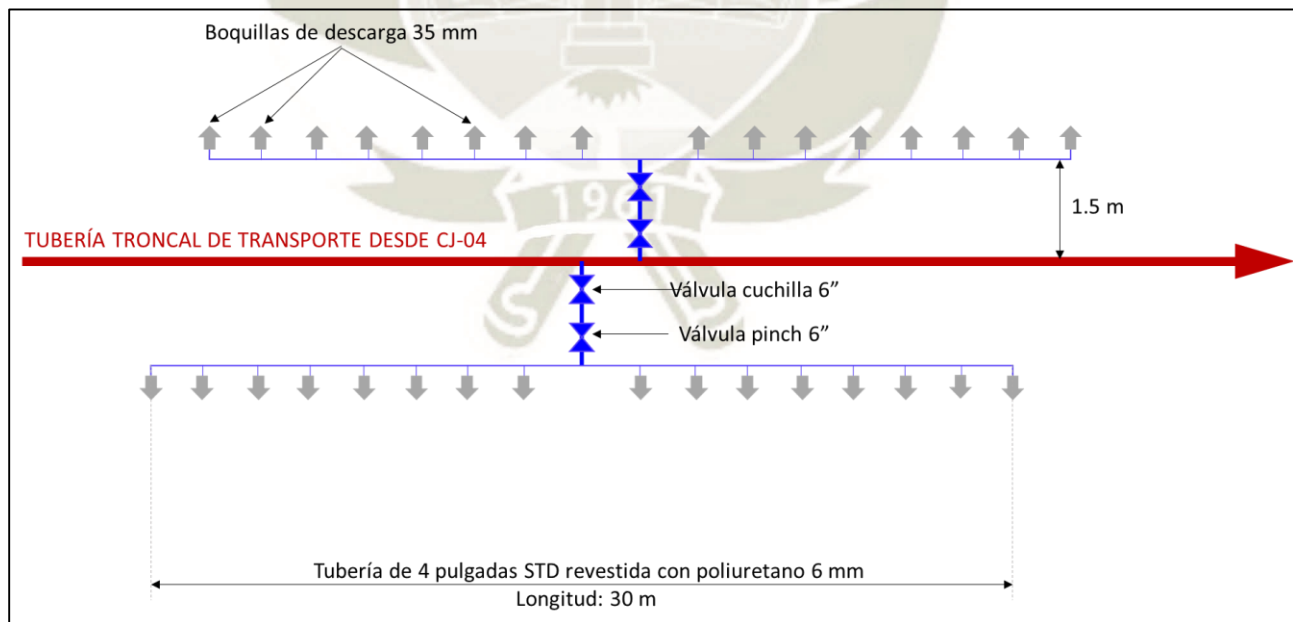
Los relaves enviados hacia el cajón CJ-04 (también denominados arenas por su granulometría gruesa) serán enviados hacia la presa de relaves y utilizados para el crecimiento del terraplén. Las arenas serán transportadas por un sistema de tuberías que permitirá su descarga en cuatro zonas del muro. Se tiene proyectado que el nivel máximo que alcanzará la descarga en el terraplén será 2541.13 msnm y la longitud máxima del terraplén será de 1 kilómetro. El sistema de transporte se diseñó considerando el nivel más alto y la longitud más larga para la descarga de arenas. Se sabe que la descarga de arenas en el terraplén será a través de cuatro zonas cada una con una longitud de 250 metros. Además se sabe que se operará una zona a la vez. Hacia el final del Jacking Header se encontrará una manguera de 16 pulgadas que enviará el flujo remanente directamente hacia el embalse.

Por otro lado, el recorrido que tendrá la tubería desde la descarga del cajón CJ-04 hasta alcanzar el nivel de descarga en el terraplén será de 430 metros mientras que la altura estática desde el nivel de relave en el CJ-04 hasta el nivel de descarga será de 41 mcp.



**Figura 76:** Esquema inicial transporte de arenas desde CJ-04 hacia presa de relaves.

La descarga de arenas en cada zona se realizará a través de derivaciones que se encontrarán a lo largo de su recorrido en el terraplén. Estas derivaciones permitirán que la descarga de arenas sobre el muro sea uniforme en toda su longitud. El esquema de las derivaciones de descarga de arenas se muestra a continuación.



**Figura 77.** Esquema de derivaciones de descarga de arenas.

La derivación iniciará con una tubería de 6 pulgadas de 1.5 metros de longitud que enviará las arenas hacia una tubería de 4 pulgadas de 30 metros de longitud, esta tubería contará con 16 boquillas de descarga de 35 milímetros de diámetro. Para minimizar las pérdidas por fricción a través de estas tuberías el material de revestimiento interno será poliuretano el cual tiene una rugosidad absoluta de 0.0015 mm.

La tubería de 6 pulgadas contará con un juego de válvulas cuchilla y pinch que permitirán la apertura y cierre de la derivación así como la modulación del flujo durante la operación.

Como se indicó anteriormente se desea descargar las arenas en cuatro zonas, operando una zona a la vez con una longitud de 250 metros cada una. Por lo tanto, cada zona contará con 8 derivaciones de descarga por lado haciendo un total de 16 derivaciones abiertas para cada zona.

A continuación se realizó el procedimiento de selección del diámetro más adecuado para la tubería troncal de transporte de arenas. Posteriormente se realizará el análisis de pérdidas por fricción en el sistema.

### 13.1 Selección del material de tubería

Se seleccionaron preliminarmente tuberías de acero electro soldadas (ERW) API 5L grado A25 de clase STD (espesor de pared 9.53 mm) con revestimiento interno de 12 mm de caucho para reducir el desgaste. Luego de determinar la presión de operación y el diámetro adecuado se realizará la verificación del material y el espesor de la tubería.

### 13.2 Diámetros tentativos de tubería

El flujo de diseño será el flujo total proveniente del cajón CJ-04 es de 1326 m<sup>3</sup>/h.

Inicialmente se plantearon tres alternativas de diámetro, las cuales se determinaron buscando una velocidad de flujo superior a 2.5 m/s.

Las alternativas planteadas y sus velocidades de flujo se muestran a continuación:

Tabla 59: Alternativas de diámetro para la línea desde el CJ-04 a la descarga final en la presa de relaves.

Nro Alternativa	Diámetro nominal	Diámetro interior	Espesor revestimiento	Diámetro interior final	Velocidad
Alternativa 1	14 pulg	337 mm	12 mm	313 mm	4.79 m/s
Alternativa 2	16 pulg	387 mm	12 mm	363 mm	3.56 m/s

Alternativa 3	18 pulg	438 mm	12 mm	414 mm	2.74 m/s
---------------	---------	--------	-------	--------	----------

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 13.3 Verificación de la velocidad de deposición

Posteriormente se realizó la verificación de la velocidad de deposición para cada alternativa utilizando el método Wasp.

En el siguiente cuadro se muestran las velocidades de deposición obtenidas para cada alternativa comparada con la velocidad de flujo.

Tabla 60: Velocidades de deposición para cada alternativa.

N° Alternativa	Velocidad de flujo	Velocidad de deposición	Relación V/Vd
Alternativa 1	4.79 m/s	2.50 m/s	1.92
Alternativa 2	3.56 m/s	2.62 m/s	1.36
Alternativa 3	2.74 m/s	2.74 m/s	1.00

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse las dos primeras alternativas tienen una velocidad de flujo superior a su velocidad de deposición. Por otro lado, la tercera alternativa tiene una velocidad igual a la velocidad de deposición lo cual incrementará el riesgo de sedimentación de la línea por lo tanto se descartará esta alternativa para el resto del análisis.

### 13.4 Gradiente hidráulico en la línea troncal

Al igual que en los casos anteriores se compararon dos análisis: el primero considerando flujo homogéneo y el segundo considerando flujo heterogéneo para cada alternativa. Luego de este análisis se consideró la más crítica.

#### 13.4.1 Gradiente hidráulico para flujo homogéneo

En el siguiente cuadro se muestran los gradientes hidráulicos obtenidos para cada alternativa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo descrito en las líneas de transporte anteriores:

Tabla 61: Gradiente hidráulico calculado para flujo homogéneo.

Nro Alternativa	Factor de fricción fD	Gradiente hidráulico (mcp/m)	Gradiente hidráulico (mca/m)
Alternativa 1	0.0179	0.067	0.118
Alternativa 2	0.0183	0.033	0.058

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 13.4.2 Gradiente hidráulico para flujo heterogéneo

El análisis de flujo heterogéneo se realizó de acuerdo al método desarrollado por Wasp.

#### Grupos de partícula

Los grupos de partícula fueron los mismos a los grupos empleados para el diseño de la línea hacia la primera etapa de ciclones. Sin embargo, al utilizar la granulometría del underflow de la segunda etapa los porcentajes pasantes variaron como se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla 62: Grupos de partícula para cálculo de pérdidas por flujo heterogéneo.

Malla Tyler	Tamaño promedio	% Pasante
Menor a 100	0.149 mm	54.45 %
De 100 a 200	0.112 mm	28.95 %
Mayor a 200	0.074 mm	16.60 %
TOTAL		100%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en el cuadro luego de atravesar por las dos etapas de clasificación las arenas cuentan con un gran porcentaje de partículas gruesas.

#### Resumen de resultados

En el siguiente cuadro se muestran los gradientes hidráulicos obtenidos bajo la condición de flujo heterogéneo para cada alternativa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo descrito con anterioridad.

Tabla 63: Gradiente hidráulico total para cada alternativa.

N° Alternativa	Factor de fricción $fD$	Gradiente hidráulico (mcp/m)	Gradiente hidráulico (mca/m)
Alternativa 1	0.0238	0.089	0.157
Alternativa 2	0.0242	0.043	0.763

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Haciendo una comparación entre los resultados de flujo homogéneo vs los resultados de flujo heterogéneo se puede observar que la condición de flujo heterogéneo presenta mayores gradientes hidráulicos lo que se reflejará en mayores pérdidas primarias en el sistema. Por lo tanto se asumirá esta condición para la selección final del diámetro de tubería.

### 13.5 Selección del diámetro final de tubería

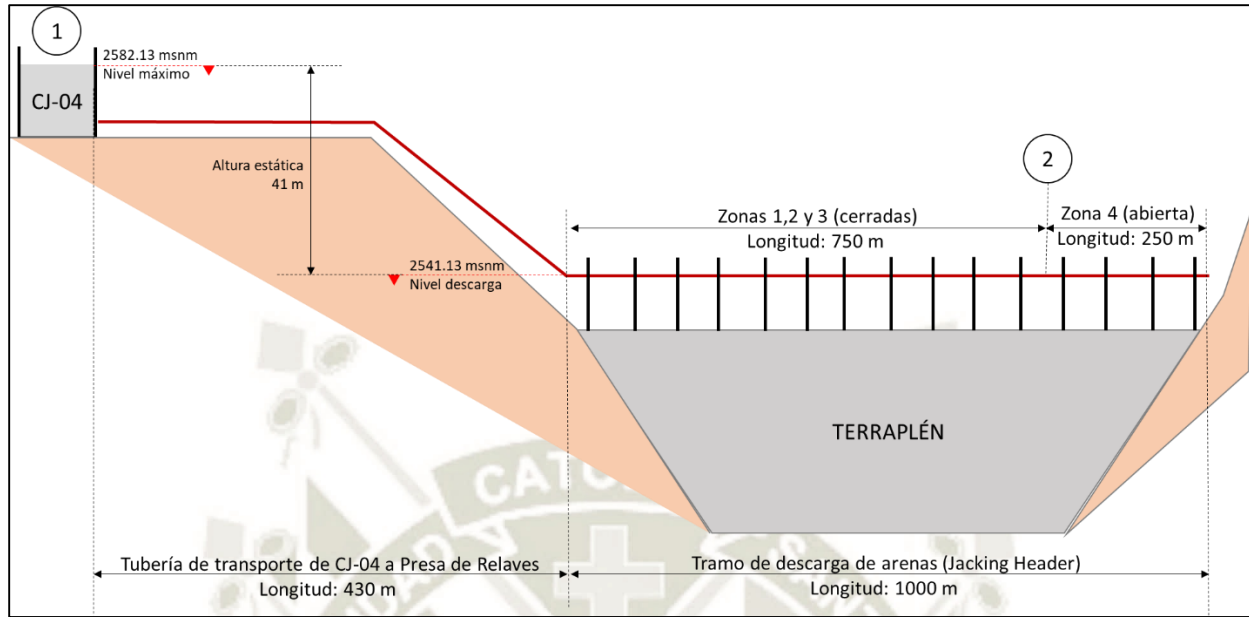
En base al gradiente hidráulico calculado para cada alternativa se seleccionó la tubería de 16 pulgadas que para el flujo de diseño ( $1326 \text{ m}^3/\text{h}$ ) ocasionará las menores pérdidas totales.

### 13.6 Análisis hidráulico del sistema

El análisis hidráulico se realizó considerando la condición más crítica de operación, es decir, cuando se descargan las arenas en la zona más alejada (zona cuatro).

Para realizar el análisis hidráulico se dividió al sistema en dos partes: La primera parte consta desde el cajón distribuidor CJ-04 hasta el inicio de la zona 4. La segunda parte consiste en la zona 4 la cual comprende los 250 metros de tubería troncal de 16 pulgadas y sus 16 derivaciones de descarga abiertas.

El objetivo de dividir el sistema en dos partes es el de simplificar el análisis determinando primero la presión de descarga requerida al inicio de la zona cuatro y utilizar esa presión como dato de entrada en la ecuación de Bernoulli del sistema.

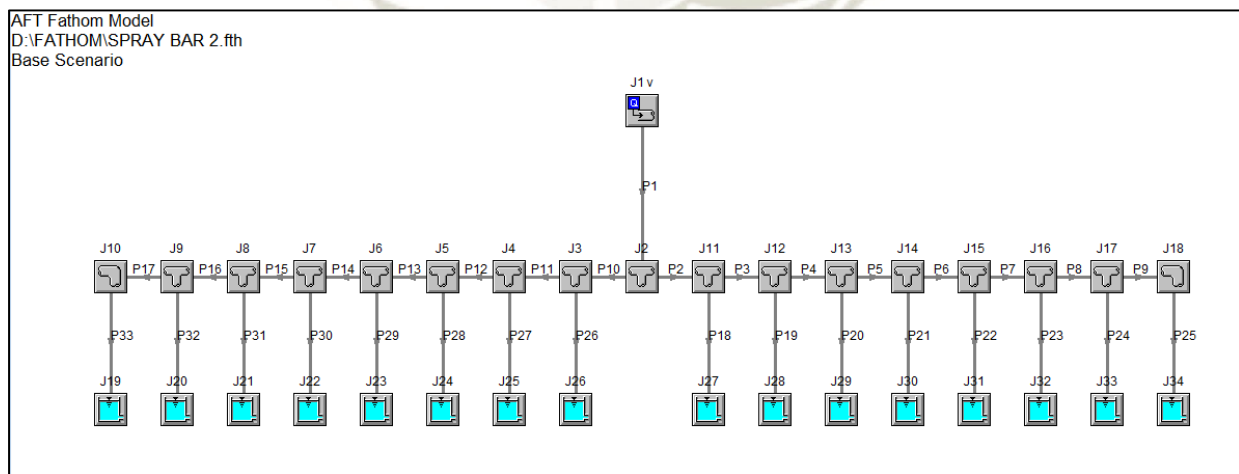


**Figura 78:** Análisis del sistema de descarga de arenas en dos partes.

### 13.6.1 Presión requerida al inicio de la zona cuatro

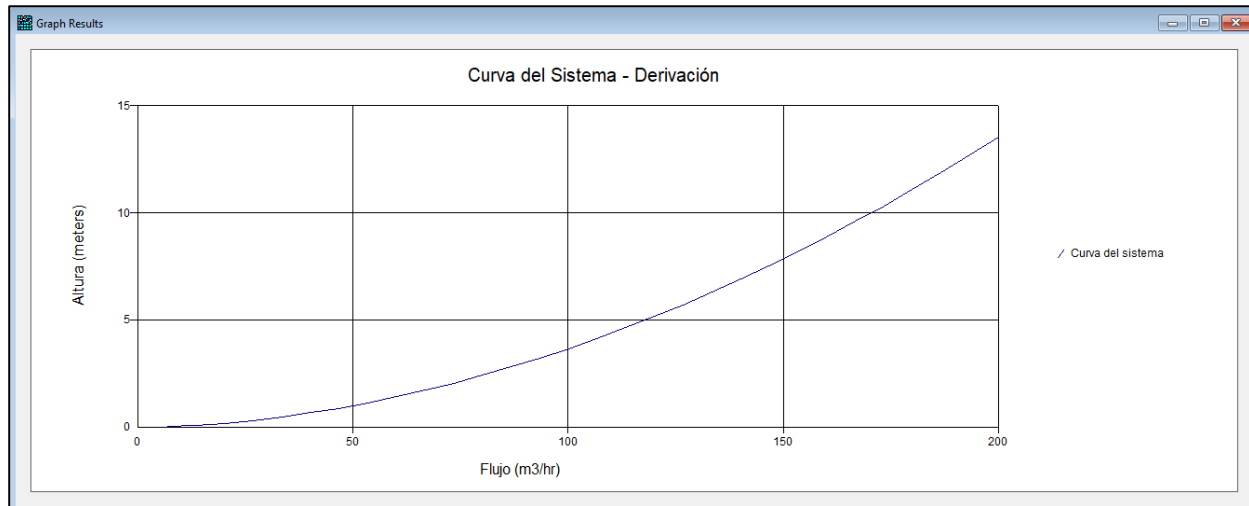
La presión al inicio de la zona cuatro debe ser suficiente para garantizar un flujo total de descarga de 1326 m<sup>3</sup>/h (flujo de diseño).

Al tratarse de un sistema de redes de tubería que requiere de múltiples iteraciones y depende directamente del flujo volumétrico que ingresará a cada derivación se realizó el modelo de una derivación utilizando el software AFT Fathom para determinar así su curva de funcionamiento.



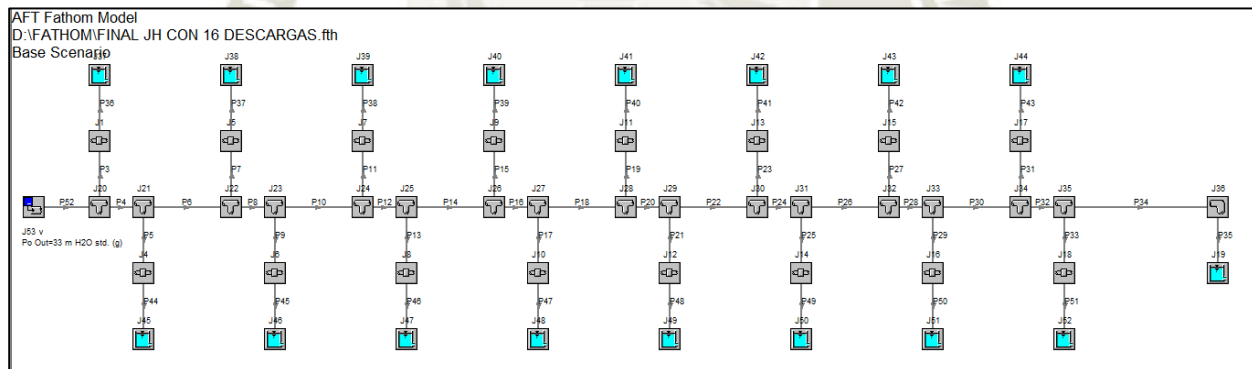
**Figura 79:** Modelado en AFT Fathom para una derivación de descarga de arenas.

Luego de modelada la derivación se obtuvo su curva de operación Altura vs Flujo.



**Figura 80:** Curva de operación – derivación de descarga de arenas.

Con los datos de la curva de operación obtenida para cada derivación se realizó el modelo de la zona cuatro de descarga con 16 derivaciones abiertas.



**Figura 81:** Modelado de la zona cuatro de descarga de arenas.

Obteniendo que la presión requerida al inicio de la zona cuatro para poder descargar un flujo total de 1326 m<sup>3</sup>/hr es de 30 mca (18.7 mcp).

### 13.6.2 Cálculo de pérdidas desde el CJ-04 hasta el inicio de la zona cuatro

Luego de haber obtenido la presión necesaria al inicio de la zona cuatro se estimaron las pérdidas primarias en la tubería troncal de 16 pulgadas desde la descarga del cajón CJ-04 hasta el inicio de la zona cuatro.

Habiendo calculado el gradiente hidráulico para cada alternativa las pérdidas primarias se calcularon multiplicando el gradiente hidráulico por la longitud de la tubería. En este caso la línea tendrá una longitud de 1180 metros. Multiplicando la longitud por el gradiente hidráulico hallado anteriormente se tiene que las pérdidas primarias desde el CJ-04 hasta el inicio de la zona cuatro son de 50.74 mcp

Para calcular las pérdidas de carga debido a los accesorios se utilizó el método de los coeficientes de pérdida, para ello se muestran a continuación la lista de accesorios a utilizar en la línea así como sus coeficientes de pérdida.

Tabla 64: Cantidad de accesorios y coeficiente de pérdidas.

Accesorio	Cantidad	Coefficiente de pérdidas por accesorio (k)
Boquilla de descarga de CJ-04	1	0.5
Codo de 45°	10	0.07
Codo de 90° 5D	1	0.13
Válvula cuchilla	8	0.03

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Para determinar las pérdidas ocasionadas por cada accesorio se utilizó la Ec. 2.65

$$H_{ps} = \sum K \cdot \left( \frac{V^2}{2 \cdot g} \right)$$

Obteniendo como resultado que las pérdidas secundarias por accesorios son de 1.01 mcp.

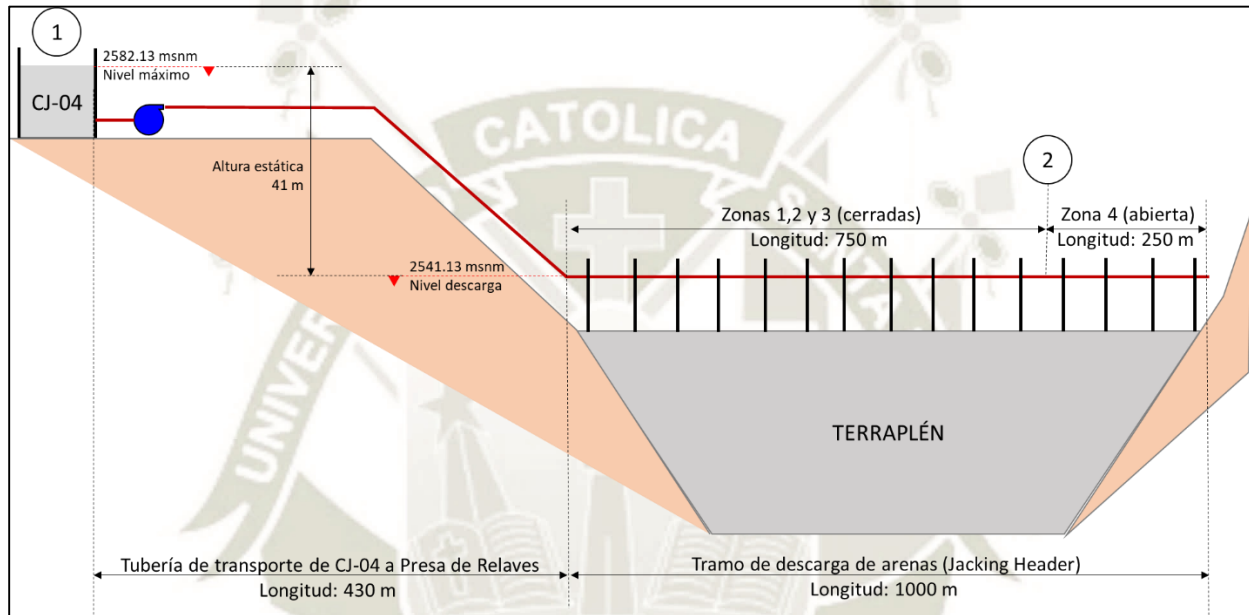
Finalmente, las pérdidas totales en el sistema son:

$$50.74 + 1.01 = 51.75 \text{ mcp}$$

A priori se puede observar que las pérdidas ocasionadas desde el CJ-04 hasta el inicio de la zona cuatro son mayores que la altura estática existente en el sistema (41 mcp). Esto indica que será necesaria la implementación de una bomba.

### 13.7 Selección de la bomba para pulpas

El esquema del sistema incluyendo la bomba para pulpas será el siguiente:



**Figura 82:** Esquema final transporte de arenas desde CJ-04 hacia presa de relaves.

#### 13.7.1 Altura de la bomba

Luego de haber seleccionado el diámetro de la tubería se calculó la altura de impulsión requerida de la bomba utilizando la adaptación de la ecuación de Bernoulli para sistemas de bombeo de acuerdo a la Ec. 2.66

$$H_B = (P_2 - P_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + H_{pp} + H_{ps}$$

Donde:

- Diferencia de presiones ( $P_2 - P_1$ ) : 18.7 mcp
- Velocidad en el Punto 1 ( $V_1$ ) : 0 m/s
- Velocidad en el Punto 2 ( $V_2$ ) : 3.56 m/s
- Altura estática ( $Z_2 - Z_1$ ) : - 41 mcp

- Altura de pérdidas primarias ( $H_{pp}$ ) : 50.74 mcp
- Altura de pérdidas secundarias ( $H_{ps}$ ) : 1.01 mcp

Resolviendo la ecuación se obtiene que:

- Altura de bombeo ( $H_B$ ) : 30.1 mcp (53.2 mca)

Esta altura representa la altura de bombeo máxima que se requerirá cuando se desee descargar las arenas en la zona cuatro de la presa de relaves e irá disminuyendo conforme la descarga se realice en zonas intermedias o al inicio de la presa.

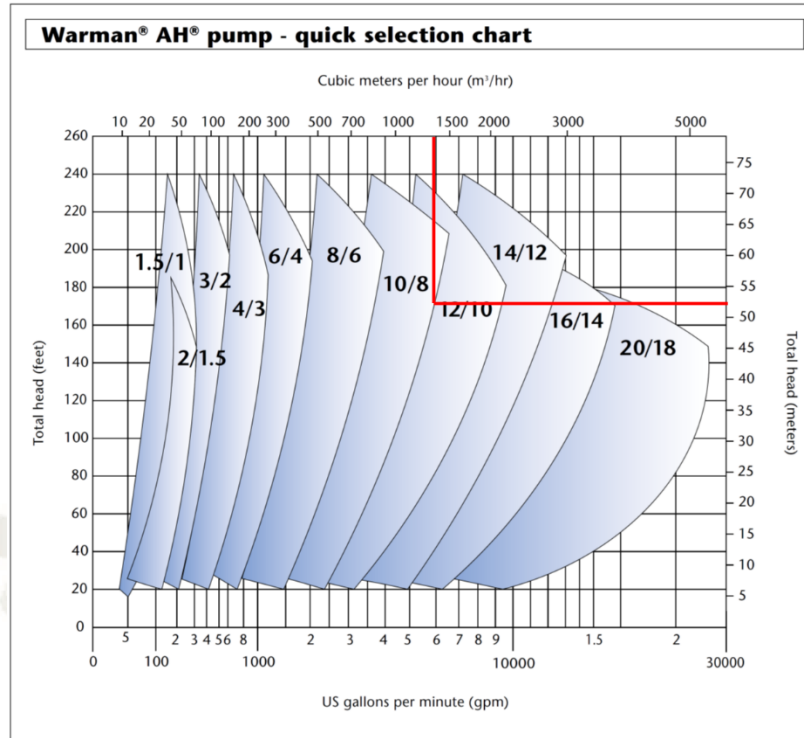
Debido a que la altura de bombeo durante operación es variable, será necesario utilizar un variador de frecuencia en el motor de la bomba que permita variar las RPM de operación de la bomba a fin de obtener un flujo constante de operación.

### 13.7.2 Selección de la bomba de arenas

De acuerdo a los manuales de selección de Warman por las condiciones de la pulpa a transportar y el diámetro de tubería a emplear se recomienda utilizar bombas tipo AH (carcasa partida y camisas reemplazables).

Adicionalmente, debido a la alta concentración y tamaño de partículas de las arenas a transportar será necesario que se cuente con revestimiento de caucho en la carcasa.

Con los datos de flujo ( $1326 \text{ m}^3/\text{h}$ ) y altura de bombeo máxima (53.2 mca) se puede seleccionar preliminarmente un modelo de bomba:



**Figura 83:** Gráfico de selección preliminar de Warman para modelos de bomba [11].

De acuerdo a los resultados del gráfico de selección preliminar el modelo más adecuado es el 12/10 AH. En la siguiente figura se muestran las curvas de operación para el modelo 12/10 AH.

	<b>PUMP SIZE</b>	<b>FRAME</b>	<b>KW RATING</b>	5 CLARKE STREET SOUTH, ALRODE, ALBERTON 1449 P.O. BOX 17672 RANDHART 1487 TEL: (811) 617-8788 E-MAIL: pumpsales@warman.co.za		<b>PUMP PERFORMANCE CURVE REFERENCE</b>  <b>WPA 1210A01</b>  Reprinted February 2000
	<b>12/10</b>	<b>F</b>	<b>260</b>			
	<b>TYPE</b>	<b>FF</b>	<b>425</b>			
	<b>AH</b>	<b>G*</b>	<b>690</b>			
		<b>GG</b>	<b>900</b>	<b>IMPELLER G10147 or FAM10147</b>		<b>LINER</b>
		<b>VANES</b>	<b>TYPE</b>	<b>MAT'L</b>	<b>VANE Ø</b>	<b>MAT'L</b>
		<b>5</b>	<b>CLOSED</b>	<b>METAL</b>	<b>762</b>	<b>METAL</b>
COPYRIGHT © RESEARCH AND DEVELOPMENT PTY LTD WE RESERVE THE RIGHT TO MODIFY OR DELETE IMPELLERS WITHOUT PRIOR NOTICE.				<b>GLAND SEAL PUMP</b>		
				<small>POWER CONSUMED MAY INCREASE BY 5% WITH CONSTANT SEAL.</small>		
CURVE SHOWS APPROXIMATE PERFORMANCE FOR CLEAR WATER (IN ACCORDANCE WITH PUMP TESTING ISO2548 CLASS C). FOR MEDIA OTHER THAN WATER, CORRECTIONS MUST BE MADE FOR DENSITY, VISCOSITY AND/OR THE PRESENCE AND EFFECTS OF SOLIDS.				<b>NORM MAX RPM</b>		<b>MIN PASSAGE SIZE</b>
				<b>900</b>		<b>86 mm</b> <b>SPHERE</b>
<small>* Indicated standard frame size fitted, refer to Head Office for availability of frame sizes quoted, other than standard. Operating pressure over maximum speed only in Head Office. Rated kilowatts is the maximum that any particular bearing assembly can transmit and is not the maximum motor frame size that can be fitted to any particular bearing assembly.</small>						

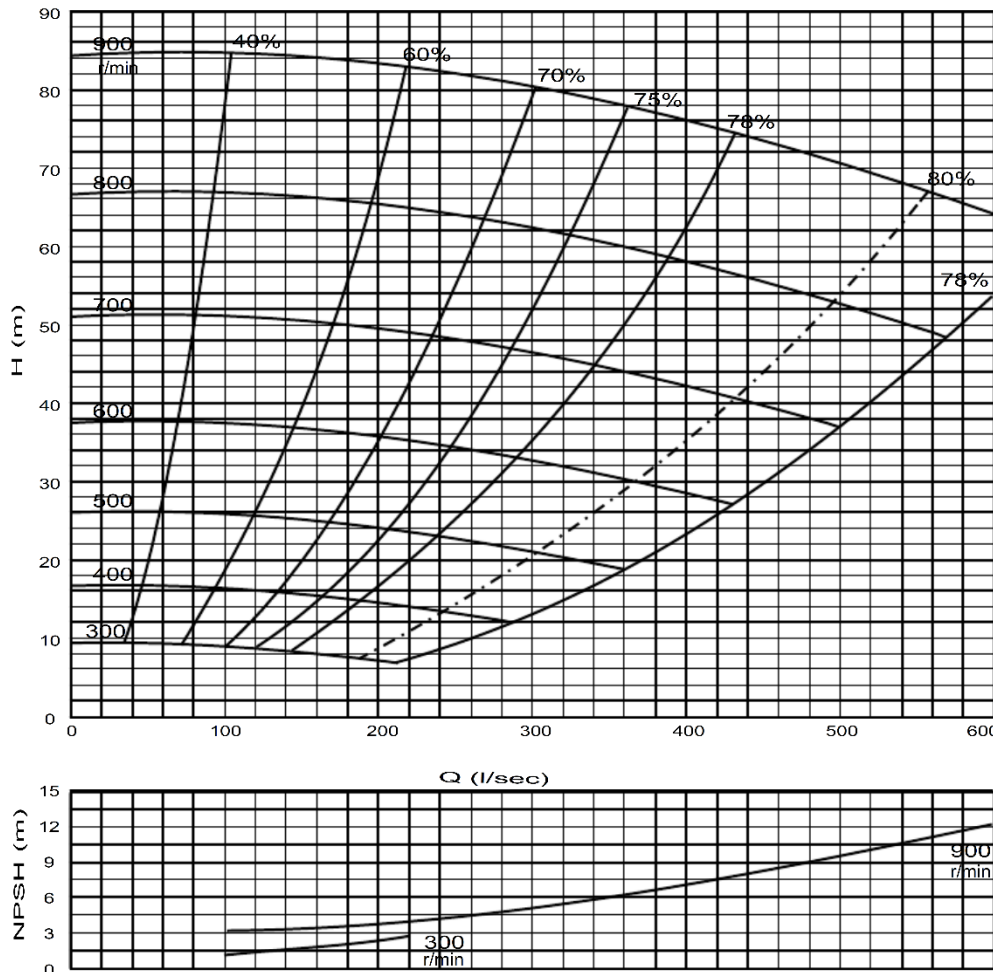
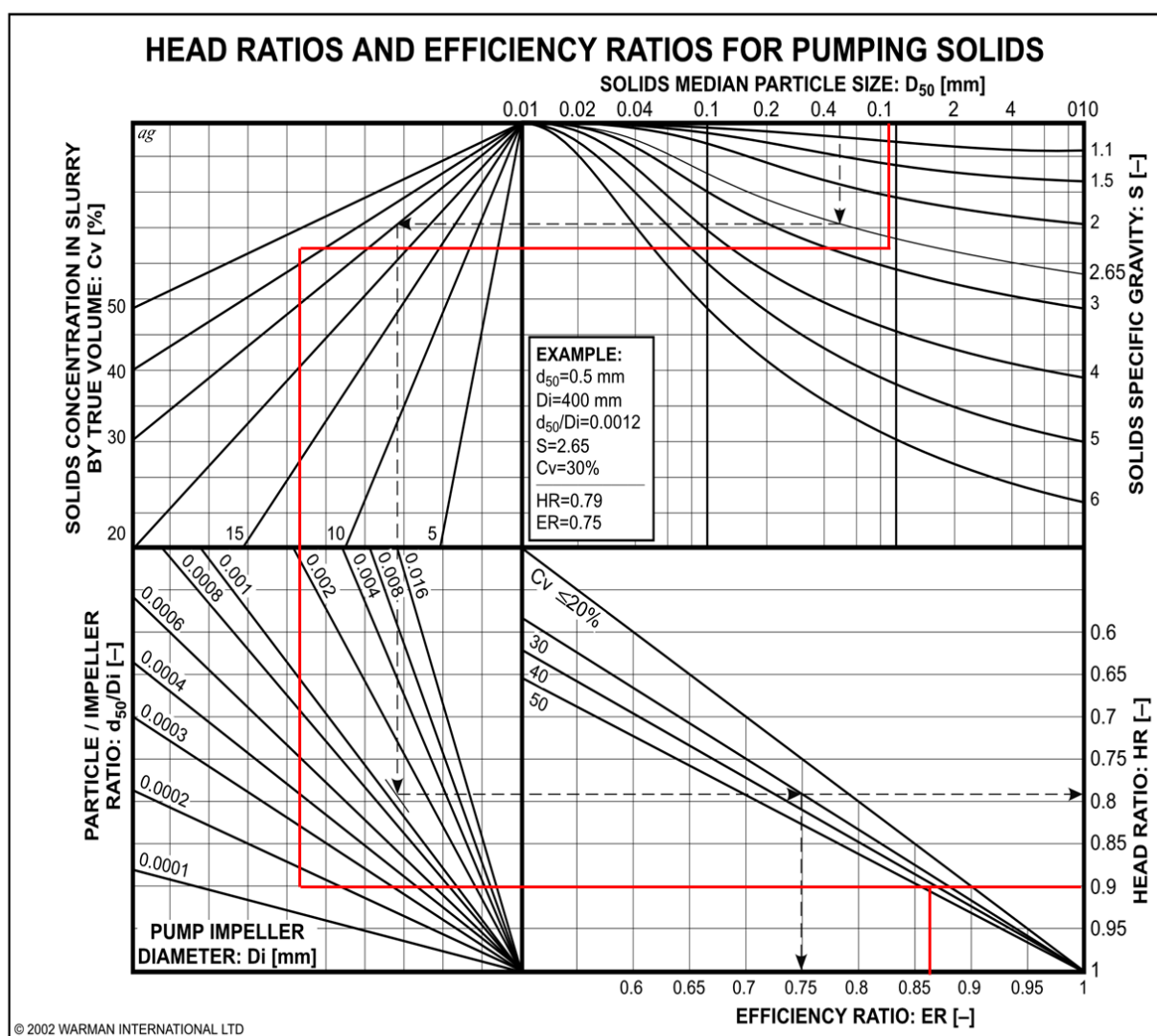


Figura 84: Curva de operación bomba centrífuga Warman 12/10 AH [27].

### 13.7.3 Coeficientes de presión y eficiencia

Una vez escogido el modelo de la bomba se calcularon los coeficientes de presión y eficiencia para las características del relave a transportar utilizando la gráfica proporcionada por Warman con los siguientes datos de entrada:

- Tamaño de partícula  $d_{50}$  : 0.135 mm
- Gravedad específica de sólidos : 2.7
- Concentración en volumen : 45.2%
- Diámetro del impulsor de la bomba : 762 mm



**Figura 85:** Estimación de los coeficientes de presión y eficiencia [10].

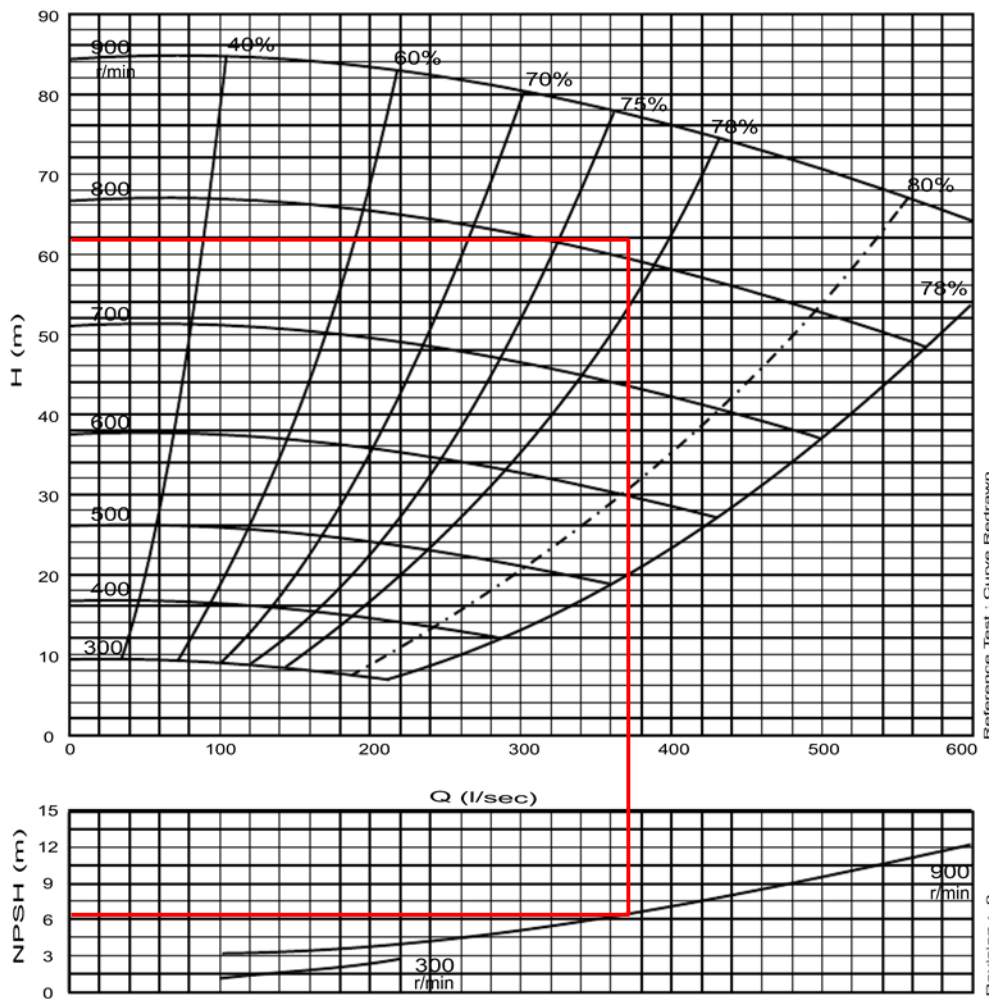
Los coeficientes de presión y eficiencia para la bomba serán 0.86 y 0.9 respectivamente.

### 13.7.4 Punto de operación máximo de la bomba

Dividiendo la altura de bombeo calculada anteriormente por el coeficiente de presión de la bomba obtenemos la altura corregida de la bomba 12/10 AH.

$$\frac{53.2 \text{ mca}}{0.86} = 61.9 \text{ mca}$$

Con la altura corregida de 61.9 mca y el flujo de 1326 m<sup>3</sup>/h (368 L/s) ubicamos el punto de operación máximo de la bomba. Como se mencionó anteriormente la altura y el punto de operación podrán disminuir conforme a los requisitos de descarga de arenas.



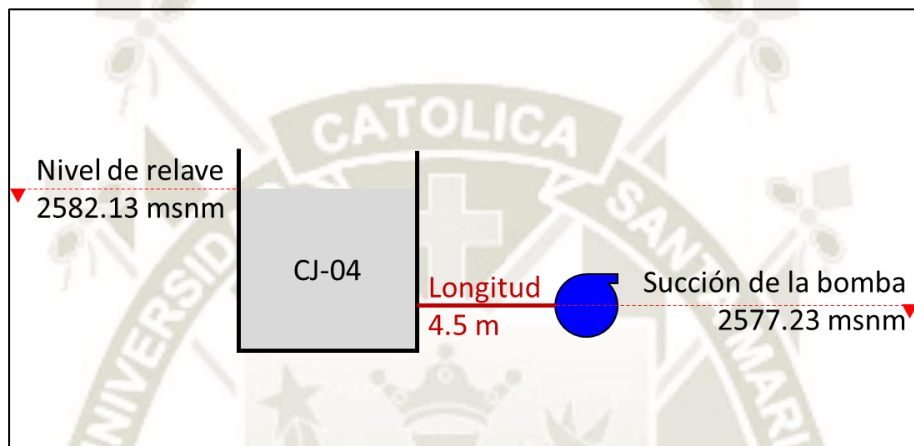
**Figura 86:** Punto de operación de la bomba de arenas.

Para el punto de operación máximo se tienen las siguientes características de funcionamiento:

- Eficiencia teórica : 77 %
- Eficiencia corregida : 69.3 %
- NPSH requerido : 6.5 mca

### 13.7.5 Cálculo del NPSH disponible en el sistema

El esquema de instalación para la succión de la bomba será el siguiente:



**Figura 87:** Esquema succión de la bomba de arenas.

### Pérdidas en la succión

La longitud de la tubería de succión será de 4.5 metros, por lo que las pérdidas en el tramo de succión pueden estimarse multiplicando la longitud por el gradiente hidráulico de 0.043 mcp/m dando como resultado unas pérdidas por fricción en la succión de 0.19 mcp.

Por otro lado las pérdidas por accesorios se resumen en el siguiente cuadro:

Tabla 65: Pérdidas por accesorios en la succión de la bomba.

Accesorio	Cantidad	Coefficiente de pérdidas por accesorio (k)	Pérdidas mcp
Boquilla de descarga de CJ-04	1	0.5	0.33
Reducción ingreso a bomba	1	0.31	0.20
Válvula cuchilla	1	0.03	0.02
TOTAL			0.55

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto las pérdidas totales en la succión serán de 0.74 mcp.

Para calcular el NPSH disponible en el sistema se utilizó la Ec. 2.67

$$NPSH_d = P_{atm} - P_v - H_{psucción} + Z_{succión}$$

Donde:

- Presión atmosférica ( $P_{atm}$ ) : 4.22 mcp (7.06 mca)
- Presión de vapor ( $P_v$ ) : 0.24 mcp (0.43 mca)
- Pérdidas en la succión ( $H_{psucción}$ ) : 0.74 mcp
- Altura de succión ( $Z_{succión}$ ) : 4.9 mcp

Resolviendo la ecuación se obtiene:

- NPSH disponible : 8.14 mcp (14.4 mca)

El NPSH disponible es mayor que el requerido por lo tanto no se tendrán problemas de cavitación en la bomba.

### 13.7.6 Cálculo de potencia

El cálculo de la potencia de la bomba se realizó de acuerdo a la Ec. 2.69

$$P_{Bomba} = \frac{Q \cdot H_B \cdot S_m \cdot g}{\eta}$$

Donde:

- Flujo de operación : 0.37 m<sup>3</sup>/s
- Altura de bombeo corregida : 61.9 mca
- Densidad relativa de la pulpa : 1.77
- Eficiencia de la bomba corregida : 69.3%

Resolviendo la ecuación se tiene:

- Potencia de la bomba : 574 kW

La potencia del motor eléctrico se calculó utilizando la Ec. 2.70

$$P_{Motor} = \frac{P_{Bomba}}{\eta_{Motor} \cdot F_{Der} \cdot \eta_{Trans}}$$

Donde:

- Potencia de la bomba : 574 kW
- Eficiencia del motor : 94%
- Factor de derrateo @2580 msnm : 0.9
- Eficiencia de transmisión : 100% (acople directo)

Resolviendo la ecuación se tiene:

- Potencia del motor : 679 kW

### 13.7.7 Sistema de agua de sello

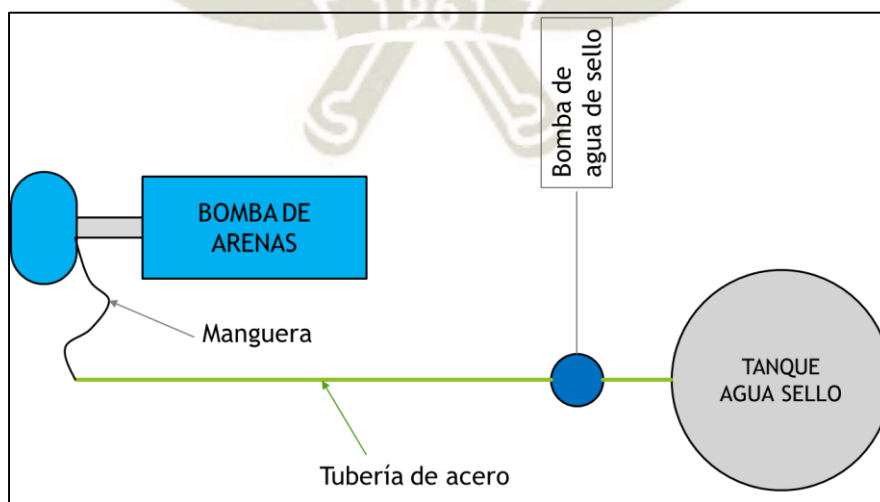
De acuerdo a las especificaciones del fabricante de la bomba seleccionada, este tipo de bombas utilizan agua como sistema de sello entre el impulsor y el eje de la bomba.

El sistema de agua de sello consta de un tanque de almacenamiento de agua filtrada que alimenta a una bomba y envía el agua a través de una tubería hasta el prensa estopas de la bomba de arenas.

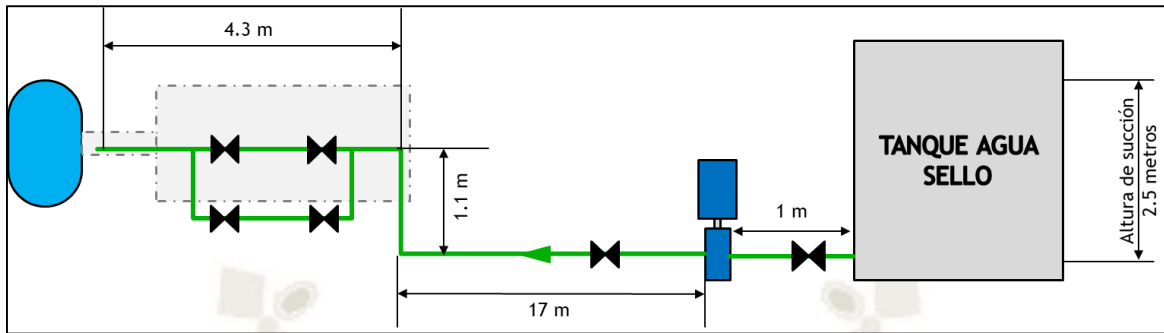
Para el dimensionamiento de las tuberías y la selección de la bomba de agua de sello se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Flujo requerido máximo : 10 m<sup>3</sup>/h
- Presión de descarga en prensa estopas : 15 psi por encima de la descarga de la bomba de arenas
- Presión de descarga : 103 psi (72.5 mca)

El esquema de la instalación se muestra en la siguiente figura:



**Figura 88:** Vista de planta Sistema de agua de sello.



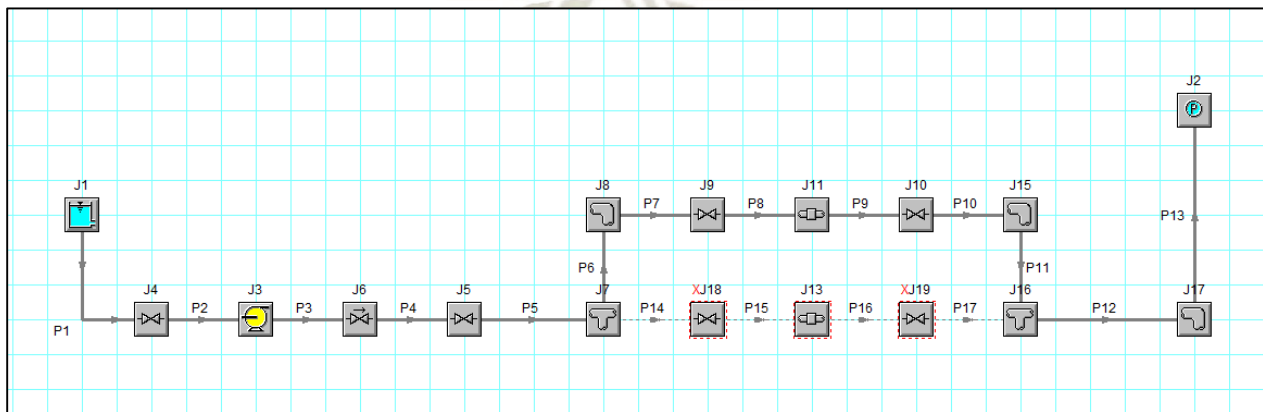
**Figura 89:** Vista frontal Sistema de agua de sello.

Como puede apreciarse en las figuras la línea de descarga tendrá una longitud de 22.5 metros mientras que la línea de succión de 1 metro. Se contarán con válvulas de bola en la succión y descarga de la bomba, además de una válvula check en la descarga.

El tramo final contará con un sistema en paralelo que constará de dos líneas equipadas con válvulas de bola al inicio y fin y un filtro tipo strainer en cada una de las líneas. Esto para permitir el cambio de filtros sin necesidad de detener el bombeo de agua de sello.

El diámetro de la tubería se seleccionó de acuerdo al acople para la manguera ubicada en el prensaestopas, en este caso se seleccionó un diámetro de tubería de dos pulgadas STD en acero API 5L A53 gr B.

Con los requerimientos indicados anteriormente y de acuerdo a las dimensiones mostradas en los esquemas se realizó el análisis hidráulico del sistema utilizando el software AFT Fathom Versión 7.



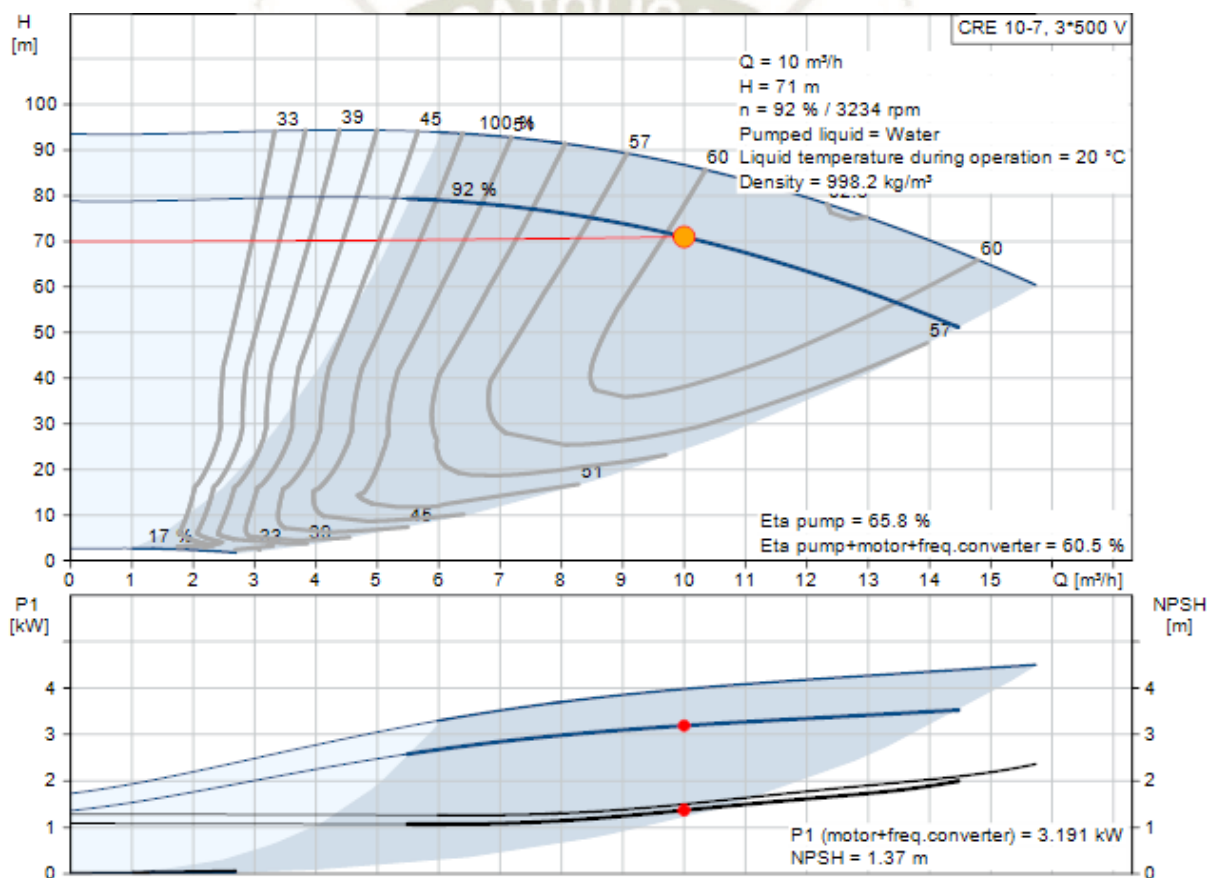
**Figura 90:** Modelado del sistema de agua de sello en AFT Fathom.

El análisis del sistema arrojó los siguientes resultados para la selección de la bomba:

Jct	Name	Vol. Flow (m <sup>3</sup> /hr)	dP (m H <sub>2</sub> O std.)	dH (meters)	NPSHA (meters)
2	Pump	10.00	70.96	71.08	12.57

**Figura 91:** Resultados para selección de bomba de agua de sello.

Con los resultados obtenidos para la selección de la bomba se obtuvo el punto de operación para una bomba vertical multietápica de la marca Grundfos.



**Figura 92:** Curva de operación vs Curva del sistema de la bomba.

Con ayuda de la herramienta de selección proporcionada por el fabricante se obtuvieron las siguientes especificaciones para la bomba seleccionada:

- Marca / Modelo : Grundfos / CRE 10-7
- Flujo de operación : 10 m<sup>3</sup>/hr

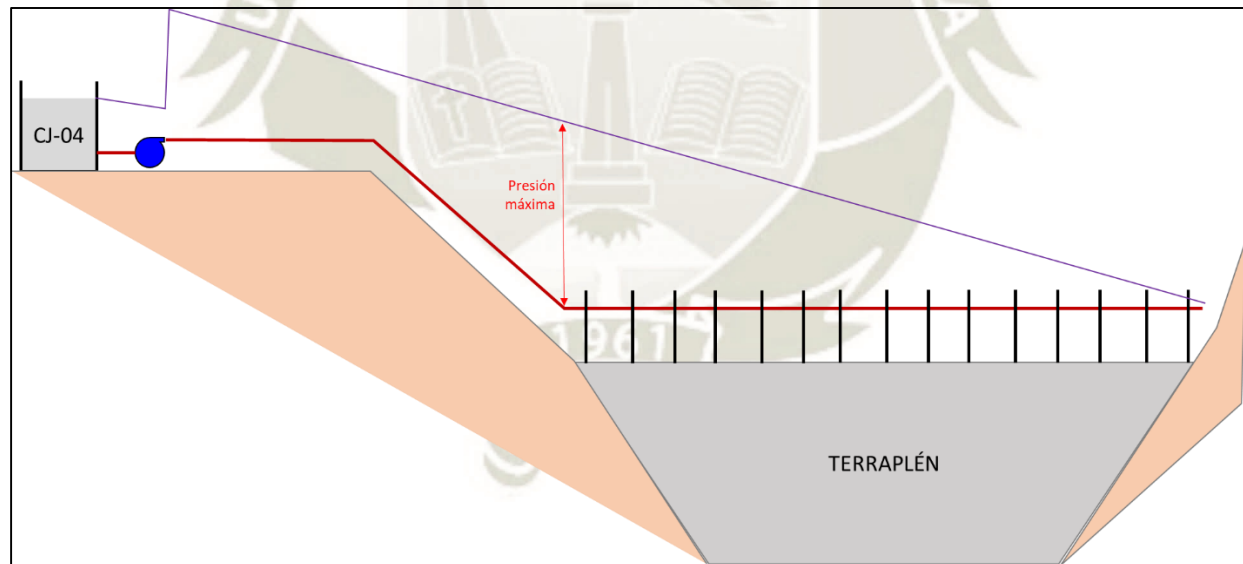
- Presión de descarga : 71 mca
- NPSH disponible : 12.57 mca
- NPSH requerido : 1.37 mca
- Velocidad de giro : 3234 rpm
- Potencia req. del motor eléctrico : 3.19 kW
- Eficiencia de la bomba : 65.8 %

Por último cabe mencionar que se seleccionó el modelo equipado con un variador de frecuencia que permita regular el flujo y la presión entregados en el sistema, ya que al ser un sistema auxiliar sus parámetros de operación dependerán de las condiciones de operación de la bomba de arenas.

### 13.8 Verificación del espesor de la tubería

#### Presión máxima de la línea

Para determinar la presión máxima que soportará la línea es necesario graficar el perfil hidráulico:



**Figura 93:** Perfil hidráulico del sistema de descarga de arenas.

La línea morada representa el gradiente de presión a lo largo de la línea. La presión en la línea puede medirse restando el nivel de la línea de color morado menos el nivel de la tubería.

Al inicio del recorrido la presión en la línea de succión será la altura estática que aporta el nivel del relave en el cajón e irá cayendo a causa de las pérdidas de la línea hasta llegar a la bomba.

Como consecuencia de la acción de la bomba la presión se incrementará hasta 30.1 mcp e irá cayendo a causa de las pérdidas de la línea de descarga. Sin embargo, conforme la tubería va descendiendo por la quebrada la línea irá ganando presión estática lo cual incrementará la presión en la línea alcanzando una presión máxima en el punto inicial de la presa. Luego la presión seguirá descendiendo a causa de las pérdidas hasta alcanzar el nivel de la tubería en el punto de descarga (presión atmosférica).

La presión máxima puede calcularse utilizando la ecuación de Bernoulli para sistemas de bombeo tomando como punto inicial el nivel superior del CJ-04 y punto final el punto de presión máxima identificado en el perfil hidráulico. Utilizando la Ec. 2.66

$$H_B = (P_2 - P_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + H_{pp} + H_{ps}$$

Donde:

- Altura de bombeo ( $H_B$ ) : 30.1 mcp
- Presión en el punto 1 ( $P_1$ ) : 0 mcp
- Velocidad en el Punto 1 ( $V_1$ ) : 0 m/s
- Velocidad en el Punto 2 ( $V_2$ ) : 3.56 m/s
- Altura estática ( $Z_2 - Z_1$ ) : - 41 mcp
- Altura de pérdidas primarias ( $H_{pp}$ ) :  $0.043 \frac{mcp}{m} \cdot 430 m = 18.5 mcp$
- Altura de pérdidas secundarias ( $H_{ps}$ ) : 1.01 mcp

Resolviendo la ecuación se obtiene que:

- Presión en el punto 2 ( $P_2$ ) : 50.94 mcp (90.2 mca)

Convirtiendo unidades se obtiene que la presión máxima de la línea será de 9.02 bar.

### Verificación del espesor de tubería

Finalmente, el espesor mínimo de la tubería se calculó de acuerdo a la Ec. 2.84

$$t_n = \frac{P_i \cdot D}{20 \cdot F \cdot E \cdot S_y} + t_A$$

Donde:

- Presión de diseño de la tubería ( $P_i$ ) : 9.02 bar
- Diámetro exterior de la tubería ( $D$ ) : 406 mm
- Factor de diseño ( $F$ ) : 0.8

- Factor de soldadura ( $E$ ) : 1
- Esfuerzo de fluencia acero ( $S_y$ ) : 172 MPa (API 5L gr A25)
- Tolerancia por corrosión y erosión ( $t_A$ ) : 1.5 mm

Se obtuvo que el espesor mínimo recomendado para la tubería es de 2.9 mm el cual es inferior al espesor seleccionado de 9.53 mm. Por lo tanto la tubería escogida no presentará problemas por presión en la línea.

### 13.9 Selección de válvulas y accesorios para tuberías.

#### 13.9.1 Válvulas cuchilla

Para este sistema se contará con válvulas cuchilla en la estación de bombeo de arenas y con válvulas cuchilla y válvulas pinch en la zona de descarga en la presa de relaves (Jacking Header). A continuación se muestran las especificaciones técnicas para las válvulas cuchilla empleadas en la línea del UF hacia la presa de relaves:

- Marca / Modelo : Clarkson / KGA
- Servicio : On /Off
- Tipo de conexión : Wafer
- Rating de presión : CL#150
- Manga : Caucho natural standard
- Material de la cuchilla : Acero inox 316
- Actuador : Pistón hidráulico / Volante (manual)

Al tratarse de válvulas de diámetro menor a las etapas anteriores, para este sistema se consideró la implementación de una sola unidad hidráulica para todas las válvulas ubicadas en la estación de bombeo.

En la zona de descarga de arenas (Jacking Header) se consideró la instalación de válvulas cuchilla de accionamiento manual, esto para optimizar los espacios y para reducir el consumo energético en la zona. Estas válvulas serán accionadas por personal operativo.

### 13.9.2 Válvulas Pinch

Las válvulas Pinch tienen la función de regular el flujo de salida por los spray bars y permiten una correcta distribución de las descargas en el Jacking Header. Al igual que las válvulas cuchilla se optó por seleccionar válvulas de accionamiento manual:

- Marca : Red Valves
- Servicio : Modulante
- Tipo de conexión : Bridada
- Rating de presión : CL#150
- Manga : Hule natural (NR)
- Material del cuerpo : Acero al carbono
- Actuador : Volante autolubricante (manual)

Una de las ventajas de la marca de válvulas pinch seleccionadas es la facilidad para realizar mantenimiento durante el cambio de mangas.

### 13.9.3 Flujómetros y densímetros

Se seleccionó un flujómetro de tipo magnético con visor para lectura en campo y con transmisor de señal. El flujómetro estará instalado en la línea principal de descarga. A continuación se muestran sus especificaciones:

- Marca/Modelo : Rosemount/8732
- Flujo de operación : 1326 m<sup>3</sup>/hr
- Velocidad de operación : 3.56 m/s
- Tipo de conexión : Bridada
- Rating de presión : CL#150

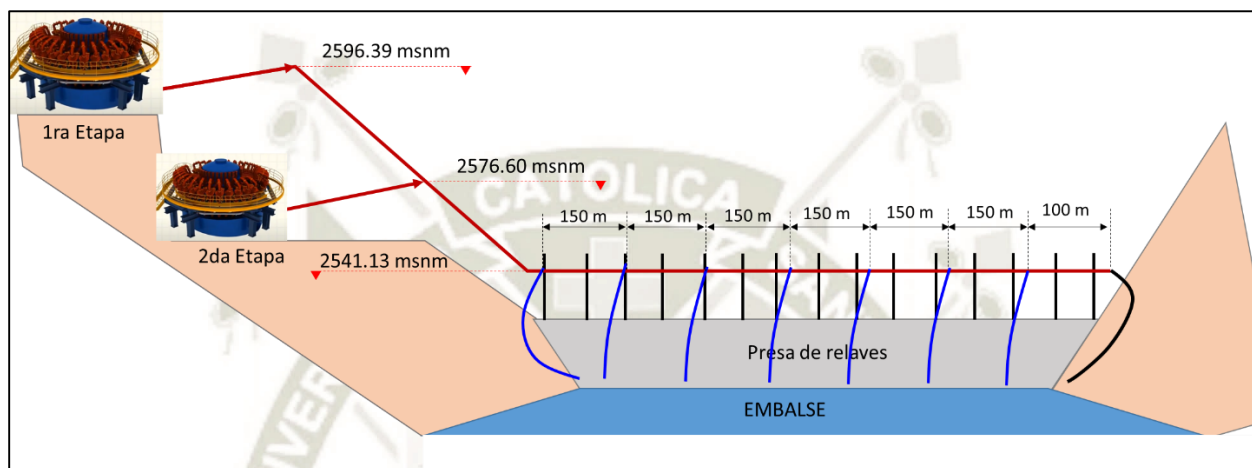
Por otro lado se seleccionó un densímetro nucleares de la marca RONAN modelo X96S de tipo no intrusivo, es decir se instalan en la parte exterior de la tubería.

### 13.9.4 Bridas y accesorios de conexión entre tuberías

Se determinó que la unión entre spools de acero se realizará utilizando bridas de tipo Slip On ASME CL#150.

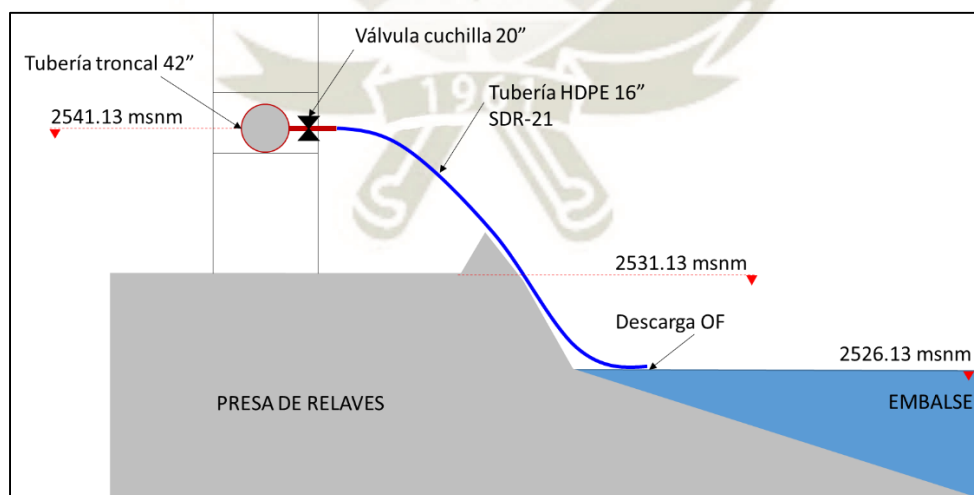
#### 14. Diseño de la línea de descarga del OF hacia la presa de relaves

Los relaves finos obtenidos del overflow de la primera y segunda etapa de clasificación serán recolectados por una tubería que los enviará hacia la presa de relaves para ser descargados hacia el embalse. Los niveles de conexión de las líneas de descarga del OF de ciclones y la línea troncal hacia la presa se muestran en el siguiente esquema:



**Figura 94:** Esquema de descarga de relaves finos OF en la presa de relaves.

A lo largo de la presa se contará con 7 puntos de descarga hacia el embalse los cuales operarán a la vez. Estos puntos estarán conformados por una derivación de 20 pulgadas seguida por una tubería de HDPE de 16 pulgadas que descargará los relaves hacia el embalse.



**Figura 95:** Esquema de descarga de OF en el embalse.

Hacia el final del Jacking Header se encontrará una manguera de 32 pulgadas que enviará el flujo remanente hacia el embalse.

### 14.1 Flujo y propiedades del relave

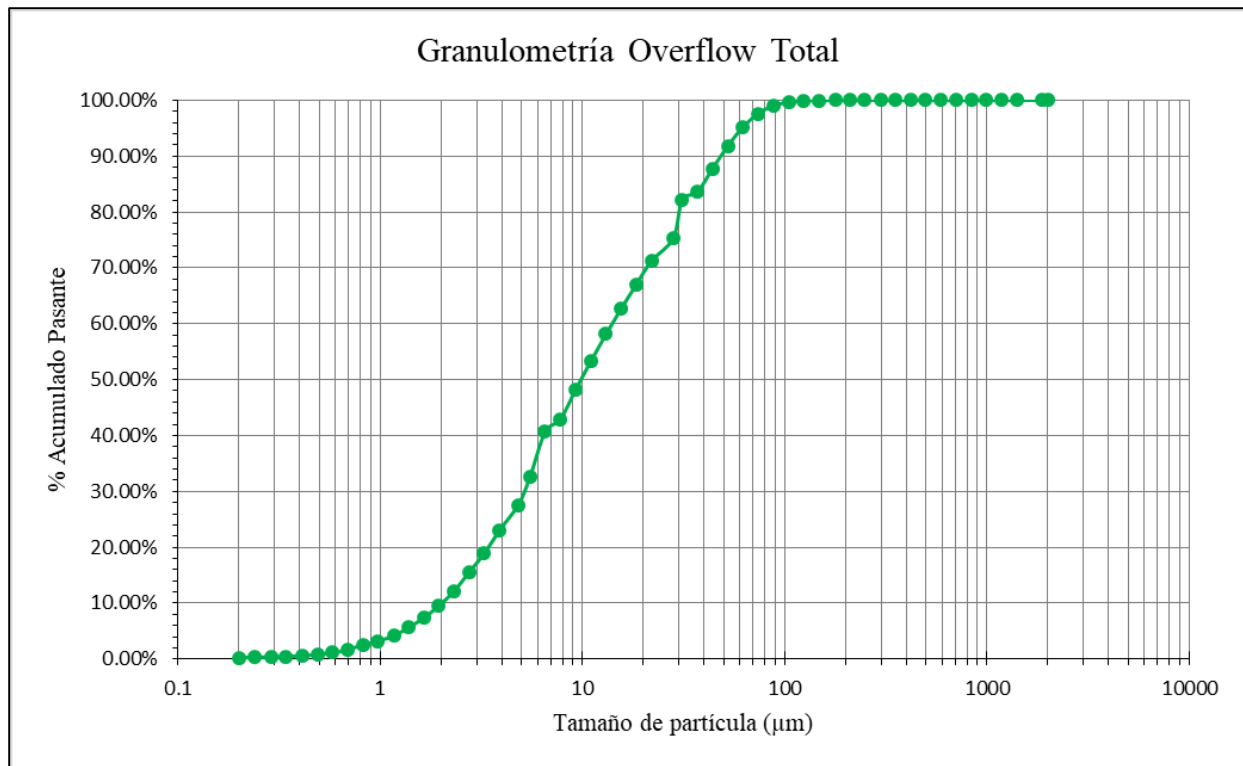
A continuación se muestran las características del overflow a ser enviado hacia la presa de relaves:

Tabla 66: Flujo y características del overflow total enviado a la presa de relaves.

Descripción	OF 1ra Etapa	OF 2da Etapa	OF Total
Flujo másico sólidos	2495.45 t/h	822.38 t/h	3317.83 t/h
Flujo agua	5453 m <sup>3</sup> /hr	2928 m <sup>3</sup> /hr	8381 m <sup>3</sup> /hr
Flujo pulpa	6368 m <sup>3</sup> /hr	3239 m <sup>3</sup> /hr	9607 m <sup>3</sup> /hr
Concentración en peso	31 %	22 %	28%
Concentración en volumen	15%	9.4 %	12.6%
Densidad pulpa	1247 kg/m <sup>3</sup>	1160 kg/m <sup>3</sup>	1217 kg/m <sup>3</sup>
Tamaño de partícula d <sub>50</sub>	8.5 μm	21 μm	9.9 μm
Viscosidad	0.00294 Pa · s	0.00201 Pa · s	0.00256 Pa · s
Tensión de fluencia	1.18 Pa	0.29 Pa	0.8 Pa

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

La granulometría total se determinó mezclando las granulometrías provenientes del OF de las etapas 1 y 2 de clasificación. La curva granulométrica obtenida se muestra a continuación:



**Figura 96:** Granulometría total del OF 1ra y 2da Etapa de clasificación.

## 14.2 Selección del material de tubería

Se seleccionaron preliminarmente tuberías de acero electro soldadas (ERW) API 5L grado A25 de clase STD (espesor de pared 9.53 mm) con revestimiento interno de 12 mm de caucho para reducir el desgaste. Luego de determinar la presión de operación y el diámetro adecuado se realizará la verificación del material y el espesor de la tubería.

## 14.3 Diámetros tentativos de tubería

Para el flujo total estimado de 9607 m<sup>3</sup>/hr se plantearon inicialmente tres alternativas de diámetro, las cuales se determinaron buscando una velocidad de flujo similar o superior a 2.5 m/s.

Las alternativas planteadas y sus velocidades de flujo se muestran a continuación:

Tabla 67: Alternativas de diámetro para la línea del OF de ciclones hacia la presa de relaves.

N° Alternativa	Diámetro nominal	Diámetro interior	Espesor revestimiento	Diámetro interior final	Velocidad
----------------	------------------	-------------------	-----------------------	-------------------------	-----------

Alternativa 1	42 pulg	1048 mm	12 mm	1024 mm	3.24 m/s
Alternativa 2	44 pulg	1099 mm	12 mm	1075 mm	2.94 m/s
Alternativa 3	48 pulg	1200 mm	12 mm	1176 mm	2.46 m/s

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

#### 14.4 Verificación de la velocidad de deposición

Posteriormente se realizó la verificación de la velocidad de deposición para cada alternativa utilizando el método Wasp.

En el siguiente cuadro se muestran las velocidades de deposición obtenidas para cada alternativa comparada con la velocidad de flujo.

Tabla 68: Velocidades de deposición para cada alternativa.

N° Alternativa	Velocidad de flujo	Velocidad de deposición	Relación V/Vd
Alternativa 1	3.24 m/s	1.83 m/s	1.77
Alternativa 2	2.94 m/s	1.86 m/s	1.58
Alternativa 3	2.46 m/s	1.92 m/s	1.28

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse todas las alternativas tendrán una velocidad de flujo superior a la velocidad de deposición.

#### 14.5 Gradiente hidráulico en la línea

##### 14.5.1 Gradiente hidráulico para flujo homogéneo

En el siguiente cuadro se muestran los gradientes hidráulicos obtenidos para cada alternativa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo descrito en las líneas de transporte anteriores:

Tabla 69: Gradiente hidráulico calculado para flujo homogéneo.

N° Alternativa	Factor de fricción fD	Gradiente hidráulico (mcp/m)	Gradiente hidráulico (mca/m)
Alternativa 1	0.0127	0.008	0.009
Alternativa 2	0.0126	0.006	0.007
Alternativa 3	0.0125	0.004	0.005

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

### 14.5.2 Gradiente hidráulico para flujo heterogéneo

El análisis de flujo heterogéneo se realizó de acuerdo al método desarrollado por Wasp.

#### Grupos de partícula

Los grupos de partícula utilizados para los relaves provenientes del OF de las dos etapas de clasificación fueron:

Tabla 70: Grupos de partícula para cálculo de pérdidas por flujo heterogéneo.

Malla Tyler	Tamaño promedio	% Pasante
Menor a 100	0.149 mm	0.09 %
De 100 a 200	0.112 mm	4.69 %
Mayor a 200	0.074 mm	95.22 %
TOTAL		100%

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

#### Resumen de resultados

En el siguiente cuadro se muestran los gradientes hidráulicos obtenidos bajo la condición de flujo heterogéneo para cada alternativa siguiendo el mismo procedimiento de cálculo descrito anteriormente:

Tabla 71: Gradiente hidráulico total para cada alternativa.

N° Alternativa	Factor de fricción fD	Gradiente hidráulico (mcp/m)	Gradiente hidráulico (mca/m)
Alternativa 1	0.0157	0.008	0.010
Alternativa 2	0.0165	0.007	0.008
Alternativa 3	0.0196	0.005	0.006

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

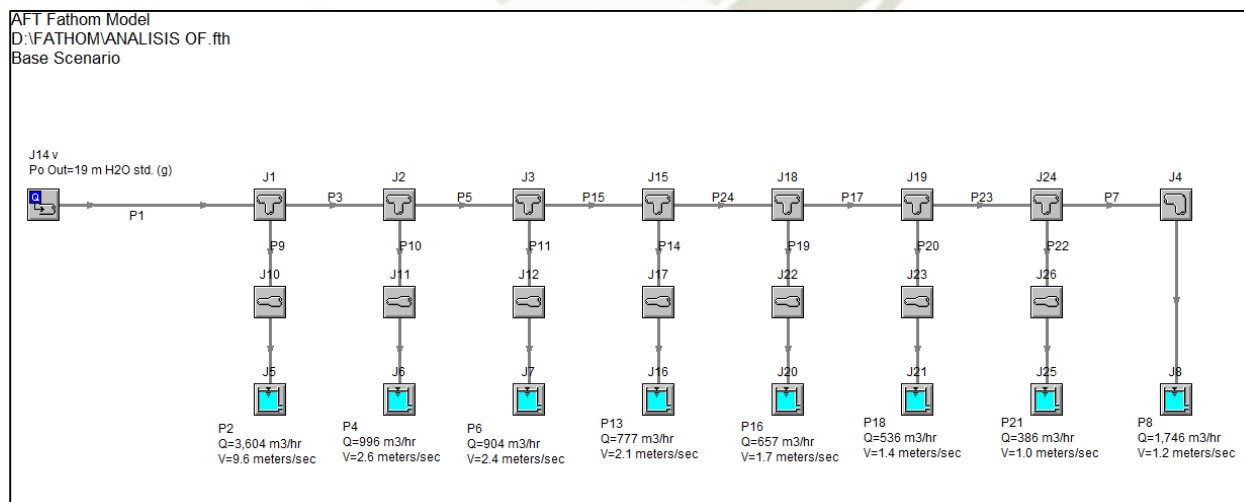
Se asumirá esta condición para la selección final del diámetro de tubería.

### 14.6 Selección del diámetro final de tubería

Se seleccionó la alternativa 1 (tubería de 42”) ya que representa un menor costo de materiales e instalación.

### 14.7 Análisis hidráulico del sistema

Al igual que en el análisis de la descarga de arenas el análisis hidráulico implica una red de tuberías que requerirá de varias iteraciones para su resolución. Utilizando en Software AFT Fathom Versión 7.0 se modelaron la línea troncal de 42” así como sus 7 derivaciones y la descarga en el punto final del Jacking Header. El objetivo de este modelo es determinar la presión necesaria al inicio del Jacking Header. A continuación se muestra el modelo y sus resultados.



**Figura 97:** Modelado de descarga de OF en presa de relaves.

Como se puede observar la presión necesaria al inicio del Jacking Header para descargar un flujo total de 9607 m<sup>3</sup>/h es de 19 mca (15.6 mcp). Esta presión en mcp es inferior a la altura estática existente entre la descarga del OF de la segunda estación de ciclones (2576.60 msnm) y el nivel de la tubería troncal de descarga (2541.13 msnm) de 35.47 mcp. Por lo tanto, el OF podrá descargarse en la presa de relaves por gravedad.

## 14.8 Verificación del espesor de la tubería

### Presión máxima de la línea

La presión máxima que puede presentarse en la línea será igual a la altura estática de 35.47 mcp (43.06 mca). Convirtiendo las unidades se obtiene que la presión máxima será de 4.31 bar.

### Verificación del espesor de tubería

Finalmente, el espesor mínimo de la tubería se calculó de acuerdo a la Ec. 2.84.

$$t_n = \frac{P_i \cdot D}{20 \cdot F \cdot E \cdot S_y} + t_A$$

Donde:

- Presión de diseño de la tubería ( $P_i$ ) : 4.31 bar
- Diámetro exterior de la tubería ( $D$ ) : 1067 mm
- Factor de diseño ( $F$ ) : 0.8
- Factor de soldadura ( $E$ ) : 1
- Esfuerzo de fluencia acero ( $S_y$ ) : 172 MPa (API 5L gr A25)
- Tolerancia por corrosión y erosión ( $t_A$ ) : 1.5 mm

Se obtuvo que el espesor mínimo recomendado para la tubería es de 3.2 mm el cual es inferior al espesor seleccionado de 9.53 mm. Por lo tanto la tubería escogida no presentará problemas por presión en la línea.

## 14.9 Selección de válvulas y accesorios para tuberías.

### 14.9.1 Válvulas cuchilla

En el caso de las derivaciones de descarga hacia el embalse se requiere instalar válvulas de tipo cuchilla. Para este caso se seleccionaron válvulas de accionamiento manual ya que la frecuencia de operación de estas válvulas será muy reducido.

- Marca / Modelo : Clarkson / KGA
- Servicio : On /Off
- Tipo de conexión : Wafer
- Rating de presión : CL#150
- Manga : Caucho natural standard
- Material de la cuchilla : Acero inox 316
- Actuador : Volante (manual)

### 14.9.2 Flujómetros y densímetros

En este caso la línea no contará con flujómetros ni densímetros ya que los relaves finos serán descargados por gravedad directamente al embalse y no se requiere de un monitoreo continuo del flujo enviado por la línea.

### 14.9.3 Bridas y accesorios de conexión entre tuberías

Se determinó que la unión entre spools de acero se realizará utilizando bridas de tipo Slip On AWWA C207 D.

## 15. Análisis de esfuerzos y diseño de soportes para tuberías de acero.

Luego de haber determinado los diámetros y trazos de tubería para las líneas de transporte se realizó el análisis de esfuerzos y flexibilidad en las líneas de acero presurizadas con el objetivo de determinar la ubicación y el tipo de soportes de tubería a utilizar. Para ello se utilizó el software Bentley AutoPIPE Versión 10, siguiendo los lineamientos del código ASME B31.4.

El análisis se realizó considerando los siguientes parámetros:

- Presión máxima de operación : Variable

- Temperatura ambiente : 22 °C
- Temperatura mínima : 3.5 °C
- Temperatura máxima : 30 °C
- Factor de carga por sismo : 0.4 g (según NTP E30)

### 15.1 Casos de carga

Para el análisis se consideraron los siguientes casos de carga:

Tabla 72: Casos de carga.

Caso	Descripción
GR	Gravedad
T1	Temperatura mínima
T2	Temperatura máxima
P1	Presión de diseño
E1	Carga por sismo (+X)
E2	Carga por sismo (-X)
E3	Carga por sismo (+Z)
E4	Carga por sismo (-Z)

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

## 15.2 Combinaciones de carga

Para el análisis se consideraron las siguientes combinaciones de carga en base al código ASME B31.4:

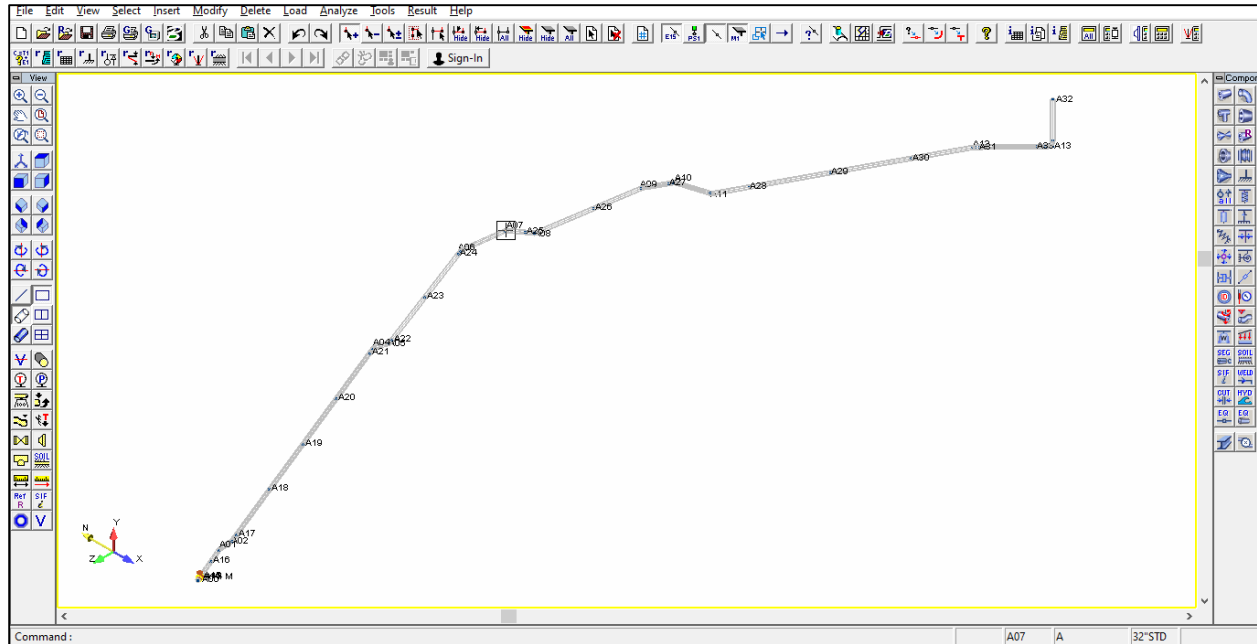
Tabla 73: Combinaciones de carga.

Combinación	Categoría
GR + Max P	Sostenida
Amb a T1	Expansión
Sust + E1	Ocasional
Sust + E2	Ocasional
Sust + E3	Ocasional
Sust + E4	Ocasional
Max P	Presión máxima

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

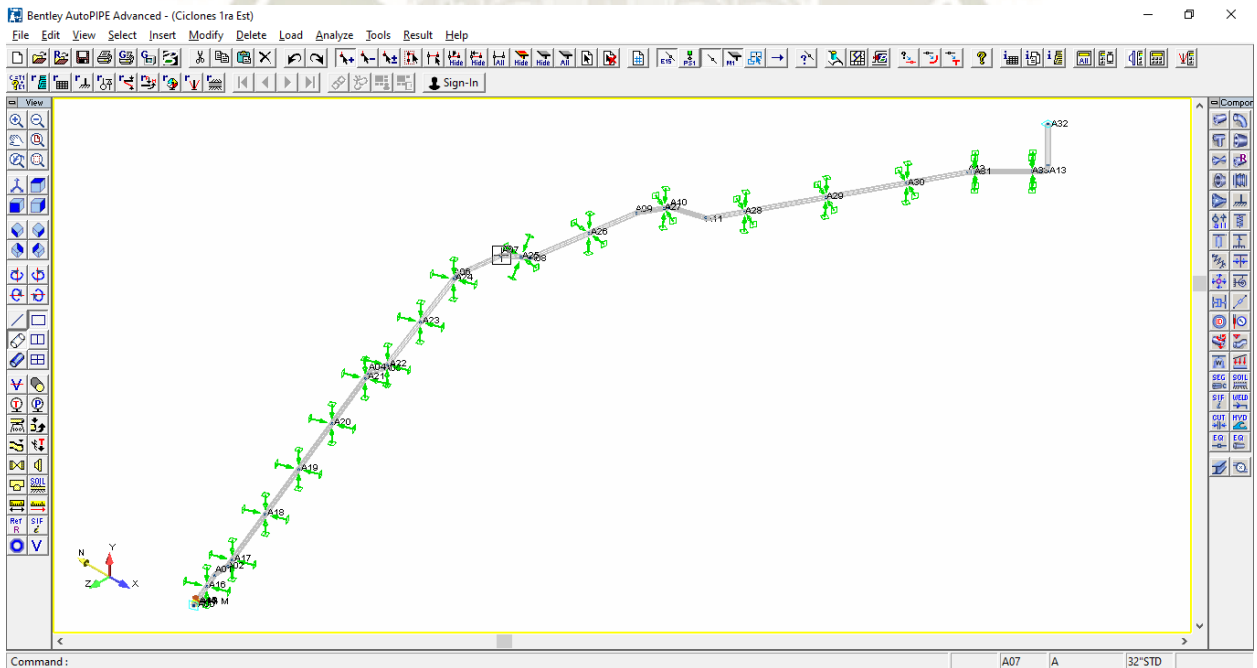
## 15.3 Análisis de esfuerzos para tuberías de acero en software Bentley AutoPIPE

A continuación, se muestra el modelado de la primera línea de alimentación hacia los ciclones de la primera etapa de clasificación:



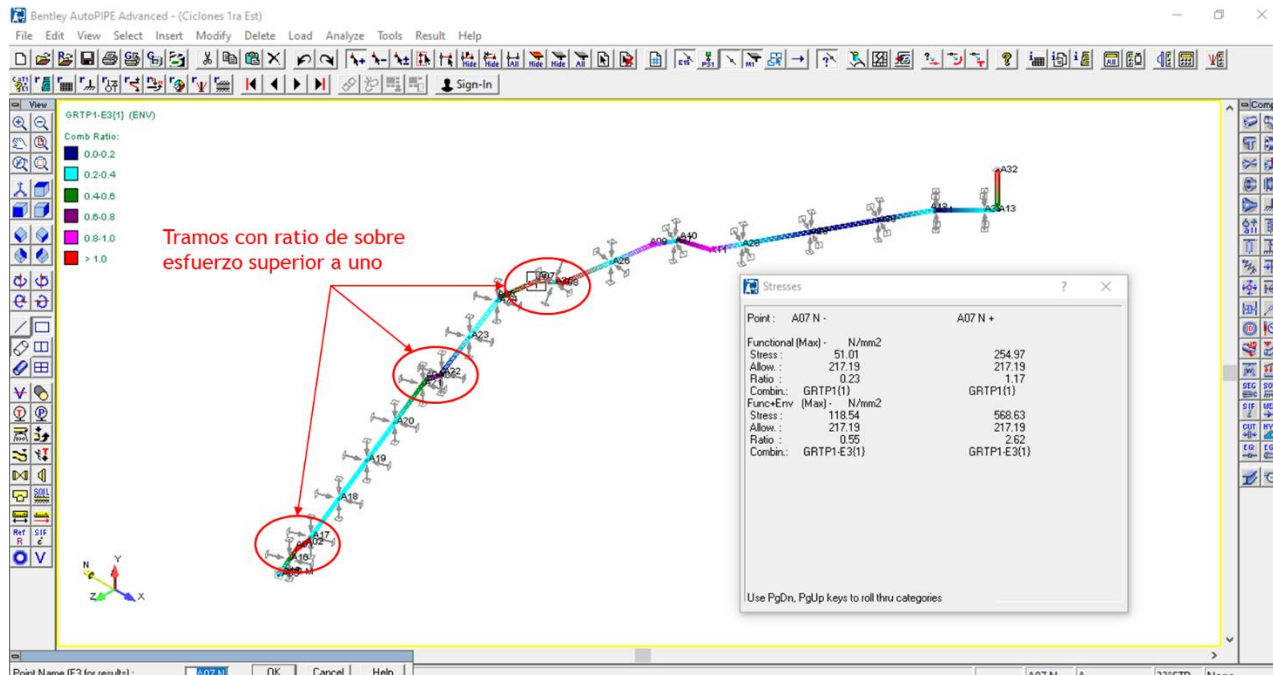
**Figura 98:** Modelado de la línea de alimentación hacia la primera Etapa de ciclones.

Posteriormente se agregaron soportes de tubería tipo guía procurando que cada spool cuente con al menos un soporte de tubería.



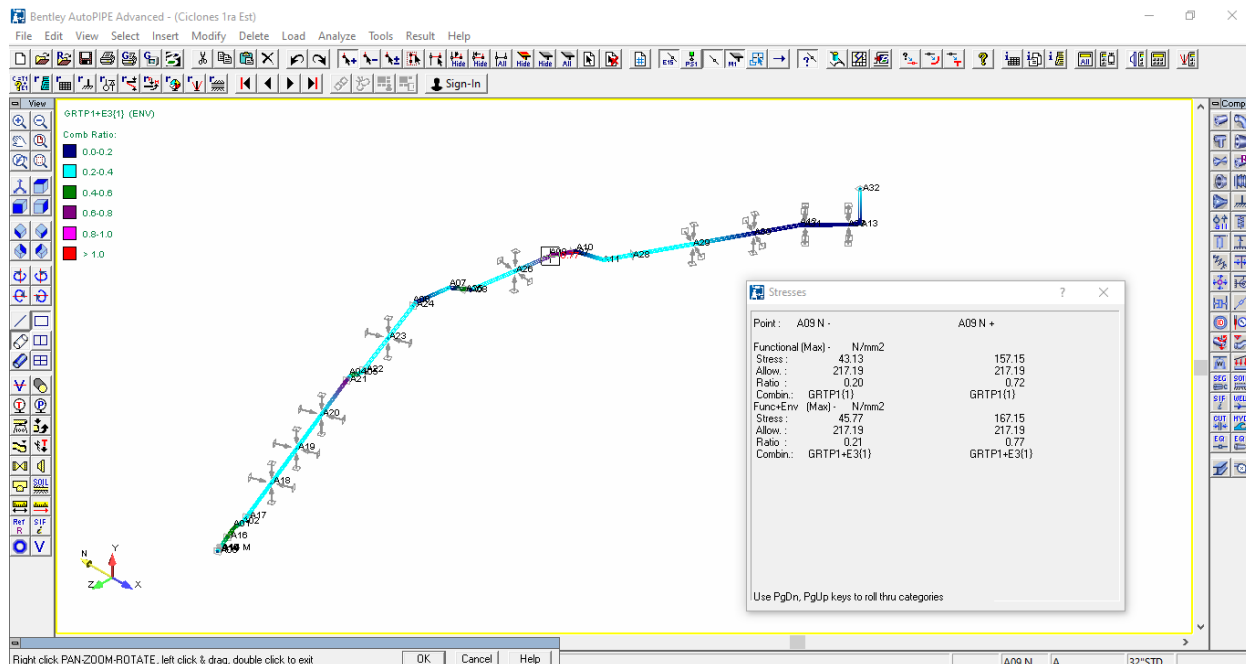
**Figura 99:** Ubicación inicial de soportes de tubería primera Etapa de ciclones.

Luego se realizó el análisis de esfuerzos en la tubería de acuerdo a las cargas y combinaciones de carga mencionados anteriormente. Luego de realizado el análisis se identificaron los tramos con un ratio de sobreesfuerzo mayor a uno, para poder realizar las modificaciones puntuales para corregir el modelo.



**Figura 100:** Tramos identificados con sobreesfuerzo en la tubería.

Por último, luego de realizadas las modificaciones al modelo se volvió a analizar el mismo hasta asegurarse de que no existan puntos de sobre esfuerzo en las tuberías.



**Figura 101:** Análisis de esfuerzos luego de la modificación de soportes.

De forma similar se realizó el modelado y análisis para cada una de las líneas de acero presurizadas en el sistema de relaves.

A continuación se muestra en las siguientes tablas la ubicación y el tipo de soportes finales seleccionados para todas las tuberías de acero presurizadas en el sistema:

**Tabla 74:** Soportes de tubería para tuberías de alimentación a primera etapa de ciclones.

Soporte Nro	Ubicación / Progresiva	Tipo
1	0+6	Fijo (Anclaje)
2	0+24	Fijo (Anclaje)
3	0+39	Guía
4	0+54	Guía
5	0+69	Guía
6	0+84	Fijo (Anclaje)
7	0+86	Fijo (Anclaje)
8	0+95	Guía
9	0+110	Fijo (Anclaje)

10	0+125	Fijo (Anclaje)
11	0+141	Guía
12	0+157	Fijo (Anclaje)
13	0+173	Fijo (Anclaje)
14	0+189	Guía
15	0+204	Guía
16	0+219	Guía
17	0+232	Guía
18	0+244	Guía
19	0+250	Guía
20	0+265	Guía

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Tabla 75: Soportes de tubería para tuberías de alimentación a segunda etapa de ciclones.

Soporte Nro	Ubicación / Progresiva	Tipo
1	0+3	Guía
2	0+13	Fijo (Anclaje)
3	0+23	Guía
4	0+33	Fijo (Anclaje)
5	0+47	Fijo (Anclaje)
6	0+60	Guía
7	0+75	Guía
8	0+90	Guía
9	0+102	Fijo (Anclaje)
10	0+109	Fijo (Anclaje)
11	0+120	Guía
12	0+133	Guía
13	0+148	Guía

14	0+158	Guía
15	0+168	Fijo (Anclaje)
16	0+181	Fijo (Anclaje)
17	0+200	Guía
18	0+217	Guía
19	0+234	Fijo (Anclaje)
20	0+245	Guía

**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

Tabla 76: Soportes de tubería para tuberías del Underflow hacia la presa de relaves.

Soporte Nro	Ubicación / Progresiva	Tipo
1	0+3	Guía
2	0+14	Fijo (Anclaje)
3	0+16	Guía
4	0+21	Guía
5	0+35	Guía
6	0+49	Guía
7	0+56	Fijo (Anclaje)
8	0+68	Guía
9	0+80	Guía
10	0+92	Guía
11	0+104	Guía
12	0+116	Guía
13	0+128	Guía
14	0+140	Guía
15	0+152	Guía
16	0+164	Guía
17	0+176	Guía

18	0+188	Guía
19	0+200	Guía
20	0+206	Fijo (Anclaje)
21	0+216	Fijo (Anclaje)
22	0+228	Guía
23	0+240	Guía
24	0+252	Guía
25	0+270	Fijo (Anclaje)
26	0+280	Fijo (Anclaje)
27	0+292	Guía
28	0+304	Guía
29	0+316	Guía
30	0+328	Guía
31	0+340	Guía
32	0+352	Guía
33	0+360	Fijo (Anclaje)
34	0+370	Fijo (Anclaje)
35	0+382	Guía
36	0+400	Guía
37	0+412	Guía
38	0+424	Guía
39	0+436	Guía

**Notas.**

1. Los soportes indicados en la tabla corresponden a la tubería desde del CJ-04 hasta el inicio del Jacking Header.
2. En el Jacking Header los soportes son de tipo guía y se ubicarán con una separación de 11 metros.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 77: Soportes de tubería para tuberías del Overflow hacia la presa de relaves.

Soporte Nro	Ubicación / Progresiva	Tipo
1	0+5	Fijo (Anclaje)
2	0+18	Fijo (Anclaje)
3	0+30	Guía
4	0+37	Guía
5	0+43	Fijo (Anclaje)
6	0+52	Guía
7	0+60	Fijo (Anclaje)
8	0+72	Guía
9	0+82	Fijo (Anclaje)
10	0+94	Guía
11	0+100	Fijo (Anclaje)
12	0+110	Guía
13	0+122	Fijo (Anclaje)
14	0+132	Guía
15	0+145	Fijo (Anclaje)
16	0+157	Guía
17	0+169	Guía
18	0+180	Fijo (Anclaje)
19	0+289	Guía
20	0+204	Fijo (Anclaje)
21	0+214	Guía
22	0+226	Guía
23	0+238	Guía
24	0+245	Guía
25	0+252	Fijo (Anclaje)
26	0+260	Guía

27	0+273	Fijo (Anclaje)
28	0+285	Guía
29	0+297	Guía
30	0+309	Guía
31	0+321	Guía
32	0+329	Fijo (Anclaje)
33	0+345	Fijo (Anclaje)
34	0+352	Guía
35	0+360	Guía
36	0+369	Guía
37	0+381	Guía
38	0+393	Guía
39	0+403	Fijo (Anclaje)
40	0+416	Guía
41	0+424	Fijo (Anclaje)
42	0+436	Guía
43	0+441	Guía
44	0+455	Fijo (Anclaje)
45	0+476	Fijo (Anclaje)
46	0+485	Guía
47	0+496	Guía
48	0+508	Guía
49	0+520	Fijo (Anclaje)
50	0+532	Guía
51	0+544	Guía
52	0+556	Guía
53	0+568	Guía
54	0+580	Guía

55	0+592	Guía
56	0+604	Guía
57	0+616	Guía
58	0+628	Guía
59	0+640	Guía
60	0+652	Guía
61	0+664	Guía
62	0+676	Guía
63	0+688	Guía
64	0+700	Guía
65	0+712	Guía
66	0+724	Fijo (Anclaje)
67	0+734	Fijo (Anclaje)
68	0+746	Guía
69	0+758	Guía
70	0+770	Guía
71	0+782	Guía
72	0+794	Fijo (Anclaje)
73	0+804	Fijo (Anclaje)
74	0+814	Guía
75	0+824	Fijo (Anclaje)
76	0+834	Fijo (Anclaje)
77	0+846	Guía
78	0+858	Guía
79	0+870	Guía
80	0+882	Guía
81	0+894	Guía
82	0+900	Fijo (Anclaje)

83	0+920	Fijo (Anclaje)
84	0+930	Guía
85	0+939	Guía
86	0+948	Guía

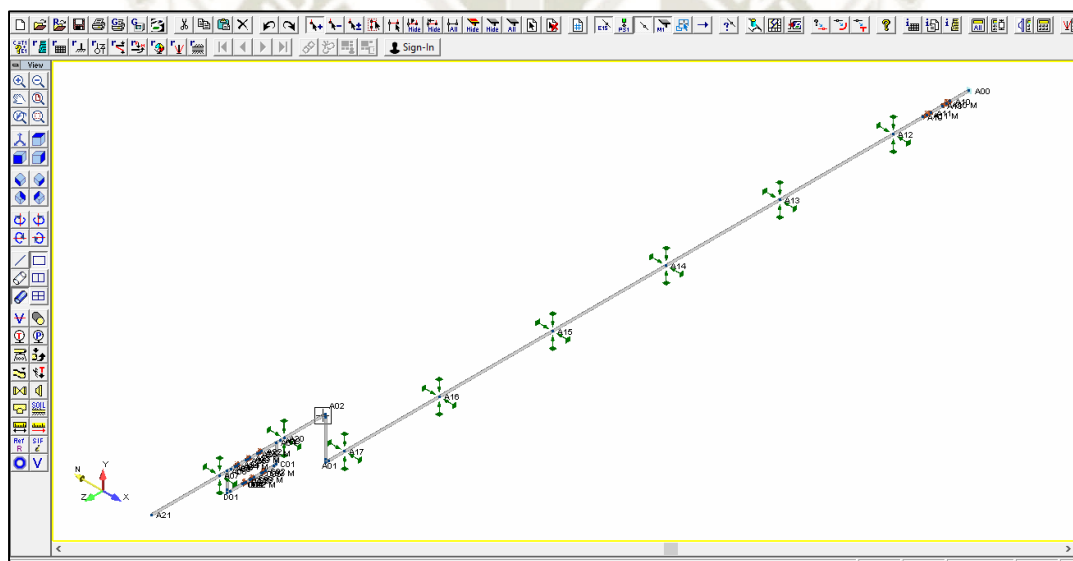
**Notas:**

1. Los soportes indicados en la tabla corresponden a la tubería desde del CJ-02 hasta el inicio del Jacking Header.
2. En el Jacking Header los soportes son de tipo guía y se ubicarán con una separación de 12 metros.

Fuente: Elaboración propia.

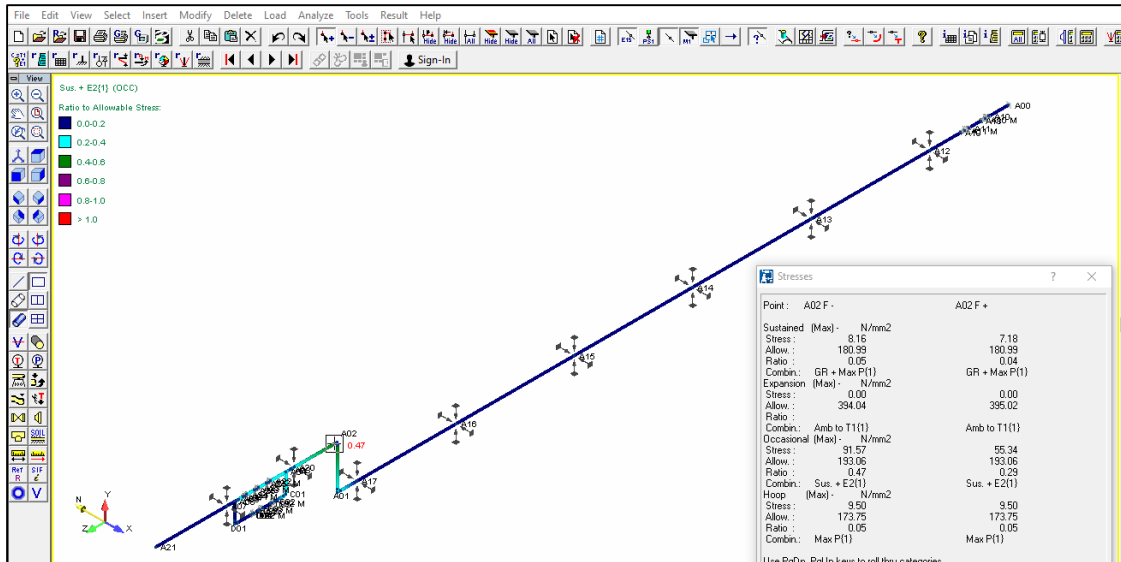
**15.4 Análisis de esfuerzos para tuberías de agua de sello en software Bentley AutoPIPE**

A continuación se muestra el modelado de la tubería de agua de sello desde el Tanque hacia la bomba de arenas:



**Figura 102:** Modelado de la tubería de agua de sello.

Se consideraron soportes de tipo guía cada tres metros en el tramo recto y soportes adicionales cerca a los cambios de dirección, además de dos soportes en la zona de las tuberías en paralelo. Posteriormente se realizó el análisis de esfuerzos en la tubería obteniendo los resultados mostrados en la siguiente figura:



**Figura 103:** Análisis de esfuerzos en la tubería de agua de sello.

Como se puede apreciar el punto con mayor esfuerzo se encuentra en el cambio de dirección A02 sin embargo el esfuerzo es inferior al permisible de acuerdo al código ASME B31.4 por lo tanto el sistema operará sin problemas bajo condiciones de diseño.

### 15.5 Diseño de soportes para tuberías de acero

Se realizó el diseño de los soportes de tipo guía los cuales serán de acero estructural, para los soportes de tipo fijo o anclajes se recomienda emplear dados de concreto.

Luego de finalizada la simulación de esfuerzos en el software AutoPIPE se obtuvieron las fuerzas ejercidas en cada soporte debido a las combinaciones de carga consideradas inicialmente. Se compararon los resultados obtenidos para cada soporte y se escogió el caso más crítico para la realización del diseño. A continuación, se muestran las fuerzas máximas con las que se diseñaron los soportes para cada una de las tuberías analizadas anteriormente:

Tabla 78: Fuerzas y reacciones en soportes de tubería para tuberías de alimentación a primera etapa de ciclones.

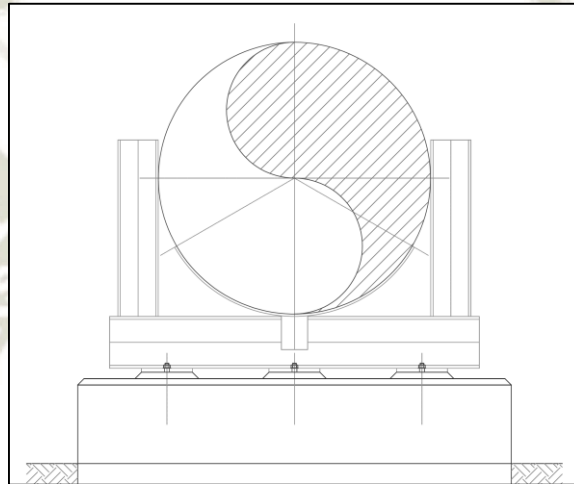
Diámetro de tubería	Fuerza máxima en el soporte (kN)	
	Vertical	Horizontal
16"	42.02	56.84
30"	118.83	65.36

32"	133.56	73.02
42"	162.73	88.4
2"	1482	360

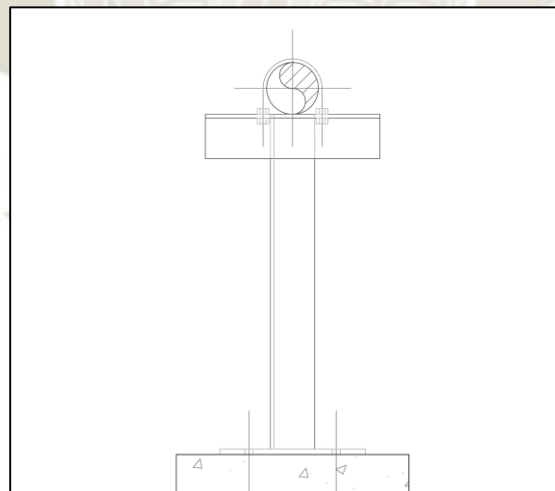
**Notas.** Fuente: Elaboración propia.

1. Las fuerzas están expresadas en Newton.

La tipología de soportes a utilizar se muestra en la siguiente figura:



**Figura 104.** Tipología para soportes tuberías mayores o iguales a 16”.



**Figura 105.** Tipología para soportes de tuberías de agua de sello.

La tipología para tuberías de diámetros mayores o iguales a 16” contempla la fabricación de soportes a partir de perfiles estructurales soldados los cuales están compuestos por un perfil tipo W colocado de forma horizontal y dos perfiles W soldados al primero en posición vertical.

Por otro lado, los soportes para tuberías de agua de sello se diseñaron a partir de ángulos estructurales de acero ASTM A36 y abrazaderas de tipo U-bolt.

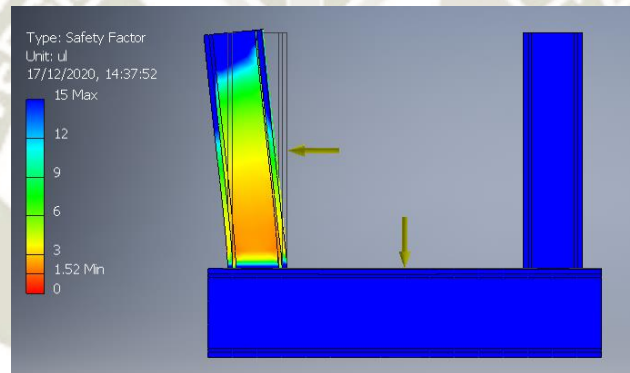
Para el diseño de cada tipo de soporte se utilizó el software Autodesk Inventor 2019, para cada soporte se modelaron los perfiles de acero estructural ASTM A36 a utilizar y se asignaron las cargas máximas verticales y horizontales determinadas anteriormente. Se analizaron diferentes perfiles de acero buscando un factor de seguridad mínimo de 1.2.

### 15.5.1 Soportes de tubería para tuberías de 16 pulgadas

Para las tuberías de 16 pulgadas se seleccionaron los siguientes perfiles:

- Acero ASTM A36 W4x13 (verticales)
- Acero ASTM A36 W6x20 (horizontal)

Obteniendo un factor de seguridad mínimo de 1.52.



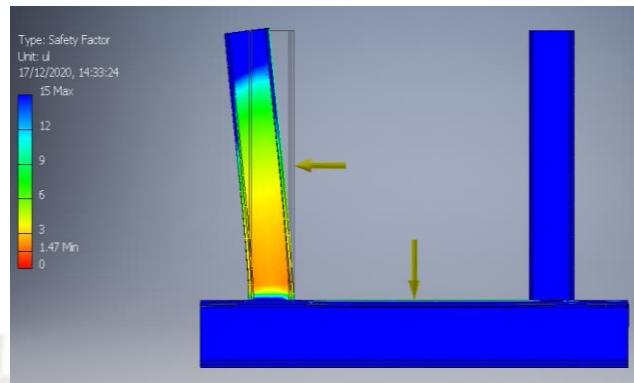
**Figura 106.** Simulación en Autodesk Inventor para soportes de tubería de 16”.

### 15.5.2 Soportes de tubería para tuberías de 30 y 32 pulgadas

Se consideró un mismo tipo de soporte para las tuberías de 30 y 32 pulgadas considerando como cargas de diseño las determinadas para la tubería de 32 pulgadas. Se seleccionaron los siguientes perfiles:

- Acero ASTM A36 W6x20 (verticales)
- Acero ASTM A36 W8x31 (horizontal)

Obteniendo un factor de seguridad mínimo de 1.47.



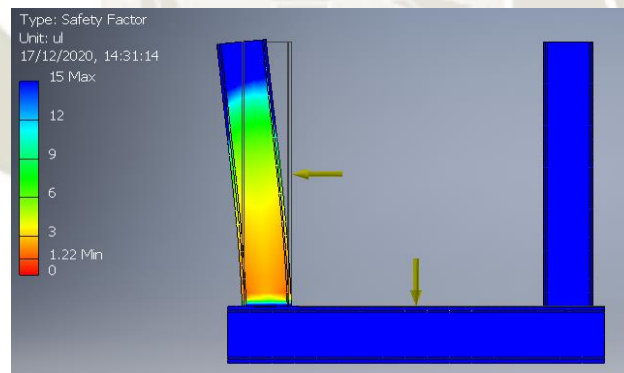
**Figura 107.** Simulación en Autodesk Inventor para soportes de tubería de 30 y 32”.

### 15.5.3 Soportes de tubería para tuberías de 42 pulgadas

Para las tuberías de 42 pulgadas se seleccionaron los siguientes perfiles:

- Acero ASTM A36 W8x21 (verticales)
- Acero ASTM A36 W10x45 (horizontal)

Obteniendo un factor de seguridad mínimo de 1.22.



**Figura 108.** Simulación en Autodesk Inventor para soportes de tubería de 42”.

### 15.5.4 Soportes para tuberías de 2 pulgadas (agua de sello)

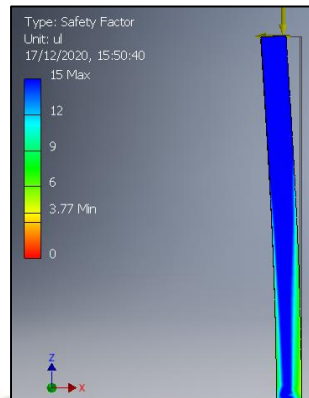
Para las tuberías de agua de sello se seleccionaron los perfiles considerando el soporte de mayor altura ubicado en el cambio de dirección.

Las cargas verticales y horizontales aplicadas al soporte fueron de 151 y 37 kgf respectivamente para ello se seleccionaron abrazaderas U-bolt de acero al carbono con acabado zincado electrolítico azul las cuales tienen una carga máxima admisible de 660 kgf.

Finalmente para el cuerpo del soporte se seleccionó el siguiente perfil:

- Acero ASTM A36 L3x3x3/16.

- Obteniendo un factor de seguridad mínimo de 3.77.



**Figura 109.** Simulación en Autodesk Inventor para soportes de tubería de 2”.



## **CAPITULO IV: COSTOS**

ITEM	DESCRIPCIÓN	UND	CANT	PU (USD)	SUBTOTAL
<b>CORREDOR PRINCIPAL DE TUBERÍAS</b>					<b>3,831,146.00</b>
<b>Materiales / equipos</b>					
1	Válvula cuchilla ON/OFF 48" acc. Hidr.	und	1	35,000.00	35,000.00
2	Válvula cuchilla ON/OFF 42" acc. Hidr.	und	1	30,500.00	30,500.00
3	Unidad Hidráulica centralizada	und	2	75,000.00	150,000.00
4	Tubería de HDPE 48 pulg SDR-21	m	4100	482.00	1,976,200.00
5	Tubería de HDPE 42 pulg SDR-21	m	850	369.00	313,650.00
6	Tubería de acero 8 pulg STD	m	20	52.00	1,040.00
7	Tubería de acero 48 pulg STD	m	36	364.00	13,104.00
8	Tubería de acero 42 pulg STD	m	36	319.00	11,484.00
9	Tubería de acero 10 pulg STD	m	20	39.00	780.00
10	Flange Adapter 48" SDR 21	und	2	1,800.00	3,600.00
11	Flange Adapter 42" SDR 21	und	2	1,650.00	3,300.00
12	Codo acero 90° - 3D 48" STD	und	1	620.00	620.00
13	Brida AWWA SO CL-D 48"	und	8	2,500.00	20,000.00
14	Brida AWWA SO CL-D 42"	und	8	1,850.00	14,800.00
15	Brida SO 8" #150	und	8	130.00	1,040.00
16	Brida SO 10" #150	und	8	150.00	1,200.00
17	Back up Ring para tub HDPE 48"	und	2	940.00	1,880.00
18	Back up Ring para tub HDPE 42"	und	2	850.00	1,700.00
<b>Fabricación/ Instalación / Montaje</b>					
19	Fabricación de spools bridados de 42"	kg	3336	3.00	10,008.00
20	Fabricación de spools bridados de 48"	kg	4700	3.00	14,100.00
21	Instalación de conjunto backing ring / flange adapter 42"	und	4	350.00	1,400.00
22	Instalación de conjunto backing ring / flange adapter 48"	und	4	430.00	1,720.00
23	Instalación de tuberías termofusionadas de 42"	m	850	200.00	170,000.00
24	Instalación de tuberías termofusionadas de 48"	m	4100	250.00	1,025,000.00
25	Instalación de válvula cuchilla de 42"	und	1	1,200.00	1,200.00
26	Instalación de válvula cuchilla de 48"	und	1	1,500.00	1,500.00
27	Montaje de tuberías de acero bridadas 42"	m	36	120.00	4,320.00
28	Montaje de tuberías de acero bridadas 48"	m	36	150.00	5,400.00
29	Revestimiento de tuberías de acero 12mm	m2	83	200.00	16,600.00
<b>PRIMERA ETAPA DE CLASIFICACIÓN</b>					<b>4,003,859.00</b>
<b>Materiales / equipos</b>					
30	Nido de ciclones GMAX 15 Incluye: Nido de ciclones con 32 ciclones, tinas de descarga UF y OF, estructura principal, plataforma circular superior y escaleras de acceso.	und	2	1,060,000.00	2,120,000.00
31	Válvula cuchilla ON/OFF 32" acc. Hidr.	und	2	23,400.00	46,800.00

32	Unidad Hidráulica centralizada	und	2	75,000.00	150,000.00
33	Tubería de acero 6" STD	m	45	36.00	1,620.00
34	Tubería de acero 32" STD	m	600	242.00	145,200.00
35	Tubería de acero 18" STD	m	30	135.00	4,050.00
36	Flujómetro magnético 32"	und	2	29,500.00	59,000.00
37	Densímetro nuclear 32"	und	2	33,000.00	66,000.00
38	Coples Victaulic 32" #150	und	8	5,500.00	44,000.00
39	Codos 90° acero 3D 32" STD	und	6	320.00	1,920.00
40	Codos 45° acero 3D 32" STD	und	6	170.00	1,020.00
41	Brida AWWA SO CL-D 32"	und	144	1,100.00	158,400.00
42	Brida 6" AWWA SO C207 Clase D	und	6	55.00	330.00
43	Brida 18" AWWA SO C207 Clase D	und	14	325.00	4,550.00
<b>Fabricación/ Instalación / Montaje</b>					
44	Instalación de nido de ciclones Incluye: Estructura principal y plataformas, escaleras, batería de ciclones	und	2	212,526.00	425,052.00
45	Fabricación y montaje de soportes para tubería	kg	3168	4.00	12,672.00
46	Fabricación de spools bridados de 18"	kg	3561	3.00	10,683.00
47	Fabricación de spools bridados de 32"	kg	127454	3.00	382,362.00
48	Instalación de flujómetros de 32"	und	2	120.00	240.00
49	Instalación de válvula cuchilla de 32"	und	2	700.00	1,400.00
50	Montaje de tuberías de acero bridadas 18"	m	36	60.00	2,160.00
51	Montaje de tuberías de acero bridadas 32"	m	600	100.00	60,000.00
52	Revestimiento de tuberías de acero 12mm	m2	1532	200.00	306,400.00
<b>SEGUNDA ETAPA DE CLASIFICACIÓN</b>					<b>1,636,845.00</b>
<b>Materiales / equipos</b>					
53	Nido de ciclones GMAX 26 Incluye: Nido de ciclones con 32 ciclones, tinas de descarga UF y OF, estructura principal, plataforma circular superior y escaleras de acceso.	und	1	689,000.00	689,000.00
54	Válvula cuchilla ON/OFF 30" acc. Hidr.	und	2	21,700.00	43,400.00
55	Unidad Hidráulica centralizada	und	2	75,000.00	150,000.00
56	Tubería de acero 6" STD	m	20	36.00	720.00
57	Tubería de acero 30" STD	m	300	242.00	72,600.00
58	Tubería de acero 18" STD	m	10	135.00	1,350.00
59	Flujómetro magnético 30"	und	1	27,700.00	27,700.00
60	Densímetro nuclear 30"	und	1	32,000.00	32,000.00
61	Coples Victaulic 30" #150	und	4	5,000.00	20,000.00
62	Codos 90° acero 3D 30" STD	und	3	300.00	900.00
63	Codos 45° acero 3D 30" STD	und	3	150.00	450.00
64	Brida AWWA SO CL-D 30"	und	80	850.00	68,000.00
65	Brida 6" AWWA SO C207 Clase D	und	4	55.00	220.00

66	Brida 18" AWWA SO C207 Clase D	und	6	325.00	1,950.00
<b>Fabricación/ Instalación / Montaje</b>					
67	Instalación de nido de ciclones Incluye: Estructura principal y plataformas, escaleras, batería de ciclones	und	1	168,519.00	168,519.00
68	Fabricación y montaje de soportes para tubería	kg	1742	4.00	6,968.00
69	Fabricación de spools bridados de 18"	kg	1226	3.00	3,678.00
70	Fabricación de spools bridados de 30"	kg	58640	3.00	175,920.00
71	Instalación de flujómetros de 30"	und	1	120.00	120.00
72	Instalación de válvula cuchilla de 30"	und	1	650.00	650.00
73	Montaje de tuberías de acero bridadas 18"	m	10	60.00	600.00
74	Montaje de tuberías de acero bridadas 30"	m	300	95.00	28,500.00
75	Revestimiento de tuberías de acero 12mm	m2	718	200.00	143,600.00
<b>SISTEMA UNDERFLOW - BOMBEO DE ARENAS</b>					<b>2,918,263.50</b>
<b>Materiales / equipos</b>					
76	Bomba de arenas 12/10 AH Incluye: Conjunto impulsor carcasa, motor eléctrico con variador de frecuencia y Skid metálico.	und	1	240,000.00	240,000.00
77	Bomba de agua de sello Incluye: Bomba vertical multietapica , motor eléctrico con variador de frecuencia y Skid metálico.	und	1	8,500.00	8,500.00
78	Unidad Hidráulica centralizada	und	2	75,000.00	150,000.00
79	Válvula Pinch modulante 6 pulg	Und	64	4,300.00	275,200.00
80	Válvula de bola 2" #150 roscada	und	6	170.00	1,020.00
81	Válvula cuchilla ON/OFF 6 pulg acc volante	Und	70	4,300.00	301,000.00
82	Válvula cuchilla ON/OFF 16" acc. Volante	und	5	17,000.00	85,000.00
83	Válvula cuchilla ON/OFF 16" acc. Hidr.	und	5	21,700.00	108,500.00
84	Válvula check 2" #150 roscada	und	1	230.00	230.00
85	Tubería de acero 6" STD	m	100	36.00	3,600.00
86	Tubería de acero 4" STD A53B	und	2000	20.00	40,000.00
87	Tubería de acero 2" STD A53B	m	25	6.50	162.50
88	Tubería de acero 16" STD	m	1600	119.00	190,400.00
89	Tee acero soldada 16x6 - STD	und	64	234.00	14,976.00
90	Tee acero roscada 2x2"-STD	und	2	7.00	14.00
91	Reducción excentrica 16x12	und	1	70.00	70.00
92	Reducción excentrica 16x10	und	1	66.00	66.00
93	Flujómetro magnético 16 pulg	Und	1	14,800.00	14,800.00
94	Densímetro nuclear 16"	und	1	15,000.00	15,000.00
95	Filtro Strainer 2" #150	und	2	275.00	550.00
96	Coples victaulic 16" #150	und	4	2,500.00	10,000.00
97	Codos 90° acero 3D 16" STD	und	2	122.00	244.00
98	Codos 45° acero 3D 16" STD	und	9	70.00	630.00

99	Codo 90° 2"-STD	und	4	7.50	30.00
100	Brida WN 4" #150	und	768	15.00	11,520.00
101	Brida 6" SO AWWA C207 Clase D	und	384	55.00	21,120.00
102	Brida 16 pulg SO AWWA C207 Clase D	und	300	310.00	93,000.00
<b>Fabricación/ Instalación/ Montaje</b>					
	Fabricación y montaje de soportes para tubería	kg	1383	4.00	5,532.00
103	Fabricación de spools bridados de 16"	kg	157110	3.00	471,330.00
104	Fabricación de spools bridados de 4"	kg	39160	3.00	117,480.00
105	Fabricación de spools bridados de 6"	kg	2203	3.00	6,609.00
106	Instalación de flujómetros de 16"	und	1	80.00	80.00
107	Instalación de tuberías de 2" STD	m	25	10.00	250.00
108	Instalación de válvula cuchilla de 16"	und	1	450.00	450.00
109	Montaje de tuberías de acero bridadas 16"	m	1600	50.00	80,000.00
110	Montaje de tuberías de acero bridadas 4"	m	2000	18.00	36,000.00
111	Montaje de tuberías de acero bridadas 6"	m	100	23.00	2,300.00
112	Revestimiento de tuberías de acero 12mm	m2	2043	200.00	408,600.00
113	Revestimiento poliuretano de tuberías de acero 6mm	m2	680	300.00	204,000.00
<b>SISTEMA OVERFLOW</b>					<b>5,680,186.00</b>
<b>Materiales / equipos</b>					
114	Válvula cuchilla 42" ON/OFF acc. Hidr.	und	3	30,500.00	91,500.00
115	Válvula cuchilla 16" ON/OFF acc. Hidr.	und	8	12,700.00	101,600.00
116	Tubería de HDPE 16 pulg SDR-21	m	175	54.00	9,450.00
117	Tubería 42" STD A53B	m	2000	319.00	638,000.00
118	Tee 42x16" STD A53B	und	8	489.00	3,912.00
119	Codos 90° 42" STD A53B	und	4	270.00	1,080.00
120	Codos 45° 42" STD A53B	und	11	552.00	6,072.00
121	Bridas AWWA SO C207 CL-D 42"	und	500	1,850.00	925,000.00
<b>Fabricación/ Instalación/ Montaje</b>					
122	Fabricación y montaje de soportes para tubería	kg	11178	4.00	44,712.00
123	Fabricación de spools bridados de 42"	kg	547020	3.00	1,641,060.00
124	Instalación de válvula cuchilla de 42"	und	1	1,200.00	1,200.00
125	Montaje de tuberías de HDPE 16" SDR 21"	m	175	80.00	14,000.00
126	Montaje de tuberías de acero bridadas 42"	m	1600	120.00	192,000.00
127	Revestimiento de tuberías de acero 12mm	m2	6702	300.00	2,010,600.00
<b>COSTO DIRECTO TOTAL</b>					<b>18,070,299.50</b>

Los precios unitarios para las partidas de fabricación, instalación y montaje se estimaron utilizando el método de análisis de precios unitarios (APUs). A continuación se muestra el detalle del análisis de precios unitarios (APU) para tres partidas de fabricación, instalación y montaje, el resto de partidas fueron estimadas de forma similar:

FABRICACION DE SOPORTES PARA TUBERÍA

kg/DIA 200.0000 EQ. 0.5000 Costo unitario directo por : kg 3.01

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$	Parcial \$
<b>Mano de Obra</b>					
CAPATAZ MECANICO	hh	0.0300	0.0012	13.0000	0.0156
PEON MECANICO	hh	1.0000	0.0400	9.0000	0.3600
OFICIAL MECANICO	hh	1.0000	0.0400	10.0000	0.4000
OPERARIO MECANICO	hh	1.0000	0.0400	11.0000	0.4400
SOLDADOR 3G	hh	0.2500	0.0100	11.0000	0.1100
					<b>1.3256</b>
<b>Materiales</b>					
OXIGENO	m3		0.0030	3.0300	0.0091
ACETILENO	m3		0.0010	10.2000	0.0102
DISCO DE CORTE DE 7" x 1/8" x 7/8"	pza		0.0100	2.4500	0.0245
SOLDADURA ELECTRICA CELLOCORD P 1/8"	kg		0.0100	3.0000	0.0306
SOLDADURA ELECTRICA SUPERCITO DE 1/8"	kg		0.0500	3.1000	0.1550
PERFILES DE ACERO A36	kg		1.1000	0.8000	0.8800
PINTURA	GL		0.0010	20.0000	0.0200
					<b>1.1294</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.0663	0.3314
EQUIPO DE OXICORTE	hm	0.5006	0.0200	2.1300	0.0427
ESMERIL DE 2600 W 7-9"	hm	1.0000	0.0400	1.5200	0.0608
MAQUINA DE SOLDAR 350 A	hm	1.0000	0.0400	3.0000	0.1200
					<b>0.5549</b>

MONTAJE DE SOPORTES PARA TUBERÍA

kg/DIA 480.0000 EQ. 0.5000 Costo unitario directo por : kg 0.99

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$	Parcial \$
<b>Mano de Obra</b>					
CAPATAZ MECANICO	hh	0.6000	0.0100	13.0000	0.1300
OFICIAL MECANICO	hh	2.0000	0.0333	11.0000	0.3667
OPERARIO MECANICO	hh	1.0000	0.0167	10.0000	0.1667
					<b>0.6633</b>
<b>Materiales</b>					
DISCO DE CORTE DE 7" x 1/8" x 7/8"	UND		0.0100	2.4500	0.0245
DISCO DE DESBASTE DE 7"X1/8" X 7/8"	UND		0.0010	3.0600	0.0031
TRAPO INDUSTRIAL	kg		0.0010	1.2000	0.0012

				0.0288		
Equipos						
HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.0332	0.1658	
ESMERIL DE 2600 W 7-9"	hm	1.0000	0.0167	1.5200	0.0810	
TORQUIMETRO DE GOLPE	hm	1.0000	0.0167	2.4400	0.0407	
GRUA 50 TN	hm	0.3000	0.0050	200.0000	0.0100	
				<b>0.2975</b>		

**INSTALACION DE VALVULAS CUCHILLA DE  
48"**

und/DIA      0.5000      EQ.    0.5000      Costo unitario directo por :      1,500.06  
und

Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$	Parcial \$
<b>Mano de Obra</b>					
OPERADOR DE GRUA	hh	0.3300	5.280000	13.0000	68.6400
RIGGER	hh	0.3300	5.280000	10.0000	52.8000
CAPATAZ MECANICO	hh	0.2000	3.200000	13.0000	41.6000
OPERARIO MECANICO	hh	3.0000	48.000000	10.0000	480.0000
PEON MECANICO	hh	2.0000	32.000000	9.0000	288.0000
OFICIAL MECANICO	hh	2.0000	32.000000	11.0000	352.0000
VIGIA	hh	0.3000	4.800000	9.0000	43.2000
					<b>1,326.240</b>
					<b>0</b>
<b>Materiales</b>					
MATERIALES (VARIOS)	%mo		5.000000	1,326.240	66.3120
PRUEBA DE CALIDAD	glb		1.000000	30.0000	30.0000
					<b>96.3120</b>
<b>Equipos</b>					
HERRAMIENTAS MANUALES	%mo		5.000000	1,326.240	66.3120
GRUA DE 50T	hm	0.3000	4.800000	200.0000	9.6000
EQUIPO DE MONTAJE	hm	1.0000	16.000000	5.0000	0.8000
ANDAMIOS TIPO TORRE	hm	1.0000	16.000000	5.0000	0.8000
					<b>77.5120</b>

**Consideraciones:**

- Los costos no incluyen IGV.
- No se incluyen costos indirectos de instalación, fabricación y montaje.
- No se incluyen costos de las disciplinas civil, estructural, eléctrica e instrumentación.

## CONCLUSIONES

- Se presentaron los métodos y procedimientos aplicables para realizar el diseño del sistema propuesto considerando una capacidad de diseño de 9872 t/h.
- Se determinaron los diámetros de tubería más adecuados para cada etapa del sistema, para ello se realizaron los análisis de diferentes alternativas y condiciones de flujo con el objetivo de evitar problemas de sedimentación y fallas por presiones excesivas.
- Se seleccionaron los materiales más adecuados para cada línea de transporte minimizando las probabilidades de desgaste y falla de las tuberías. Se seleccionaron tuberías de HDPE en tramos a presión atmosférica y tuberías de acero revestidas en tuberías a presión.
- Se dimensionaron los cajones de distribución CJ-02, CJ-03 y CJ-04 de acuerdo a las recomendaciones propuestas por Harold Linke teniendo en cuenta las condiciones de flujo de relave y agua en su ingreso y salida garantizando tiempos de retención mayores o iguales a 60 segundos.
- Se realizó el dimensionamiento y selección de los ciclones modelo GMAX de la marca Krebs de acuerdo al modelo de Richard Arterburn. Para la primera etapa de clasificación se seleccionaron ciclones GMAX 15 los cuales se ubicaron en dos nidos con 32 ciclones cada uno (27 operativos y 5 en Stand-by). Para la segunda etapa de clasificación se seleccionaron ciclones GMAX 26 los cuales se ubicaron en un nido con 21 ciclones (17 operativos y 4 en stand-by).
- Se realizó el análisis hidráulico en el sistema propuesto para determinar la necesidad de implementar una bomba de relaves en el sistema de descarga de arenas desde el CJ-04 al terraplén de la presa de relaves seleccionando el modelo de bomba 12/10 AH de Warman. La selección del modelo y condiciones de operación de la bomba se realizó de acuerdo a la metodología y recomendaciones del fabricante.
- Se realizó un estimado de costo referencial de materiales, equipos, fabricación y montaje arrojando un total de 18,070,299.50 USD para el sistema propuesto, este costo representa el costo directo sin considerar los costos de las disciplinas civil, estructural, eléctrica e instrumentación, tampoco se consideraron los costos indirectos de instalación y montaje. Los costos no incluyen IGV.

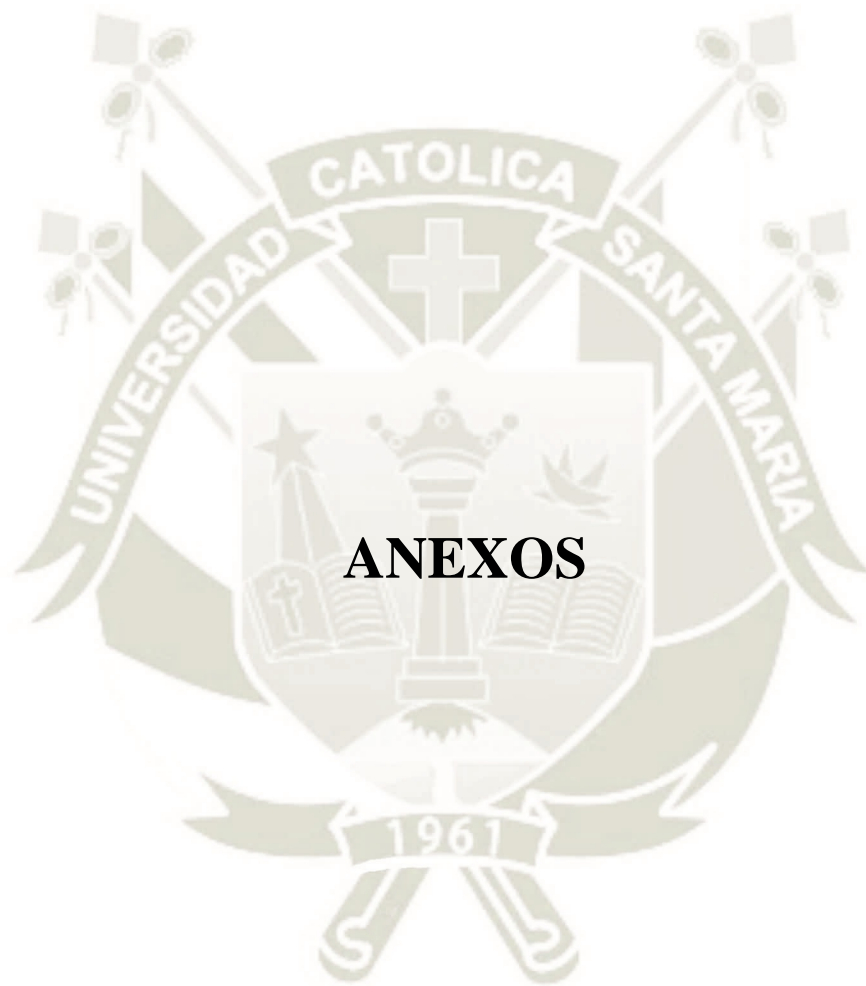
## RECOMENDACIONES

- En el sistema de bombeo de arena es recomendable instalar puntos de inyección de agua para lavado o dilución de las tuberías en caso de sedimentación por paradas de planta.
- En las instalaciones de clasificación y cajones de distribución es recomendable instalar accesos y plataformas que faciliten la toma de muestras y manipulación de equipos o válvulas.
- En el primer corredor de tuberías que trabajará como canal suelen emplearse venteos que permitan un flujo de aire constante al interior de la tubería así como manholes que permitan realizar el lavado de las líneas en caso sea necesario.
- Se recomienda que el revestimiento de las tuberías de acero se realice también en la cara plana de las bridas de conexión para evitar la compra de empaquetaduras y poder realizar las conexiones directamente entre tuberías.

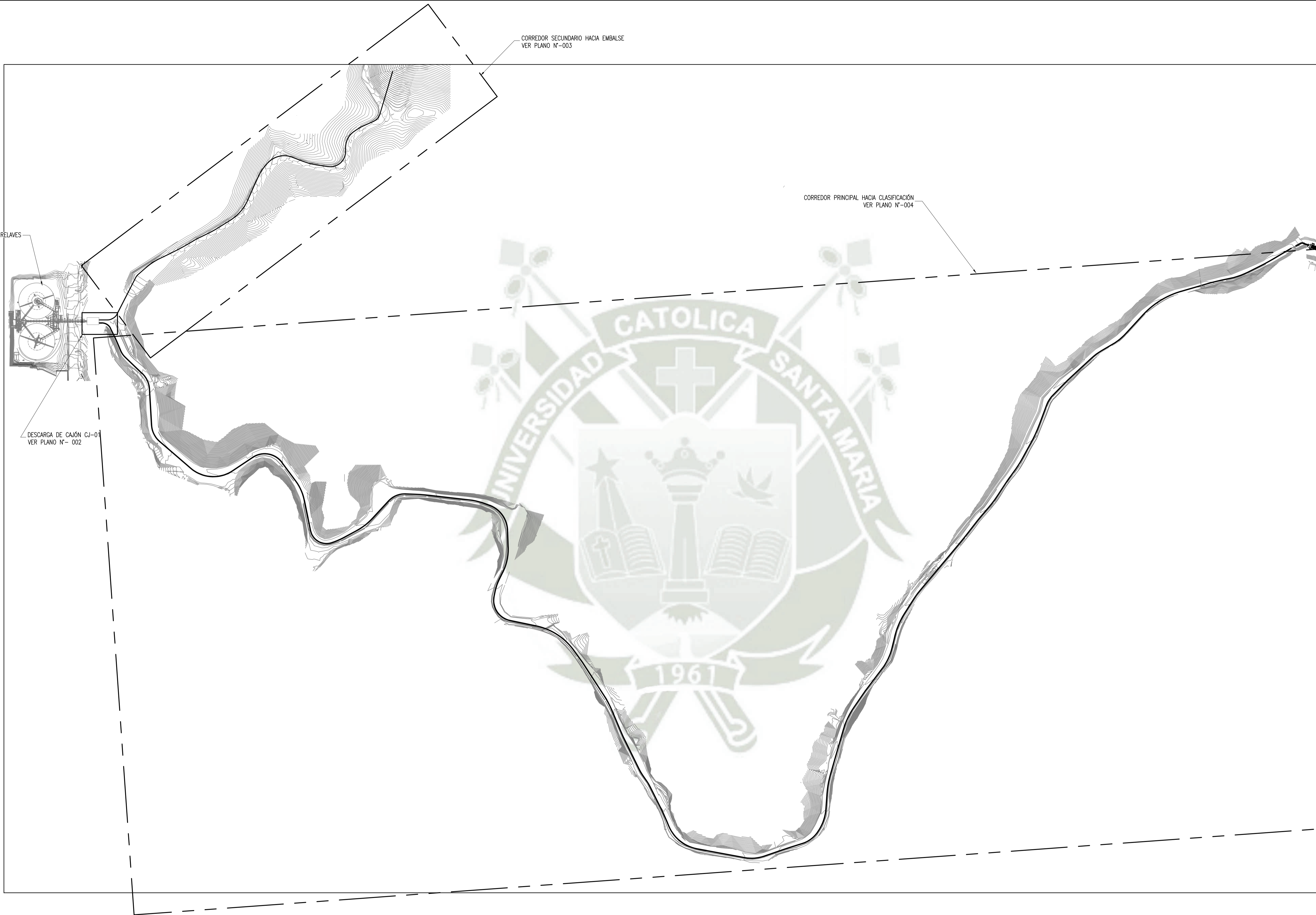
## REFERENCIAS

- [1] E. Reyes Pérez, *Disposición de relaves*, Paper publicado en Academia.edu.
- [2] P. A. Hinojosa Talavera, *Nuevas tecnologías para la reducción del bypass en el ciclonado de relaves de cobre.*, Arequipa, 2013.
- [3] R. Fuentes Aguilar, J. Rayo Prieto y C. Moreno Gonzáles, *Fluidodinámica Aplicada a la Minería*, Santiago de Chile: Juan Rayo Capacitación S.A., 2013.
- [4] Minerales Industriales, «MINDU,» 14 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.mindu.cl/news/2018/3/14/tabla-de-equivalencias-tayler-astme-britanica-francesa-alemana>. [Último acceso: 15 Mayo 2020].
- [5] Geotecnia Online, «Diccionario de Geotecnia,» 08 Junio 2020. [En línea]. Available: <https://www.diccionario.geotecnia.online/palabra/diametro-medio-aritmetico-d50/>.
- [6] C. Vidal Peralta, *Estudios reofísicos de relaves chilenos*, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2013.
- [7] B. E. Abulnaga, *Slurry Systems Handbook*, Nueva York: McGraw-Hill, 2002.
- [8] E. J. Wasp y J. P. Kenny, *Solid-Liquid flow slurry pipeline transportation*, San Francisco: Trans Tech Publications, 1977.
- [9] F. A. Jalil Vega, *Modelamiento de flujos de pulpas de cobre en cajones de distribución*, Universidad de Chile, Facultad de ciencias físicas y matemáticas, 2010.
- [10] Warman International Ltd., *Warman Slurry Pumping Manual*, Internal Publication, 2002.
- [11] Weir Slurry Group, Inc., *Horizontal Slurry Pumps*, 2014.
- [12] H. A. Linke, *Launders*, Nueva York, 1960.
- [13] R. A. Arterburn, *The sizing and selection of hydrocyclones*, New York, 1982.
- [14] FLSmidth, «FLSmidth Krebs GMax Technologies Cyclone,» [En línea]. Available: [www.FLSmidthKrebs.com](http://www.FLSmidthKrebs.com).
- [15] SysCad, «Size Distribution Models,» 20 Abril 2020. [En línea]. Available: <https://help.syscad.net/index.php/Cyclone>. [Último acceso: 30 Junio 2020].

- [16] H. A. Ari Mamani, Servicios profesionales manejo y disposición de relaves SMCV, Universidad Nacional de San Agustín, Facultad de Ingeniería de Procesos, 2016.
- [17] The American Society of Mechanical Engineers - ASME, *ASME B31.4 Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries*, ASME International, 2012.
- [18] Canada Engineered Fabrication, «Fangles,» [En línea]. Available: <https://www.bmssi.ca/>.
- [19] Victaulic Company, «Victaulic Solutions,» [En línea]. Available: [www.victaulic.com](http://www.victaulic.com).
- [20] Aguartec, «Productos accesorios de HDPE para termofusión,» [En línea]. Available: [www.aguartec.com,ar](http://www.aguartec.com,ar).
- [21] AKO Armaturen & Separationstechnik GmbH, «Pinch-valve,» [En línea]. Available: [www.pinch-valve.com](http://www.pinch-valve.com).
- [22] Otkonsas, «Slurry Ball Valves,» [En línea]. Available: [www.otkonsas.com](http://www.otkonsas.com).
- [23] CMO Valves, «Lista de productos,» [En línea]. Available: <https://www.cmovalves.com/es/valvulas/valvula-de-guillotina-serie-a/>.
- [24] Emerson, «Sensores del caudalímetro magnético bridado,» [En línea]. Available: <https://www.emerson.com/es-es/catalog/rosemount-8705-es-es?fetchFacets=true#facet:&facetLimit:&productBeginIndex:0&partsBeginIndex:0&orderBy:&pageView:list&minPrice:&maxPrice:&pageSize:&>.
- [25] Ashcroft, «Manómetros de presión modelo 1279,» [En línea]. Available: <https://ashcroftsudamericana.com/produto/manometro-de-processo-modelo-1279/>.
- [26] Research Gate, «Nuclear density gauge components,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Nuclear-density-gauge-components-Hoepfner-and-Liptak-1982-1995\\_fig10\\_329272537](https://www.researchgate.net/figure/Nuclear-density-gauge-components-Hoepfner-and-Liptak-1982-1995_fig10_329272537).
- [27] Warman Pump Group, «Pump Performance Curves,» [En línea]. Available: [www.global.weir](http://www.global.weir).




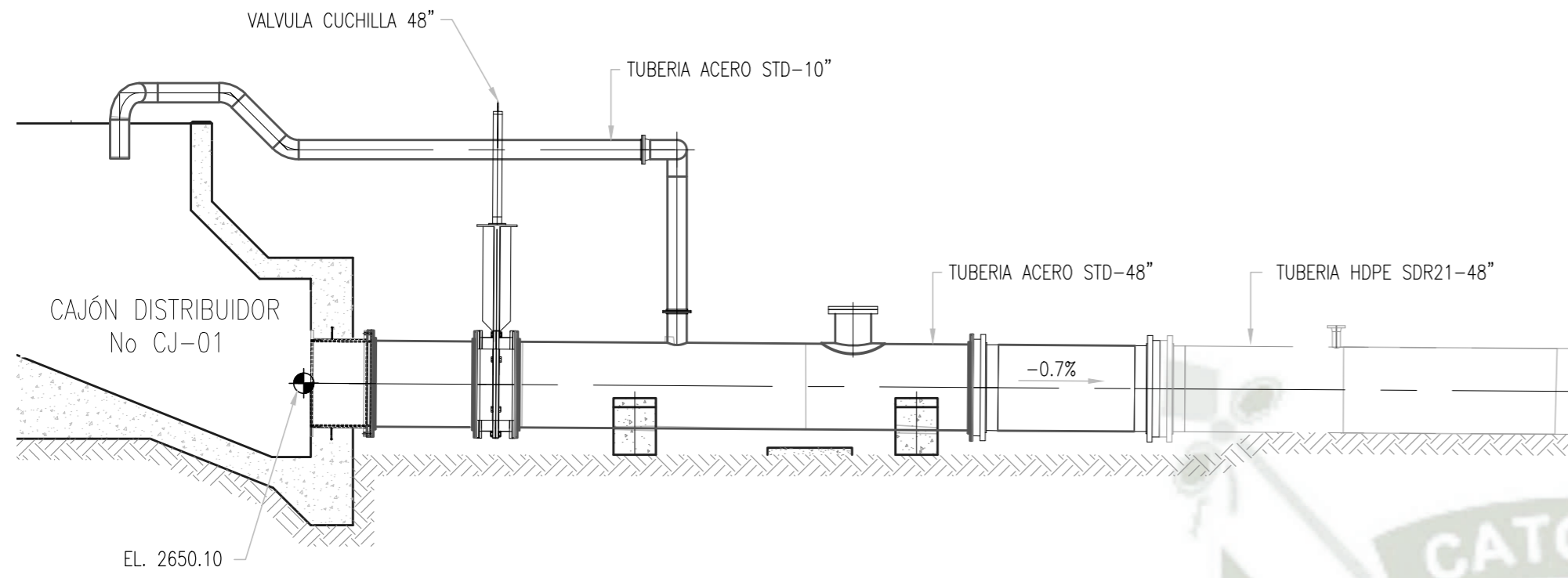




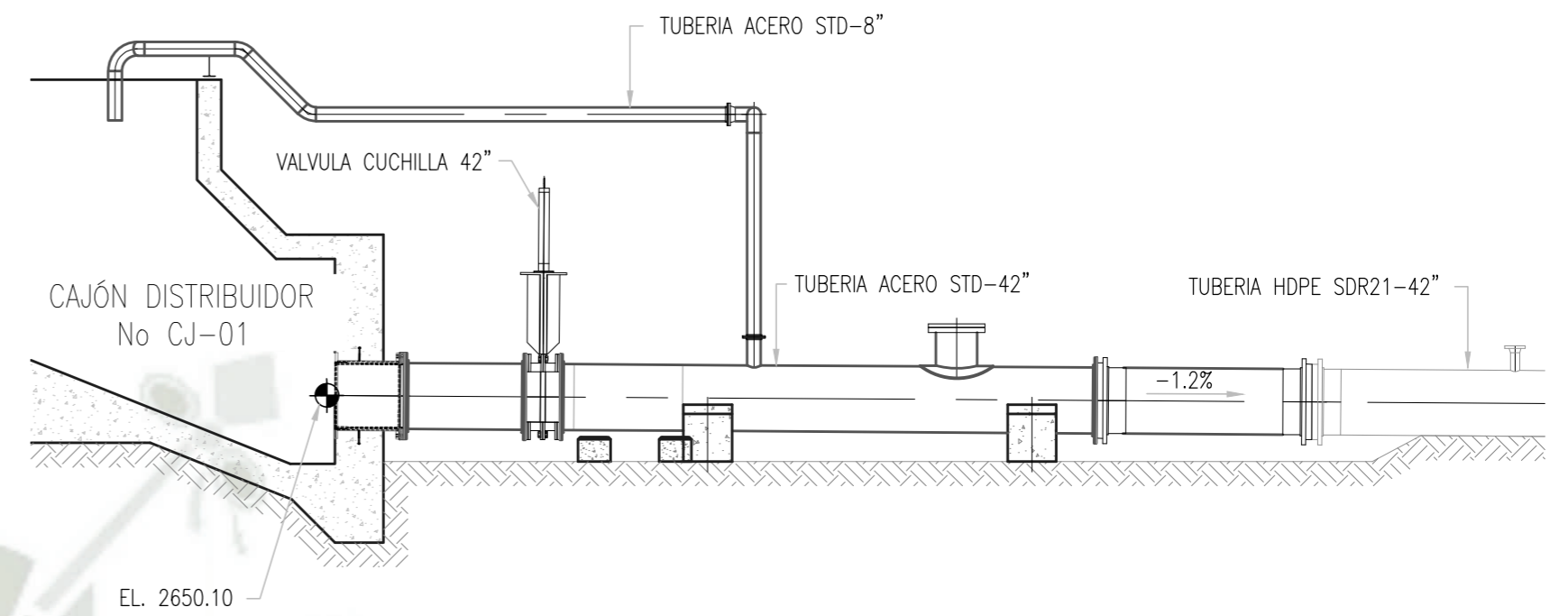
VISTA PLANTA-DESCARGA DE RELAVES DESDE CJ-01 HACIA SISTEMA DE CLASIFICACION Y EMBALSE  
 ESCALA 1:4000

NOTAS:  
 1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.  
 2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

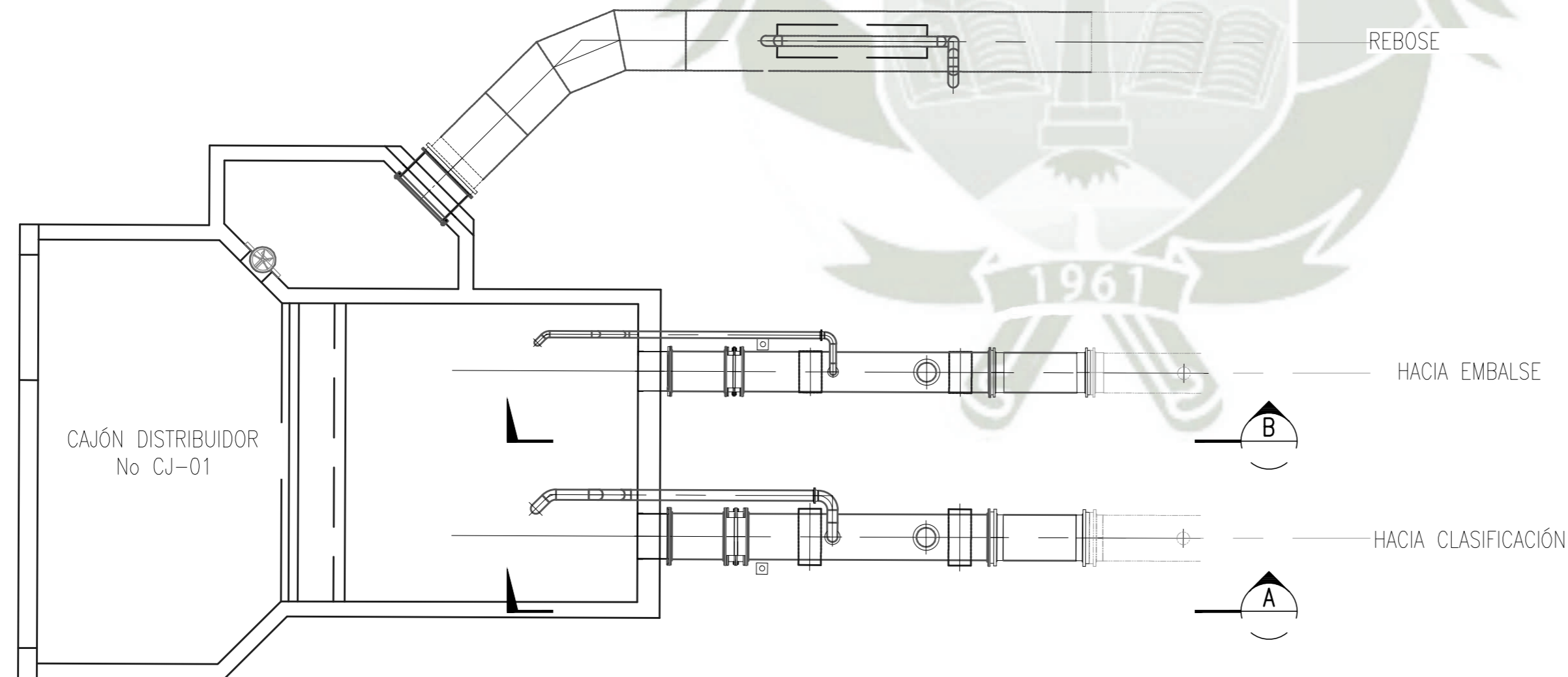
	Fecha	Nombre	Firmas	 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
Dibujado:		I. Flores		
Revisado:				
Aprobado:				
Escala:	CORREDOR PRINCIPAL DE RELAVES TOTALES DESDE CJ-01 HACIA EMBALSE Y SISTEMA DE CLASIFICACIÓN			Plano: 001
Indicada				Sustituye a:
				Sustituido por:



SECCION A  
1:80




SECCION B  
1:80



VISTA PLANTA-DESCARGA DE CAJÓN CJ-01  
ESCALA 1:125

- NOTAS:  
 1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.  
 2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

	Fecha	Nombre	Firmas	 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
Dibujado:		I. Flores		
Revisado:				
Aprobado:				
Escala:	TUBERIAS DE DESCARGA CAJÓN DISTRIBUIDOR CJ-01 RELAVES TOTALES			Plano: 002
Indicada				Sustituye a: Sustituido por:



VISTA PLANTA-LÍNEA DE DESCARGA DESDE CJ-01 HACIA EL EMBALSE  
 ESCALA 1:1200

- NOTAS:  
 1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.  
 2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

	Fecha	Nombre	Firmas
Dibujado:		I. Flores	
Revisado:			
Aprobado:			

Escala:		Plano:	003
Indicada:	LÍNEA DE DESCARGA DE RELAVES TOTALES DESDE EL CAJÓN CJ-01 HACIA EL EMBALSE		Sustituye a:
			Sustituido por:




"Universidad Católica de Santa María"  
 Escuela Profesional de Ingeniería  
 Mecánica, Mecánica Eléctrica y  
 Mecatrónica.



VISTA PLANTA-LÍNEA DE DESCARGA DESDE CJ-01 HACIA CJ-02  
 ESCALA 1:3300

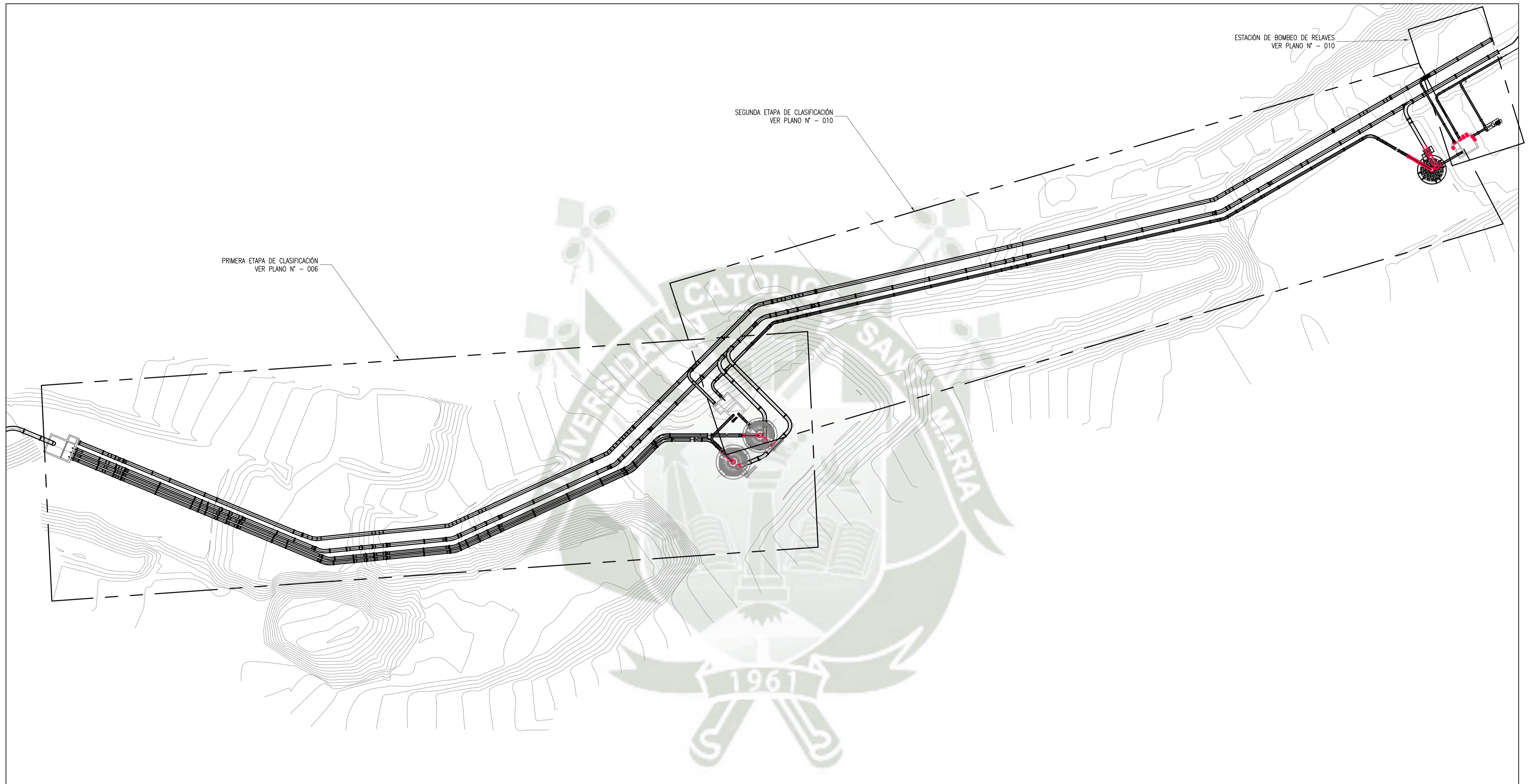
- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.
  2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

	Fecha	Nombre	Firmas
Dibujado:		I. Flores	
Revisado:			
Aprobado:			



Universidad Católica de Santa María  
 Escuela Profesional de Ingeniería  
 Mecánica, Mecánica Eléctrica y  
 Mecatrónica.

Escala: Indicada	Línea de descarga de los relaves totales desde el cajón distribuidor CJ-01 hacia el cajón distribuidor CJ-02	Plano: 004
Sustituye a:		Sustituido por:

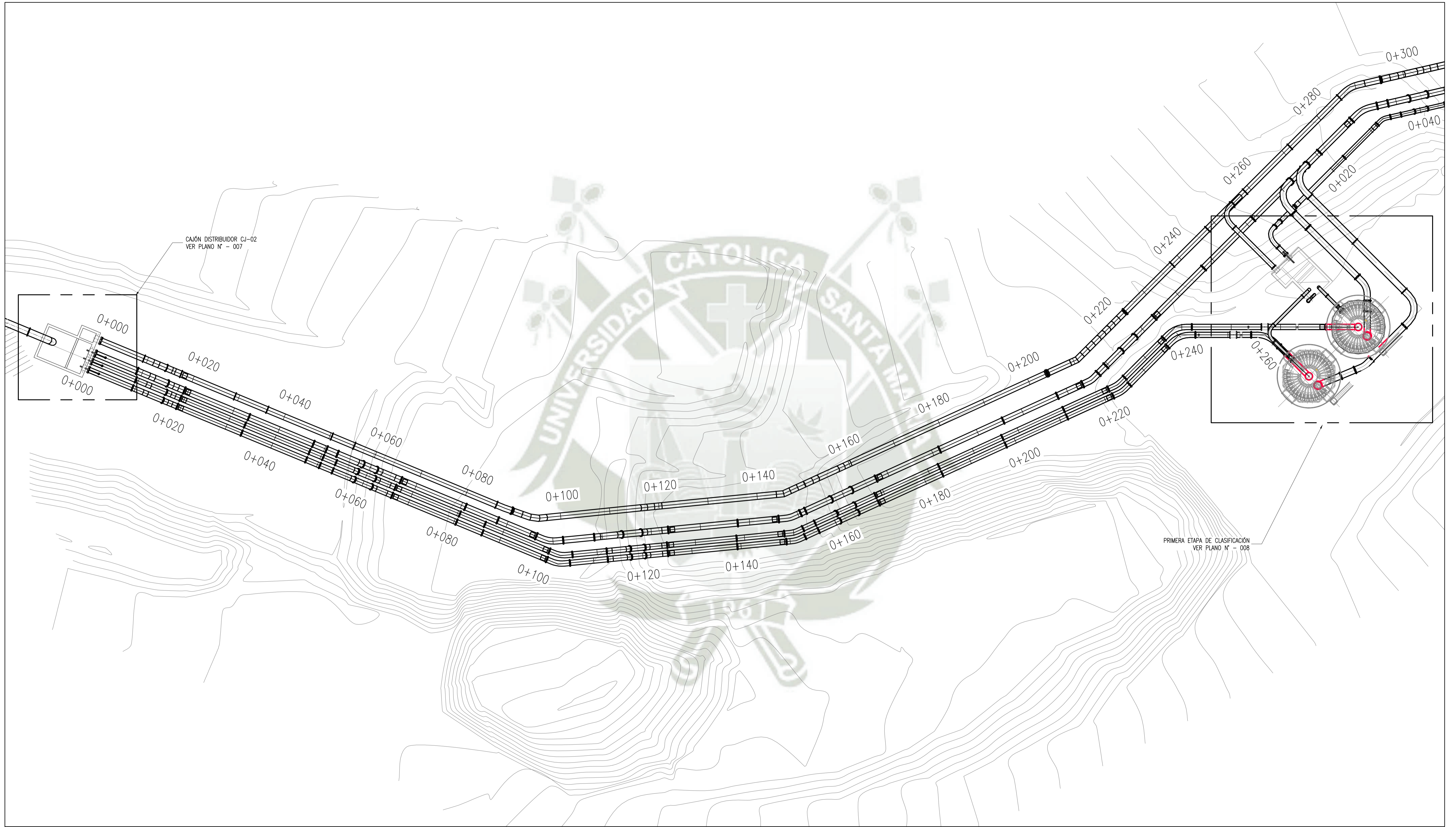


VISTA PLANTA-SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE RELAVES (PLANO ÍNDICE)

ESCALA 1:625

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.
  2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

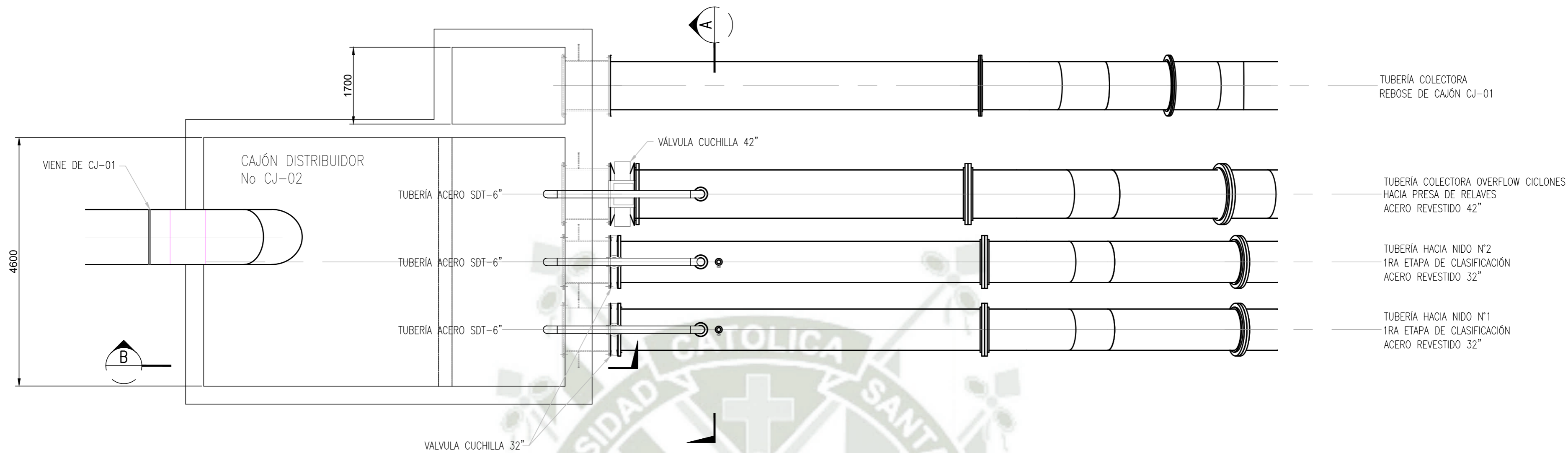
	Fecha	Nombre	Firmas	 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
Dibujado:		I. Flores		
Revisado:				
Aprobado:				
Escala:	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE RELAVES - PLANO ÍNDICE			Plano: 005
Indicada				Sustituye a: Sustituido por:



**SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE RELAVES-PRIMERA ETAPA DE CLASIFICACIÓN**  
 ESCALA 1:300

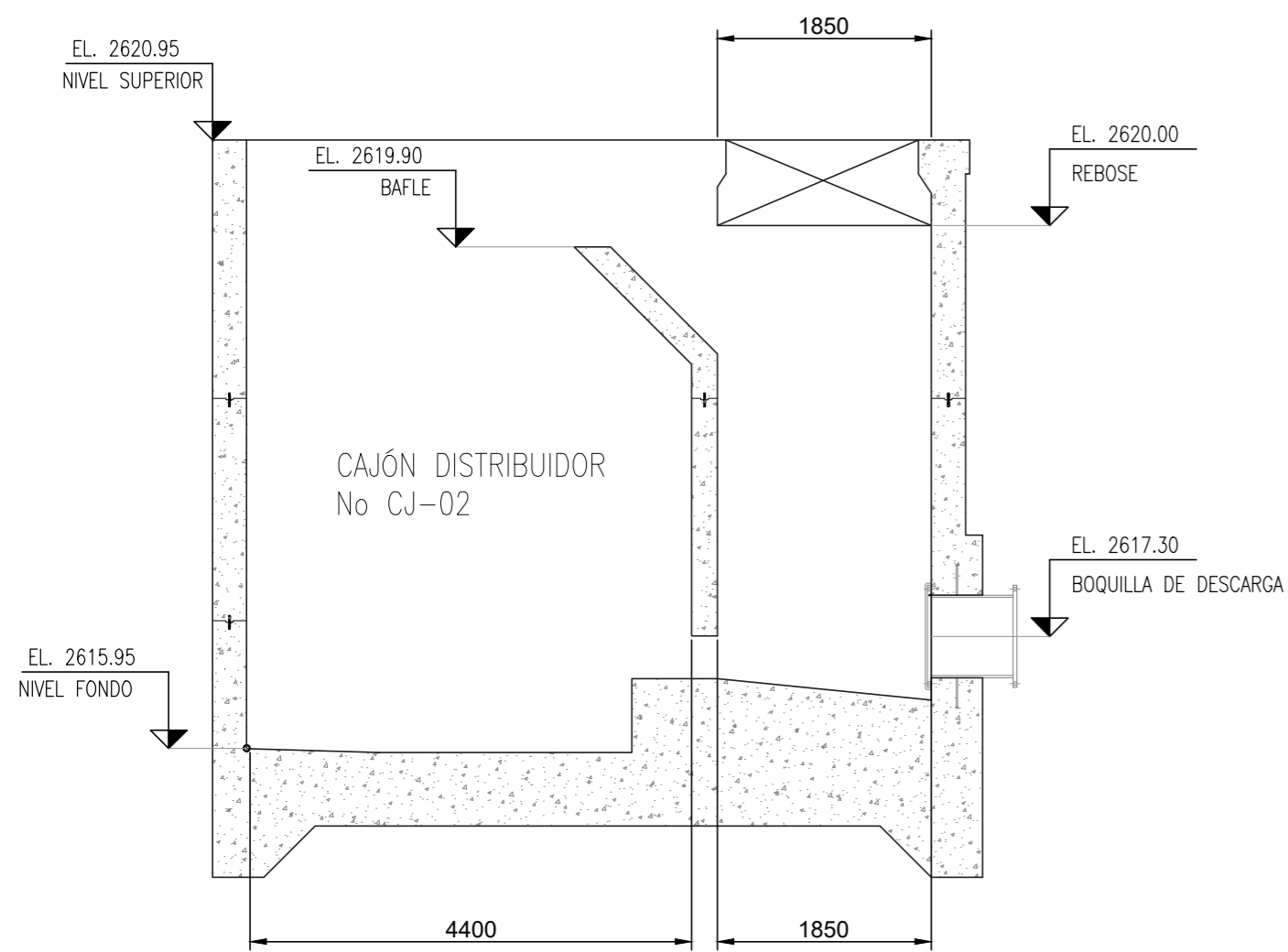
- NOTAS:  
 1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.  
 2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

Dibujado:	Fecha:	Nombre:	Firmas:	 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
Revisado:		I. Flores		
Aprobado:				
Indicada:	Escala:	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE RELAVES - PRIMERA ETAPA ARREGLO GENERAL		Plano: 006
				Sustituye a:
				Sustituido por:



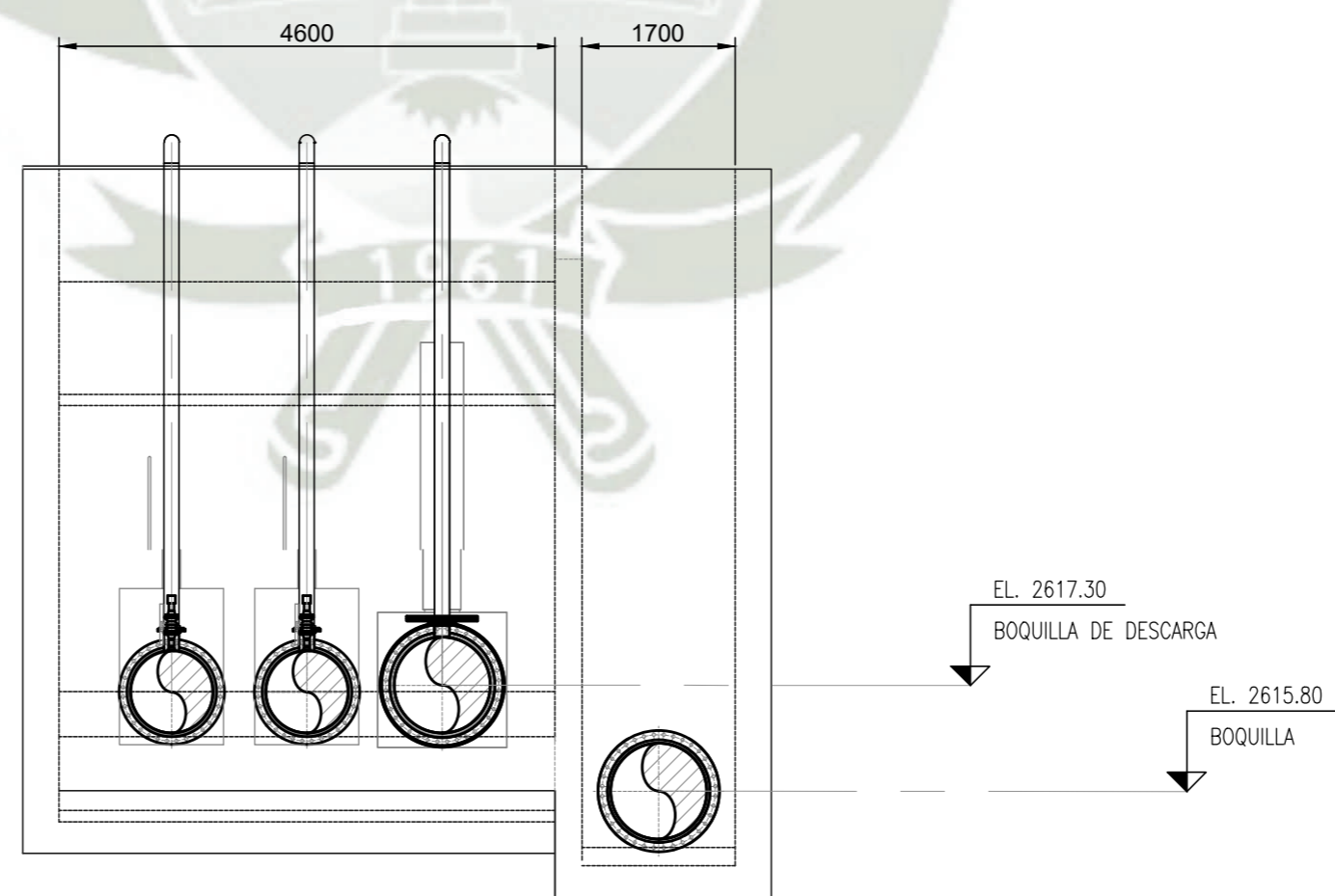
VISTA PLANTA-DESCARGA DE CAJÓN CJ-02

ESCALA 1:67



SECCION B


1:80

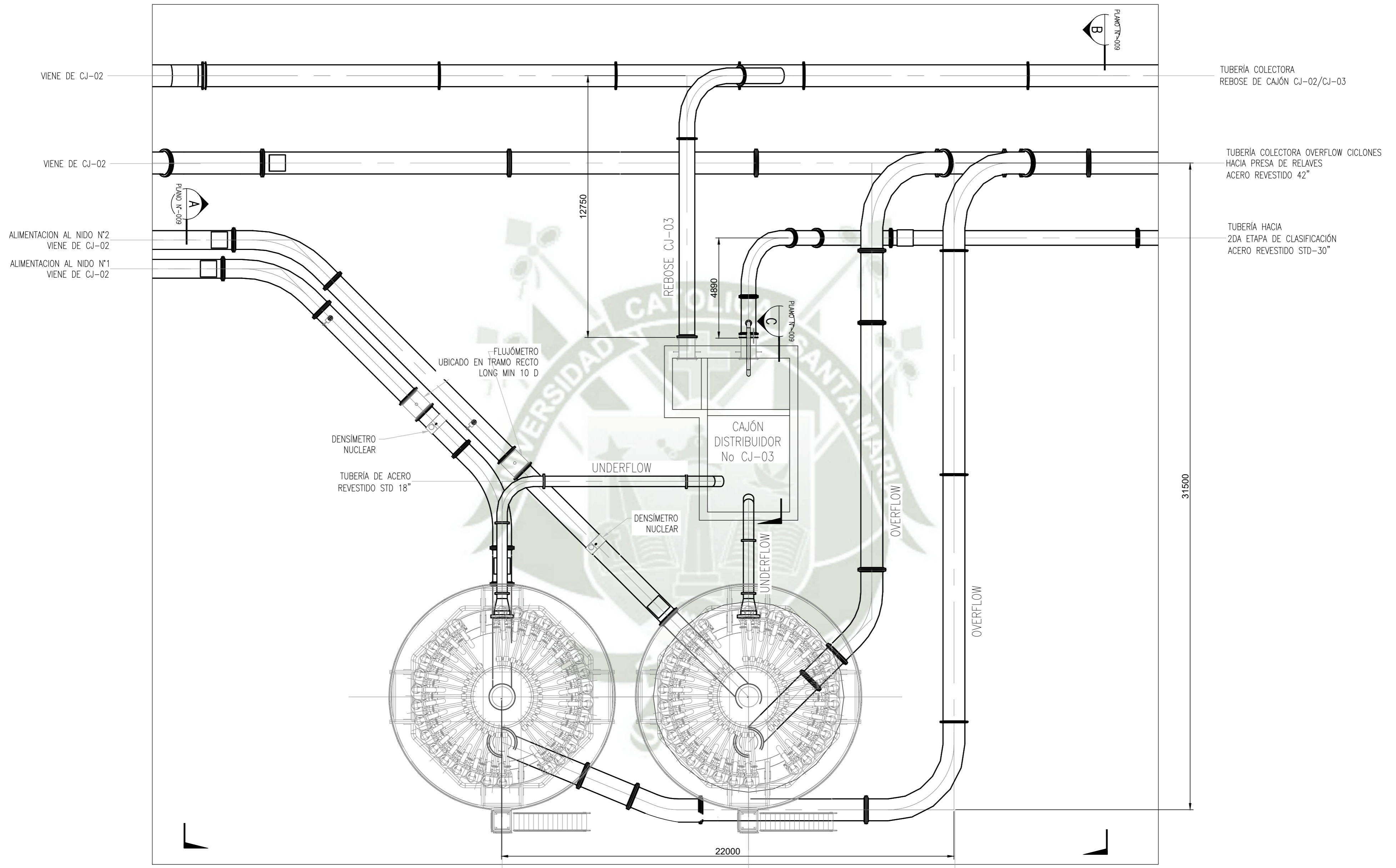


SECCION A

1:80

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.
  2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

	Fecha	Nombre	Firmas		
Dibujado:		I. Flores			
Revisado:					
Aprobado:					
Escala:	CAJÓN DISTRIBUIDOR CJ-02 SECCIONES Y DETALLES				
Indicada					
 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.				Plano:	007
				Sustituye a:	
Sustituido por:					



VISTA PLANTA- CICLONES PRIMERA ETAPA DE CLASIFICACIÓN  
ESCALA 1:125

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.
  2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

NIDO DE CICLONES N°1  
1RA ETAPA DE CLASIFICACIÓN

NIDO DE CICLONES N°2  
1RA ETAPA DE CLASIFICACIÓN

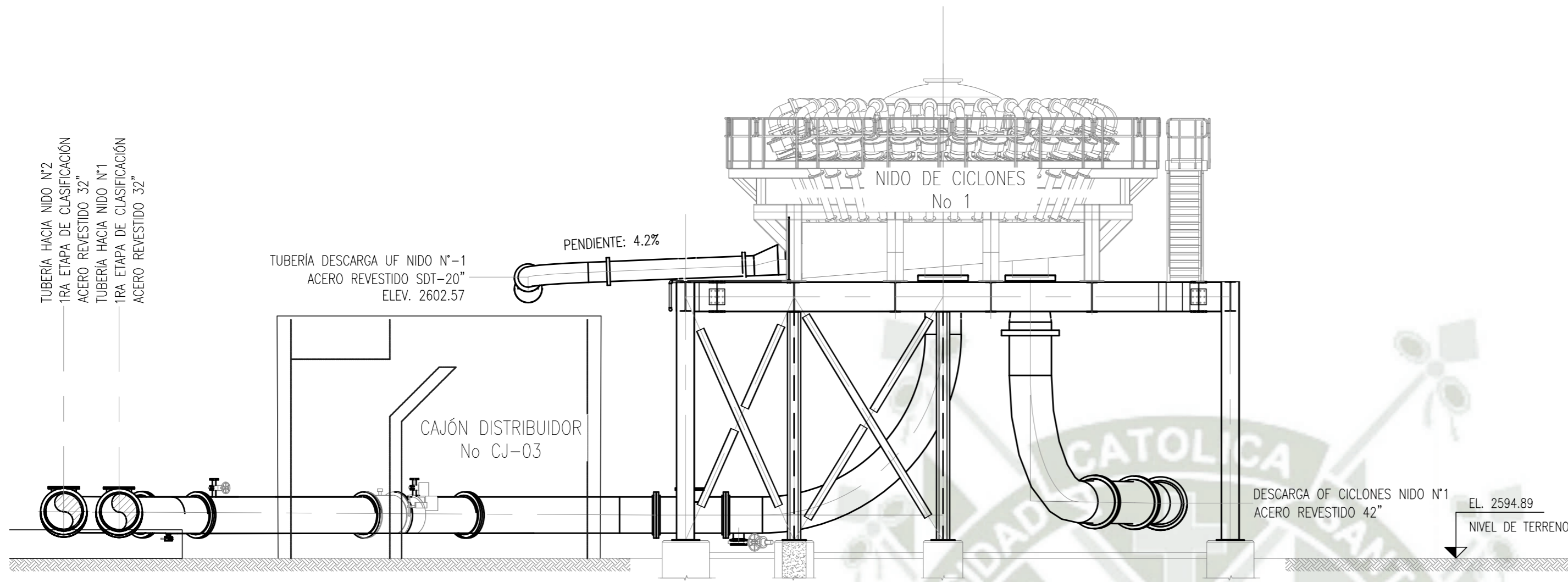
TUBERÍA DE ACERO REVESTIDO  
STD 42"

	Fecha	Nombre	Firmas
Dibujado:		I. Flores	
Revisado:			
Aprobado:			

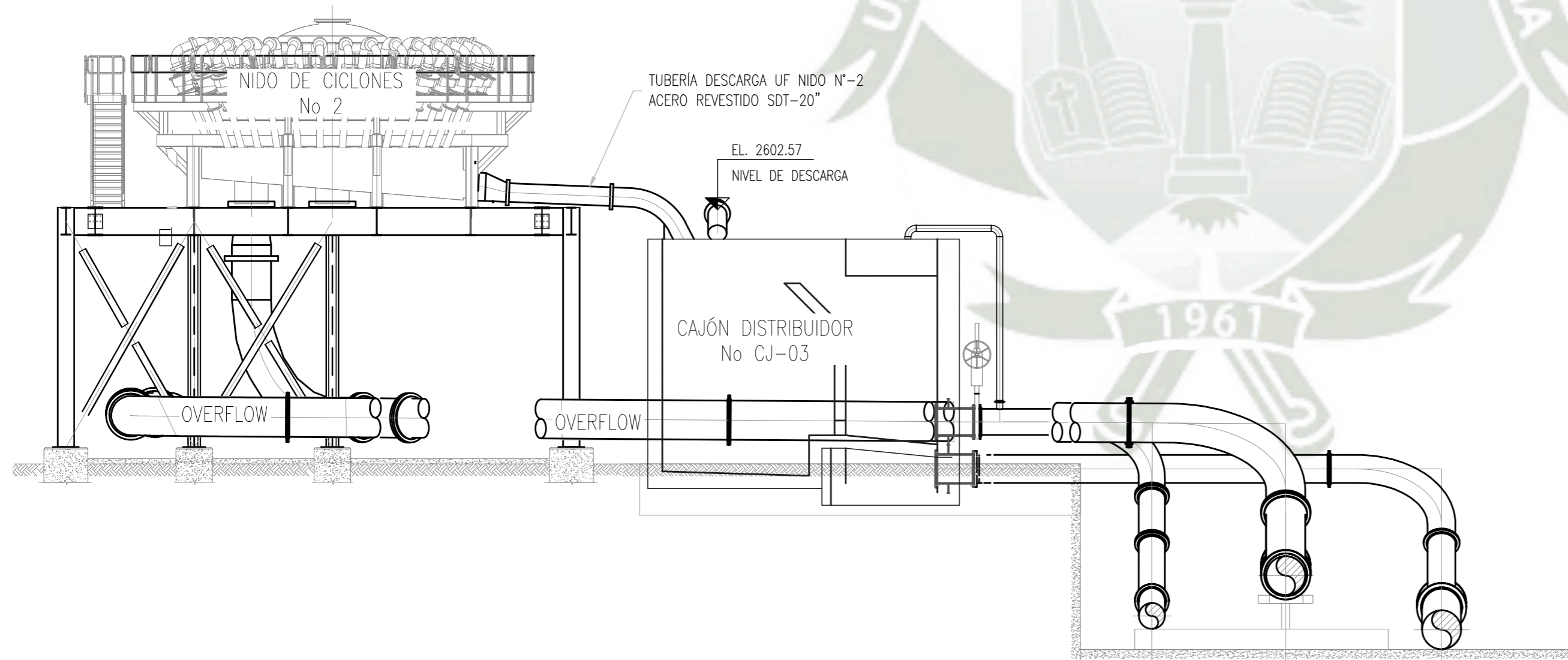


"Universidad Católica de Santa María"  
Escuela Profesional de Ingeniería  
Mecánica, Mecánica Eléctrica y  
Mecatrónica.

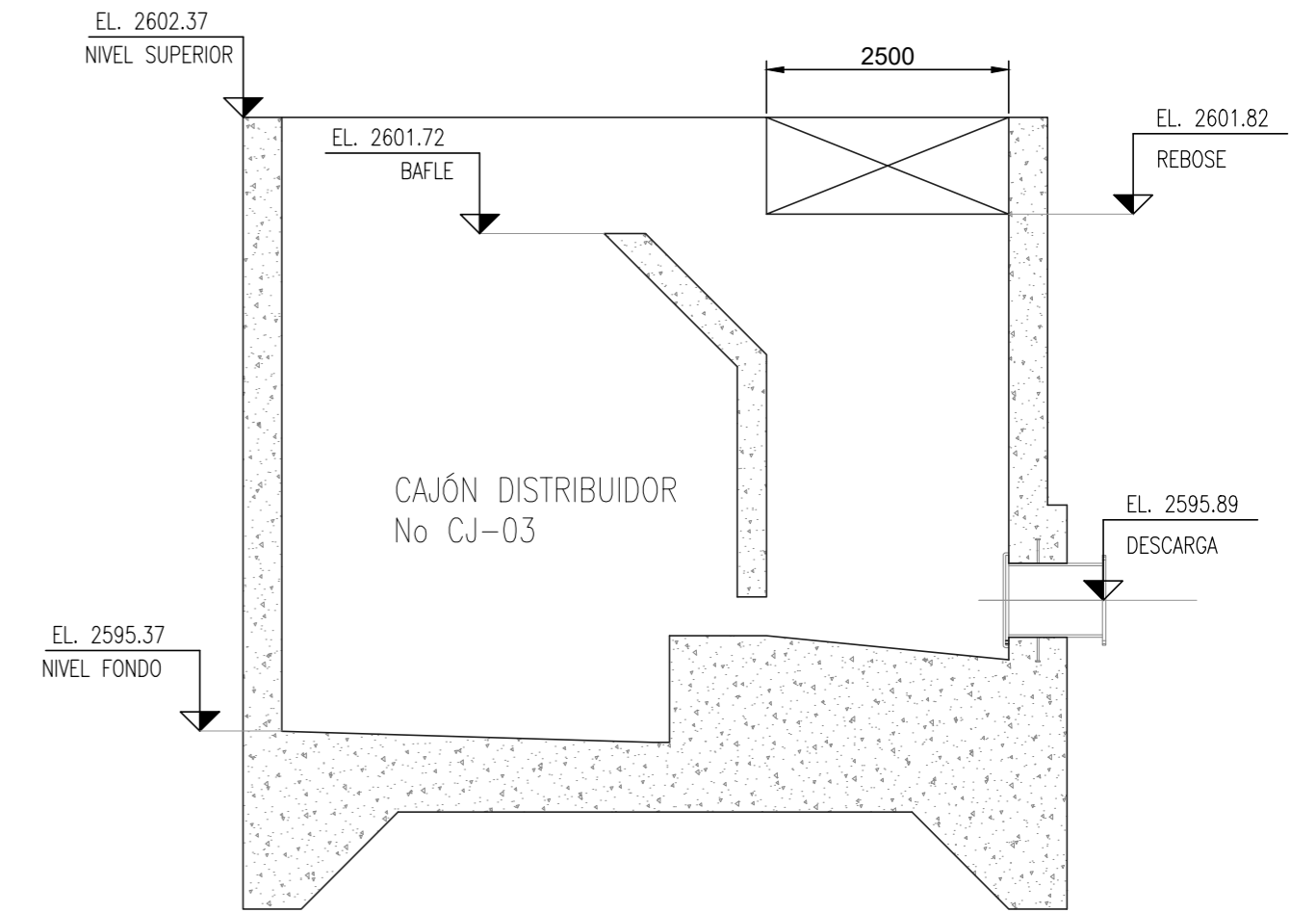
Indicada	CICLONES PRIMERA ETAPA DE CLASIFICACIÓN VISTA DE PLANTA	Plano: 008
		Sustituye a:
		Sustituido por:



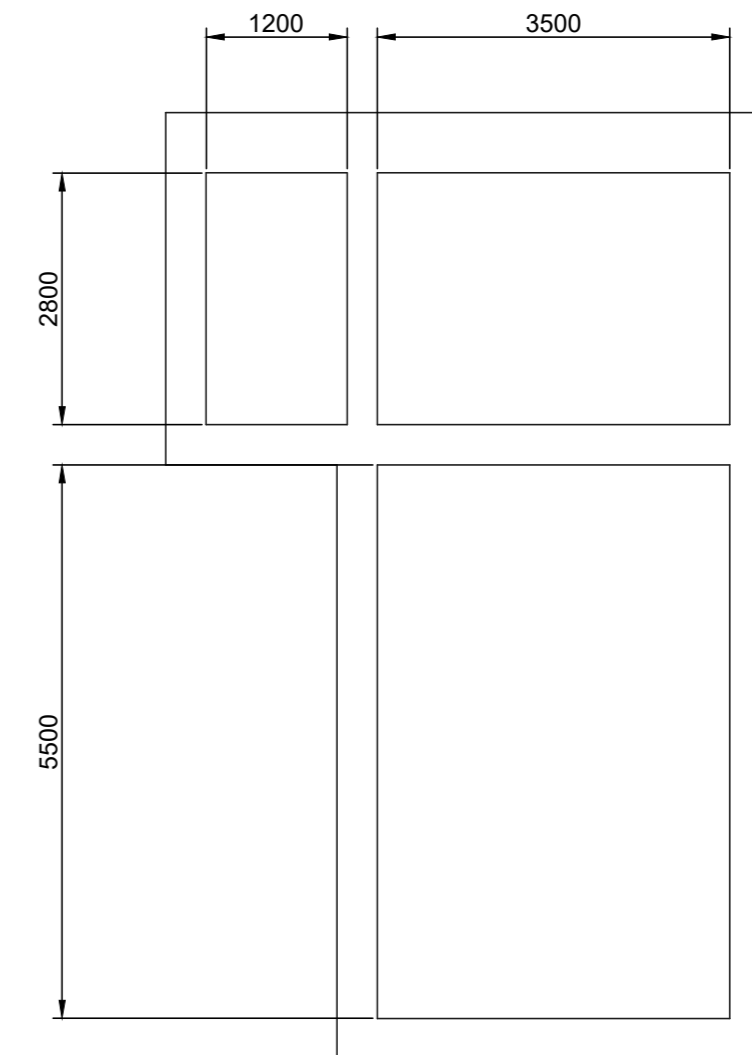
SECCION A  
1:100 PLANO N°-008



SECCION B  
1:120 PLANO N°-008



SECCION C  
1:70 PLANO N°-008



VISTA PLANTA- CAJON DISTRIBUIDOR CJ-03  
ESCALA 1:70

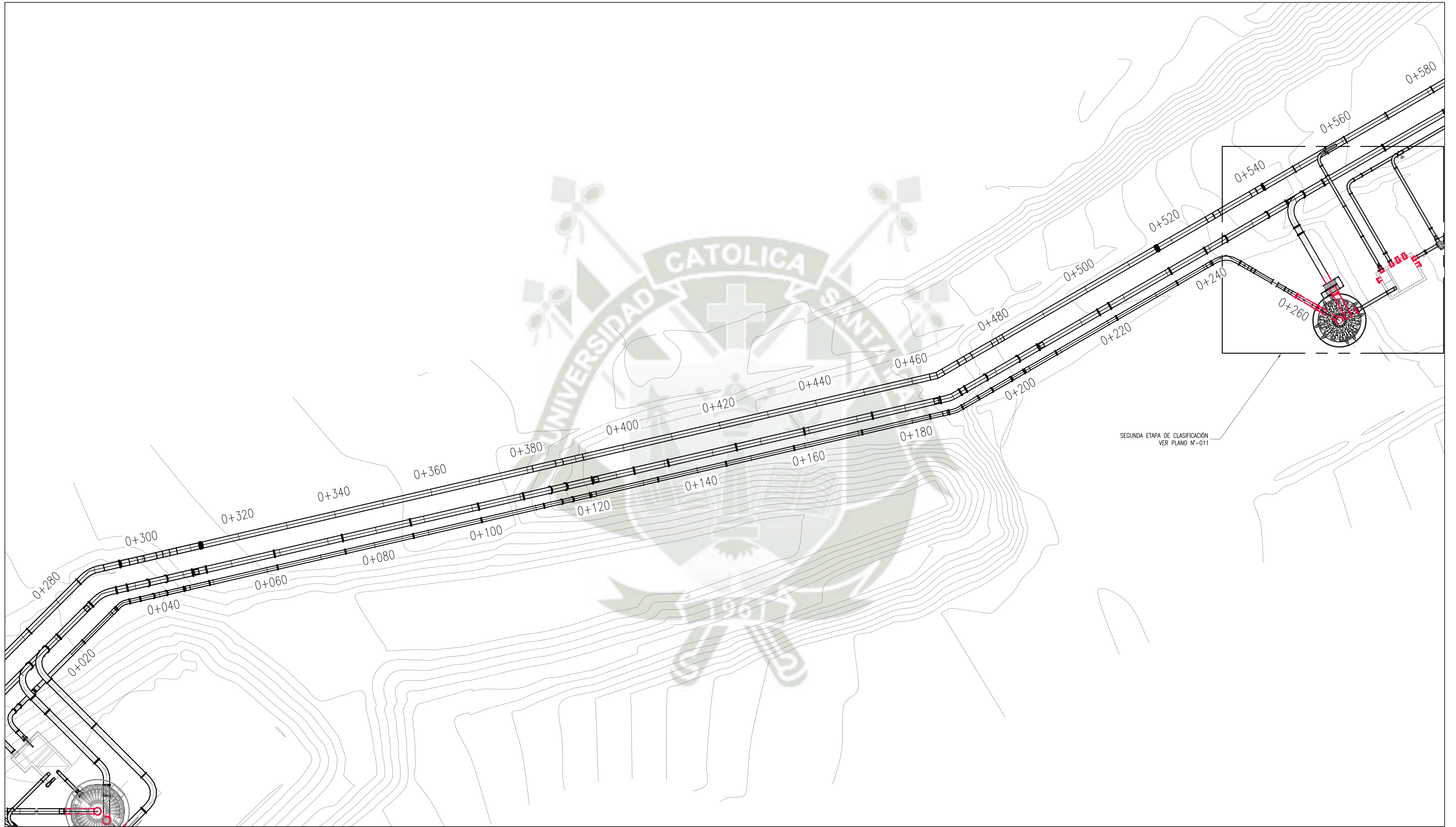
- NOTAS:  
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.  
2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

TUBERÍA HACIA NIDO N°1  
2DA ETAPA DE CLASIFICACIÓN  
ACERO REVESTIDO 30"

TUBERÍA COLECTORA OVERFLOW  
HACIA PRESA DE RELAVES  
ACERO REVESTIDO 42"

TUBERÍA COLECTORA  
REBOSE DE CAJÓN CJ-03

	Fecha	Nombre	Firmas	 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
Dibujado:		I. Flores		
Revisado:				
Aprobado:				
Indicada	PRIMERA ETAPA DE CLASIFICACIÓN SECCIONES Y DETALLES			Plano: 009 Sustituye a: Sustituido por:



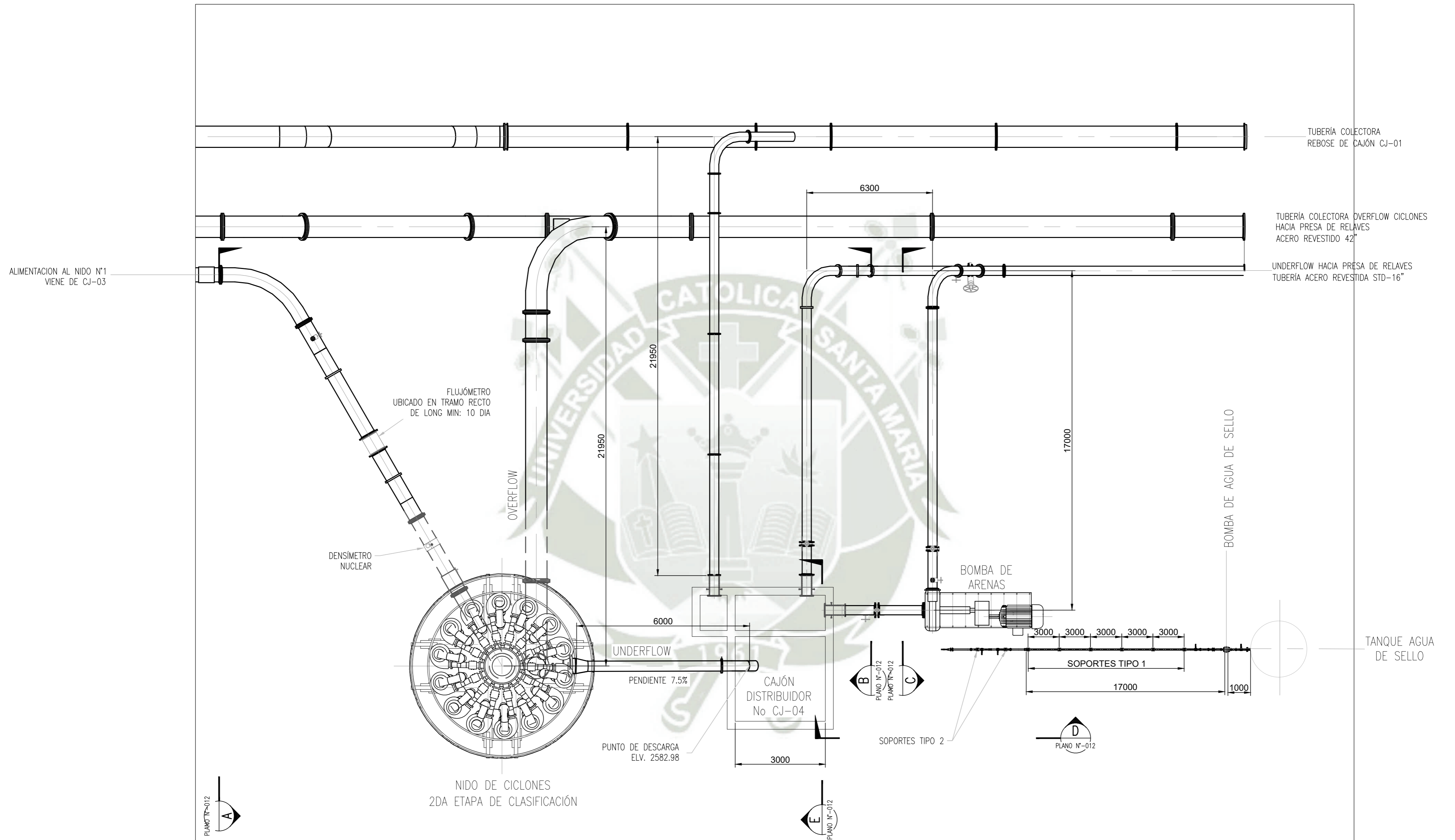
SEGUNDA ETAPA DE CLASIFICACIÓN  
VER PLANO N°-011

**SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE RELAVES-SEGUNDA ETAPA DE CLASIFICACIÓN**

ESCALA 1:300

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILIMETROS.
  2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

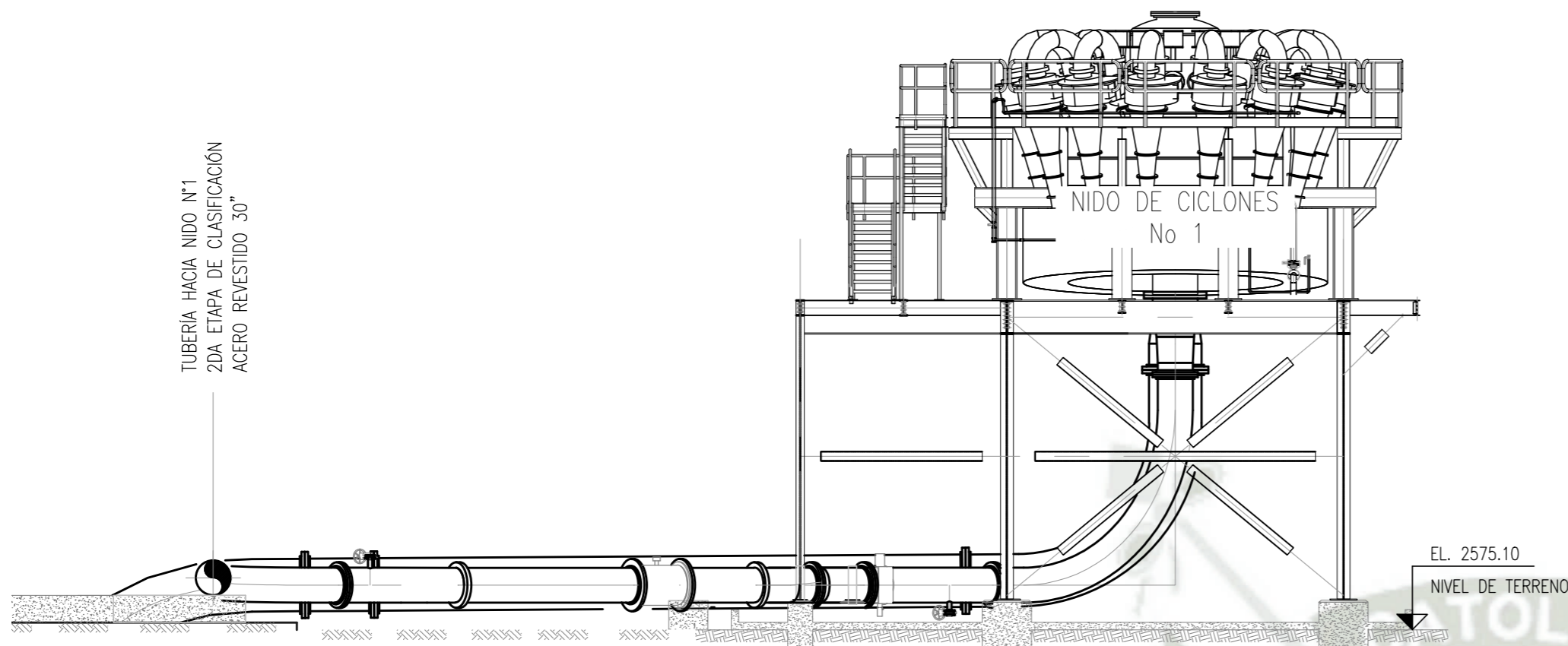
Dibujado:	Fecha	Nombre	Firmas	 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
Revisado:		I. Flores		
Aprobado:				
Escala:	SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE RELAVES - SEGUNDA ETAPA - ARREGLO GENERAL			Plano: 010
Indicada:				Sustituye a:
				Sustituido por:



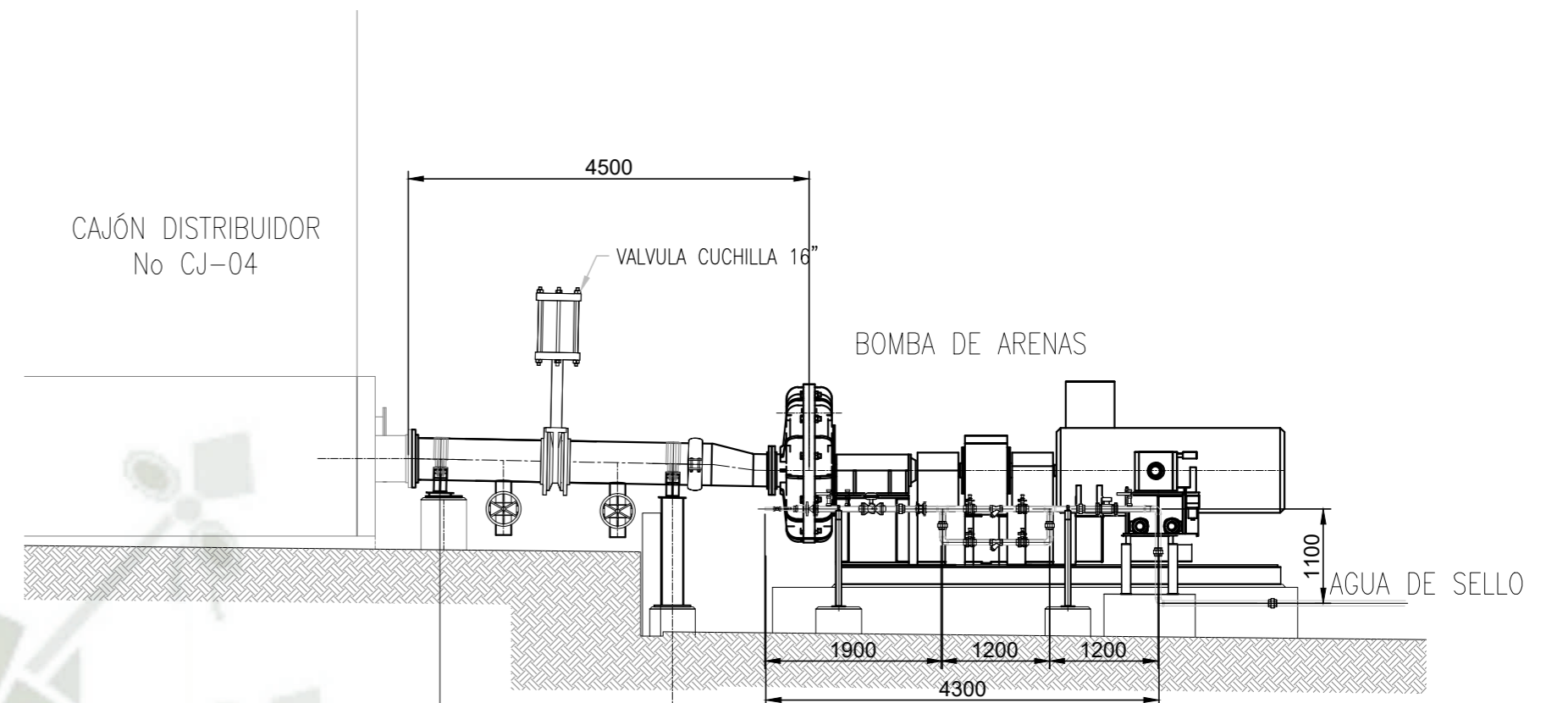
VISTA PLANTA- CICLONES SEGUNDA ETAPA DE CLASIFICACIÓN  
 ESCALA 1:125

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.
  2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

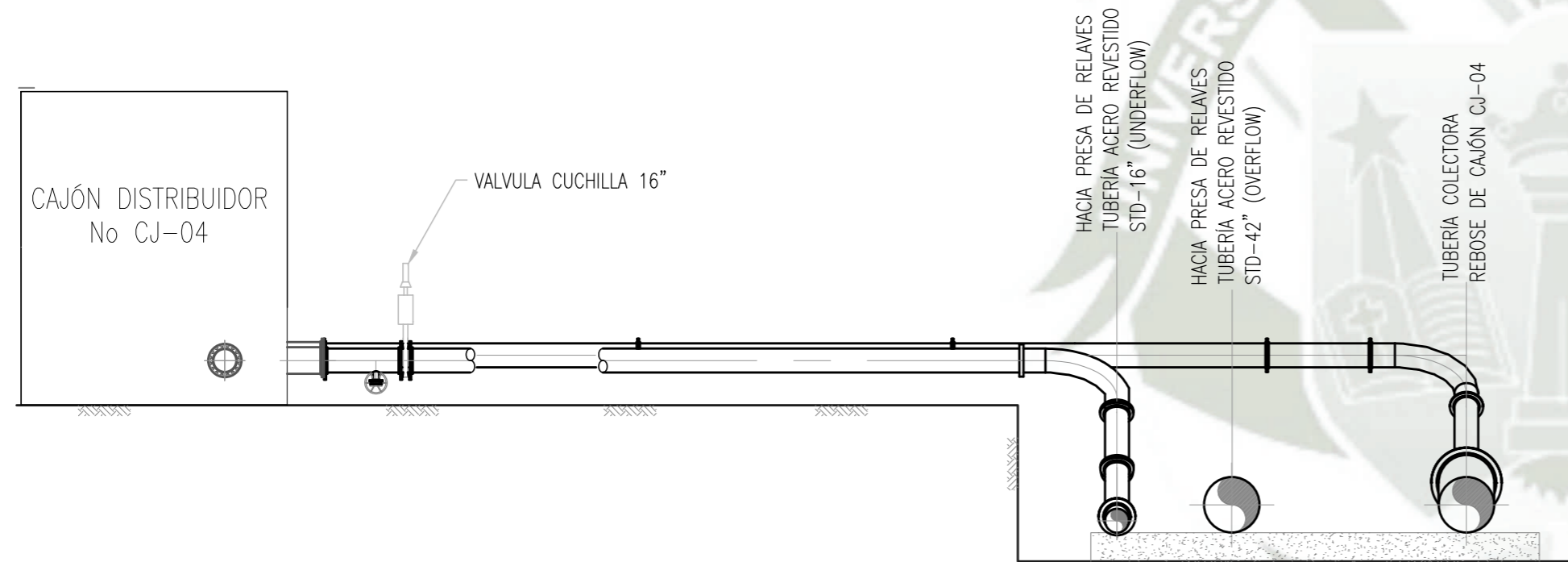
	Fecha	Nombre	Firmas
Dibujado:		I. Flores	
Revisado:			
Aprobado:			
Escala:	 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.		
Indicada			
	Plano: 011		
	Sustituye a:		
	Sustituido por:		



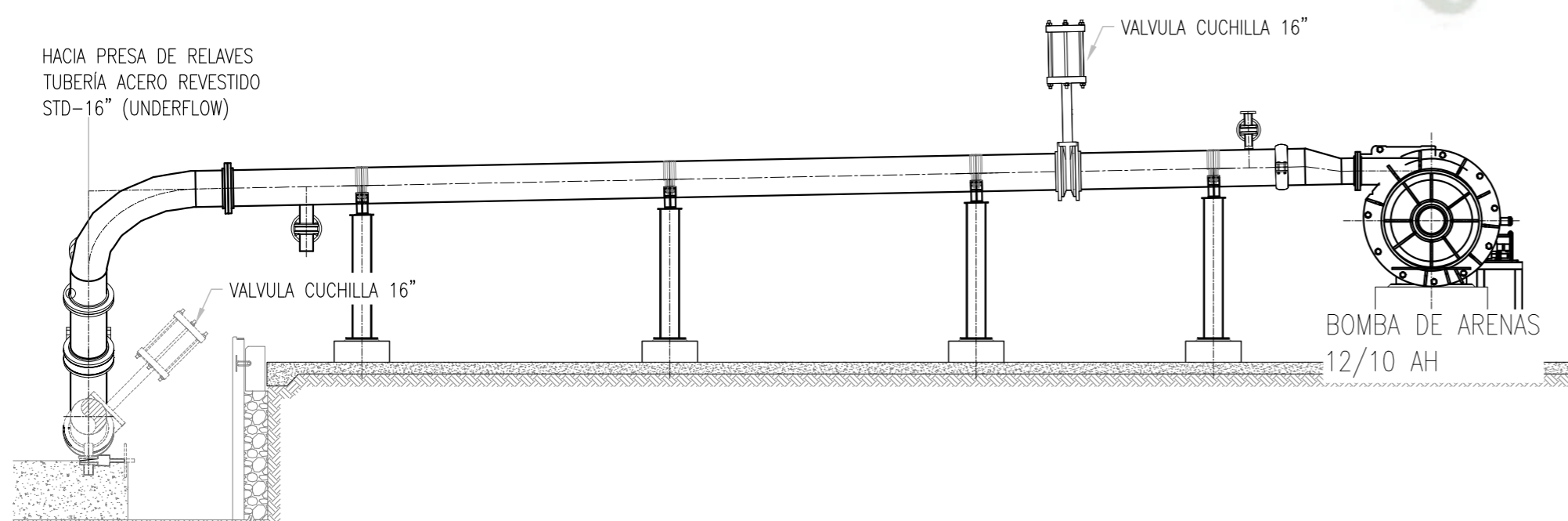
SECCION A  
1:115 PLANO N°-011



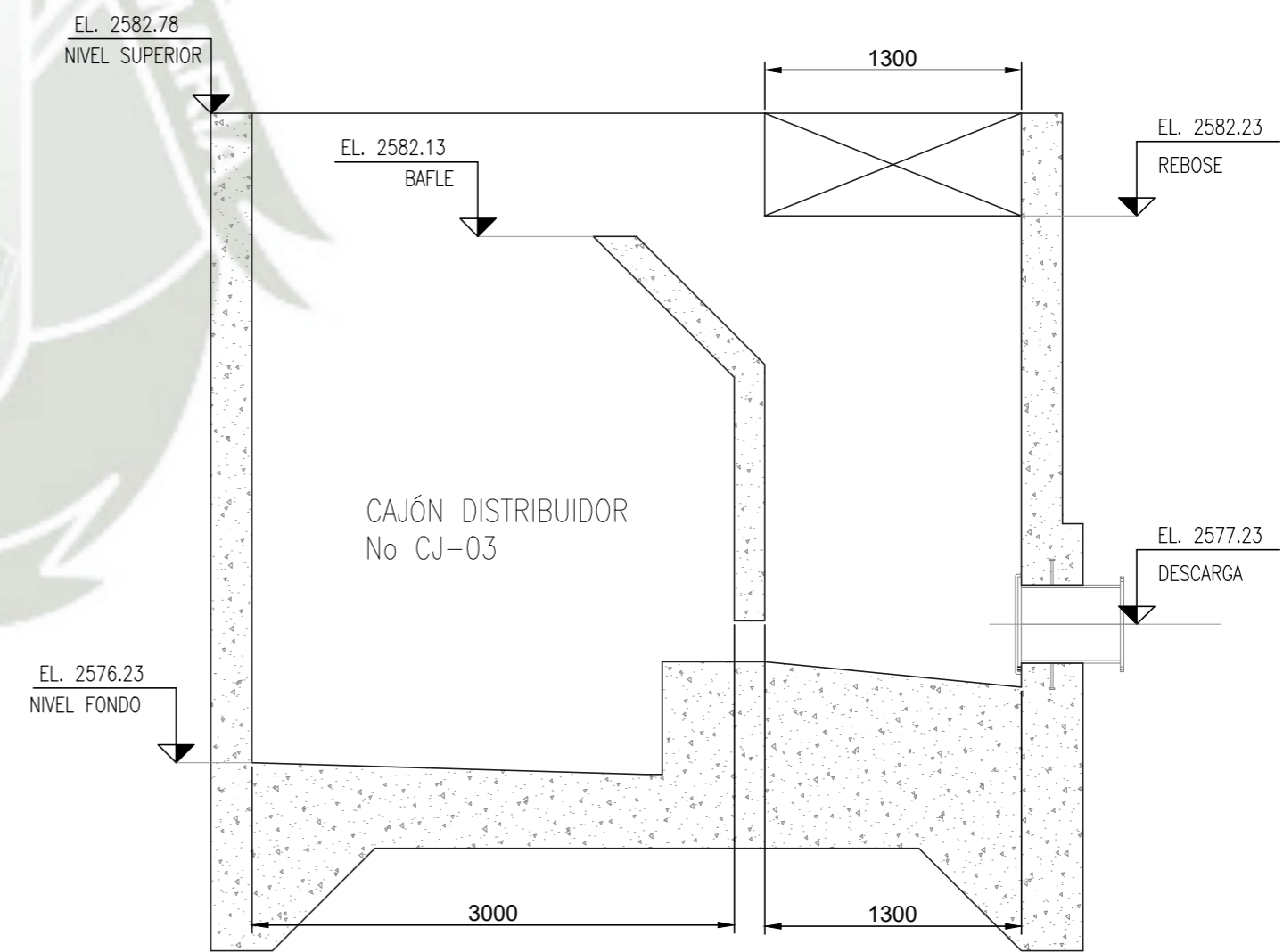
SECCION D  
1:65 PLANO N°-011



SECCION B  
1:115 PLANO N°-011



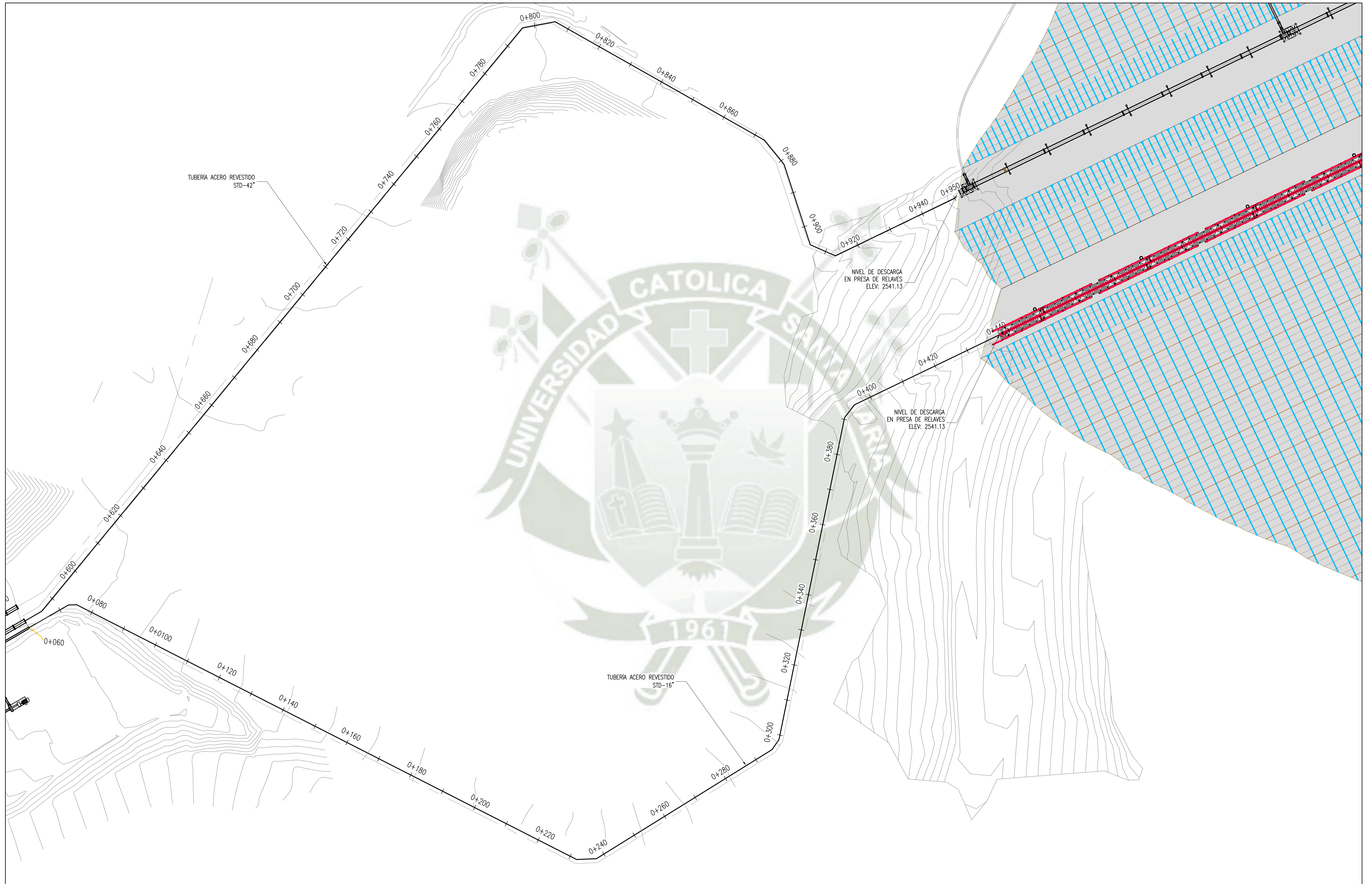
SECCION C  
1:70 PLANO N°-011



SECCION E  
1:65 PLANO N°-011

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.
  2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

	Fecha	Nombre	Firmas	 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
Dibujado:		I. Flores		
Revisado:				
Aprobado:				
Escala:	SEGUNDA ETAPA DE CLASIFICACIÓN SECCIONES Y DETALLES			Plano: 012
Indicada				Sustituye a:
				Sustituido por:



VISTA PLANTA-TUBERÍAS DE TRANSPORTE OF Y UF HACIA PRESA DE RELAVES  
 ESCALA 1:500

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.
  2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

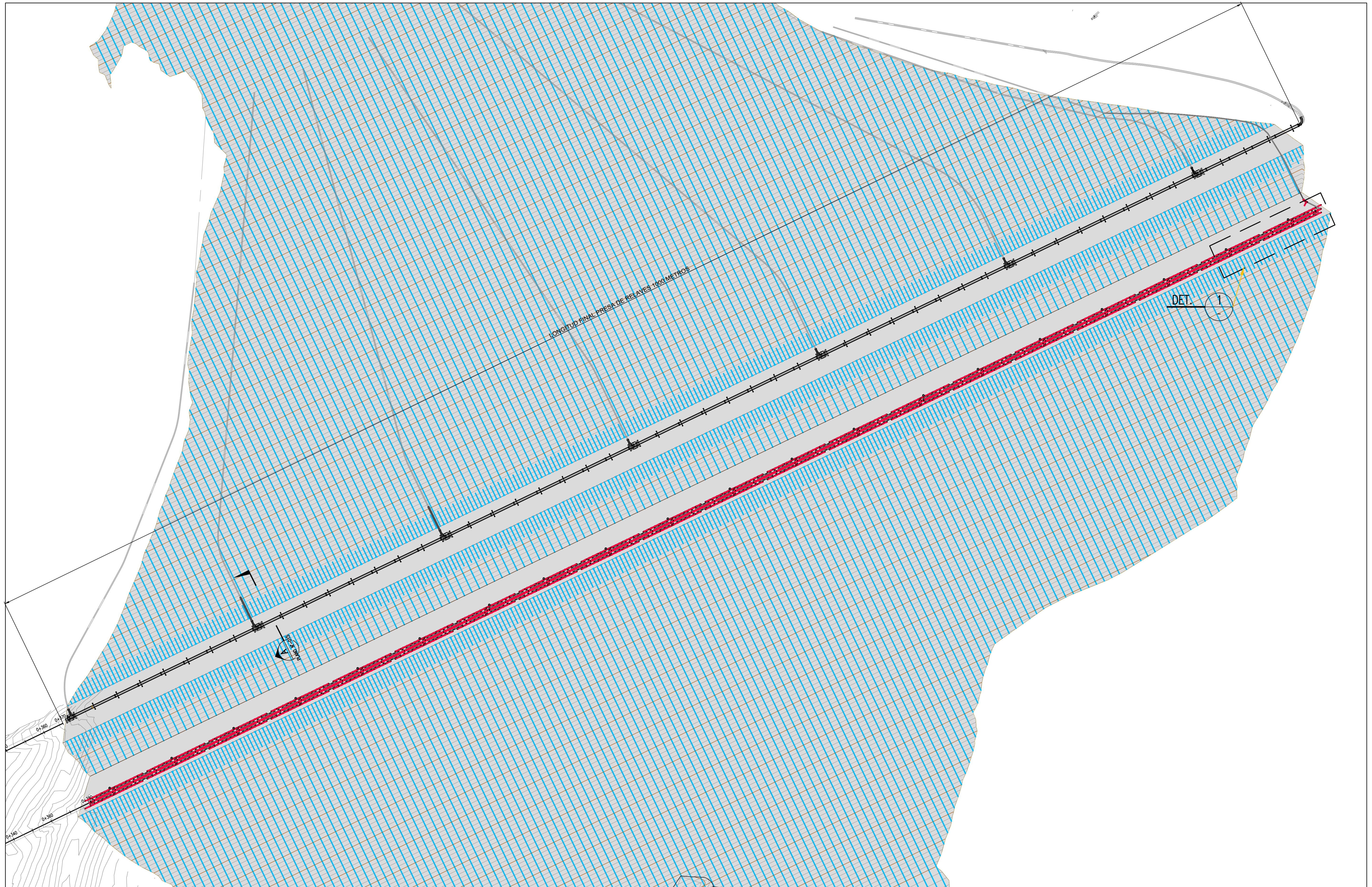
	Fecha	Nombre	Firmas
Dibujado:		I. Flores	
Revisado:			
Aprobado:			

Escala:		Plano:	013
Indicada:	RECORRIDO DE TUBERÍAS DE TRANSPORTE OVERFLOW Y UNDERFLOW HACIA PRESA DE RELAVES	Sustituye a:	
		Sustituido por:	




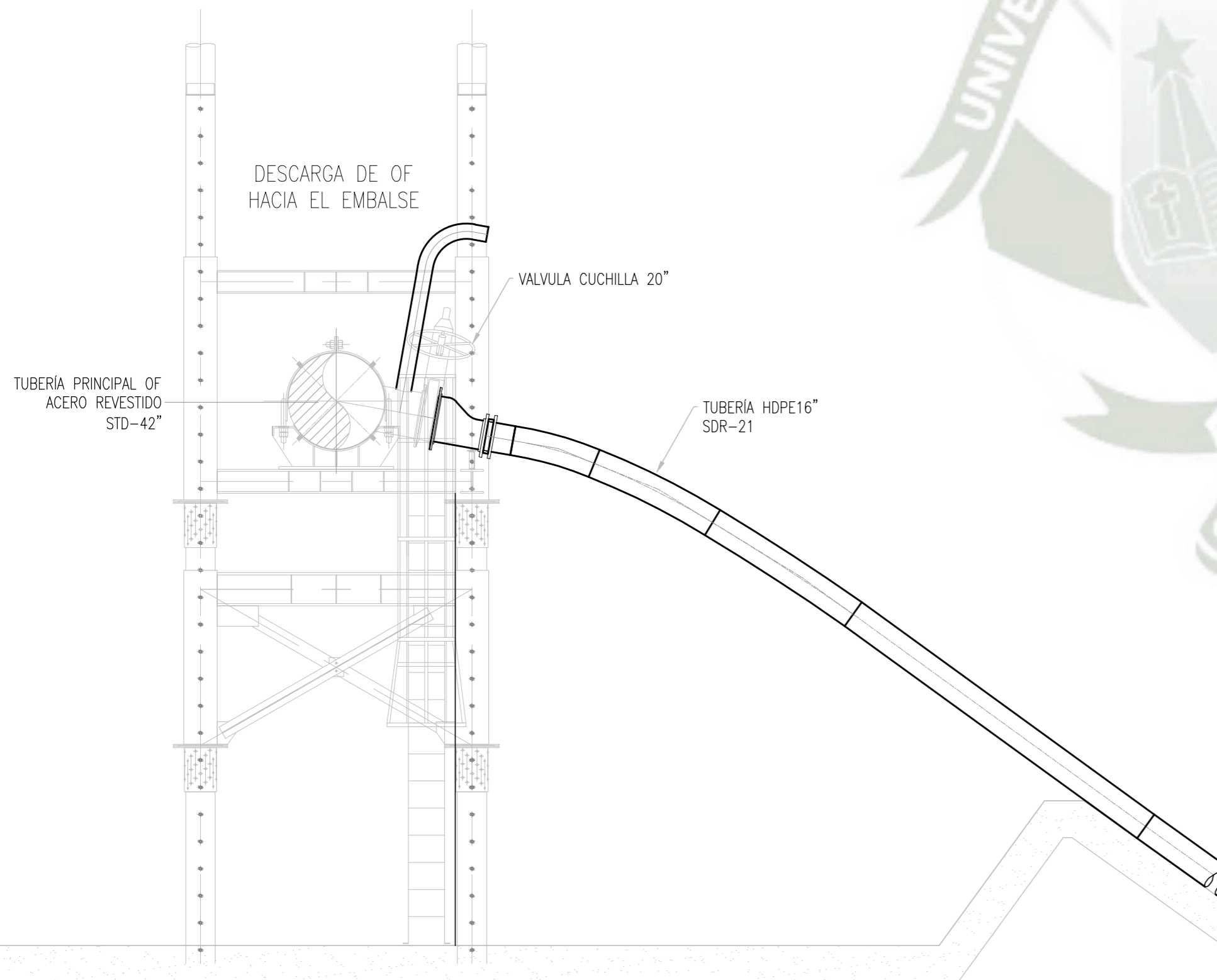
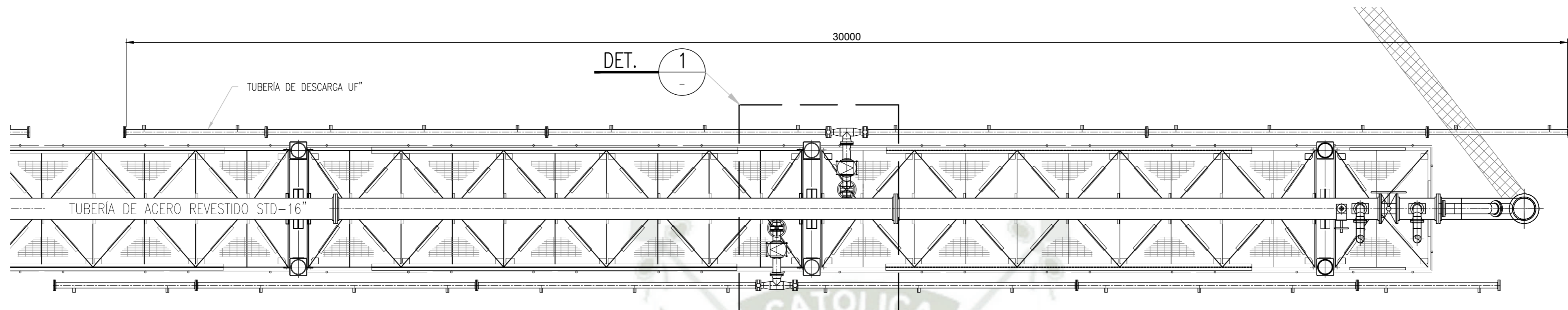
"Universidad Católica de Santa María"  
 Escuela Profesional de Ingeniería  
 Mecánica, Mecánica Eléctrica y  
 Mecatrónica.



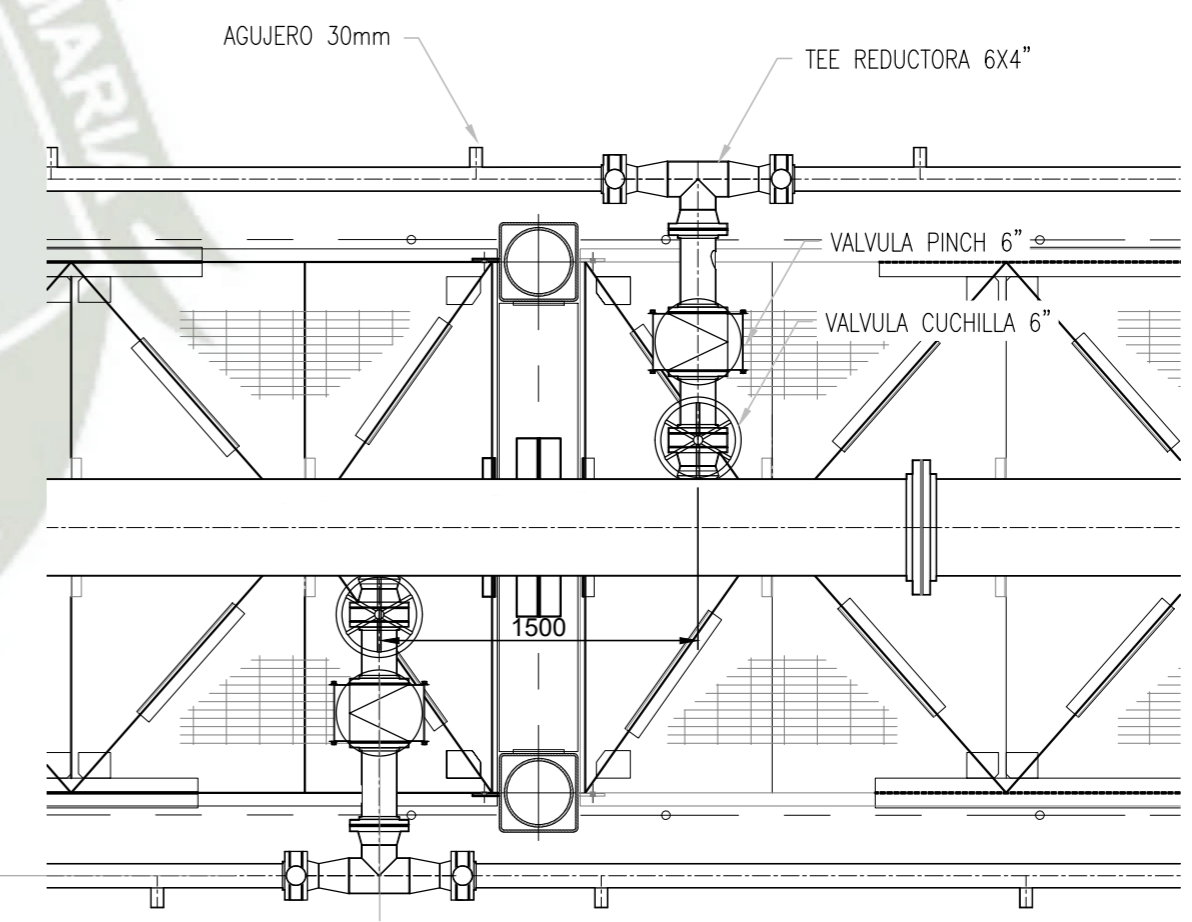
VISTA PLANTA-TUBERÍAS OF Y UF EN PRESA DE RELAVES  
 ESCALA 1:850

- NOTAS:  
 1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.  
 2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

Fecha	Nombre	Firmas	 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
Dibujado:	I. Flores		
Revisado:			
Aprobado:			
Escala:	TUBERÍAS DE DESCARGA EN OVERFLOW Y UNDERFLOW EN LA PRESA DE RELAVES JACKING HEADER		Plano: 014
Indicada:			Sustituye a: Sustituido por:



SECCION A  
1:62.5 PLANO N°-014




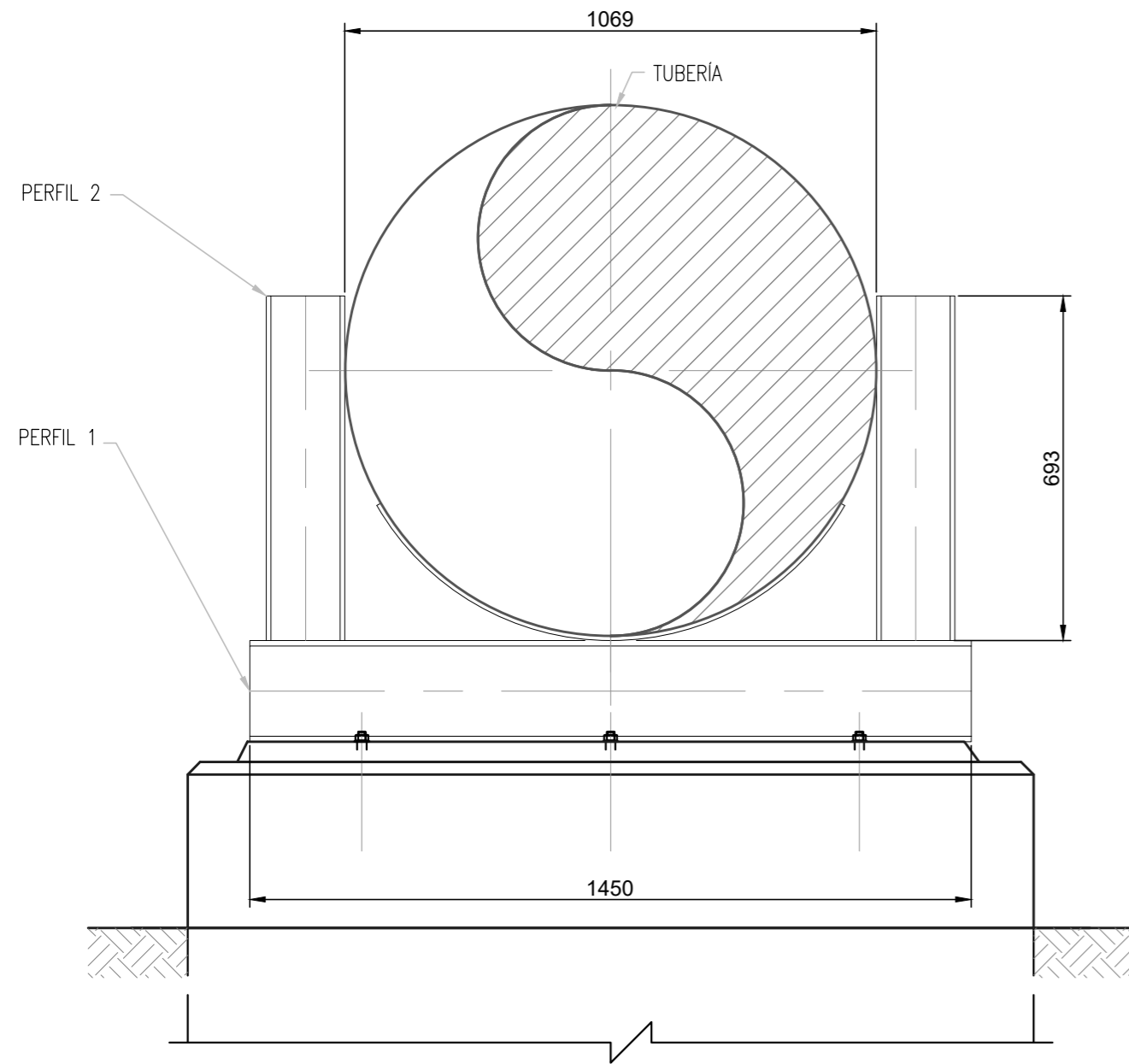
LINEA DE DERIVACION  
TUBERIA DE ACERO REVESTIDA  
STD-6"

DETALLE 1  
1:33

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILIMETROS.
  2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.

SECCION A  
1:50 PLANO N°-014

	Fecha	Nombre	Firmas	 "Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
Dibujado:		I. Flores		
Revisado:				
Aprobado:				
Indicada	DESCARGA DE OF Y UF EN PRESA DE RELAVES SECCIONES Y DETALLES			Plano: 015
				Sustituye a:
				Sustituido por:



SOPORTE METÁLICO TIPO GUÍA

DIÁMETRO	A	B	C	PERFIL 1	PERFIL 2
16 PULG	600 mm	250 mm	450 mm	W6X20	W4X13
30 PULG	1450 mm	410 mm	812 mm	W8X31	W6X20
32 PULG	1500 mm	450 mm	863 mm	W8X31	W6X20
42 PULG	1700 mm	600 mm	1120 mm	W10X45	W8X21


Soporte Nro	Progresiva	Tipo	Soporte Nro	Progresiva	Tipo
1	0+5	Anclaje	44	0+455	Anclaje
2	0+18	Anclaje	45	0+476	Anclaje
3	0+30	Guía	46	0+485	Guía
4	0+37	Guía	47	0+496	Guía
5	0+43	Anclaje	48	0+508	Guía
6	0+52	Guía	49	0+520	Anclaje
7	0+60	Anclaje	50	0+532	Guía
8	0+72	Guía	51	0+544	Guía
9	0+82	Anclaje	52	0+556	Guía
10	0+94	Guía	53	0+568	Guía
11	0+100	Anclaje	54	0+580	Guía
12	0+110	Guía	55	0+592	Guía
13	0+122	Anclaje	56	0+604	Guía
14	0+132	Guía	57	0+616	Guía
15	0+145	Anclaje	58	0+628	Guía
16	0+157	Guía	59	0+640	Guía
17	0+169	Guía	60	0+652	Guía
18	0+180	Anclaje	61	0+664	Guía
19	0+289	Guía	62	0+676	Guía
20	0+204	Anclaje	63	0+688	Guía
21	0+214	Guía	64	0+700	Guía
22	0+226	Guía	65	0+712	Guía
23	0+238	Guía	66	0+724	Anclaje
24	0+245	Guía	67	0+734	Anclaje
25	0+252	Anclaje	68	0+746	Guía
26	0+260	Guía	69	0+758	Guía
27	0+273	Anclaje	70	0+770	Guía
28	0+285	Guía	71	0+782	Guía
29	0+297	Guía	72	0+794	Anclaje
30	0+309	Guía	73	0+804	Anclaje
31	0+321	Guía	74	0+814	Guía
32	0+329	Anclaje	75	0+824	Anclaje
33	0+345	Anclaje	76	0+834	Anclaje
34	0+352	Guía	77	0+846	Guía
35	0+360	Guía	78	0+858	Guía
36	0+369	Guía	79	0+870	Guía
37	0+381	Guía	80	0+882	Guía
38	0+393	Guía	81	0+894	Guía
39	0+403	Anclaje	82	0+900	Anclaje
40	0+416	Guía	83	0+920	Anclaje
41	0+424	Anclaje	84	0+930	Guía
42	0+436	Guía	85	0+939	Guía
43	0+441	Guía	86	0+948	Guía

Soporte Nro	Progresiva	Tipo	Soporte Nro	Progresiva	Tipo
1	0+3	Guía	21	0+216	Anclaje
2	0+14	Anclaje	22	0+228	Guía
3	0+16	Guía	23	0+240	Guía
4	0+21	Guía	24	0+252	Guía
5	0+35	Guía	25	0+270	Anclaje
6	0+49	Guía	26	0+280	Anclaje
7	0+56	Anclaje	27	0+292	Guía
8	0+68	Guía	28	0+304	Guía
9	0+80	Guía	29	0+316	Guía
10	0+92	Guía	30	0+328	Guía
11	0+104	Guía	31	0+340	Guía
12	0+116	Guía	32	0+352	Guía
13	0+128	Guía	33	0+360	Anclaje
14	0+140	Guía	34	0+370	Anclaje
15	0+152	Guía	35	0+382	Guía
16	0+164	Guía	36	0+400	Guía
17	0+176	Guía	37	0+412	Guía
18	0+188	Guía	38	0+424	Guía
19	0+200	Guía	39	0+436	Guía
20	0+206	Anclaje			

- NOTAS:
- TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.
  - LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.
  - LOS SOPORTES DE TIPO ANCLAJE CORRESPONDEN A BLOQUES DE CONCRETO

Soporte Nro	Ubicación / Progresiva	Tipo
1	0+6	Anclaje
2	0+24	Anclaje
3	0+39	Guía
4	0+54	Guía
5	0+69	Guía
6	0+84	Anclaje
7	0+86	Anclaje
8	0+95	Guía
9	0+110	Anclaje
10	0+125	Anclaje
11	0+141	Guía
12	0+157	Anclaje
13	0+173	Anclaje
14	0+189	Guía
15	0+204	Guía
16	0+219	Guía
17	0+232	Guía
18	0+244	Guía
19	0+250	Guía
20	0+265	Guía

Soporte Nro	Progresiva	Tipo
1	0+3	Guía
2	0+13	Anclaje
3	0+23	Guía
4	0+33	Anclaje
5	0+47	Anclaje
6	0+60	Guía
7	0+75	Guía
8	0+90	Guía
9	0+102	Anclaje
10	0+109	Anclaje
11	0+120	Guía
12	0+133	Guía
13	0+148	Guía
14	0+158	Guía
15	0+168	Anclaje
16	0+181	Anclaje
17	0+200	Guía
18	0+217	Guía
19	0+234	Anclaje
20	0+245	Guía

	Fecha	Nombre	Firmas	
Dibujado:		I. Flores		 <p>"Universidad Católica de Santa María" Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.</p>
Revisado:				
Aprobado:				
Escala:	SOPORTES DE TUBERIA - CORREDORES PRINCIPALES DIMENSIONES Y UBICACIÓN			Plano: 016
Indicada				Sustituye a: Sustituido por:

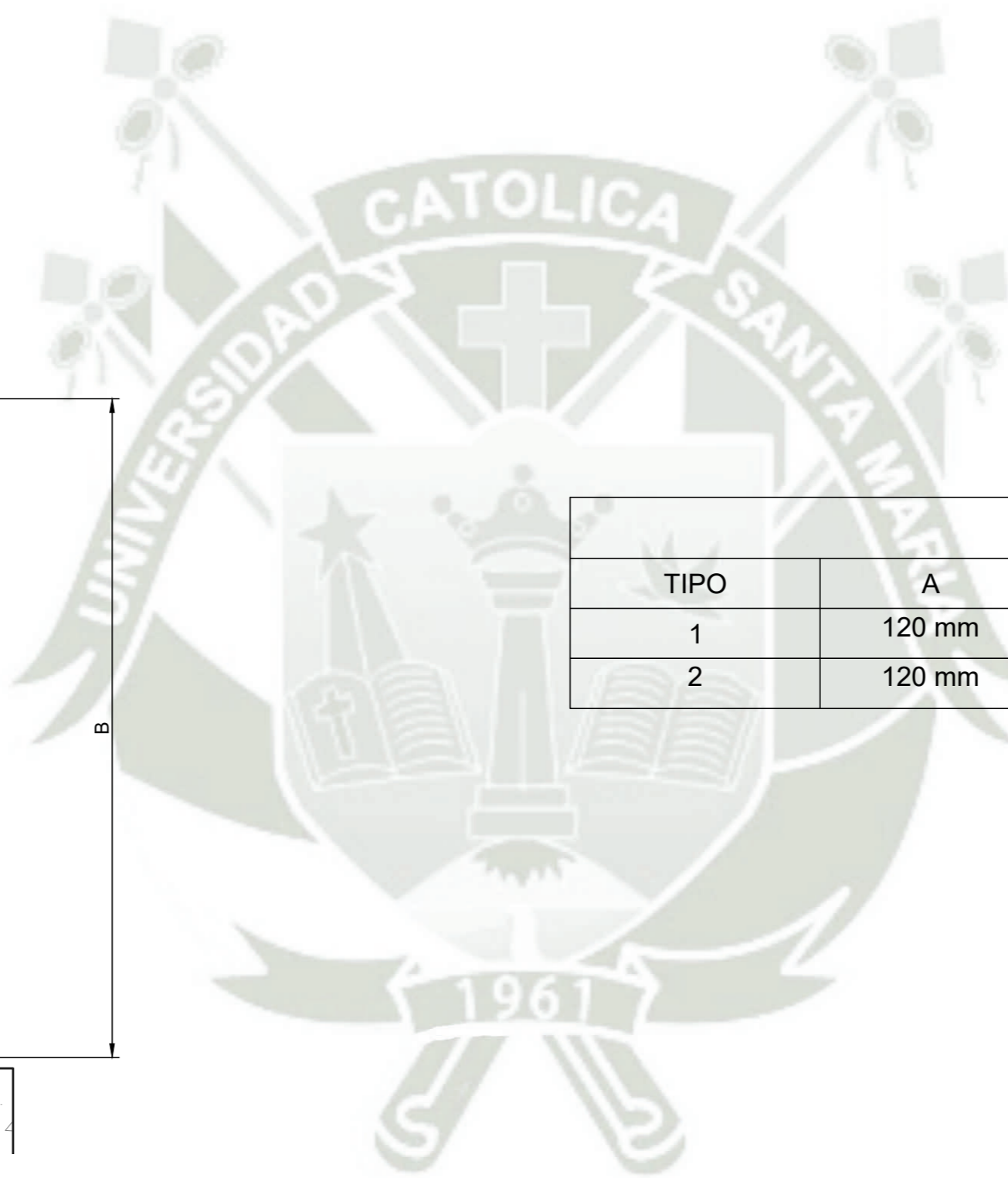
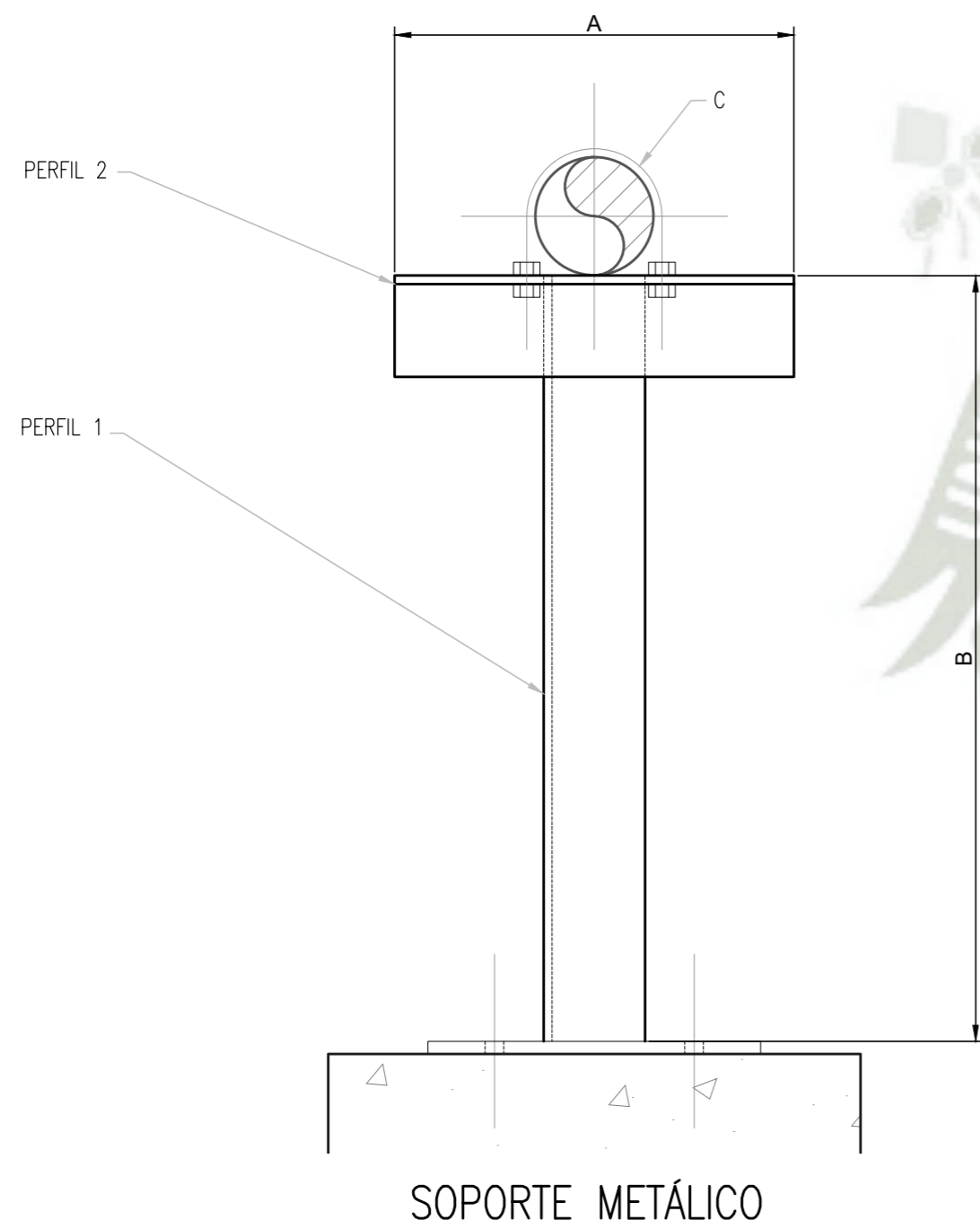


TABLA DE DIMENSIONES					
TIPO	A	B	C	PERFIL 1	PERFIL 2
1	120 mm	1100 mm	UBOLT 2"	L3X3X $\frac{3}{16}$	L3X3X $\frac{3}{16}$
2	120 mm	200 mm	UBOLT 2"	L3X3X $\frac{3}{16}$	L3X3X $\frac{3}{16}$

- NOTAS:
1. TODAS LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MILÍMETROS.
  2. LAS COORDENADAS Y NIVELES SE ENCUENTRAN EN METROS.
  3. VER DISTRIBUCIÓN/UBICACIÓN DE SOPORTES EN PLANO 011

	Fecha	Nombre	Firmas
Dibujado:		I. Flores	
Revisado:			
Aprobado:			



"Universidad Católica de Santa María"  
Escuela Profesional de Ingeniería  
Mecánica, Mecánica Eléctrica y  
Mecatrónica.

Escala:	SOPORTES DE TUBERIA - AGUA DE SELLO DIMENSIONES	Plano:	017
Indicada		Sustituye a:	
		Sustituido por:	