

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**



**CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA Y SU APLICACIÓN AL  
TRANSPORTE DE LOS LODOS GENERADOS EN LA  
EXPLOTACIÓN DE GRAVAS AURÍFERAS DE LA MORRENA  
VIZCACHANI – ANANEA**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**Bach. HUGO SUCAPUCA NINA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**PUNO – PERÚ**

**2019**



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS**

**TESIS**

**CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA Y SU APLICACIÓN AL TRANSPORTE DE LOS LODOS GENERADOS EN LA EXPLOTACIÓN DE GRAVAS AURÍFERAS DE LA MORRENA VIZCACHANI – ANANEA**

**PRESENTADA POR:**

**HUGO SUCAPUCA NINA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO DE MINAS**

**APROBADA POR:**

**PRESIDENTE DE JURADO:**

.....  
M. Sc. Ing. EUGENIO ARAUCANO DOMINGUEZ

**PRIMER MIEMBRO:**

.....  
M. Sc. Ing. HENRY A. TAPIA VALENCIA

**SEGUNDO MIEMBRO:**

.....  
D. Sc. Ing. JORGE G. DURANT BRODEN

**DIRECTOR / ASESOR:**

.....  
M. Sc. Ing. ESTEBAN MARÍN PAUCARA

**Área** : Ingeniería de Minas.

**Tema** : Métodos de extracción de yacimientos minerales metálicos y no metálicos.

Fecha de sustentación 16 de abril del 2019

## DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme salud para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A la Facultad de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional del Altiplano por haberme formado, para alcanzar mis metas como persona y como profesional.

## AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, por sus bendiciones y a toda mi familia por estar siempre presentes.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, a toda la Facultad de Ingeniería de Minas, a mis docentes en especial al M. Sc. Ing. Eugenio Araucano Domínguez, M. Sc. Ing. Henry A. Tapia Valencia, D. Sc. Ing. Jorge G. Durant Broden y a mi asesor M. Sc. Ing. Esteban Marín Paucara quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación y apoyo incondicional.

Finalmente quiero expresar mi más grande y sincero agradecimiento a la Cooperativa Minera San Juan de Dios de Pampa Limitada, principal colaborador durante todo este proceso, por haberme permitido el desarrollo de este trabajo.

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN

ABSTRACT

### CAPÍTULO I

#### INTRODUCCIÓN

1.1.	Descripción de la realidad problemática .....	17
1.2.	Formulación del problema.....	18
1.2.1.	Problema general. ....	18
1.2.2.	Problemas específicos.....	18
1.3.	Objetivos de la investigación.....	19
1.3.1.	Objetivo general. ....	19
1.3.2.	Objetivos específicos. ....	19
1.4.	Justificación de la investigación .....	19
1.5.	Delimitación del estudio .....	20

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.	Antecedentes de la investigación.....	22
2.2.	Marco teórico.....	26
2.2.1.	Fluidos newtonianos y no newtonianos.....	26
2.2.2.	Parámetros Reológicos (Jiménez & Agudelo, 1996).....	29
2.2.3.	Ecuación general del comportamiento de los fluidos.....	30
2.2.4.	Densidad del fluido.....	31
2.2.5.	Granulometría.....	31
2.2.6.	Relaciones Gravimétricas y volumétricas básicas.....	32
2.2.7.	Conveniencia de usar régimen laminar con fluidos no newtonianos.....	33
2.2.8.	Velocidad del flujo.....	33
2.2.9.	Clasificación de bombas.....	34
2.2.10.	Modelos reológicos de fluidos no Newtonianos.....	39
2.2.11.	Selección del modelo.....	42
2.2.12.	Numero de Reynolds generalizado (Bandala-Rocha, Macedo y Ramírez, & Vélez-Ruiz, 2005).....	43
2.2.13.	Factor de fricción en las tuberías.....	43
2.2.14.	Carga total o altura total.....	44
2.2.15.	Altura dinámica total (ADT).....	44
2.2.16.	Ventajas y desventajas del transporte por tubería.....	45
2.2.17.	Criterios de evaluación de rentabilidad.....	45
2.2.18.	Reología, la ciencia que estudia el movimiento de fluidos.....	45
2.3.	Marco conceptual.....	46

2.3.1.	Concepto de reología. ....	46
2.3.2.	Modelo reológico.....	48
2.3.3.	Determinación de parámetros reológicos de flujos hiperconcentrados aplicados a relaves mineros (Rosario, 2010). ....	48
2.3.4.	Reología aplicada a procesos de fundición y metal.....	49
2.3.5.	Viscosidad. ....	49
2.3.6.	Modelos en Reología de Suspensiones: Aplicaciones a la Minería. ....	50
2.3.7.	Flujo de lodos y reología en minería. ....	50
2.3.8.	Características de las pastas minerales. ....	52
2.3.9.	Propiedades Básicas de las Pulpas.....	52
2.3.10.	Régimen Laminar. ....	53
2.3.11.	Régimen Turbulento. ....	53
2.3.12.	Típicas Pulpas Viscosas.....	53
2.3.13.	Ensayos Escala de Laboratorio.....	53
2.3.14.	Bomba hidráulica.....	55
2.3.15.	Relaves.....	55
2.3.16.	Relaveducto .....	55
2.3.17.	Ducto o tubería .....	55
2.3.18.	Pozas de sedimentación .....	56
2.3.19.	Posas de clarificación .....	56
2.3.20.	Parámetros .....	56
2.3.21.	Relleno hidráulico.....	56
2.4.	Hipótesis del trabajo .....	56
2.4.1.	Hipótesis general. ....	56
2.4.2.	Hipótesis específico.....	56

2.5.	Operacionalización de variables .....	57
2.5.1.	Variable independiente. ....	57
2.5.2.	Variable dependiente. ....	57

### CAPÍTULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.	Tipo de investigación.....	58
3.2.	Diseño de la investigación.....	58
3.3.	Fuentes de la investigación.....	59
3.4.	Población y muestra.....	59
3.4.1.	Población. ....	59
3.4.2.	Muestra. ....	59
3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	59
3.6.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	60
3.6.1.	Análisis cuantitativo de las muestras.....	60
3.6.2.	Método analítico. ....	60
3.6.3.	Análisis y visualización de los datos. ....	60
3.6.4.	Prueba de hipótesis. ....	61
3.6.5.	Evaluación confiabilidad. ....	62
3.6.6.	Presentación de tablas y figuras.....	62
3.7.	Procedimiento del método .....	80
3.7.1.	Condiciones de operación.....	80
3.7.2.	Preparación y envío de muestras. ....	80
3.7.3.	Determinación de los modelos reológico. ....	81

3.7.4.	Análisis granulométrico.....	81
3.7.5.	Determinación de densidades. ....	81
3.7.6.	Determinación de porcentaje de sólidos en peso y volumen.....	82
3.7.7.	Cálculos de dimensionamiento de equipos de bombeo y tuberías. ....	82
3.8.	Instrumentos de medición para la prueba reológica. ....	82
3.9.	Instrumentos para análisis granulométrico .....	82

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Resultados.....	83
4.1.1.	Resultados del análisis reológico.....	83
4.1.2.	Resultados de análisis granulométrico. ....	84
4.1.3.	Resultados del análisis de la rentabilidad. ....	85
4.1.4.	Características del equipo de bombeo y tuberías.....	86
4.1.5.	Del diámetro y material de la tubería. ....	87
4.2.	Discusión .....	87
CONCLUSIONES .....		89
RECOMENDACIONES .....		90
REFERENCIAS .....		91
ANEXOS.....		95

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Clasificación de los fluidos según su reología.....	27
<i>Figura 2.</i> Diagramas reológicos de los diferentes tipos de fluidos.....	28
<i>Figura 3.</i> Curva granulométrica.....	32
<i>Figura 4.</i> Clasificación de bombas de desplazamiento positivo.....	34
<i>Figura 5.</i> Bomba recíprocante de vapor. ....	35
<i>Figura 6.</i> Bombas recíprocantes de potencia.....	36
<i>Figura 7.</i> Bomba de diafragma.....	37
<i>Figura 8.</i> Bombas de engranes. ....	38
<i>Figura 9.</i> Bombas de lóbulos.....	38
<i>Figura 10.</i> Bombas de tornillos. ....	39
<i>Figura 11.</i> Bomba peristáltica. ....	39
<i>Figura 12.</i> Curva granulométrica de la muestra S1.....	64
<i>Figura 13.</i> Curva granulométrica de la muestra S2.....	65
<i>Figura 14.</i> Curva granulométrica de la muestra C1.....	67
<i>Figura 15.</i> Curva granulométrica de la muestra C2.....	69
<i>Figura 16.</i> Curva granulométrica de la muestra C3.....	71
<i>Figura 17.</i> Curva granulométrica de la muestra C4.....	73
<i>Figura 18.</i> Curva reológica de la muestra S1. ....	75
<i>Figura 19.</i> Curva reológica de la muestra S2. ....	76
<i>Figura 20.</i> Curva reológica de la muestra C1.....	77

<i>Figura 21.</i> Curva reológica de la muestra C2.....	78
<i>Figura 22.</i> Curva reológica de la muestra C3.....	79
<i>Figura 23.</i> Curva reológica de la muestra C4.....	80
<i>Figura 24.</i> Resumen de las curvas reológicas.....	84
<i>Figura 25.</i> Resumen de las curvas granulométricas. ....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Ubicación geográfica .....	21
Tabla 2: Fluidos no newtonianos .....	31
Tabla 3: Relaciones Gravimétricas y Volumétricas Básicas .....	33
Tabla 4: Ventajas y desventajas de transporte por tubería.....	45
Tabla 5: Operacionalización de variables .....	57
Tabla 6: Resultados del análisis granulométrico de la muestra S1 .....	63
Tabla 7: Resultados del análisis granulométrico de la muestra S2.....	64
Tabla 8: Resultados del análisis granulométrico de la muestra C1.....	66
Tabla 9: Resultados del análisis granulométrico de la muestra C2.....	68
Tabla 10: Resultados del análisis granulométrico de la muestra C3.....	70
Tabla 11: Resultados del análisis granulométrico de la muestra C4.....	72
Tabla 12: Resultados de las densidades de las muestras S1, C1, C2 y C4 .....	74
Tabla 13: Resultados de los parámetros reológicos de la muestra S1 .....	74
Tabla 14: Resultados de los parámetros reológicos de la muestra S2 .....	75
Tabla 15: Resultados de los parámetros reológicos de la muestra C1 .....	76
Tabla 16: Resultados de los parámetros reológicos de la muestra C2 .....	77
Tabla 17: Resultados de los parámetros reológicos de la muestra C3 .....	78
Tabla 18: Resultados de los parámetros reológicos de la muestra C4.....	79
Tabla 19: Muestras a analizar .....	80
Tabla 20: clasificación según sistema único de clasificación de suelos SUCS .....	84

Tabla 21: Costos unitarios por la evacuacion de lodos.....	86
Tabla 22: Criterios de evaluación de rentabilidad de las propuestas .....	86
Tabla 23: Propuestas de bombas a seleccionar .....	86
Tabla 24: Contratación y verificación de la hipótesis.....	88

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

$\mu$	Viscosidad dinámica del fluido.
$\dot{\gamma}$	Gradiente de Velocidad o Tasa de Corte.
$\dot{\tau}_i$	Tasa de corte calculada por cada modelo.
$V_x$	Velocidad local (Componente x)
$x, y, z$	Coordenadas cartesianas de posición.
$\tau_{xy}$	Esfuerzo de Corte.
$\tau_o, \tau_y$	Punto de Cedencia, esfuerzo de fluencia o esfuerzo umbral.
$n$	Índice de Comportamiento.
$k$	Índice de Consistencia.
$\mu_o, \mu_{ap}$	Viscosidad aparente.
$\eta$	Viscosidad plástica definida por Casson
$D$	Diámetro del tubo (m)
$De$	Número de Deborah
$v$	Velocidad del fluido en el tubo (m/s)
$\rho$	Densidad del fluido (kg/m <sup>3</sup> )
$h_{pl}$	Perdida de carga por instalación
$f$	factor de fricción
$C_v$	Concentración en volumen.
$C_w$	Concentración en peso.

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación abordó el problema de evacuación de lodos en Ananea, San Antonio de Putina, Puno, cuyo título es “caracterización reológica y su aplicación al transporte de lodos de arcilla generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea”, cuyo objetivo es caracterizar el comportamiento reológico de los lodos para proponer el uso de un equipo de bombeo como medio de transporte más rentable. El diseño es descriptivo, cuantitativo y transversal. El proceso metodológico fue por objetivos, garantizando la confiabilidad de los equipos, además del uso del software Rheocalc V3.1-1 para el modelamiento reológico, así mismo se analizó la granulometría, luego para determinar la rentabilidad de los medios de transporte se usó el criterio del valor actual neto VAN, finalmente para probar la hipótesis, se optó por el estadístico de prueba  $t_c$ . Los resultados demuestran que estamos frente a un fluido plástico de bingham y Pseudoplástico. Se concluyó que “en contraste al objetivo general, es viable conocer el tipo de fluido a través de los modelos reológicos y la curva granulométrica, he ahí radica su importancia para implementar mejoras en el sistema de transporte de lodos generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea”, “los lodos generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani - Ananea no son newtonianos, son fluidos de comportamiento tipo plástico de bingham y pseudoplástico (ley de potencia) y contienen arenas bien graduadas con un coeficiente de curvatura de 14,65 y coeficiente de uniformidad de 1,43” y “el transporte a través tuberías es más rentable que cualquier otro medio, siendo posible la reducción de costos de \$ 2.25 a \$ 0.77 por m<sup>3</sup> de lodo evacuado y queda descartado el uso de bombas centrifugas para la evacuación de lodos”.

**Palabras Clave:** Mecánica de fluidos, caracterización reológica, reología, transporte de lodos y fluidos de bingham.

## ABSTRACT

This research work addressed the problem of sludge evacuation in Ananea, San Antonio de Putina, Puno, whose title is "rheological characterization and its application to the transport of clay mud generated in the exploitation of auriferous gravels of the Vizcachani moraine - Ananea ", Whose main objective is to characterize the rheological behavior of sludge to propose the use of pumping equipment as the most cost-effective means of transport. The method is descriptive, quantitative and transversal. The methodological process was by objectives, guaranteeing the reliability of the equipment, in addition to the use of the Rheocalc V3.1-1 software for the rheological modeling, likewise the granulometry was analyzed, then to determine the profitability of the means of transport, the criterion of the NPV net present value, finally to test the hypothesis, we chose the test statistic  $t_c$ . The results show that we are facing a bingham and Pseudoplastic plastic fluid. It was concluded that "in contrast to the general objective, it is feasible to know the type of fluid through the rheological models and the granulometric curve, this is why it is important to implement improvements in the transport system of sludge generated in the exploitation of gold gravels. of the Vizcachani moraine - Ananea ", the sludge generated in the exploitation of auriferous gravels of the Vizcachani - Ananea moraine are not Newtonian, they are fluid of plastic type behavior of bingham and pseudoplastic (power law) and contain well graded sands with a Curve coefficient of 14.65 and coefficient of uniformity of 1.43 "and" transport through pipelines is more profitable than any other means, being possible to reduce costs from \$ 2.25 to \$ 0.77 for every m<sup>3</sup> of sludge evacuated and the use of centrifugal pumps for the disposal of sludge is ruled out ".

**Key Words:** Fluid mechanics, rheological characterization, rheology, transport of sludge and Bingham fluids.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Descripción de la realidad problemática

El transporte de pulpas siempre fue un desafío para la minería en el mundo, cobrando importancia desde la década de 1850 con el procesamiento de mineral en plantas de tratamiento, durante la fiebre del oro en California, las aplicaciones industriales patentadas nacieron en Inglaterra en 1914. En tanto que en Chile, entre 1959 y 1981, se construyó el primer mineroducto de 6 km (Revista Minería Chilena, 2014). En la actualidad cualquier sistema de disposición de relaves en su mayoría es a través de ductos o tuberías, siendo una condición necesaria para reducir costos en el transporte.

En el Perú las mineras proactivas no son ajenas a las mejoras tecnológicas en su disposición de relaves, tal es el caso de Hochschild Mining, quienes han implementado con éxito un nuevo relaveducto en su planta Selene de la mina Pallancata, esto principalmente gracias a un estudio reológico. En la región Puno, específicamente en las minas dedicadas a la explotación de gravas auríferas no se puede percibir las mejoras en la disposición de lodos, por comprenderse como elemento del movimiento de material.

La Unidad Minera San Juan del proyecto minero Estela, ubicado en el Distrito de Ananea, Provincia de San Antonio de Putina, Departamento de Puno, enfrenta serios problemas socio económicos y ambientales, debido a que en la explotación de gravas auríferas se usa gran cantidad de agua, generando un promedio 200 m<sup>3</sup>/día de lodo y su evacuación resulta muy costoso con el uso de equipos pesados, tales como excavadoras, volquetes y cargador frontal, con un costo estimado de operación de 2,25 \$/m<sup>3</sup>, una distancia de acarreo de dos (02) Km entre las pozas de sedimentación y clarificación del agua, y la desmontera N° 2, donde se ubica la poza de secado de lodos. Por tales se tiene la necesidad de mejorar el transporte de lodos, buscando una alternativa más rentable que implique también la recuperación del agua, lo cual podría lograrse adquiriendo un equipo de bombeo adecuado y determinando el tipo de tubería, para tal fin se debe conocer el tipo de fluido a transportar.

## **1.2. Formulación del problema**

De acuerdo a la realidad de la operación de minado de gravas auríferas en la morrena Vizcachani, donde se tiene en la cola la acumulación de lodos de arcilla en las pozas de sedimentación y clarificación de agua, siendo un problema la evacuación de los mismos, por ello se plantea:

### **1.2.1. Problema general.**

¿Cómo influirá la caracterización del comportamiento reológico para su aplicación al transporte de lodos de arcilla generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani - Ananea?

### **1.2.2. Problemas específicos.**

¿Cómo es el comportamiento reológico de lodos de arcilla generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea?

¿Cuál será la rentabilidad de los medios de transporte de lodos generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea?

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1. Objetivo general.**

Caracterizar el comportamiento reológico para su aplicación al transporte de lodos de arcilla generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani - Ananea.

#### **1.3.2. Objetivos específicos.**

Determinar el comportamiento reológico de los lodos generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea.

Evaluar la rentabilidad de los medios de transporte de lodos de arcilla generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani - Ananea.

### **1.4. Justificación de la investigación**

El presente estudio pretende aperturar una nueva línea de investigación que aporte en la solución de problemas de evacuación y disposición de lodos en la explotación de gravas auríferas, actividad a la cual se dedica la unidad minera San Juan del proyecto minero Estela, bajo la administración de la cooperativa minera San Juan de Dios de Pampa Blanca Limitada, dicha institución agrupa a 31 socios y al mismo tiempo ocupa entre 25 y 30 trabajadores, entre empleados y colaboradores.

Con la búsqueda de una alternativa más rentable y limpia en el transporte de lodos se espera reducir los costos de operación, los mismos que se verán reflejados en el bienestar económico de los miembros de la cooperativa y colaboradores, las experiencias en la mejora tecnológica darán valor agregado a la gestión de equipos y

serán transmitidas a toda la sociedad de manera directa e indirecta, fortaleciendo la convivencia y el bienestar social, con una visión de sostenibilidad, sin comprometer los derechos de las generaciones venideras.

Del mismo modo se espera mantener y mejorar los valores ambientales del área de influencia directa de la mina, en términos de calidad del aire, recuperación del agua, reducción de derrames y emisiones, lo cual podría lograrse con una adecuada selección del equipo de bombeo, para su disposición a través de tuberías, es decir reemplazando los equipos pesados por las bombas de desplazamiento positivo o similares.

### **1.5. Delimitación del estudio**

El presente proyecto de investigación se ha realizado en el conjunto de pozas de clarificación de agua de la unidad minera San Juan del proyecto minero Estela y se extiende su aplicación a las diez (10) cooperativas asociadas a la central de cooperativas mineras San Antonio de Poto CECOMSAP, por ser similares, tanto el método de explotación como el yacimiento de la morrena Vizcachani.

El proyecto minero Estela, se desarrolla en la concesión minera Estela, con código N.º 13000008Y01, el mismo que se encuentra ubicado en el paraje denominado Kalatira del distrito de Ananea, provincia de San Antonio de Putina, departamento de Puno, aproximadamente a 90,00 km al noreste del lago Titicaca, entre las coordenadas UTM WGS84 de la tabla 1, a una altitud comprendida entre 4 680 y 4 900 msnm.

Geográficamente el área forma parte de la depresión longitudinal Crucero Ananea ubicada entre los cuadrángulos de Putina y Rinconada perteneciente al Distrito de Ananea.

Tabla 1:  
*Ubicación geográfica*

CONCESIÓN MINERA	VÉRTICES	COORDENADAS UTM		ÁREA (Has)
		ESTE	NORTE	
ESTELA	V-1	444825,00	8376839,52	240
	V-2	446814,55	8376658,47	
	V-3	446705,93	8375464,74	
	V-4	444716,37	8375645,78	

Fuente: INGEMMET.

## CAPÍTULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. Antecedentes de la investigación

Merril (2016) en su tesis de maestría presentado a la Universidad de Chile, departamento de Ingeniería de Minas, titulada: *Estudio del efecto de la composición mineralógica en la reología de pulpas basado en técnicas de caracterización avanzada*, concluye:

Las pulpas son ampliamente utilizadas en el procesamiento de minerales ya que permiten el transporte de sólidos con granulometría fina, además posibilita la extracción del material valioso, es por tal el interés por estudiar sus propiedades reológicas como la viscosidad y el esfuerzo de fluencia, estos a su vez muchas veces como características limitantes en algunos procesos, acortando la capacidad de tratamiento de los equipos, además de aumentar el gasto energético, el consumo de agua y otros.

El trabajo experimental de este estudio conlleva la realización de pruebas reológicas a escala de laboratorio y para la caracterización hiper-espectral de pulpas se han considerado las variables controladas tales como: la composición,

concentración de sólidos y el PH; constantemente midiendo otras variables incidentes como la granulometría, la temperatura, etc. Los minerales que contienen las pulpas además de formar parte de la ganga de alta abundancia en la industria minera chilena, inciden en las propiedades de interés como la viscosidad y el esfuerzo de fluencia.

En la investigación desarrollada se logró establecer una amplia base científica para la comprensión de los fenómenos reológicos asociados a las pulpas minerales, identificando las primeras variables con incidencia en la viscosidad y el esfuerzo de fluencia de una suspensión. por otra parte, también se revisaron los fenómenos microscópicos asociados a la físico-química y el mecanismo mediante el cual estos interactúan con el comportamiento reológico macroscópico, otorgando los conocimientos necesarios para idear formas de control de dicho comportamiento.

Es posible identificar una serie de problemas asociados a la reología que hoy en día se ven en diversas plantas metalúrgicas, debido principalmente a los comportamientos reológicos complejos que exhiben algunas suspensiones minerales que hacen incurrir en errores de dimensionamiento de equipos o acortamiento de los tiempos de mantención de bombas u otros, principalmente debido a una subestimación de los esfuerzos de fluencia y la viscosidad que terminan por acotar la capacidad de tratamiento al imponer una concentración de sólidos máxima en la pulpas a tratar.

Gaitán (2010) en su tesis de maestría presentado a la Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, titulada: *Estimación de parámetros reológicos de pulpas minerales a diferentes concentraciones de sólidos*, concluye:

La diversidad de los minerales bombeados, la amplia gama de los tamaños de las partículas sólidas y las diversas propiedades físicas y químicas; hacen que la ingeniería de hidráulica de pulpas requieran de diversos modelos matemáticos y empíricos para predecir su comportamiento, en esencia considera que, a concentraciones de sólidos en peso inferiores al 30% es fácil de transportar la pulpa, casi como si se tratase de fluido newtoniano, sin embargo, superado los 30% o 35%, requiere mayores esfuerzos en el sistema de transporte de fluidos, estos podrían ser

compensados con pendientes a favor del fluido o mediante una bomba, en caso de realizar un transporte por impulsión.

Por lo tanto, para efectuar el transporte hidráulico de una pulpa por una tubería, se requiere conocer, simular o estimar sus características o propiedades físicas y reológicas con mayor aproximación a la realidad, denominándose a este proceso como caracterización de una pulpa de mineral, con la finalidad de efectuar un diseño óptimo para un sistema de transporte hidráulico de pulpas minerales.

Rojas, Quitian & Saldarriaga (2017) en su artículo de investigación: *Caracterización Magneto-reológica de un Fluido a Base de Desechos Mineros*, publicado en la revista Ciencia en Desarrollo, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, concluye:

Los fluidos magneto-reológicos (FMR) son materiales cuyas propiedades varían considerablemente en presencia de un estímulo externo, conocidos también como materiales inteligentes. Por lo tanto, es posible la fabricación de fluidos magneto-reológicos a partir de desechos de minería aluvial, con un procesamiento de fabricación sencillo y con excelentes respuestas magneto-reológicas. Un fluido magneto-reológico con 15% de sólidos en volumen puede variar hasta en 150 veces su valor de viscosidad en cuestión de milisegundos, de aquí su poder de aplicación en diferentes campos como ingeniería mecánica (construcción de amortiguadores, frenos y embragues para automotores) e ingeniería civil (amortiguadores de vibraciones en edificios y protección sísmica en puentes).

Aguirre, Moncada, Guatarasma & Suárez (2005) en un artículo de investigación: *Reología y mecánica de barros y lodos*, publicado en la Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, comprueban que es despreciable el efecto de las partículas de arena en concentraciones volumétricas menores al 20%, en suspensiones de arcilla bentonítica o en matrices de barro. Sin embargo, superado el 20% de concentración de arena, la viscosidad de la mezcla se incrementa rápidamente. Esto con el uso de un equipo de medición, con esfera, que se emplea para determinar el comportamiento reológico de fluidos con grandes partículas sólidas. El estudio

practicó el examen reológico y se apreció que el esfuerzo de cedencia disminuye cuando se incrementa la concentración de arena y se incrementa cuando aumenta la concentración de arcilla. Como resultado, para una relación entre los esfuerzos inerciales y los esfuerzos viscosos menores que 30, el flujo establecido, uniforme e impermanente mostró ser un flujo de Bingham.

Huamán (2007) en su tesis de grado: *Aplicación de relleno hidráulico en la Mina Jimena de Compañía Minera Poderosa S.A.*, concluye que la aplicación del relleno hidráulico reduce los costos, garantiza mayor productividad y seguridad operacional, además de aumentar la vida útil de la desmontera, estableciendo el uso de bombas de desplazamiento positivo para el transporte del relleno.

De la cruz (2013) en su tesis de grado: *Diseño de un sistema de bombeo para transporte de relave desde planta concentradora hasta zona de disposición en sociedad minera austria duvaz S.A.C.*, concluye sobre el tema. “(...) que lo más importante para el diseño del sistema de bombeo es conocer las características del relave a bombear, así como la demanda o caudal a transportar” (p. 189).

Domínguez (2016), sobre la aseveración anterior, en su tesis de grado concluyó que es de interés tomar en cuenta la naturaleza del fluido al momento de determinar el sistema de bombeo, por lo cual, la viscosidad es un factor determinante para el dimensionamiento de una bomba.

Martinson (2015) en su artículo de investigación: *Relaves de alto espesamiento: desafíos en el sistema de transporte*, publicado en la Revista Chile, afirma que, para los sistemas mecánicos de impulsión de pulpas de alto espesamiento, siempre se debate sobre el tipo de bombas que resulta más conveniente. Algunos optan por un suministro rápido y al menor costo de inversión que brinda las bombas centrífugas, sin embargo, las bombas de desplazamiento positivo tienen mayor eficiencia que las de tipo centrífugo, por lo tanto, un menor consumo eléctrico, lo que es un factor muy relevante de considerar.

Yalle (2009) en su tesis de grado: *Construcción de la planta de relleno hidráulico 100% relave*, presentada a la Universidad Nacional de Ingeniería, concluye

que, es ineludible conocer las características del fluido para elegir el material de la tubería, tomando en cuenta los siguientes parámetros: la granulometría, el coeficiente de uniformidad, la velocidad de percolación, la velocidad crítica, la densidad, el porcentaje sólidos en volumen y en peso de la pulpa.

López (2014) en su tesis: *Diseño hidráulico de un sistema gravimétrico para relaves mineros con un caudal de 202 m<sup>3</sup>/h y 220 de desnivel*, presentada a la Pontificia Universidad Católica del Perú, luego de caracterizar la reología de la pulpa con un comportamiento viscoso de tipo bingham, afirma que la viscosidad es también apreciada para el cálculo de la caída presión en las tuberías de acero al carbono con revestimiento interno de caucho.

Grupo Editorial Editec (2016) en un informe técnico: *Transporte de fluidos: variables a considerar para una mayor disponibilidad*, publicada en la revista Minería chilena, destaca para el transporte de fluidos a través de tuberías, sobre los materiales antiguos, como el acero, otras alternativas tecnológicas, como el polietileno de alta densidad o HDPE, entre cuyas ventajas se encuentra su resistencia a la acción de agentes químicos y abrasión.

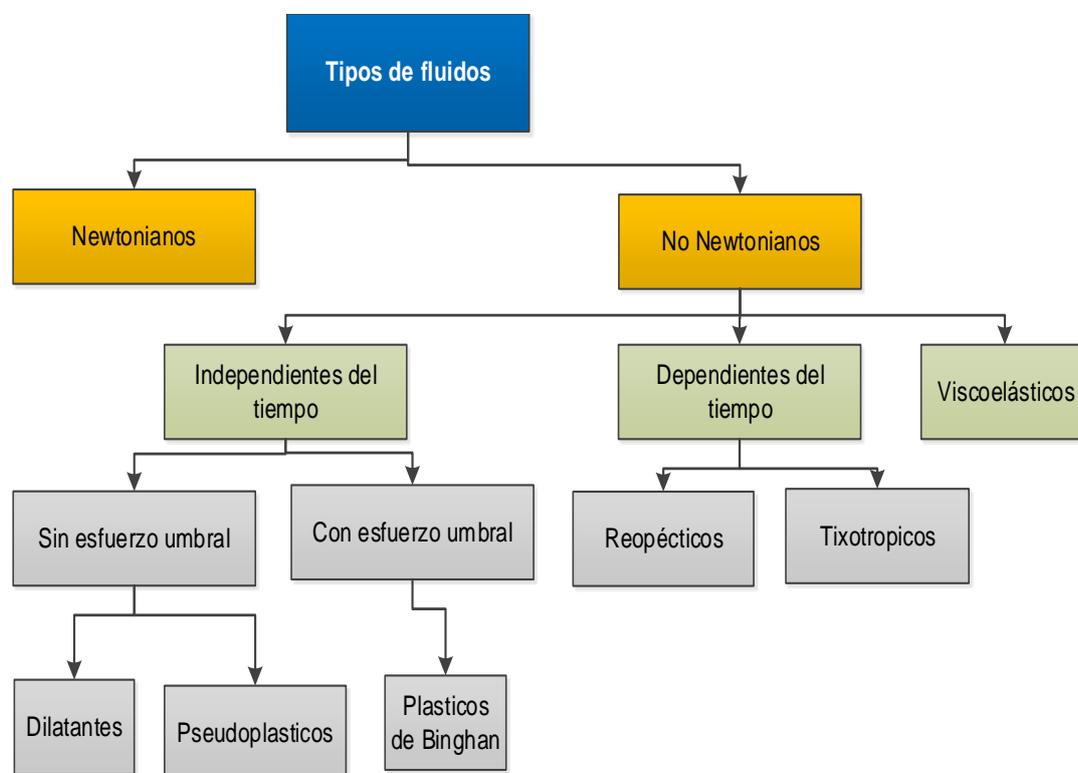
Talavera (2013) en un estudio realizado por la gerencia mantenimiento de una minera reconocida a nivel nacional, concluye que, para el fluido no newtoniano, la condición de transporte es de flujo turbulento, por tanto, las tuberías de acero y HDPE debieran ser mayormente soldada, restringiéndose el uso de bridas, salvo para mantenimiento. De esta manera la importancia del estudio reológico, fue confirmada por una minera líder en la gestión de relaves mineros.

## 2.2. Marco teórico

### 2.2.1. Fluidos newtonianos y no newtonianos.

De modo general la mayoría de los autores coinciden en hacer una clasificación entre los fluidos newtonianos y no newtonianos según su comportamiento reológico siga o no la Ley de Newton de la viscosidad. Monsalve

(2010) afirma que los fluidos en el que la relación entre el esfuerzo de corte y la viscosidad es lineal, reciben el nombre de **fluidos newtonianos**, pero un gran número de fluidos no obedece tal relación, a estos se les denomina **fluidos no-newtonianos**, corresponde a este tipo de fluidos los barros arcillosos. Además, existen fluidos en los que su comportamiento depende del tiempo de actuación del esfuerzo realizado sobre ellos. Finalmente existe otro grupo de fluidos que se comportan como fluidos viscosos y sólidos y estos a la vez son fluidos viscoso elásticos. En la figura 1 se aprecia la clasificación de los fluidos según su reología y en la figura 2 se observa los diagramas reológicos de los diferentes tipos de fluidos.



**Figura 1.** Clasificación de los fluidos según su reología.

**Fuente:** Elaboración propia.

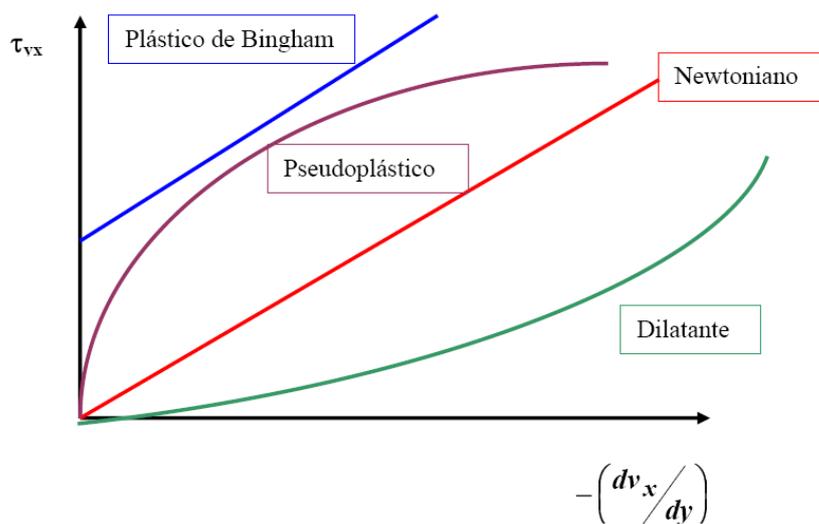


Figura 2. Diagramas reológicos de los diferentes tipos de fluidos.

Fuente: <https://www.agitador.es/blog/wp-content/uploads/2011/07/visosidad-y-tipo-fluidos.png>

**Definición:**

Gardea (2008) afirma que, la conocida ley de viscosidad de Newton establece que el esfuerzo cortante (o densidad de flujo de cantidad de movimiento) que se propaga a través de un fluido es directamente proporcional a la gradiente negativa de su velocidad local, es decir:

$$\tau_{yx} = \frac{F}{A} \alpha \left( - \frac{\delta V_x}{\delta y} \right) \quad (2.1)$$

$$\tau_{yx} = \mu \left( - \frac{\delta V_x}{\delta y} \right) = \mu \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

Donde:

$\tau_{xy}$  = Esfuerzo cortante o densidad del flujo de cantidad de movimiento que se transfiere a través de planos perpendiculares al eje y produciendo movimiento del fluido en la dirección x.

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido.

$\left(-\frac{\delta V_x}{\delta y}\right) = \dot{\gamma} =$  Gradiente negativa de la viscosidad local o gradiente de velocidad.

$V_x =$  Velocidad local (Componente x)

$x, y, z =$  Coordenadas cartesianas de posición.

### 2.2.2. Parámetros Reológicos (Jiménez & Agudelo, 1996).

La definición de los parámetros reológicos se hace tomando como base el flujo laminar, en el cual se entiende el fluido como el deslizamiento de las capas de fluido una sobre otra, así tenemos:

**Esfuerzo de Corte ( $\tau_{xy}$ ):** Resistencia del fluido al movimiento deslizante de sus capas cuando se aplica una fuerza en forma tangencial a su superficie laminar. Tiene unidades de fuerza sobre área.

**Tasa de Corte ( $\dot{\gamma}$ ):** Se define como la tasa de movimiento del fluido contenido entre dos superficies. Se determina dividiendo la velocidad con que se mueven las superficies entre la distancia que las separa. En este caso se desplazan a un metro por segundo por cada metro de fluido y por lo tanto se mide en segundos recíprocos (1/segundo o  $s^{-1}$ )

Dicho en otras palabras, es la diferencia entre las velocidades de dos capas dividida entre la distancia que las separa.

**Viscosidad ( $\mu$ ):** Resistencia que opone un fluido a ser deformado. En términos matemáticos es la relación de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la tasa de corte.

Gardea (2008) afirma que, cuando un fluido es no newtoniano y no lineal presenta una viscosidad diferente para cada tasa de corte, esta es llamada viscosidad aparente. La viscosidad aparente es generalmente explicada como la parte de la resistencia al flujo causada por fricción mecánica y es afectada por la concentración

de sólidos, el tamaño y la forma de las partículas sólidas y la viscosidad de la fase fluida.

**Punto de Cedencia ( $\tau_o$ ):** Esfuerzo cortante mínimo requerido para que se dé la deformación del fluido. Representa el valor del esfuerzo de corte para una velocidad de deformación igual a cero.

**Índice de Comportamiento ( $n$ ):** Indica la desviación del comportamiento reológico del fluido con respecto a los fluidos newtonianos.

**Índice de Consistencia ( $k$ ):** Caracterización numérica de la consistencia del fluido, es decir, es una medida indirecta de la viscosidad, pero sus unidades dependen de ( $n$ ).

### 2.2.3. Ecuación general del comportamiento de los fluidos.

Slatter (2004) considera apropiado para el estudio del movimiento de líquidos por una tubería de sección circular en régimen laminar, usar el modelo de Herschel-Bulkley, y es la expresión siguiente:

$$\tau = \tau_y + K \left( - \frac{du}{dr} \right)^n \quad (2.3)$$

Donde:

$\tau$  (Pa), esfuerzo cortante que experimenta una partícula a una distancia  $r$  del eje de la tubería y tiene una velocidad  $u$ .

$\tau_y$ (Pa), es el esfuerzo de fluencia o esfuerzo umbral necesario para que el fluido entre en movimiento.

$K$ (Pa.s <sup>$n$</sup> ), es el llamado índice de consistencia del fluido o coeficiente de viscosidad plástica (constante).

$n$ , es el índice de comportamiento del fluido.

Resumiendo, la ecuación (2.3) en la tabla 2, se indica la clasificación de los principales tipos de fluidos en la figura 1, con sus respectivos parámetros generales que caracterizan dichos fluidos.

Tabla 2:  
*Fluidos no newtonianos*

NO NEWTONIANO (Ec. 2.3)		
	$\tau_y = 0$	$\tau_y > 0$
n<1	Pseudoplástico	<i>Bingham</i> Pseudoplástico
n>1	Dilatante	<i>Bingham</i> dilatante
N=1	*	<i>Bingham</i> plástico

**Fuente:** (Slatter, 2004). \* *Newtonianos*, sujetos a la ley:  $\tau = K \left(-\frac{du}{dr}\right)$ , conocida como la ley de viscosidad de Newton.  $K$  es el coeficiente de viscosidad dinámica, indicada con la letra griega  $\mu$  (cp).

#### 2.2.4. Densidad del fluido.

Se define densidad  $\rho$  al cociente entre la masa y el volumen que ocupa  $\rho = m/V$ . Sus unidades son por lo tanto  $kg/m^3$  o  $g/cm^3$ .

#### 2.2.5. Granulometría.

Se entenderá por granulometría o análisis granulométrico de los sólidos en suspensión del fluido a todo procedimiento manual o mecánico por medio del cual se pueda separar las partículas constitutivas del agregado según tamaños, de tal manera que se puedan conocer las cantidades en peso de cada tamaño que aporta el peso total. Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra.

Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (granulometría).

#### Grafica granulométrica e indicadores

La curva granulométrica es una representación gráfica de los resultados del ensayo de granulometría, se representa gráficamente en un papel denominado "log-normal" por tener en la horizontal una escala logarítmica, y en la vertical una escala natural, tal como se observa en la siguiente figura 3.

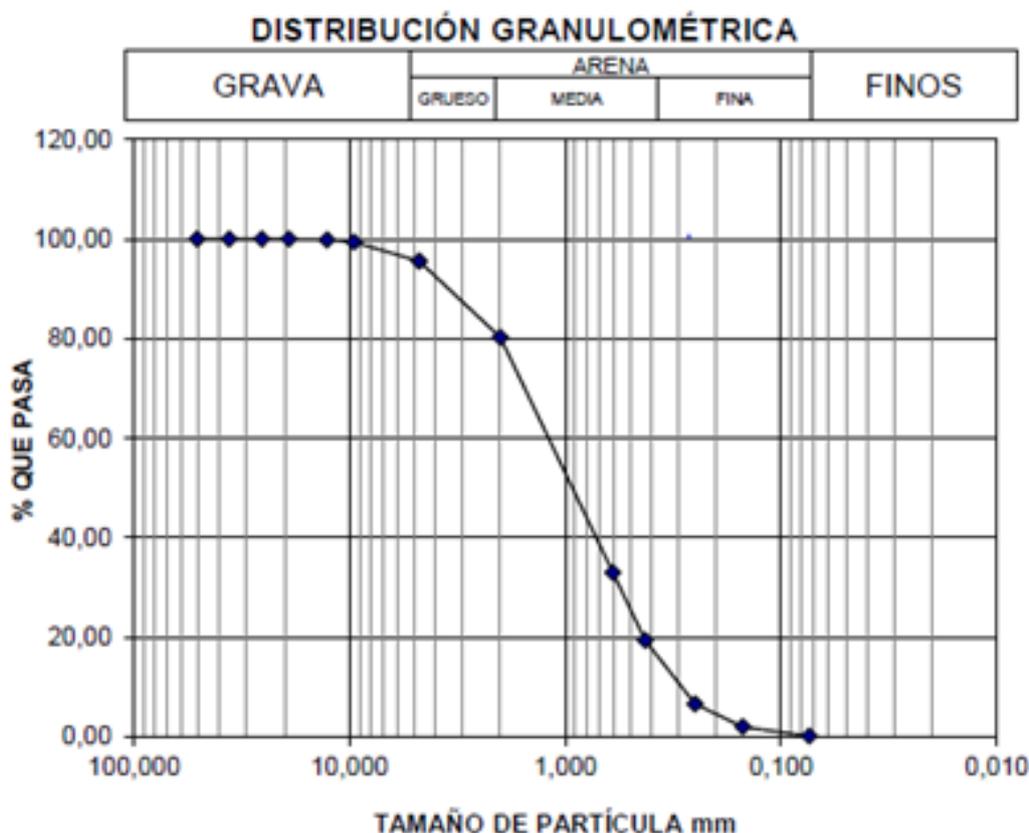


Figura 3. Curva granulométrica.

Fuente: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8195/13454>

**2.2.6. Relaciones Gravimétricas y volumétricas básicas.**

Se describe en la tabla a continuación, lo que indica Martinson (2012) las relaciones gravimétricas y volumétricas usadas el presente estudio, esto para determinar la concentración de sólidos tanto en volumen como en peso.

Tabla 3:  
*Relaciones Gravimétricas y Volumétricas Básicas*

	$C_v$	$C_w$	$\rho_m$
$C_v =$	1	$\frac{\rho_s}{C_w} - (\rho_s - \rho_w)$	$\frac{(\rho_m - \rho_w)}{(\rho_s - \rho_w)}$
$C_w =$	$\frac{\rho_s}{\frac{\rho_w}{C_v} - (\rho_s - \rho_w)}$	1	$\frac{\rho_s(\rho_m - \rho_w)}{\rho_m(\rho_s - \rho_w)}$
$\rho_m =$	$\rho_w + C_v(\rho_s - \rho_w)$	$\rho_w + \frac{\rho_w C_w(\rho_s - \rho_w)}{\rho_s - C_w(\rho_s - \rho_w)}$	1

Fuente: (Martinson, 2012). Paterson & Cooke.

Donde:

$C_v$ : Concentración en volumen.

$C_w$ : Concentración en peso.

$\rho_s$ : Densidad del sólido.

$\rho_w$ : Densidad del agua.

$\rho_m$ : Densidad de la pulpa

### 2.2.7. Conveniencia de usar régimen laminar con fluidos no newtonianos.

Para fluidos no newtonianos se recomienda trabajar como flujo laminar, ya que las pérdidas por fricción aumentan con la velocidad (Slatter, 1997). También se señala que la mezcla rápida de las partículas del líquido consume una gran cantidad de energía, manifestándose en una mayor pérdida de energía en conducción (Shook & Roco, 1991).

### 2.2.8. Velocidad del flujo.

Esta velocidad se halla dividiendo el caudal Q sobre la sección interior de una tubería.

### 2.2.9. Clasificación de bombas.

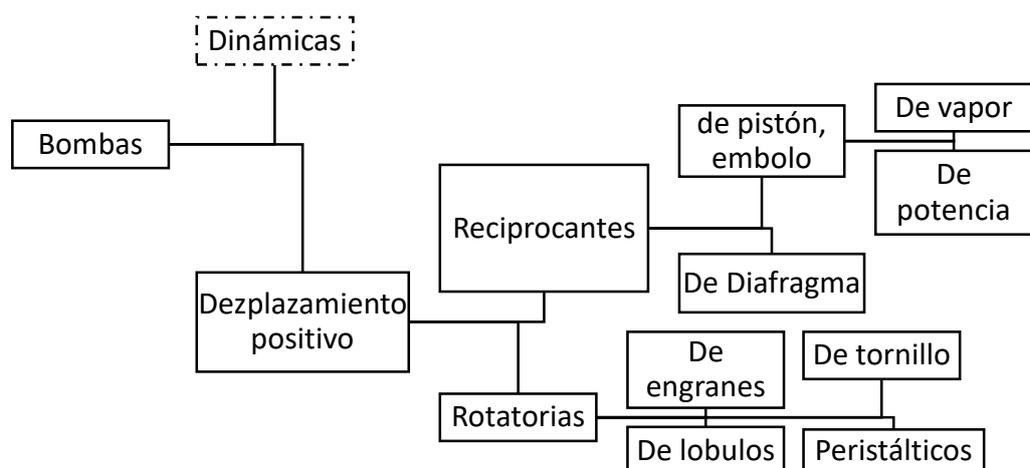
La clasificación de las bombas hidráulicas está basada en el principio por el cual se agrega energía al fluido, asimismo identifica al medio por el cual se aplica este principio y la disposición de los elementos impulsores, así tenemos dos grupos:

#### 2.2.9.1. Bombas Dinámicas.

Son aquellas que aprovechan el movimiento de rotación de una rueda con paletas (rodete) para incrementar las velocidades de los fluidos dentro de la máquina, las cuales por el diseño de la carcasa y otras se transforman en presión (Delgado, 2009), dentro de este grupo están: la bomba centrífuga de voluta, de flujo mixto, de difusor, de flujo axial y de turbina o regenerativa, no siendo este objeto de estudio.

#### 2.2.9.2. Bombas de Desplazamiento Positivo.

Son aquellas que muestran una relación directa entre los movimientos de los elementos bombeados y la cantidad de líquido movilizado (Tello, 2015). Se tiene la clasificación de las bombas de desplazamiento positivo en la figura 4.

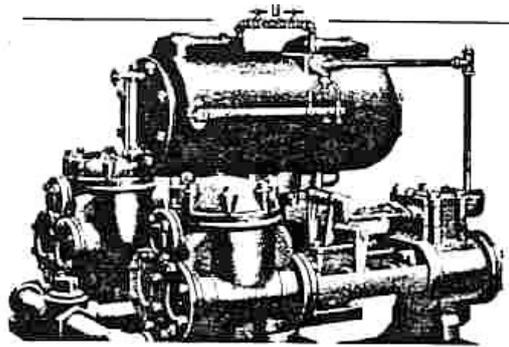


**Figura 4.** Clasificación de bombas de desplazamiento positivo.  
**Fuente:** Domínguez (2010). Especificación de sistemas de bombeo [imagen].

### 2.2.9.2.1. *Bombas reciprocantes.*

#### A. Bombas reciprocantes de vapor

Son aquellas en la que un émbolo o pistón desplaza un volumen dado de fluido en cada carrera (TECSUP, 2012). Se puede apreciar la bomba en la figura 5.

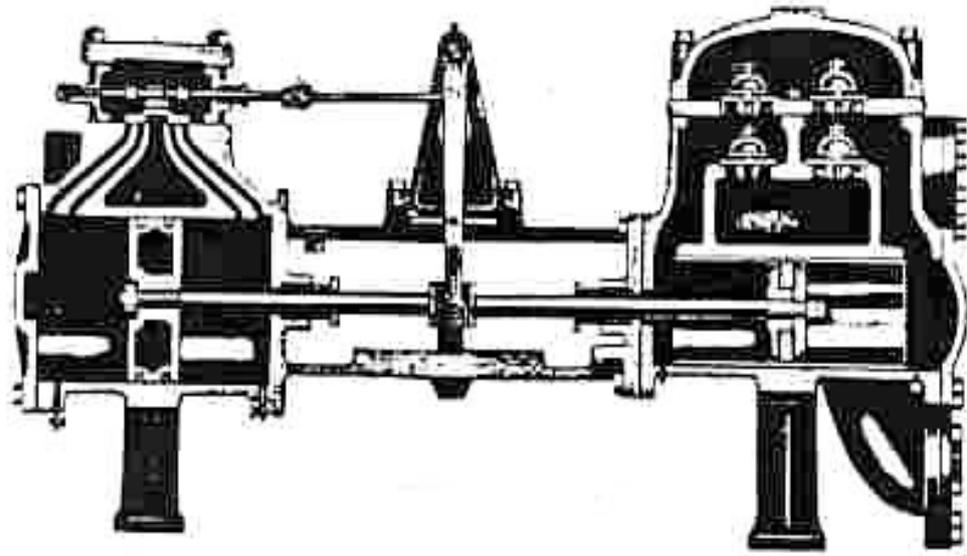


*Figura 5.* Bomba reciprocante de vapor.

**Fuente:** (TECSUP, 2012).

#### B. Bombas reciprocantes de potencia

Es una máquina alternativa de velocidad constante, para motor constante y capacidad casi constante, cuyos émbolos o pistones se mueven por medio de un cigüeñal, a través de una fuente motriz externa. La capacidad de la bomba varía con el número de émbolos o pistones. En general, mientras mayor es el número, menor es la variación en capacidad, a un número dado de rpm. Pueden ser verticales u horizontales, se observa la bomba en la figura 6 (Karassik, Krutzsch, Fraser, & Messina, 1995).



*Figura 6.* Bombas recíprocas de potencia.  
**Fuente:** (TECSUP, 2012).

### C. Bombas de diafragma

La bomba de diafragma usa un elemento flexible como un elemento de desplazamiento, tal como se muestra en la figura 7. Este puede ser movido directamente por un movimiento excéntrico o un líquido de bombeo secundario. No requiere empaques o sellos dinámicos porque el mecanismo de impulsión está completamente aislado del fluido bombeado por el diafragma. Los diafragmas están fabricados por elastómeros, plásticos o metales. El principal problema que presentan es naturalmente el de la vida relativamente corta del diafragma y su riesgo de rotura, por lo que los costos de mantenimiento pueden ser elevados (TECSUP, 2012).



**Figura 7.** Bomba de diafragma.

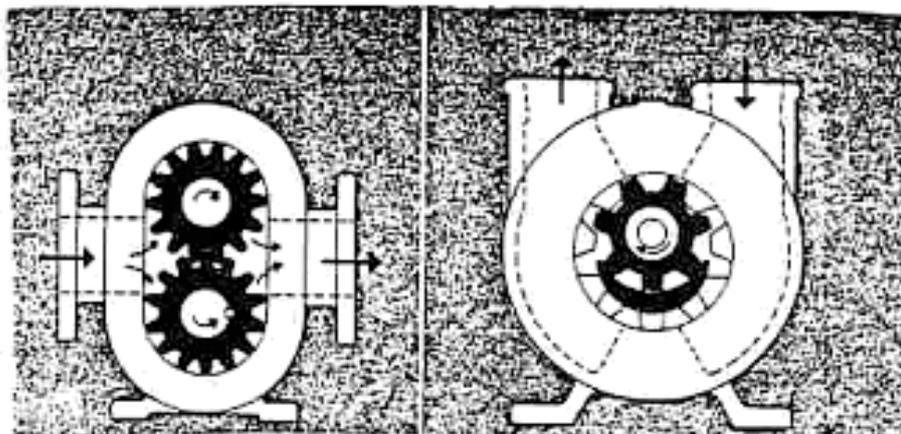
**Fuente:** <https://www.maqpower.com.mx/productos/price-pump/bombas-de-diafragma/>

#### 2.2.9.2.2. **Bombas rotatorias.**

En ellas el desplazamiento del líquido se produce por rotación de una o más piezas móviles en el interior de una carcasa, determinando unas cavidades en la que se aloja el líquido que se desplaza desde de la entrada de la bomba hasta la zona de descarga. La velocidad de giro es del orden de 500 rpm, proporcionando al líquido presiones medias (Karassik et al., 1995).

##### A. Bombas de engranes

Son aquellas que constan de dos o más ruedas dentadas de igual diámetro que se engranan alojadas en una carcasa. Impulsan al líquido confinándolo entre los dientes de las ruedas y las paredes de la carcasa. Los dos tipos principales son las bombas de engranajes internos y externos, tal como se aprecia en la figura 8.

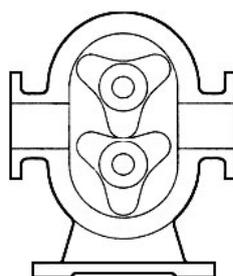


**Figura 8.** Bombas de engranes.  
**Fuente:** (TECSUP, 2012).

### B. Bombas de lóbulos

Son semejantes a las bombas de engranes, los lóbulos cumplen la misma misión. Cuando los lóbulos son helicoidales son usadas para aplicaciones de bajas presiones, se observa este tipo de bomba en la figura 9.

La bomba de lóbulo recibe su nombre de la forma redondeada de las superficies radiales del rotor que permite que los rotores estén continuamente en contacto entre sí, a medida que giran (TECSUP, 2012).



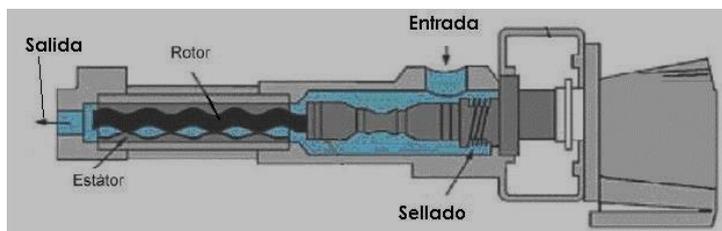
**Figura 9.** Bombas de lóbulos.

**Fuente:** <https://www.watson-marlow.com/ar-es/support/against-the-competition/Lobe-pumps/>

### C. Bombas de tornillos

Constan de uno o más rotores cilíndricos en forma de tornillo que encierran al líquido entre sus estrías y las paredes de la cavidad donde se alojan, obligándolo a circular en dirección axial desde un extremo del tornillo al otro.

En las versiones de tres rotores, el central es el que arrastra a los otros dos. Se utilizan principalmente para impulsar líquidos viscosos, este tipo de bomba se presenta en la figura 10 (Karassik et al., 1995).



**Figura 10.** Bombas de tornillos.

**Fuente:** [https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Bomba-rotativa-de-tornillo-helicoidal\\_fig3\\_279479588](https://www.researchgate.net/figure/Figura-7-Bomba-rotativa-de-tornillo-helicoidal_fig3_279479588)

#### D. Bombas peristálticas

Son aquellas que constan de una tubería flexible que al ser comprimida sucesivamente por unas ruedas que giran continuamente, obligan a circular el líquido en la dirección del giro. El efecto resultante es similar al movimiento peristáltico del aparato digestivo animal, del cual recibe su nombre y se aprecia en la figura 11 este tipo de bomba (TECSUP, 2012).



**Figura 11.** Bomba peristáltica.

**Fuente:** <http://www.reporteroindustrial.com/temas/Bomba-peristaltica-de-manguera-Abaque+10089977>

#### 2.2.10. Modelos reológicos de fluidos no Newtonianos.

Muchos modelos se han propuesto para el tratamiento de los datos experimentales para describir el comportamiento de las propiedades de flujo de las sustancias. Sin embargo, es muy posible que un único modelo no correlacione satisfactoriamente el comportamiento de una determinada sustancia en un amplio

intervalo de cizallas. A pesar de ello, estos modelos son útiles para correlacionar el comportamiento de una gran cantidad de sustancias por lo simple de las ecuaciones de flujo y facilidad con la que se estiman los parámetros reológicos (Bedoya & Cardona, 2009).

Los modelos más utilizados son los siguientes:

#### 2.2.10.1. *Modelo plástico de Bingham (Jiménez & Agudelo, 1996).*

Es un modelo de dos parámetros muy usado en la industria, su expresión es:

$$\tau_{yx} = -\mu_o \frac{dv_x}{dy} \pm \tau_o = \tau_o + \eta(\dot{\gamma}) \quad (2.4)$$

Un fluido Plástico de Bingham no comienza a fluir hasta que el esfuerzo de corte aplicado exceda el valor mínimo  $\tau_o$ . A partir de este punto el cambio en el esfuerzo de corte es proporcional a la tasa de corte y la constante de proporcionalidad es la viscosidad aparente ( $\mu_o$ ).

#### 2.2.10.2. *Modelo de Oswald – de Waele o Ley de potencia.*

$$\tau_{yx} = K \dot{\gamma}^n = K \left( -\frac{\delta v_x}{\delta y} \right)^n = \left[ K \left( \frac{\delta v_x}{\delta y} \right)^{n-1} \right] \left( -\frac{\delta v_x}{\delta y} \right) = \mu_{ap} \left( -\frac{\delta v_x}{\delta y} \right) \quad (2.5)$$

Donde K y n son parámetros empíricos, (K) es el índice de consistencia y (n) es el índice de comportamiento de flujo. El término entre corchetes se denomina “viscosidad aparente” y es evidente que no es constante, dependiendo directamente de la gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ). Debido a que (n) determina precisamente el modo como se desarrolla el flujo, cuando (n) es menor que uno el comportamiento es pseudoplástico, estos fluidos fluyen más fácilmente aumentando la velocidad de deformación.

Por el contrario, cuando  $n > 1$  la resistencia a fluir aumenta con un aumento de la velocidad de corte, y el fluido se denomina dilatante.

No existe un término para el punto de cedencia por tanto bajo este modelo los fluidos comienzan a fluir a una tasa de corte cero (Bedoya & Cardona, 2009).

Una limitación importante de la ley de la potencia es que es aplicable a un rango limitado de velocidades de corte. Además, el valor de (K) depende del valor numérico de (n), con lo cual valores de (K) de distintos fluidos no son comparables.

### 2.2.10.3. *Modelo de casson .*

$$\tau^{0.5} - \tau_o^{0.5} = \eta^{0.5}(\dot{\gamma})^{0.5} \quad (2.6)$$

Se aplica para aquellos fluidos en los que no existe proporcionalidad entre el esfuerzo y la velocidad:

Siendo:

$\tau$ : esfuerzo cortante (Pa)

$\tau_o$ : esfuerzo umbral (Pa)

$\dot{\gamma}$  : velocidad de deformación ( $s^{-1}$ )

$\eta$ : Viscosidad plástica definida por Casson

### 2.2.10.4. *Modelo Herschel–Bulkley .*

Es el resultado de la combinación de aspectos teóricos y prácticos de los modelos Plástico de Bingham y Ley de Potencia (Jiménez & Agudelo, 1996). La siguiente ecuación describe el comportamiento de un fluido regido por este modelo:

$$\tau = \tau_y + K \dot{\gamma}^n \quad (2.7)$$

En este modelo los parámetros “ $n$ ” y “ $k$ ” se definen igual que en Ley de Potencia. Como casos especiales se tienen que el modelo se convierte en Plástico de Bingham cuando  $n = 1$  y en Ley de Potencia cuando  $\tau_y = 0$ .

#### 2.2.10.5. *Modelo Robertson-stiff (Sierra, 2000).*

Fue presentado en 1979 como un modelo híbrido de los modelos Ley de Potencia y Plástico de Bingham para representar lechadas de cemento y lodos. La ecuación que lo caracteriza es:

$$\tau = (\dot{\gamma}_0 + \dot{\gamma})^n \quad (2.8)$$

El parámetro  $\dot{\gamma}_0$  es considerado como una corrección a la tasa de corte, de modo que  $\dot{\gamma}_0 + \dot{\gamma}$  representa la tasa de corte requerida por un fluido pseudo-plástico puro para producir el esfuerzo de cedencia del modelo de Bingham. Los parámetros “ $n$ ” y “ $k$ ” se definen igual que en Ley de Potencia.

#### 2.2.11. Selección del modelo.

Según Bedoya & Cardona (2009), para comparar y definir los modelos reológicos, se calcula el error promedio para cada uno y se toma en cuenta cuál de ellos arroja el mínimo error, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\%error = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \frac{|\dot{\tau}_i - \dot{\gamma}_i|}{\dot{\tau}_i} \right) 100}{n} \quad (2.9)$$

Donde:  $\dot{\gamma}_i$  es la tasa de corte medida y  $\dot{\tau}_i$  es la tasa de corte calculada por el modelo en cada punto. El modelo seleccionado será aquel modelo cuyo valor de “%error” será más cercano a cero.

### 2.2.12. Numero de Reynolds generalizado (Bandala-Rocha, Macedo y Ramírez, & Vélez-Ruiz, 2005).

$$Re_G = \frac{D^n V^{2-n} \rho}{K 8^{n-1} \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n} \quad (2.10)$$

Donde:

D: Diámetro del tubo (m)

V: Velocidad del fluido en el tubo (m/s)

$\rho$ : Densidad del fluido (kg/m<sup>3</sup>)

K: Índice de consistencia (N s/m<sup>2</sup>)

n: Índice de comportamiento del flujo

Y el número de Reynolds crítico:

$$Re_{CRITICO} = \frac{6464n}{(1+3n)^2 (1/(2+n))^{(2+n)/(1+n)}} \quad (2.11)$$

### 2.2.13. Factor de fricción en las tuberías.

Con los datos anteriores se determina el comportamiento laminar ( $Re_G < Re_{CRITICO}$ ) o turbulento del fluido ( $Re_G > Re_{CRITICO}$ ), y nos sirve para obtener el coeficiente de fricción.

En régimen laminar:

$$f = \frac{16}{Re_G} \quad (2.1)$$

En régimen turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left(\frac{4}{n^{0.75}}\right) \log_{10} \left[ (Re_G) f^{(1-(n/2))} \right] - \left(\frac{0.4}{n^{1.2}}\right) \quad (2.12)$$

Ya solo queda calcular la pérdida de carga debida a la instalación mediante la ecuación general:

$$h_{pl} = \frac{4fLV^2}{D \times 2g} \quad (2.13)$$

donde:

f: es el factor de fricción

L: es la longitud de tubería en (m)

V: es la velocidad del flujo (m/s)

D: es el diámetro interno de la tubería (m)

g: es la aceleración de la gravedad en (m/s<sup>2</sup>)

La pérdida de carga del fluido siempre se podrá obtener de una forma más ajustada mediante el uso de ábacos y ecuaciones empíricas de paso del fluido por determinadas figuras, no obstante, en este estudio consideramos suficiente el uso de esta ecuación para una aproximación bastante ajustada.

#### **2.2.14. Carga total o altura total.**

Es la diferencia de cota entre el nivel del líquido en la succión y en la descarga.

#### **2.2.15. Altura dinámica total (ADT).**

La altura dinámica total (TDH, por sus siglas en inglés) es la presión, expresada en metros del fluido que es transportado, que se debe desarrollar para trasladar el fluido en mención desde un punto A hasta un punto B.

### 2.2.16. Ventajas y desventajas del transporte por tubería.

Tabla 4:

*Ventajas y desventajas de transporte por tubería.*

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo (1,8-2,1 €/100 km)</li> <li>• Alta capacidad (60 millones de litros al día)</li> <li>• Alta seguridad de la carga (2 accidentes por cada 10 000km)</li> <li>• Suministro seguro (no afectado por el clima, 365 días al año)</li> <li>• Bajas consecuencias medioambientales. (al soterrarse las tuberías no producen molestias de ruidos ni impacto visual).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cargas limitadas (gas, aceite, emulsiones y materias primas)</li> <li>• Baja disponibilidad de pequeños volúmenes de carga</li> <li>• transportada</li> </ul>

**Fuente:** *Société des transports par pipeline.*

### 2.2.17. Criterios de evaluación de rentabilidad.

La evaluación de la rentabilidad se determina usando las reglas básicas de decisión generalmente utilizadas para decidir cuándo un proyecto de inversión debe llevarse a cabo o no. Estas reglas de decisión son el valor actual neto (VAN), el periodo de recupero de la inversión (PRI) y la tasa interna de retorno (TIR).

### 2.2.18. Reología, la ciencia que estudia el movimiento de fluidos.

Monsalve (2010) en su artículo de investigación publicado en la revista remetallica de la Universidad de Santiago de Chile, asocia el comportamiento del barro y las pulpas con el comportamiento reológico de los fluidos de Bingham, además hace notar claramente la diferencia entre los fluidos newtonianos y no newtonianos, luego de definir los comportamientos de distintos fluidos, finalmente concluye en que, la ciencia denominada reología, es de gran importancia en todas las ramas de la ingeniería que estén relacionadas con el transporte de fluidos, siendo la viscosidad una de las propiedades más importantes que caracteriza la resistencia de un fluido a ponerse en movimiento.

## 2.3. Marco conceptual

### 2.3.1. Concepto de reología.

La reología (palabra introducida por Eugene Bingham en 1929) es la rama de la física de medios continuos que se dedica al estudio de la deformación y el fluir de la materia.

La reología es la parte de la física que estudia la relación entre el esfuerzo y la deformación en los materiales que son capaces de fluir. La reología es una parte de la mecánica de medios continuos. Una de las metas más importantes en reología es encontrar ecuaciones constitutivas para modelar el comportamiento de los materiales. Dichas ecuaciones son en general de carácter tensorial.

Las propiedades mecánicas estudiadas por la reología se pueden medir mediante reómetros, aparatos que permiten someter al material a diferentes tipos de deformaciones controladas y medir los esfuerzos o viceversa. Algunas de las propiedades reológicas más importantes son:

- Viscosidad aparente (relación entre esfuerzo de corte y velocidad de corte)
- Coeficientes de esfuerzos normales
- Viscosidad compleja (respuesta ante esfuerzos de corte oscilatorio)
- Módulo de almacenamiento y módulo de pérdidas (índices de comportamiento y consistencia)
- Funciones complejas de visco elasticidad no lineal

Los estudios teóricos en reología en ocasiones emplean modelos microscópicos para explicar el comportamiento de un material. Por ejemplo, en el estudio de polímeros, estos se pueden representar como cadenas de esferas conectadas mediante enlaces rígidos o elásticos.

Si nos fijamos en el sentido etimológico de la palabra «reología», podríamos definirlo como la ciencia del flujo. La reología describe la deformación de un cuerpo

bajo la influencia de esfuerzos, pero la reología no está limitada a los polímeros, se puede aplicar a todo tipo de material, sólido, líquido o gas.

Un sólido ideal se deforma elásticamente y la energía requerida para la deformación se recupera totalmente cuando se retira el esfuerzo aplicado. Mientras que los fluidos ideales se deforman irreversiblemente, fluyen, y la energía requerida para la deformación se disipa en el interior del fluido en forma de calor y no se puede recuperar al retirar el esfuerzo. Pero solo unos pocos líquidos se comportan como líquidos ideales; la inmensa mayoría de los líquidos muestra un comportamiento reológico que se clasifica en una región intermedia entre los líquidos y los sólidos: son a la vez elásticos y viscosos, por lo que se los denomina «viscoelásticos». Por otra parte, los sólidos reales pueden deformarse irreversiblemente bajo la influencia de fuerzas de suficiente magnitud; en definitiva, pueden fluir.

En esta clasificación de los comportamientos reológicos de los materiales con relación a su respuesta a los esfuerzos aplicados se ha de introducir un nuevo parámetro: la escala de tiempo en la cual se aplica la deformación. Para ello, se define una nueva magnitud que tiene en cuenta el tiempo de observación; se trata del número de Deborah:  $De = \lambda/t$ , donde  $\lambda$  es el tiempo de relajación y  $t$  es el tiempo de observación.

En este sentido, podemos decir que los sólidos tienen un tiempo de relajación infinito, mientras que, en el caso de los líquidos, este valor se aproxima a cero; por ejemplo, el tiempo de relajación del agua es de 10-12 s. Por otra parte, si consideramos procesos de deformación característicos asociados a los típicos tiempos de observación, podemos decir que un número de Deborah grande define un comportamiento tipo sólido y un número de Deborah pequeño define un comportamiento tipo líquido.

Como conclusión se puede decir que sustancias como el agua o el vidrio no se pueden clasificar como líquidos o sólidos, sino que, como mucho, podemos decir que tienen un comportamiento de líquido o sólido bajo unas determinadas condiciones de esfuerzo, deformación o tiempo.

### 2.3.2. Modelo reológico.

Un modelo reológico es una expresión matemática empírica que relaciona el esfuerzo cortante  $\tau_{xy}$  (shear stress) con la rapidez de deformación  $\dot{\gamma}$  (shear rate). En este sentido, se puede decir que la ley de Newton de la viscosidad es el modelo reológico más simple.

### 2.3.3. Determinación de parámetros reológicos de flujos hiperconcentrados aplicados a relaves mineros (Rosario, 2010).

La Determinación de parámetros reológicos de flujos hiperconcentrados, en especial atención a relaves mineros, se ha desarrollado bajo el estudio de la Reología para la parte conceptual y de la Reometría para la parte experimental. La Reología como ciencia que estudia la deformación de los cuerpos sometidos a esfuerzos externos; partiendo de la premisa que todo cuerpo fluye para un determinado tiempo de relajación, introduce el término de "Número de Deborah" como una forma de evaluar el tiempo de relajación mencionado. En ese sentido la Reología clasifica a los fluidos en función a su comportamiento de parámetros como viscosidad, esfuerzo de cadencia, en función del tiempo. Siendo uno de los objetivos de esta investigación determinar dichos parámetros. Otro aspecto importante es la Reometría, término que se refiere al conjunto de técnicas y metodologías utilizados para medir los parámetros reológicos. Por lo que, se tiene la necesidad de contar con equipos de medición reológica, que permitan cumplir con estos objetivos. Se optó por la fabricación del Reómetro de Caída de Varilla, por cuanto su modelamiento físico del equipo es simple y se fundamenta en los conceptos de la mecánica clásica. El equipo instrumental se ha fabricado en las instalaciones del Laboratorio Nacional de Hidráulica. Los resultados de la investigación se pueden considerar como favorables al haberse determinado los parámetros reológicos, como Esfuerzo de cedencia y Viscosidad dinámica de la muestra de relave minero. El rango de aplicación de la muestra de relave minero (flujo hiperconcentrado) ensayada se ubica entre 63,37% al 79,01 % de concentración en peso o su equivalente de 31,10% al 49,88% de concentración volumétrica respectivamente.

#### 2.3.4. Reología aplicada a procesos de fundición y metal.

Todo fluido se va a deformar en mayor o menor medida al someterse a un sistema de fuerzas externas. Dicho sistema de fuerzas se representa matemáticamente mediante el esfuerzo cortante ( $\tau_{xy}$ ), mientras que la respuesta dinámica del fluido se cuantifica mediante la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ). El viscosímetro nos permite estudiar el comportamiento reológico de los metales semisólidos. La viscosidad, es un parámetro de la capacidad del material semisólido de llenar el molde durante la inyección, y determina la fuerza requerida para la inyección, deformación y circulación del material semisólido.

#### 2.3.5. Viscosidad.

La viscosidad se puede definir como una medida de la resistencia a la deformación del fluido.

Isaac Newton publicó en “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” una hipótesis asociada al estado simple de cizalladura (o corte): “La resistencia derivada de la falta de deslizamiento de las partes de un líquido es proporcional a la velocidad con que se separan unas de otras dentro de él”. Esta necesidad de deslizamiento es lo que ahora se denomina “Viscosidad”, sinónimo de fricción interna. Dicha viscosidad es una medida de la resistencia a fluir. Existen tres tipos de viscosidad: la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática y la viscosidad aparente. Si se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación) se define como la pendiente en cada punto de dicha curva. Viscosidad aparente ( $\mu_0$ ), se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación. Este término es el que se utiliza al hablar de viscosidad para fluidos no newtonianos.

### **2.3.6. Modelos en Reología de Suspensiones: Aplicaciones a la Minería.**

Larenas (2011) en su libro Modelos en Reología de Suspensiones: Aplicaciones a la Minería: Estudio teórico e implementación numérica de métodos de análisis reológico para suspensiones concentradas (Spanish Edition, afirma:

La caracterización de suspensiones concentradas es un campo de investigación activo de gran relevancia científica e industrial y donde la aplicación de la mecánica matemática permite desarrollar diseños de ingeniería más seguros y eficientes. Esta tesis de grado es un estudio teórico dividido en dos secciones, ambas en el marco de la reología aplicada a relaves mineros. La primera parte plantea una metodología eficiente para la construcción de la curva reológica de un fluido a partir de mediciones experimentales. Se describen e implementan distintas estrategias que han sido utilizadas históricamente para buscar soluciones numéricas aproximadas. Además, se realiza un análisis comparativo de estos métodos utilizando información experimental de relaves mineros. En la segunda parte se propone un modelo reológico original que da cuenta del comportamiento complejo observado en los experimentos. Globalmente, esta investigación contribuye, tanto de manera conceptual como práctica, a la comprensión de las suspensiones concentradas. La aplicación de los resultados que de aquí se desprenden puede conducir a mejoras significativas en procedimientos de análisis en laboratorios de reología.

### **2.3.7. Flujo de lodos y reología en minería.**

Los servicios de flujo de lodos y de reología de SGS utilizan procedimientos y pruebas reológicas avanzadas para caracterizar el flujo de lodos en muchos procesos industriales.

La reología es la ciencia del flujo de materia. El comportamiento del flujo de los lodos procesados impacta en las operaciones de unidades basadas en transferencia de masas y energía. Los procesos que implican la separación física de líquidos de sólidos y de sólidos de sólidos (es decir, lodos) dependen también de la reología.

La reometalurgia aplica estos principios de forma práctica para desarrollar criterios de diseño para las instalaciones metalúrgicas, por tal las propiedades reológicas de los lodos de mineral bruto:

- Se trata de un factor decisivo en el éxito o el fracaso de los proyectos.
- Gran impacto en la economía de plantas a escala completa.
- Ayuda a orientar la selección de equipos optimizados incluidos los tamaños de bombeo.

### **Posibles aplicaciones de la reología**

La definición de las condiciones de bombeo óptimas para el transporte de lodos proporciona criterios directos para el diseño. Entre los ejemplos habituales se incluyen:

- Bombeo de concentrados, productos beneficiados y relaves para su eliminación medida de bombeo.
- Caracterización de la pasta cribado y manipulación de los lodos separación de líquidos y sólidos
- Generación de datos de reología de alta temperatura para caracterizar el flujo de lodos calientes. Estos datos informan del diseño de intercambiadores de calor, autoclaves, depósitos de retención calentados, etc.
- La reología de procesos y la asignación de depósitos permiten la mezcla de mena, con lo que se crean los requisitos previos para la optimización del flujo de lodos de baja inversión en su paso por la planta.
- Caracterización de productos: las pruebas eficaces de reología le proporcionan balances de masas correctos, datos para el diseño de procesos de precisión y condiciones para procesos eficientes en las operaciones.
- Control y supervisión de las reacciones, así como diseño de ingeniería tradicional.
- Utilizamos procedimientos y equipos para pruebas de reología de última generación. Podemos probar una amplia variedad de menas, residuos y lodos de procesos químicos. para realizar.

- Diseño y desarrollo de pruebas especializadas para el transporte de lodos, la separación de líquidos y sólidos y el aumento en el bombeo.
- Preparación de criterios de diseño para los procesos metalúrgicos y el tamaño de los equipos.

### **2.3.8. Características de las pastas minerales.**

Olcay, Sales & Hernández (2014) en una investigación realizada sobre: Características principales de pastas minerales de relaves de manganeso preparadas en espesador de escala de laboratorio, aseveran que la disposición de relaves en forma de pasta mineral presenta una serie de ventajas, entre las cuales se pueden destacar las de índole ambiental, social, operacional y técnica.

### **2.3.9. Propiedades Básicas de las Pulpas.**

#### **Propiedades Físicas:**

Peso específico de los sólidos y granulometría

Contenido de sólidos

Forma de las partículas

#### **Propiedades Químicas:**

Conductividad del agua de proceso

pH de la mezcla

#### **Propiedades Mineralógicas:**

Presencia de arcillas y tipo de arcillas

#### **Propiedades del Proceso:**

Adición de Floculante

## Agitación

### **2.3.10. Régimen Laminar.**

Es la condición en que las líneas de flujo se mantienen paralelas e imperturbadas, sin entremezclarse. Sucede cuando hay alta viscosidad y/o baja velocidad.

### **2.3.11. Régimen Turbulento.**

Condición en la que el flujo es caótico y desordenado. El flujo cambia de rumbo en forma errática. Sucede cuando hay baja viscosidad y/o alta velocidad.

### **2.3.12. Típicas Pulpas Viscosas.**

Arcillas. - cuando hay presentes arcillas minerales la pulpa tiende a ser muy viscosa.

Pastas y relaves espesados. - generalmente las pulpas finas y de baja sedimentabilidad tienen viscosidad alta, la que domina el comportamiento dinámico de la pulpa.

### **2.3.13. Ensayos Escala de Laboratorio.**

Los ensayos de laboratorio incluyen:

#### **a) Caracterización del Material**

- Granulometría
- Peso específico de las partículas
- Concentración de sedimentación libre y máxima
- Micrografía de las partículas
- Propiedades del líquido (si el medio de transporte no es agua)
- Química del agua

**b) Caracterización de la Pulpa**

- pH
- Reología
- Comportamiento coloidal de la pulpa y arcillas
- Ensayos de descenso (Slump)
- Abrasividad (Número de Miller)
- Desgaste de tubería (Corrosión y Erosión).

**c) Ensayos Reológicos**

Elaborados usando un viscosímetro rotatorio, un viscosímetro tubular o un loop de cañería. Para un trabajo más preciso, es preferible realizar los ensayos con varias configuraciones/tamaños de modo de validar las mediciones (las curvas de comportamiento resultante deben ser coincidentes en la zona laminar).

Para ensayos en viscosímetro rotacional se deben eliminar los datos que corresponden a las siguientes condiciones:

- Flujo no del todo desarrollado (bajas tasas de corte)
- Presencia de vórtices de Taylor (altas tasas de corte)
- En el caso de viscosímetro tubular y loop de cañerías, se deben descartar los puntos de operación en régimen turbulento.

**d) Ensayo de Descenso (Slump)**

- Provee una indicación de la Tensión de Fluencia de la pulpa, pero no provee suficiente información para caracterizar el comportamiento de flujo de la pulpa.
- Es buena para efectuar control de calidad de la pulpa.
- No es adecuado para el diseño de conducciones.

**e) Características de las pulpas sedimentables**

- El flujo depende de la turbulencia para mantener en suspensión a los sólidos y así poder transportarlos dentro del flujo.
- Los sólidos están asimétricamente distribuidos en la sección transversal.

- Hay un incremento en la concentración de sólidos hacia el fondo de la conducción.
- A bajas velocidades las partículas sedimentan en el fondo de la conducción y llegan a formar un depósito estacionario.
- Como regla general: Una pulpa con partículas predominantemente mayores a 75  $\mu\text{m}$  se comportará como pulpa sedimentable.

#### **2.3.14. Bomba hidráulica**

Una bomba es una máquina generadora que transforma la energía con la que es accionada en energía del fluido incompresible que mueve. El fluido incompresible puede ser líquido o una mezcla de líquidos y sólidos como puede ser el hormigón antes de fraguar o la pasta de papel. En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión a otra de mayor presión.

#### **2.3.15. Relaves**

Es un conjunto de desechos de procesos mineros de la concentración de minerales, usualmente constituido por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales de ganga, aunque también se encuentran bajas concentraciones de metales pesados.

#### **2.3.16. Relaveducto**

Son los ductos mediante el cual se lleva los relaves.

#### **2.3.17. Ducto o tubería**

Se denomina ducto, por lo tanto, a un canal o un conducto que puede emplearse para trasladar agua, petróleo, gas u otra sustancia.

### **2.3.18. Pozas de sedimentación**

Son pozas destinadas a separar los sólidos suspendidos en el agua por sedimentación.

### **2.3.19. Posas de clarificación**

Del mismo modo cumple las mismas funciones que la poza de sedimentación, pero con una sedimentación más lenta.

### **2.3.20. Parámetros**

Se denomina así a las variables que pueden tomar cualquier valor.

### **2.3.21. Relleno hidráulico**

Son sólidos mezclados en un líquido cualquiera que adquiere propiedades hidráulicas.

## **2.4. Hipótesis del trabajo**

### **2.4.1. Hipótesis general.**

La caracterización de las propiedades reológicas nos permite optar por el medio más óptimo de transporte de los lodos de arcilla generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea.

### **2.4.2. Hipótesis específico.**

- a) La determinación del comportamiento reológico, permitirá contar con un modelo reológico de los lodos de arcilla generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea.

- b) La evaluación de la rentabilidad, permitirá optar por el medio adecuado de transporte de lodos de arcilla generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea.

## 2.5. Operacionalización de variables

La operacionalización de variables se presenta en la tabla 5.

### 2.5.1. Variable independiente.

El comportamiento reológico de los lodos generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea.

### 2.5.2. Variable dependiente.

Parámetros para la selección de equipos para el transporte de los lodos generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani - Ananea.

Tabla 5:  
*Operacionalización de variables*

Variables	Indicadores	Medición
Independiente: Las propiedades reológicas	Esfuerzo de corte	(Pa)
	Velocidad de corte	(1/s)
	Viscosidad	(cp)
	Punto de cedencia	(Pa)
	Índice de comportamiento	
	Índice de consistencia	(N s/m <sup>2</sup> )
	Densidad del fluido	(kg/m <sup>3</sup> )
Dependiente: Parámetros para la selección de equipos para el transporte de lodos	Velocidad del flujo	(m/s)
	Costo de transporte	(\$/m <sup>3</sup> )
	Número de Reynolds	
	Factor de fricción	
	Longitud de tubería	(m)
	Diámetro interno de la tubería	(m)
	Aceleración de la gravedad	(m/s <sup>2</sup> )
Capacidad de bombeo	(m <sup>3</sup> /h)	
	Carga total	(m)

**Fuente:** Elaboración propia.

## CAPÍTULO III

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Tipo de investigación

Teniendo en cuenta los criterios de Borja (2012), para el presente proyecto se ha considerado que el tipo de investigación es:

- a) De acuerdo al fin que se persigue: investigación aplicada o de campo.
- b) De acuerdo a los tipos de datos analizados: investigación cuantitativa.
- c) De acuerdo a la Metodología para demostrar la hipótesis: investigación no experimental, porque no se va a manipular las variables.
- d) De acuerdo al periodo y mediciones: Transversal, porque la recolección de datos se realizará en un solo tiempo.

#### 3.2. Diseño de la investigación

El diseño de la investigación es descriptivo, cuantitativo y transversal.

### **3.3. Fuentes de la investigación**

Se ha usado la información de fuentes secundarias en su mayoría, tales como artículos especializados, fuentes bibliográficas, tesis y ponencias, que abordan el tema de reología y transporte de lodos.

### **3.4. Población y muestra**

#### **3.4.1. Población.**

La población es finita y accesible, estuvo representada por el conjunto de pozas de sedimentación y clarificación de agua de la unidad minera San Juan.

#### **3.4.2. Muestra.**

En el presente estudio se obvió la sección de la muestra por la afirmación siguiente:

Si la población, por el número de unidades que la integran, resulta accesible en su totalidad, no será necesario extraer una muestra. En consecuencia, se podrá investigar u obtener datos de toda la población objetivo, sin que se trate estrictamente de un censo. (Arias, 2012, p.83)

Por lo cual se tomó las muestras de la totalidad de las pozas, estos son (02) dos muestras de las pozas de sedimentación y (04) cuatro muestras de las pozas de clarificación, con un total de (06) seis muestras representativas, la unidad de muestreo fue de 500 g/muestra.

### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Se aplica la observación no participante, la revisión de informes de laboratorio y el análisis de las bases teóricas, como herramientas principales o técnicas en la

recolección de datos. Los instrumentos predominantes para recuperar, analizar y procesar la información obtenida, son la libreta de apuntes, Pc portátil y cámara fotográfica.

### **3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos**

La propuesta del proceso metodológico para cumplir con los objetivos del presente estudio consiste en lo siguiente:

#### **3.6.1. Análisis cuantitativo de las muestras.**

Las pruebas de viscosidad para determinar las curvas de comportamiento reológico se llevan a cabo en el laboratorio de control de calidad de la Facultad de Ingeniería Química, este análisis se basa en el modelo matemático regresión lineal y el cálculo del error promedio, esto es tomando en cuenta cuál de ellos arroja el mínimo error. Así mismo el análisis granulométrico de las muestras se lleva a cabo en el laboratorio de tecnología de concretos y suelos de la Facultad de Ingeniería Agrícola.

#### **3.6.2. Método analítico.**

El método analítico que se opta para determinar las curvas reológicas de las muestras, es usando el software Rheocalc V3.1-1, el software Excel para los cálculos y gráficos de las curvas granulométricas. En tanto que, para la evaluación de la rentabilidad de los medios de transporte, se recurre al criterio de análisis en base al VAN, el PRI y la TIR, descritos en el capítulo anterior.

#### **3.6.3. Análisis y visualización de los datos.**

Una vez pasado el procedimiento de análisis en los laboratorios, mostramos los informes del laboratorio sobre viscosidad y ajuste de curva reológica en los anexos D1, D2, D3, D4, D5 y D5. Los datos del análisis granulométrico se muestran en los anexos E1, E2, E3, E4, E5 y E6.

### 3.6.4. Prueba de hipótesis.

Para la prueba de hipótesis se cumple con el procedimiento siguiente:

1. Establecemos la hipótesis nula  $H_0$  y la hipótesis alterna nativa  $H_1$ .

$$H_0: \mu = 1; \text{No newtoniano}$$

$$H_1: \mu \neq 1; \text{Newtoniano}$$

2. Establecemos el nivel de significancia por ser un proyecto investigación.

$$\alpha = 0.05$$

Luego entonces el nivel de confianza, lo cual no es otra cosa que la probabilidad de rechazar la  $H_0$  cuando es verdadera.

$$1 - \alpha = 0.95$$

3. Seleccionamos el estadístico de prueba, esto es la prueba  $t_c$  y su estadístico  $t$ , por ser la muestra pequeña, para ello aplicamos la distribución de probabilidad y ajustamos los datos de la evidencia muestral, para obtener el estadístico con la siguiente fórmula:

$$t_c = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}}$$

Donde:

$t_c$ : Es el estadístico  $t$  calculado.

$\bar{X}$ : La media de la muestra. Su valor es 1, pero ajustamos a 1.001.

$\mu$ : Valor hipotético. Su valor también es 1.

$\sigma$ : Desviación estándar. Su valor ajustado es 0.001.

$n$ : Tamaño de muestra. Su valor es 6.

4. Establecemos como regla de decisión, la de aceptar la  $H_0$ , si el estadístico calculado se encuentra en la región de aceptación.

$$-2.571 \leq t_c \leq 2.571$$

5. La toma de decisión será de acuerdo con la regla de decisión, contrastando el estadístico de la prueba con el valor crítico  $t_{T=2.571}$  de la tabla de distribución t de student, con grado de libertad  $gl = n - 1 = 5$ .

$$t_c = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} = 2.449$$

$$-2.571 \leq 2.449 \leq 2.571$$

En conclusión, existe evidencia estadística para aceptar el comportamiento No newtoniano de los fluidos.

### 3.6.5. Evaluación confiabilidad.

La confiabilidad del procesamiento y análisis de datos se ha encargado a los laboratorios mencionados, garantizando así su concordancia.

### 3.6.6. Presentación de tablas y figuras.

A continuación, se presenta los resultados del análisis granulométrico desde la tabla 6 hasta la tabla 11 y las curvas granulométricas desde la figura 13 hasta la figura 17, la densidad seca de las muestras se presenta en la tabla 12, los parámetros reológicos desde la tabla 13 hasta la tabla 18 y las curvas reológicas desde la figura 18 hasta la figura 23, todo ellos obtenidos de los informes de laboratorio, los mismos también se pueden verificar en los informes de los anexos D y E.

Tabla 6:  
*Resultados del análisis granulométrico de la muestra S1*

Nº DE MALLAS EN SERIE AMERICAN A	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENID O	% RETEN PARCIA L	% RETEN. ACUMUL	% QUE PASA
3"	76,200				
2 1/2"	63,500				
2"	50,8 00		0,000	0,000	100,00
1 1/2"	38,100	0,000	0,000	0,000	100,00
1"	25,400	0,000	0,000	0,000	100,00
3/4"	19,050	0,000	0,000	0,000	100,00
1/2"	12,700	0,000	0,000	0,000	100,00
3/8"	9,525	0,000	0,000	0,000	100,00
1/4"	6,350	9,000	1,661	1,661	98,34
Nº 4	4,760	27,000	4,982	6,642	93,36
Nº 6	3,360	0,000	0,000	6,642	93,36
Nº 8	2,380	142,000	26,199	32,841	67,16
Nº 10	2,000	28,000	5,166	38,007	61,99
Nº 16	1,190	81,000	14,945	52,952	47,05
Nº 20	0,840	38,000	7,011	59,963	40,04
Nº 30	0,590	35,000	6,458	66,421	33,58
Nº 40	0,426	40,000	7,380	73,801	26,20
Nº 50	0,297	12,000	2,214	76,015	23,99
Nº 80	0,177	65,000	11,993	88,007	11,99
Nº 100	0,149	22,000	4,059	92,066	7,93
Nº 200	0,074	33,000	6,089	98,155	1,85
-200	76,200	10,00	1,845	100,000	-

**Fuente:** Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

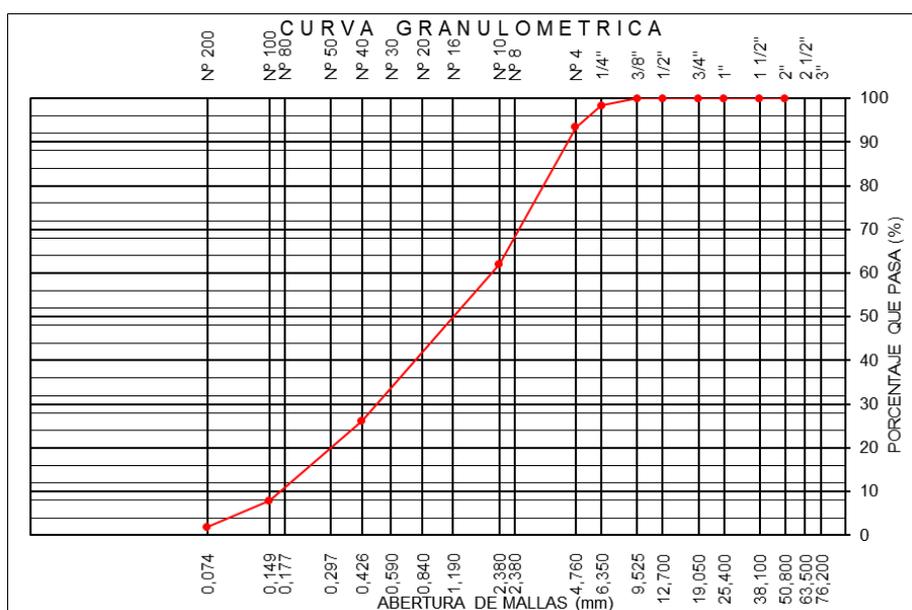


Figura 12. Curva granulométrica de la muestra S1.

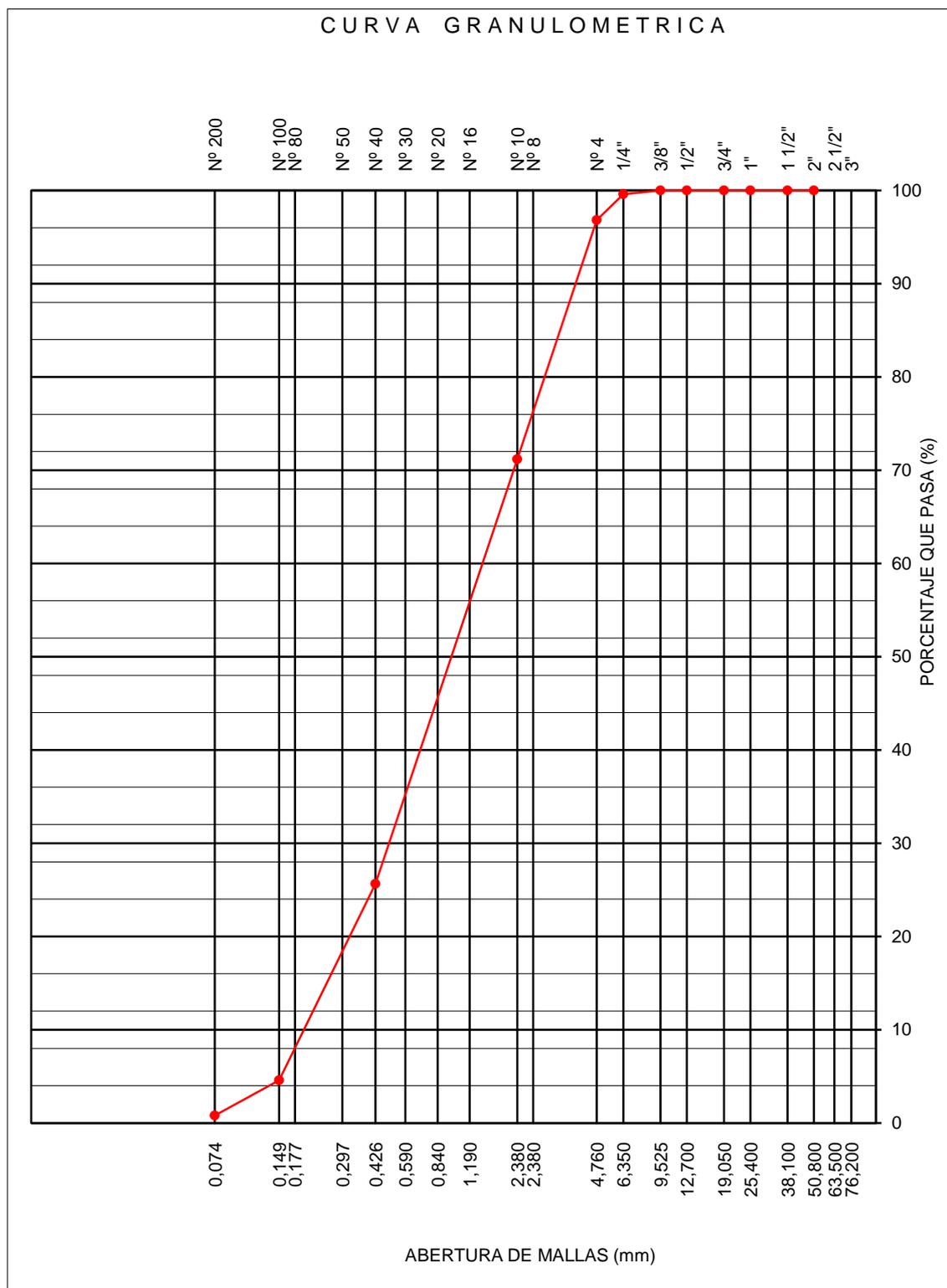
Fuente: Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

Tabla 7:

Resultados del análisis granulométrico de la muestra S2

Nº DE ALLAS EN SERIE AMERICANA	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN, ACUMUL	% QUE PASA
3"	76,200				
2 1/2"	63,500				
2"	50,800		0,000	0,000	100,00
1 1/2"	38,100	0,000	0,000	0,000	100,00
1"	25,400	0,000	0,000	0,000	100,00
3/4"	19,050	0,000	0,000	0,000	100,00
1/2"	12,700	0,000	0,000	0,000	100,00
3/8"	9,525	0,000	0,000	0,000	100,00
1/4"	6,350	2,000	0,398	0,398	99,60
Nº 4	4,760	14,000	2,783	3,181	96,82
Nº 6	3,360	0,000	0,000	3,181	96,82
Nº 8	2,380	101,000	20,080	23,260	76,74
Nº 10	2,000	28,000	5,567	28,827	71,17
Nº 16	1,190	83,000	16,501	45,328	54,67
Nº 20	0,840	38,000	7,555	52,883	47,12
Nº 30	0,590	45,000	8,946	61,829	38,17
Nº 40	0,426	63,000	12,525	74,354	25,65
Nº 50	0,297	19,000	3,777	78,131	21,87
Nº 80	0,177	73,000	14,513	92,644	7,36
Nº 100	0,149	14,000	2,783	95,427	4,57
Nº 200	0,074	19,000	3,777	99,205	0,80
-200		4,00	0,795	100,000	-

Fuente: Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

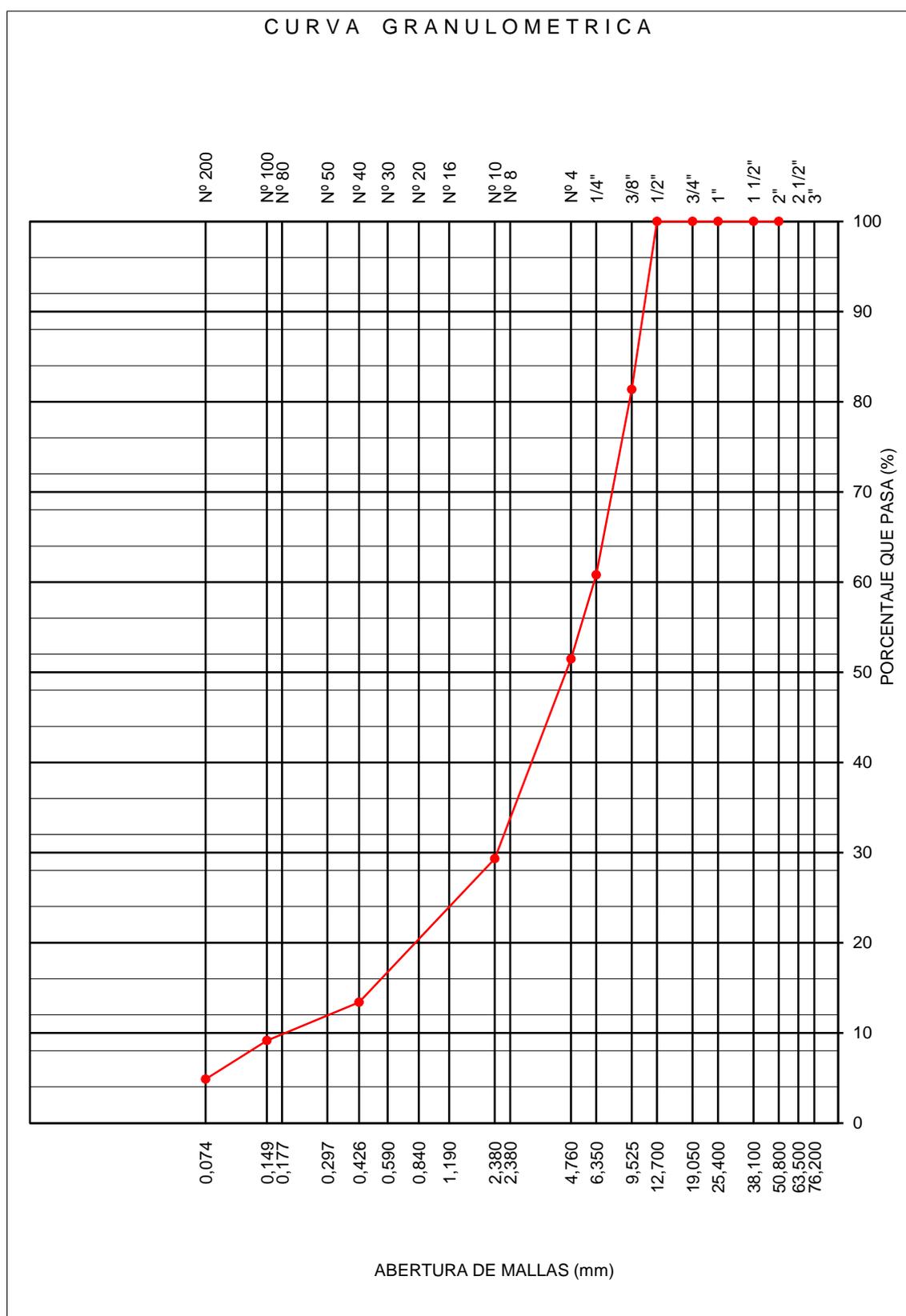


**Figura 13.** Curva granulométrica de la muestra S2.  
**Fuente:** Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

Tabla 8:  
*Resultados del análisis granulométrico de la muestra C1*

Nº DE MALLAS EN SERIE AMERICANA	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN, ACUMUL	% QUE PASA
3"	76,200				
2 1/2"	63,500				
2"	50,800		0,000	0,000	100,00
1 1/2"	38,100	0,000	0,000	0,000	100,00
1"	25,400	0,000	0,000	0,000	100,00
3/4"	19,050	0,000	0,000	0,000	100,00
1/2"	12,700	0,000	0,000	0,000	100,00
3/8"	9,525	96,000	18,641	18,641	81,36
1/4"	6,350	106,000	20,583	39,223	60,78
Nº 4	4,760	48,000	9,320	48,544	51,46
Nº 6	3,360	0,000	0,000	48,544	51,46
Nº 8	2,380	98,000	19,029	67,573	32,43
Nº 10	2,000	16,000	3,107	70,680	29,32
Nº 16	1,190	34,000	6,602	77,282	22,72
Nº 20	0,840	15,000	2,913	80,194	19,81
Nº 30	0,590	15,000	2,913	83,107	16,89
Nº 40	0,426	18,000	3,495	86,602	13,40
Nº 50	0,297	5,000	0,971	87,573	12,43
Nº 80	0,177	10,000	1,942	89,515	10,49
Nº 100	0,149	7,000	1,359	90,874	9,13
Nº 200	0,074	22,000	4,272	95,146	4,85
-200		25,00	4,854	100,000	-
		515,000			

**Fuente:** Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

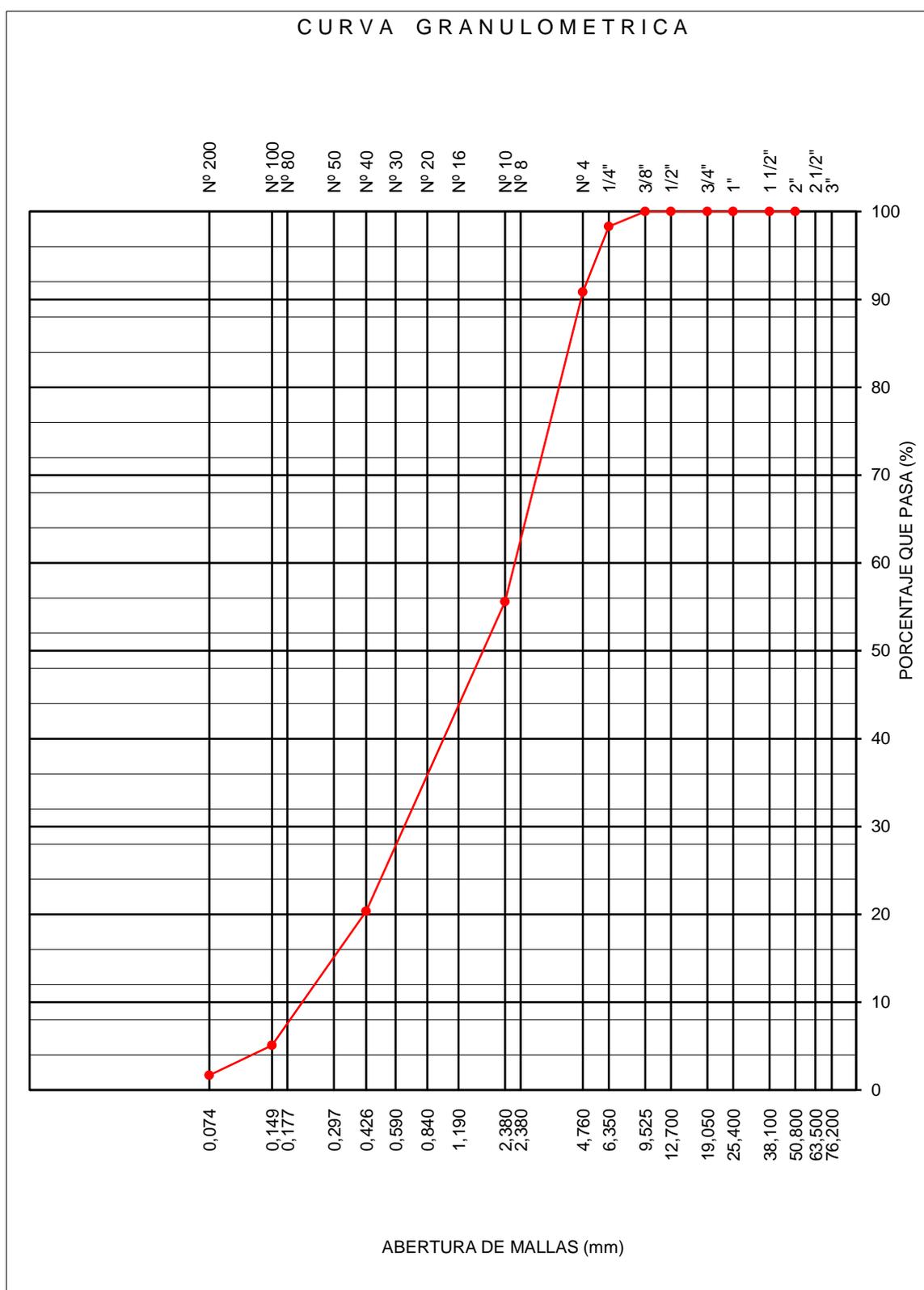


**Figura 14.** Curva granulométrica de la muestra C1.  
**Fuente:** Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

Tabla 9:  
*Resultados del análisis granulométrico de la muestra C2*

Nº DE MALLAS EN SERIE MERICANA	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN, ACUMUL	% QUE PASA
3"	76,200				
2 1/2"	63,500				
2"	50,800		0,000	0,000	100,00
1 1/2"	38,100	0,000	0,000	0,000	100,00
1"	25,400	0,000	0,000	0,000	100,00
3/4"	19,050	0,000	0,000	0,000	100,00
1/2"	12,700	0,000	0,000	0,000	100,00
3/8"	9,525	0,000	0,000	0,000	100,00
1/4"	6,350	5,000	1,695	1,695	98,31
Nº 4	4,760	22,000	7,458	9,153	90,85
Nº 6	3,360	0,000	0,000	9,153	90,85
Nº 8	2,380	91,000	30,847	40,000	60,00
Nº 10	2,000	13,000	4,407	44,407	55,59
Nº 16	1,190	43,000	14,576	58,983	41,02
Nº 20	0,840	21,000	7,119	66,102	33,90
Nº 30	0,590	19,000	6,441	72,542	27,46
Nº 40	0,426	21,000	7,119	79,661	20,34
Nº 50	0,297	6,000	2,034	81,695	18,31
Nº 80	0,177	28,000	9,492	91,186	8,81
Nº 100	0,149	11,000	3,729	94,915	5,08
Nº 200	0,074	10,000	3,390	98,305	1,69
-200		5,00	1,695	100,000	-

**Fuente:** Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

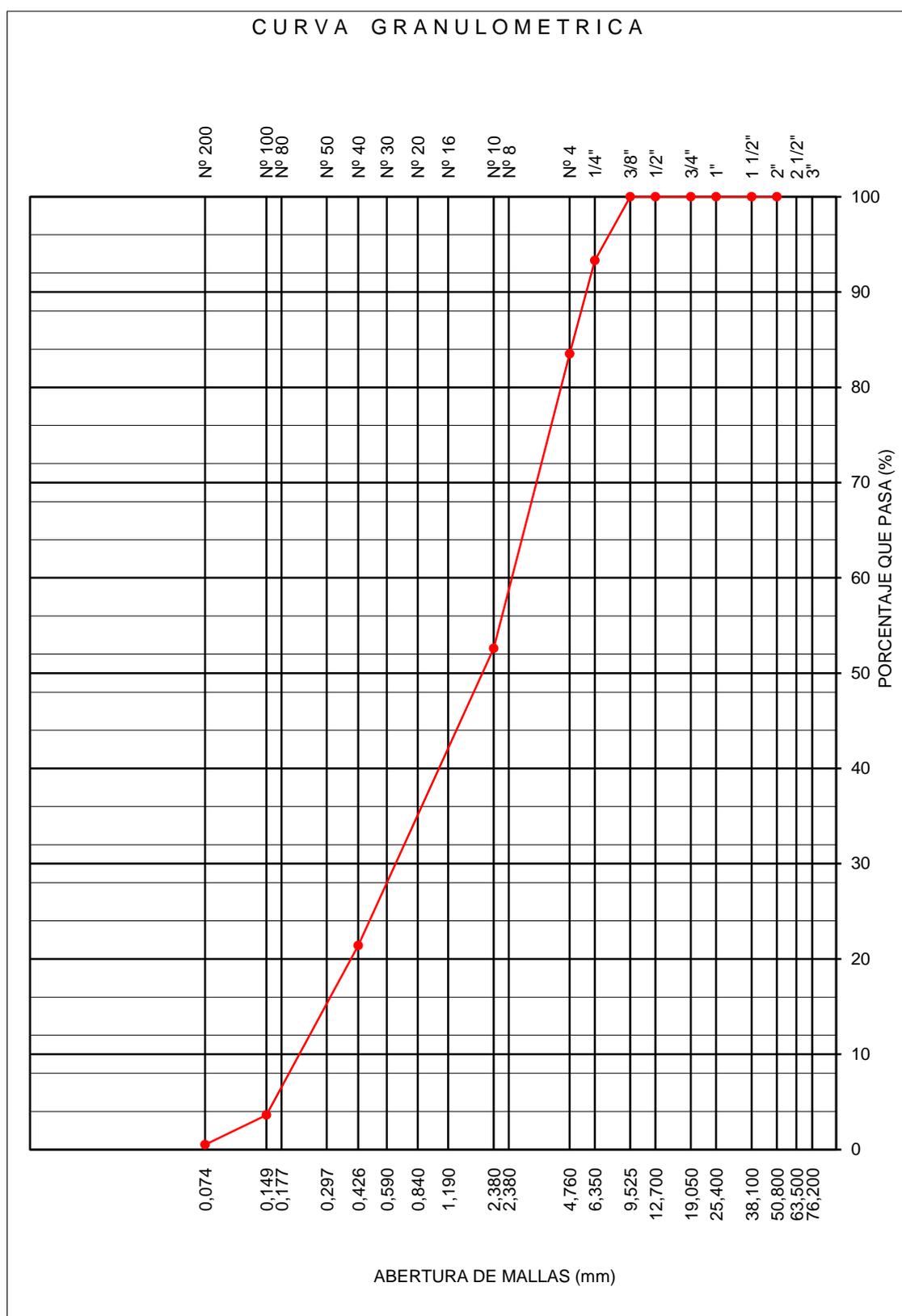


**Figura 15.** Curva granulométrica de la muestra C2  
**Fuente:** Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

Tabla 10:  
*Resultados del análisis granulométrico de la muestra C3*

Nº DE MALLAS EN SERIE AMERICANA	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN, ACUMUL	% QUE PASA
3"	76,200				
2 1/2"	63,500				
2"	50,800		0,000	0,000	100,00
1 1/2"	38,100	0,000	0,000	0,000	100,00
1"	25,400	0,000	0,000	0,000	100,00
3/4"	19,050	0,000	0,000	0,000	100,00
1/2"	12,700	0,000	0,000	0,000	100,00
3/8"	9,525	0,000	0,000	0,000	100,00
1/4"	6,350	26,000	6,701	6,701	93,30
Nº 4	4,760	38,000	9,794	16,495	83,51
Nº 6	3,360	0,000	0,000	16,495	83,51
Nº 8	2,380	104,000	26,804	43,299	56,70
Nº 10	2,000	16,000	4,124	47,423	52,58
Nº 16	1,190	52,000	13,402	60,825	39,18
Nº 20	0,840	23,000	5,928	66,753	33,25
Nº 30	0,590	19,000	4,897	71,649	28,35
Nº 40	0,426	27,000	6,959	78,608	21,39
Nº 50	0,297	3,000	0,773	79,381	20,62
Nº 80	0,177	51,000	13,144	92,526	7,47
Nº 100	0,149	15,000	3,866	96,392	3,61
Nº 200	0,074	12,000	3,093	99,485	0,52
-200		2,00	0,515	100,000	-
		388,000			

**Nota. Fuente:** Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

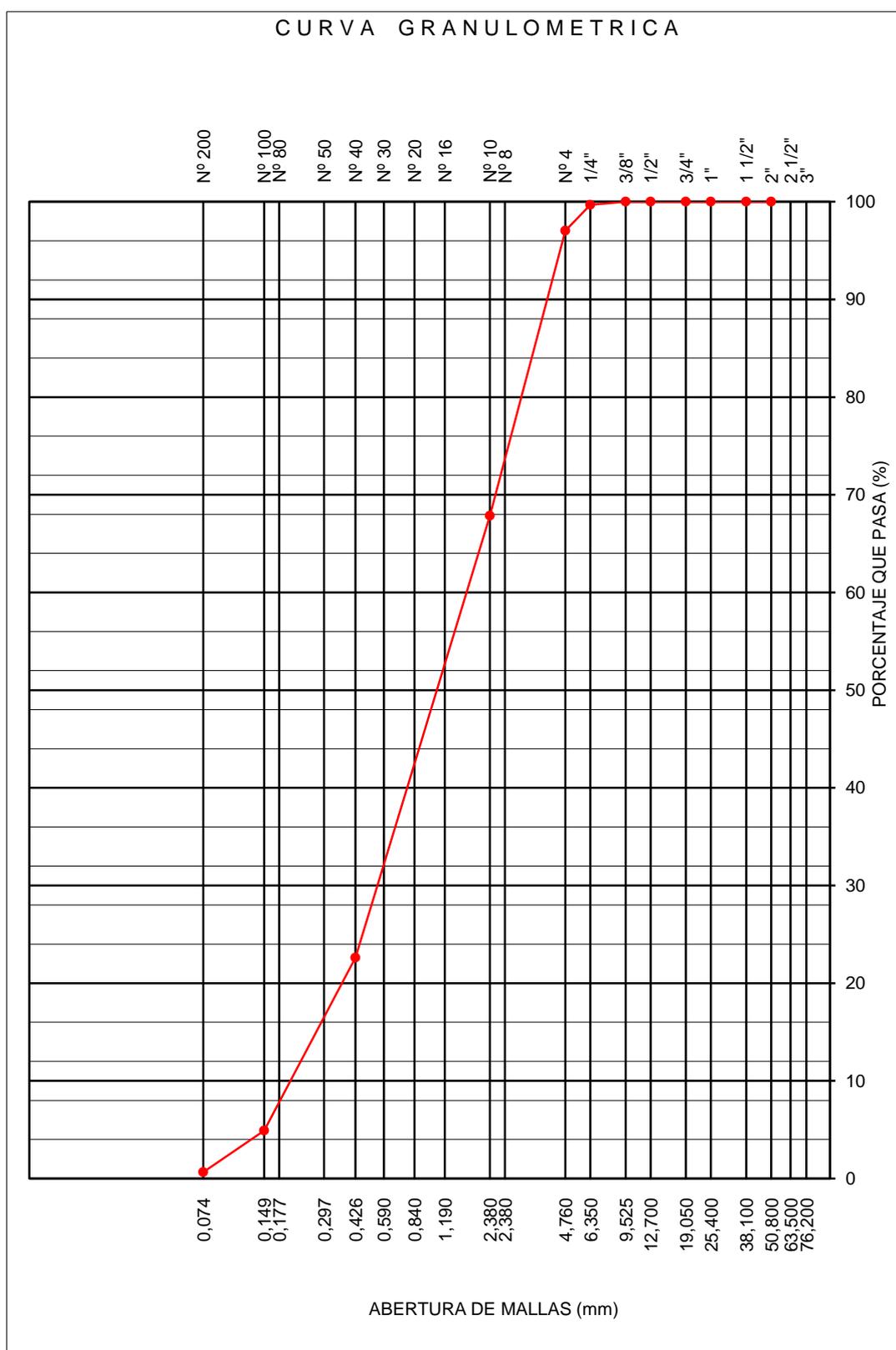


**Figura 16.** Curva granulométrica de la muestra C3.  
**Fuente:** Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

Tabla 11:  
*Resultados del análisis granulométrico de la muestra C4*

Nº DE MALLAS EN SERIE AMERICANA	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN, ACUMUL	% QUE PASA
3"	76,200				
2 1/2"	63,500				
2"	50,800		0,000	0,000	100,00
1 1/2"	38,100	0,000	0,000	0,000	100,00
1"	25,400	0,000	0,000	0,000	100,00
3/4"	19,050	0,000	0,000	0,000	100,00
1/2"	12,700	0,000	0,000	0,000	100,00
3/8"	9,525	0,000	0,000	0,000	100,00
1/4"	6,350	1,000	0,328	0,328	99,67
Nº 4	4,760	8,000	2,623	2,951	97,05
Nº 6	3,360	0,000	0,000	2,951	97,05
Nº 8	2,380	72,000	23,607	26,557	73,44
Nº 10	2,000	17,000	5,574	32,131	67,87
Nº 16	1,190	58,000	19,016	51,148	48,85
Nº 20	0,840	29,000	9,508	60,656	39,34
Nº 30	0,590	24,000	7,869	68,525	31,48
Nº 40	0,426	27,000	8,852	77,377	22,62
Nº 50	0,297	7,000	2,295	79,672	20,33
Nº 80	0,177	38,000	12,459	92,131	7,87
Nº 100	0,149	9,000	2,951	95,082	4,92
Nº 200	0,074	13,000	4,262	99,344	0,66
-200		2,00	0,656	100,000	-
		305,000			

**Fuente:** Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.



**Figura 17.** Curva granulométrica de la muestra C4.  
**Fuente:** Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

Tabla 12:

Resultados de las densidades de las muestras S1, C1, C2 y C4

PESO ESPECIFICO O DENSIDAD ESPECIFICA RET. NRO. 8					
DATOS		C-1	C-2	C-4	S-1
1	PESO DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO (g)	93,17	84,62	63,9	76,2
2	PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (g).	121,43	110,54	77,11	84,2
3	VOLUMEN EN LA INICIAL EN LA PROBETA (cm <sup>3</sup> )	200	200	100	200
4	VOLUMNE EN LA FINAL EN LA PROBETA (cm <sup>3</sup> )	356	252	210	302
5	VOLUMEN DE LA MUESTRA (cm <sup>3</sup> ) (4-3)	156	52	110	102
RESULTADOS					
6	PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS: P.E.S. (1/3) (g/cm <sup>3</sup> )	0,46585	0,4231	0,639	0,381
7	TEMPERATURA DEL AGUA (°C)	17	17	17	17
8	FACTOR DE CORRECCION K	1,0006	1,0006	1,0006	1,0006
9	PESO ESPECIFICO CORREGIDO DE LOS SOLIDOS: P.E.S.: 6*8 (g/cm <sup>3</sup> ) GRAVEDDA ESPECIFICA	0,46613	0,423354	0,639383	0,381229
10	RELATIVA DE LO SOLIDOS: 9/(P.E. AGUA= 1 g/cm <sup>3</sup> )	0,46613	0,423354	0,639383	0,381229

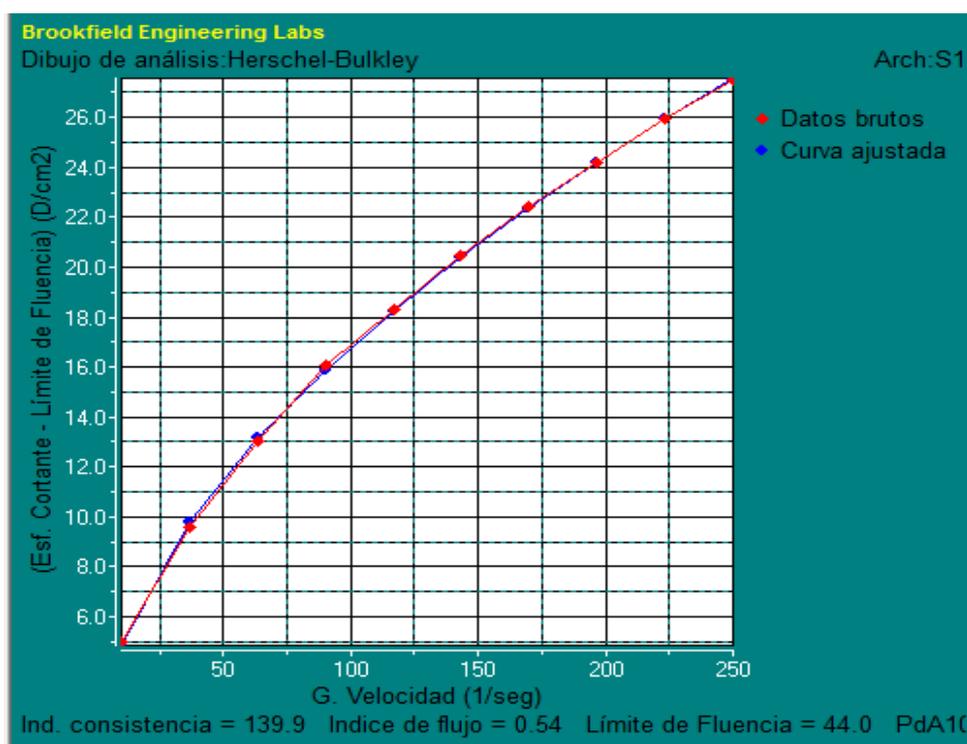
Fuente: Resultados del laboratorio de tecnología de concretos y suelos.

Tabla 13:

Resultados de los parámetros reológicos de la muestra S1

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf. Cortante	G. Velocidad
488,71	8,18	62,55	48,92	10,01
145,96	29,99	68,36	53,54	36,68
89,96	51,79	72,75	56,98	63,34
66,70	73,60	76,74	60,03	90,01
53,39	95,42	79,56	62,30	116,70
44,95	117,17	82,34	64,42	143,30
39,04	139,00	84,82	66,37	170,00
34,66	160,83	87,11	68,17	196,70
31,30	182,58	89,25	69,90	223,30
28,58	204,42	91,34	71,46	250,00

Fuente: Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.



**Figura 18.** Curva reológica de la muestra S1.

**Fuente:** Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.

Tabla 14:

*Resultados de los parámetros reológicos de la muestra S2*

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf. Cortante	G. Velocidad
152,48	8,18	19,49	15,26	10,01
49,93	29,99	23,41	18,32	36,68
30,03	51,79	24,34	19,02	63,34
21,65	73,60	24,92	19,49	90,01
17,17	95,42	25,59	20,04	116,70
14,20	117,17	26,00	20,35	143,30
12,16	139,00	26,40	20,66	170,00
10,70	160,83	26,92	21,06	196,70
9,60	182,58	27,44	21,45	223,30
8,77	204,42	27,97	21,92	250,00

**Fuente:** Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.

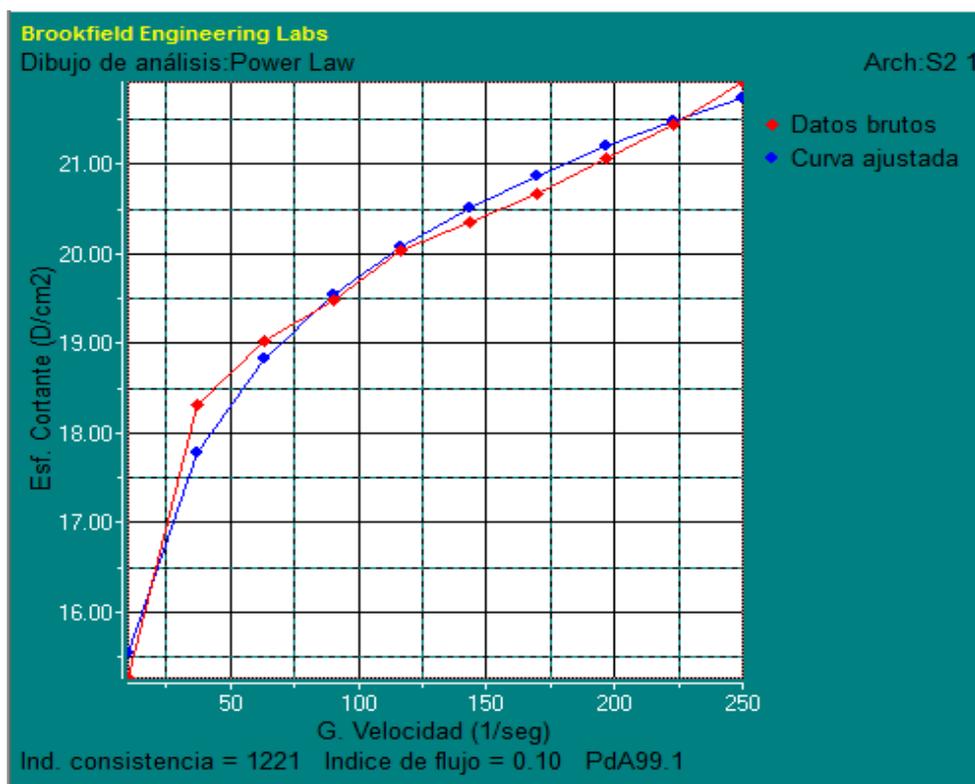


Figura 19. Curva reológica de la muestra S2.

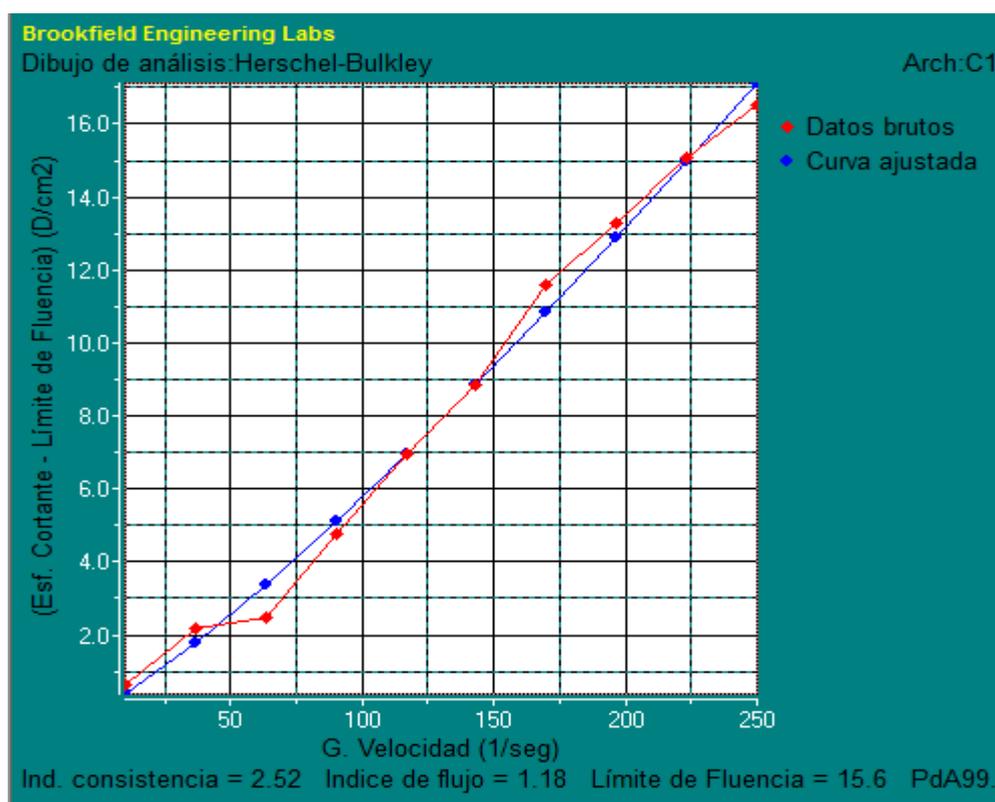
Fuente: Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.

Tabla 15:

Resultados de los parámetros reológicos de la muestra C1

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf. Cortante	G. Velocidad
161,86	8,18	20,74	16,20	10,01
48,44	29,99	22,74	17,77	36,68
28,55	51,79	23,13	18,08	63,34
22,61	73,60	26,01	20,35	90,01
19,32	95,42	28,79	22,54	116,70
17,04	117,17	31,18	24,42	143,30
15,98	139,00	34,66	27,16	170,00
14,68	160,83	36,88	28,88	196,70
13,74	182,58	39,21	30,68	223,30
12,84	204,42	40,96	32,09	250,00

Fuente: Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.



**Figura 20.** Curva reológica de la muestra C1.

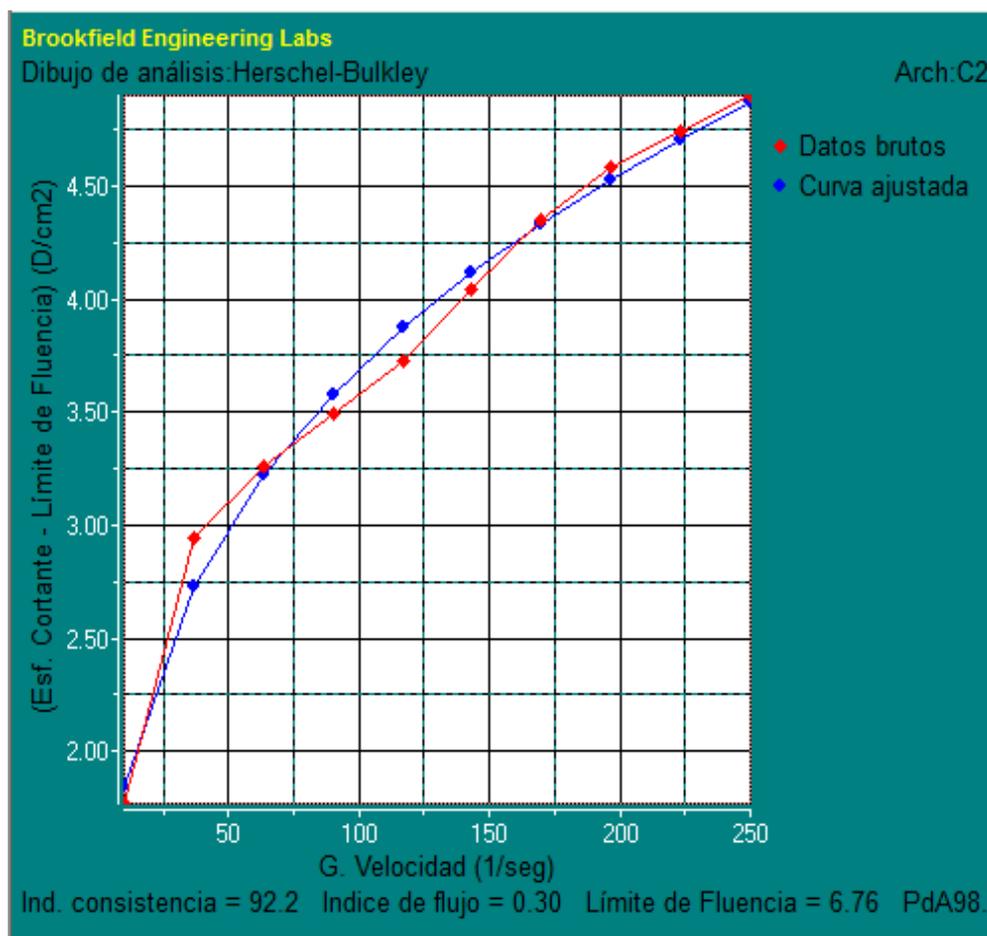
**Fuente:** Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.

Tabla 16:

*Resultados de los parámetros reológicos de la muestra C2*

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf. Cortante	G. Velocidad
85,23	8,18	10,94	8,53	10,01
26,46	29,99	12,39	9,71	36,68
15,82	51,79	12,79	10,02	63,34
11,39	73,60	13,07	10,25	90,01
8,99	95,42	13,42	10,49	116,70
7,54	117,17	13,79	10,80	143,30
6,54	139,00	14,15	11,11	170,00
5,77	160,83	14,47	11,35	196,70
5,15	182,58	14,73	11,51	223,30
4,67	204,42	14,93	11,66	250,00

**Fuente:** Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.



**Figura 21.** Curva reológica de la muestra C2.

**Fuente:** Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.

Tabla 17:

*Resultados de los parámetros reológicos de la muestra C3*

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf. Cortante	G. Velocidad
50,04	8,18	6,42	5,01	10,01
15,79	29,99	7,36	5,79	36,68
9,52	51,79	7,69	6,03	63,34
7,13	73,60	8,16	6,42	90,01
5,77	95,42	8,57	6,73	116,70
4,92	117,17	8,97	7,04	143,30
4,28	139,00	9,33	7,28	170,00
3,82	160,83	9,62	7,51	196,70
3,47	182,58	9,86	7,75	223,30
3,13	204,42	10,00	7,83	250,00

**Fuente:** Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.

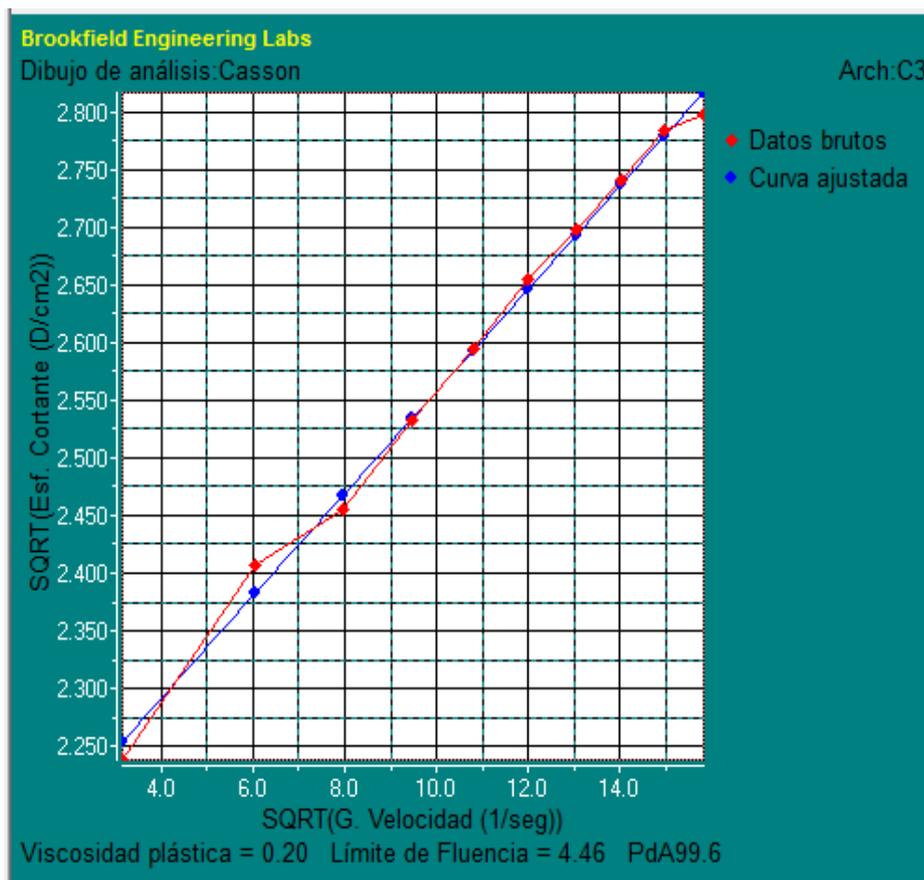


Figura 22. Curva reológica de la muestra C3.

Fuente: Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.

Tabla 18:

Resultados de los parámetros reológicos de la muestra C4

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf. Cortante	G. Velocidad
49,26	8,18	6,33	4,93	10,01
15,36	29,99	7,22	5,64	36,68
9,52	51,79	7,69	6,03	63,34
6,96	73,60	8,03	6,26	90,01
5,63	95,42	8,36	6,57	116,70
4,75	117,17	8,66	6,81	143,30
4,10	139,00	8,86	6,97	170,00
3,62	160,83	9,11	7,12	196,70
3,26	182,58	9,33	7,28	223,30
2,97	204,42	9,54	7,44	250,00

Fuente: Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.

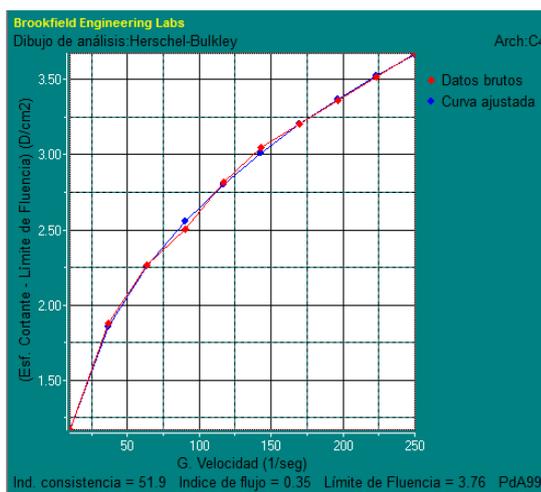


Figura 23. Curva reológica de la muestra C4.

Fuente: Resultados del laboratorio de control de calidad – Facultad de Ingeniería Química.

### 3.7. Procedimiento del método

#### 3.7.1. Condiciones de operación.

En esta etapa se aseguró que los laboratorios cuenten con los equipos necesarios para llevar a cabo los análisis reológicos y granulométricos.

#### 3.7.2. Preparación y envío de muestras.

Una vez asegurado la etapa anterior, se ha procedido a recoger las muestras, considerando el orden de las pozas para su envío a los laboratorios, se muestra en la tabla 19 los datos de la muestra.

Tabla 19:  
Muestras a analizar

Código	Tipo de muestra	Lugar de toma
C1	Lodo	Poza de clarificación 1
C2	Lodo	Poza de clarificación 2
S1	Lodo	Poza de sedimentación 1
S2	Lodo	Poza de sedimentación 2
S3	Lodo	Poza de sedimentación 3
S4	Lodo	Poza de sedimentación 4

Fuente: elaboración propia.

### 3.7.3. Determinación de los modelos reológico.

Para este fin, a recomendación del especialista de los laboratorios se validaron los modelos reológicos a partir de las ecuaciones de La ley de potencia, Herschel-Bulkley y Casson. Se determinó también la densidad del fluido.

### 3.7.4. Análisis granulométrico.

Para este procedimiento se considera apropiado usar la NORMA ASTM D – 422 MTC E – 240 para la granulometría de las muestras, se determinó también la densidad del material en seco. Luego, para la clasificación se usa el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS en función al coeficiente de uniformidad  $C_u$  y el coeficiente curvatura  $C_z$ .

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$C_z = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}}$$

Donde:

$C_u$ : Coeficiente de uniformidad.

$C_z$ : Coeficiente de curvatura.

$D_{10}$ : Diámetro de la abertura del tamiz por el cual pasa el 10% de material.

$D_{30}$ : Diámetro de la abertura del tamiz por el cual pasa el 30% de material.

$D_{60}$ : Diámetro de la abertura del tamiz por el cual pasa el 60% de material.

### 3.7.5. Determinación de densidades.

Se determina la densidad del fluido en el laboratorio de control de calidad y la densidad del material en seco en el laboratorio de concreto y suelos.

### **3.7.6. Determinación de porcentaje de sólidos en peso y volumen.**

Este procedimiento se realiza en gabinete a partir de las densidades, usando las relaciones gravimétricas y volumétricas descritas en el capítulo 2.

### **3.7.7. Cálculos de dimensionamiento de equipos de bombeo y tuberías.**

Para este procedimiento se toma en cuenta el criterio de análisis de la rentabilidad de los medios de transporte y los costos de inversión. Del mismo modo para el diámetro económico de la tubería, se considera el mismo diámetro de descarga de la bomba seleccionada.

### **3.8. Instrumentos de medición para la prueba reológica.**

- Viscosímetro BROOKFIELD DV-111 ULTRA
- Incluye software Rheocalc V3.1-1
- Balanza analítica AND HR-250A

### **3.9. Instrumentos para análisis granulométrico**

- Horno
- Molino
- N° de mallas en serie americana desde 3" hasta la malla 200.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Resultados

##### 4.1.1. Resultados del análisis reológico

Todas las curvas reológicas representadas en la figura 24, indican un comportamiento reológico de plástico de bingham y Pseudoplástico, evidentemente la curva que describe la muestra S1 significa que es el lodo más caprichoso, lo cual se debe tomar en cuenta al momento de seleccionar el material de la tubería.

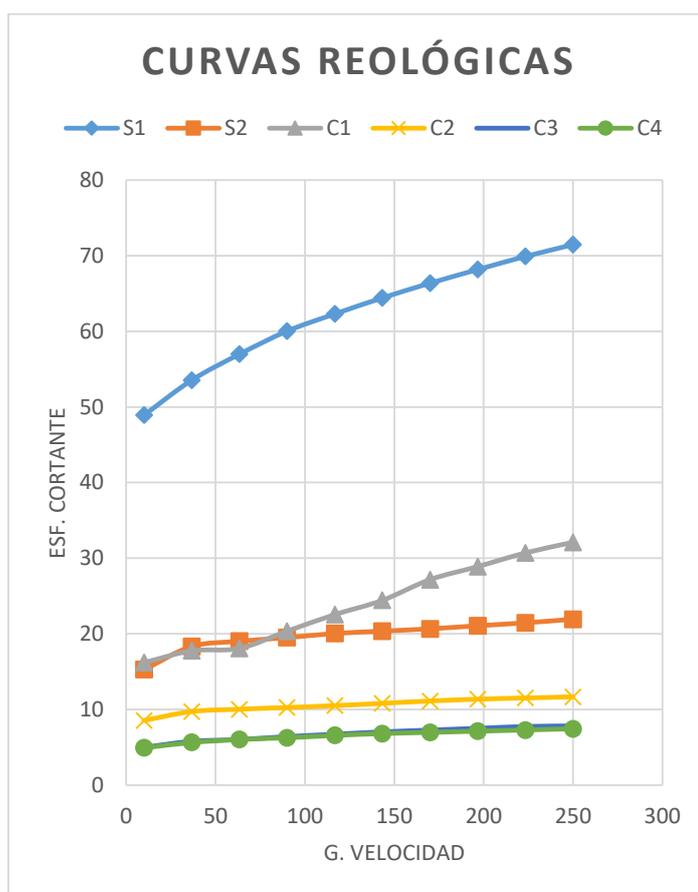


Figura 24. Resumen de las curvas reológicas.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2. Resultados de análisis granulométrico.

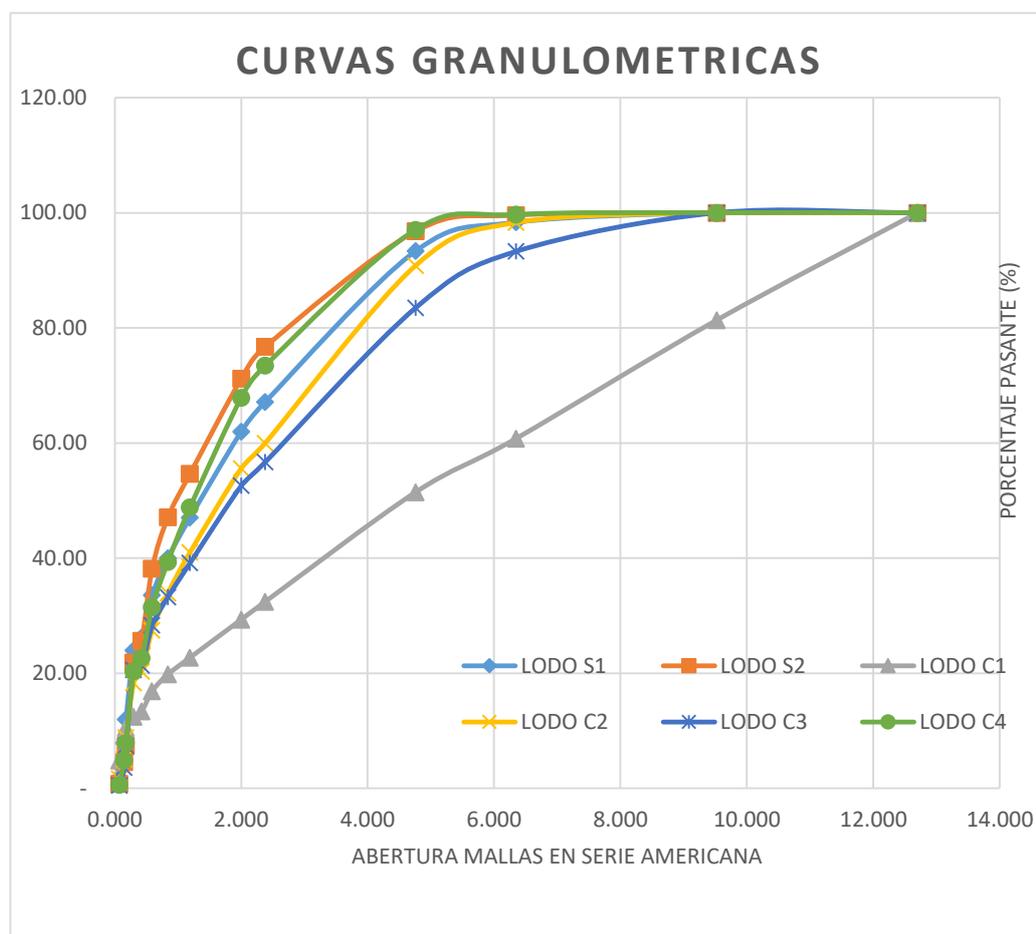
En la tabla 20 se puede apreciar que según la clasificación del sistema único de clasificación de suelos SUCS, el contenido de las muestras son arenas bien graduadas.

Tabla 20:  
*clasificación según sistema único de clasificación de suelos SUCS*

	LODO S1	LODO S2	LODO C1	LODO C2	LODO C3	LODO C4	PROMEDIO
Cu	1,56	7,00	37,19	12,04	11,93	8,18	14,65
Cz	0,85	0,77	4,18	1,03	0,86	0,91	1,43
Clasificación SUCS	SW	SW	SP	SW	SW	SW	SW

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 25 se puede notar que la muestra C1, tiene un comportamiento distinto a las curvas granulométricas de las demás muestras, lo que justifica su clasificación SUCS como una arena pobremente graduada en la tabla 20.



**Figura 25.** Resumen de las curvas granulométricas.  
**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.3. Resultados del análisis de la rentabilidad.

Al solicitar los costos unitarios por concepto de evacuación y disposición de lodos se tiene la información de que, por cada metro cubico de lodo evacuado se llega a pagar hasta \$ 2,25, en tanto haciendo los cálculos de los costos unitarios con la implementación de las propuestas 2 y 3, se tiene los mismos costos, es decir se pagaría \$ 0,77 por cada metro cubico de lodo evacuado para su disposición final. Se presenta en la tabla 21 los costos unitarios.

Tabla 21:  
*Costos unitarios por la evacuacion de lodos*

COSTO UNITARIO (\$/m3)	
Propuesta 1; Uso de equipos pesados (actualidad)	2.25
Propuesta 2; Con bomba de rotor helicoidal Cavidad progresiva	0.77
Propuesta 3; Bomba para solidos Centrifuga helicoidal	0.77

**Fuente:** Elaboración propia.

A continuación, se presenta en la tabla 22 la evaluación de la rentabilidad de los medios de transporte para su discusión, se usa toma como criterio de evaluación el valor actual neto VAN, no siendo posible la aplicación de la tasa interna de retorno TIR por ser proyectos mutuamente excluyentes, el periodo de recuperación PRI solo servirá para definir entre las propuestas 2 y 3.

Tabla 22:  
*Criterios de evaluación de rentabilidad de las propuestas*

CRITERIOS	PROYECTO 1	PROYECTO 2	PROYECTO 3
VAN	\$ 98 113,24	\$ 51 155,74	\$ 62 245,34
TIR	-	46%	65%
PRI	-	1.84	1.42

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.1.4. Características del equipo de bombeo y tuberías.

En la tabla 23 se puede apreciar las características de las bombas por cada propuesta.

Tabla 23:  
*Propuestas de bombas a seleccionar*

Bomba	Propuesta 2: bomba de rotor helicoidal Cavidad progresiva	Propuesta 3: Bomba para solidos Centrifuga helicoidal
Tipo	Desplazamiento positivo	Mixto
Marca	ORBIT PUMP (Franklin Electric)	HIDROSTAL
Caudal Requerido Q	60 m3/h	85 m3/h
Potencia del motor	25 HP	60 HP
Costo (\$)	19 850,00	30 939,60

**Fuente:** elaboración propia de las cotizaciones a los proveedores Anexo G.

#### **4.1.5. Del diámetro y material de la tubería.**

Para el diámetro óptimo de la tubería se ha considerado el mismo diámetro de descarga de la bomba por la recomendación del mercado, en ambos casos la recomendación es de 6", siendo el material recomendado para este tipo de fluidos HDPE (Grupo Editorial Editec, 2016; Talavera, 2013)

#### **4.2. Discusión**

Todos los modelos describen el comportamiento reológico del fluido como plástico de Bingham y pseudoplástico. De la tabla 22, podemos discriminar el uso de los equipos pesados como medio de transporte de lodos, siendo los más rentables los proyectos (propuestas) 2 y 3.

En la tabla 22, pareciera la propuesta 1 la más rentable, sin embargo, por los altos costos de evacuación y pérdida de días efectivos de operación queda discriminado dando lugar a elegir entre las dos opciones restantes.

#### **4.3. Contrastación y verificación de la hipótesis**

La contrastación y verificación de la hipótesis se presenta en la tabla 24.

Tabla 24:  
*Contratación y verificación de la hipótesis*

Hipótesis general	Objetivo general	Objetivos específicos	Conclusiones parciales
La caracterización de las propiedades reológicas nos permite optar por el medio más óptimo de transporte de los lodos generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea.	Caracterizar el comportamiento reológico para su aplicación al transporte de lodos de arcilla generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani - Ananea.	<p>a) Determinar el comportamiento reológico de los lodos generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani – Ananea.</p> <p>b) Evaluar la rentabilidad de los medios de transporte de lodos de arcilla generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani - Ananea.</p>	<p>Los lodos no son newtonianos y se comportan como plástico de bigham y pseudoplástico.</p> <p>El transporte a través de ductos o tuberías es más rentable que cualquier otro medio.</p>

**Fuente:** Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

En contraste al objetivo general, es viable conocer el tipo de fluido a través de los modelos reológicos y la curva granulométrica, he ahí radica su importancia para implementar mejoras en el sistema de transporte de lodos generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani - Ananea.

Los lodos generados en la explotación de gravas auríferas de la morrena Vizcachani - Ananea no son newtonianos, son fluidos de comportamiento tipo plástico de bingham y pseudoplástico (ley de potencia) y contienen arenas bien graduadas con un coeficiente de curvatura de 14,65 y coeficiente de uniformidad de 1,43.

El transporte a través de ductos o tuberías es más rentable que cualquier otro medio, siendo posible la reducción de costos de \$ 2.25 a \$ 0.77 por cada  $m^3$  de lodo evacuado y queda descartado el uso de bombas centrifugas para la evacuación de lodos.

## RECOMENDACIONES

Se debe aperturar y extender esta línea de estudio en todos los centros mineros dedicados a la explotación de gravas auríferas en la región como en el país, ya que los resultados servirán para mejorar el sistema de transporte de lodos o pulpas.

Debe procurarse realizar más estudios de este tipo, tomando muestras con más detalle, en todas las Unidades Mineras que se dedican a la explotación de gravas auríferas o similares, tomando en cuenta los floculantes y otros insumos usados para la clarificación del agua.

Se debe adquirir una bomba de desplazamiento positivo de rotor helicoidal o cavidad progresiva, ya que es el más apropiado según el análisis de rentabilidad para el transporte de fluidos no newtonianos y es de uso común alrededor del mundo.

## REFERENCIAS

- Aguirre-Pe, J., Moncada, A. T., Guatarasma, L., & Suárez, A. (2005). Reología y mecánica de barros y lodos. *Iberoamericana de ingeniería mecánica* 9(2), 39-50.
- Arias, F. G. (2012). *El proyecto de investigación*. Caracas, Venezuela: Episteme.
- Bandala-Rocha, M. R., Macedo y Ramírez, R. C., & Vélez-Ruiz, J. F. (2005). Evaluation of Friction Coefficients for the Transport of Non-Newtonian Fluid. *Información tecnológica*, 16(2), 73-80.
- Bedoya, M. I., & Cardona, N. (2009). *Estudio Comparativo de modelos reológicos para lodos de perforación* (Trabajo dirigido de grado). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.  
[http://www.bdigital.unal.edu.co/871/1/1128404561\\_1128267343\\_2009.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/871/1/1128404561_1128267343_2009.pdf)
- Borja, M. (2012). *Metodología de la investigación científica para ingenieros*. Chiclayo, Perú.
- De la cruz, J. C. (2013). *Diseño de un sistema de bombeo para transporte de relave desde planta concentradora hasta zona de disposición en sociedad minera austria duvaz S.A.C.* (Tesis de grado). Universidad Nacional del Centro, Huancayo.
- Delgado, A. M. (2009). *Selección y mantenimiento de equipos industriales*. Lima, Perú: Grupo UNIVERSITARIO SAC.
- Domínguez, G. (2016). *Especificación de sistemas de bombeo* (Tesis de grado). Instituto Politécnico Nacional, D.F. México.
- Gaitán, I. P. (2010). *Estimación de parámetros reológicos de pulpas minerales a diferentes concentraciones de sólidos* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Gardea, H. (2008). Dos propuestas para el proyecto del bombeo de fluidos no newtonianos. Caso de los lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras. *INGENIERÍA Investigación y Tecnología*, 9(2), 87-97.  
<http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v9n2/v9n2a1.pdf>

- Grupo Editorial Editec. (2016). Transporte de fluidos: variables a considerar para una mayor disponibilidad. *Minería chilena*, 36(424), 78-79. <http://www.mch.cl/wp-content/uploads/sites/4/2016/10/MCH-424-digital.pdf>
- Hernández, S. R. (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Mexico: Mc Graw Hill.
- Huamán, L. W. (2007). *Aplicación de relleno hidráulico en la Mina Jimena de Compañía Minera Poderosa S.A.* (Tesis de grado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- Jiménez, J., & Agudelo, W. (1996). Reología de Fluidos Newtonianos y No Newtonianos.
- Karassik, I. J., Krutzsch, W. C., Fraser, W. H., & Messina, J. P. (1995). *Manual de Bombas*. New York, EE.UU.: McGraw-Hill.
- Larenas, M. A. (2011). *Modelos en Reología de Suspensiones: Aplicaciones a la Minería: Estudio teórico e implementación numérica de métodos de análisis reológico para suspensiones concentradas (Spanish Edition)*. Santiago de Chile: Editorial Académica Española.
- López, J. (2014). *Diseño hidráulico de un sistema gravimétrico para relaves mineros con un caudal de 202 m<sup>3</sup>/h y 220 de desnivel* (Tesis de grado). Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Martinson, R. (2012). *Aspectos claves en el transporte de pulpas espesadas* [Diapositivas de PowerPoint]. [http://www.dosso.cl/fm\\_weblogin/pdf/5-ray.pdf](http://www.dosso.cl/fm_weblogin/pdf/5-ray.pdf)
- Martinson, R. (2015). Relaves de alto espesamiento: desafíos en el diseño del sistema de transporte. *Minería Chilena*, 35(407), 245-247. <http://www.mch.cl/wp-content/uploads/sites/4/2015/05/MCH-407.pdf>
- Merril, J. N. (2016). - *Estudio del efecto de la composición mineralógica en la reología de pulpas basado en técnicas de caracterización avanzada* (Tesis de grado). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

- Monsalve, G. A. (Octubre de 2010). Reología, la ciencia que estudia el movimiento de fluidos. *Remetallica*, 30(18), 21-27.
- Mott, R. L., & Untener, J. A. (2015). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson.
- Ñaupas, H., Valdivia, M. R., Palacios, J. J., & Romero, H. E. (2018). *Metodología de la investigación Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis* (5ta ed.). Bogotá, Colombia: Ediciones de la U.
- Olcay, R. H., Sales, G. E., & Hernández, C. A. (2014). Características principales de pastas minerales de relaves de manganeso preparadas en espesador de escala de laboratorio. *Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 17(34), 25-34.
- Revista Minería Chilena. (2014). *Transporte de fluidos: La confiabilidad es la clave* (397) <http://www.mch.cl/wp-content/uploads/sites/4/2014/07/MCH-3971.pdf>
- Rojas, N. R., Quitian, G. R., & Saldarriaga, W. (2017). Caracterización Magneto-reológica de un Fluido a Base de Desechos Mineros. *Ciencia en Desarrollo*, 8(2), 61-67.
- Rosario, K. (2010). *Determinación de parámetros reológicos de flujos hiperconcentrados aplicados a relaves mineros* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Shook, C. A., & Roco, M. C. (1991). *Slurry Flow. Principles and practice*. Boston, EE.UU.: Butterworth-Heinemann.
- Sierra, M. A. (2000). *Lecturas sobre lodos de perforación*. Medellín, Colombia: Ecográficas Ltda. <http://bdigital.unal.edu.co/12939/1/8393449.2000.Parte%201.pdf>
- Slatter, P. T. (1997). The rheological characterisation of sludges. *IAWQ Journal*, 36(11), 9-18.
- Slatter, P. T. (2004). The hydraulic transportation of thickened sludges. *Water SA*, 30(5), 66-68.

Talavera, J. (2013). *Caso de éxito, construcción relaveducto de selene* [Diapositivas de PowerPoint].

[http://www.iimp.org.pe/website2/jueves/ultimo313/jm20130314\\_jt.pdf](http://www.iimp.org.pe/website2/jueves/ultimo313/jm20130314_jt.pdf)

TECSUP. (2012). Bombas hidráulicas y aplicaciones. En TECSUP, *Operación y mantenimiento de bombas centrifugas* (págs. 6-10). Lima, Perú: TECSUP.

Tello, E. (2015). *Fenómenos de transporte*. Puno, Perú: Servicios Integrales ARCE.

Yalle, E. C. (2009). *Construcción de la planta de relleno hidraulico 100% relave* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

## ANEXOS

### Anexo A. Geología de la mina y petrografía de la mina

Ananea se encuentra dentro de una subunidad morfoestructural denominada depresión de Crucero-Ananea, la cual forma parte de la unidad morfoestructural del altiplano y se encuentra ubicada entre la cordillera oriental y la pre cordillera de Carabaya. La depresión originada por un juego de fallas longitudinales de rumbo noroeste, de edad post Miocénica y rellenada posteriormente por depósitos glaciares, fluvio-glaciares, aluvionales y fluviales.

Localmente el área de influencia comprende las siguientes unidades lito estratigráficas.

**Formación Ananea (SD-a).** - Esta unidad corresponde al basamento paleozoico de la zona, está caracterizada por la presencia de estructuras de trama Pizarrosa y Filitas las cuales se evidencian como producto de una esquistosidad de flujo; son de coloración negra a gris con presencia de FeO<sub>3</sub>. Las cuarcitas de coloraciones gris Blanquecinas a rosáceas están compuesta por Sílice debido a su alta dureza. La estructura más sobresaliente es el cerro Chosicanipata de trama pizarrosa cuya superficie expuesta a la intensa meteorización de la zona se encuentra escarpada y cubierta de till en algunas superficies de laderas del distrito de Ananea. Esta formación constituye el límite de mineralización Glaciofluvial.

**Grupo Tarma. (P-ta).** - Se encuentra en la parte Sur Este del yacimiento San Antonio de Poto, en el sector del Cerro Santa Rosa, emplazándose por el margen izquierdo de la carretera Ananea Trapiche, específicamente aflora en el Cerro Quebrada estructuralmente está caracterizada por la presencia fallas normales y de rumbo; su litología está compuesta de areniscas arcósicas feldespáticas de coloraciones rosáceas no se ha evidenciado presencia de algún tipo de mineralización en las zonas sin embargo existe la presencia de cuarzo blanquecino relleno en sus microfracturas además de FeO<sub>3</sub>.

**Formación Arco-Aja. (Q-aj).** - constituida por un miembro inferior de sedimentos palustres caracterizados por estratos de coloración gris amarillenta intercalados de sedimentos gruesos y finos y un miembro superior aluvial y conglomerádico posiblemente de facie lacustre. Localmente se encuentra suprayaciendo a la formación Ananea bajo una discordancia Cuaternaria limitado por fallas con escalonamiento hacia el oeste.

Esta formación en gran mayoría se encuentra emplazada en la parte este de la cuenca Ananea su altura máxima es 4900m.s.n.m. la superficie que presenta es ondulada producto de la abrasión y flujo glaciar.

Su litología presenta cuatro etapas de flujo y sedimentación las cuales son:

Una secuencia inferior de coloración gris oscuro que se componen de sedimentos (agregados de meta sedimentos pizarrosos, y limos, cuya potencia es variable de acuerdo a sus corrientes de flujo, esta se encuentra en el piso final la hipótesis es que se trata de la roca madre ya alterada cuyo interés económico es en algunos casos importante.

La segunda secuencia trata de sedimentos pardo amarillentos a grisáceos. Los sedimentos son cuarcitas, pizarras, intercalados de material fino loess, lodolitas de potencia variable de alto interés económico.

La tercera secuencia trata de material grisáceo con altos contenidos de drumlim o barro glaciario su importancia económica es relativa debido a que además se presenta una pequeña capa de FeO<sub>3</sub>.

La cuarta etapa presenta potentes secuencias de Drumlins, intercalados de lodolitas cuya coloración es gris claro no presenta importancia económica.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA LOCAL DE LA ZONA DEL PROYECTO

<b>COLUMNA ESTRATIGRAFICA</b>			
<b>ERA</b>	<b>SISTEMA</b>	<b>SERIE</b>	<b>UNIDADES LITOESTRATIGRAFICAS</b>
CENOZOICA	Cuaternario	Holoceno	Aluviales <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Q - al</span> Morrenas <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><b>Q - m</b></span>
		Plioceno	Fm. Arco Aja <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><b>Np - aj</b></span>
PALEOZOICO	Carbonífero	Pensilvaniano	Gpo. Tarma <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><b>Cs - t</b></span>
		Misisipiano	Gpo. Ambo <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><b>Ci - a</b></span>
	Siluriano	Devoniano	Fm. Ananea <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><b>SD - a</b></span>
	Ordoviciano	Caradociano	Fm. Sandia <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;"><b>Os - s</b></span>

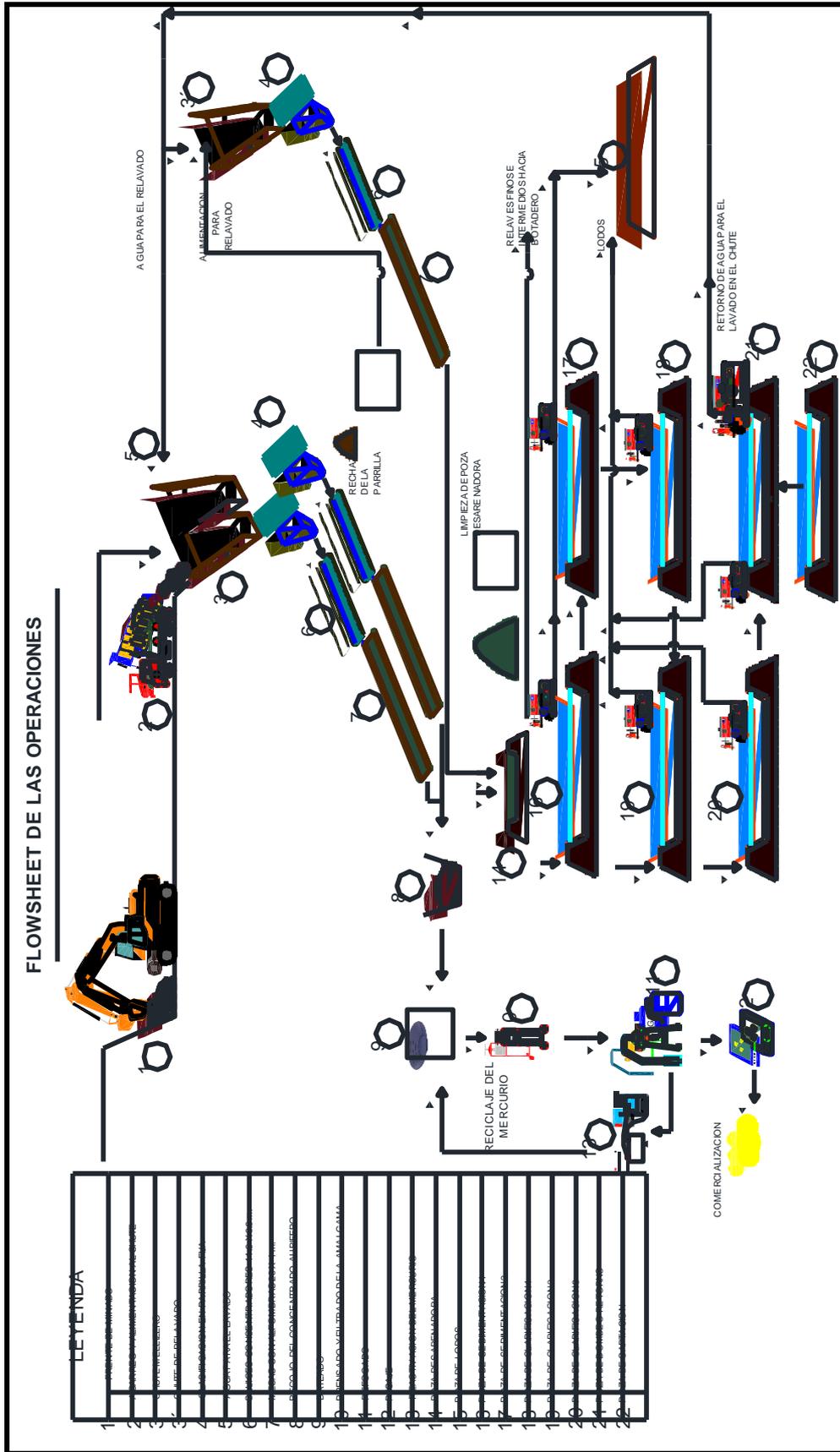
*Figura A.1.* Resumen de las curvas granulométricas.  
Fuente: Plan de minado 2018 UM SAN JUAN.

## **Anexo B. Proceso de lavado y su clasificación del material en la mina**

### **PROCESO DE LAVADO Y SU CLASIFICACION**

Para este propósito se emplea una planta artesanal o convencional consistente en un plano inclinado con barreras en forma de embudo llamado tolva de alimentación del CHUT, una vez que el volquete de acarreo descarga el material en la tolva, usando la presión de agua se procede con la dilución y el lavado de material separando en la zaranda el material grueso y material intermedio, este último es el que contiene oro, el cual pasa por unas canaletas con trampas conocidas como riffles, para luego pasar por unos planos inclinados con alfombras conocidos como mesas, también en estos queda atrapado el oro, finalmente termina pasando por unos canales con empedrado que sirven también de trampa, antes de llegar al Desarenador.

Durante el día se recoge los concentrados de oro de las instalaciones mencionadas como trampa, tales como las canaletas con riffles y mesas con alfombra, estos concentrados pasan por un proceso de amalgamado, para recuperar el oro en el refogado, consistente en quemar la amalgama en un circuito cerrado en la retorta. Se tiene molinos de bolas, esto con el objetivo de mejorar la recuperación del metal precioso, tal implementación se inserta después del recojo de concentrado y antes del amalgamado. El mercurio se reactiva una vez culminado la recuperación del oro.



**Figura A.2.** Flowsheet de las operaciones.  
Fuente: Plan de minado 2018 UM SAN JUAN.

Anexo C. Informe de densidad de los solidos

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA

IND\* RESP. \_\_\_\_\_  
FECHA \_\_\_\_\_

ALICIA HURTADO  
CALDERON MONTAÑO  
28 sep-18

### ANALISIS GRANULOMETRICO

SOLICITANTE: ELIJO SUZUCUCA NINA  
UBICACIÓN : UM SAN JUAN - ANANEA

**PESO ESPECIFICO O DENSIDAD ESPECIFICA RET. NRO. 8**

DATOS	C-1	C-2	C-3	C-4	S-1	S-2
1 PESO DE LA MUESTRA SECADA AL HORNO GR.	93.17	84.62	84.62	83.9	76.2	76.2
2 PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA	121.43	110.54	110.54	77.11	84.2	84.2
3 VOLUMEN EN LA INICIAL EN LA PROBETA CC	200	200	200	100	200	200
4 VOLUMEN EN LA FINAL EN LA PROBETA CC.	356	252	252	210	302	302
5 VOLUMEN DE LA MUESTRA CC. (4-3)	156	52	52	110	102	102
RESULTADOS						
6 PESO ESPECIFICO DE LOS SOLIDOS: P.E.S. (1/3) GR/CM3	0.46585	0.4231	0.4231	0.639	0.381	0.381
7 TEMPERATURA DEL AGUA °c	17	17	17	17	17	17
8 FACTOR DE CORRECCION K	1.0006	1.0006	1.0006	1.0006	1.0006	1.0006
9 PESO ESPECIFICO CORREGIDO DE LOS SOLIDOS: P.E.S. - 6°E	0.49613	0.423354	0.4233539	0.639383	0.3812296	0.381229
10 GRAVEDAD ESPECIFICA RELATIVA DE LO SOLIDOS: 9°P.E. AG	0.46913	0.423354	0.4233539	0.639383	0.3812286	0.381229

INGENIERA AGRICOLA  
CIP: 435022  
JEFE DE LABORATORIOS

**Anexo D. Informes de viscosidad**



Universidad Nacional del Altiplano - Puno  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



**N° 0503**

## Certificado de Análisis

**ASUNTO** : Análisis Viscosidad en Sedimentos **Cooperativa Minera San Juan de Dios de Pampa Blanca Ltda.**

---

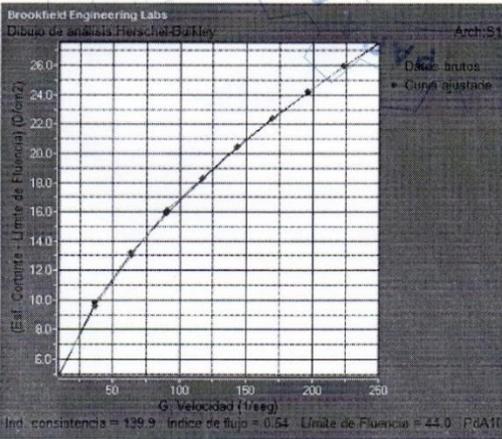
**PROCEDENCIA** : Pozas de sedimentación y clarificación de la UM San Juan  
**INTERESADO** : Hugo Sucapuca Nina  
**MOTIVO** : Evaluacion de Parametro Reologicos  
**MUESTREO** : 28/09/2018, por el interesado  
**ANÁLISIS** : 02/10/2018  
**COD. MUESTRA** : S01

---

**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**  
 Densidad : 1.6004 g/ml

**CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS**  
 Análisis

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad
161.86	8.18	20.74	16.20	10.01
48.44	29.99	22.74	17.77	36.68
28.55	51.79	23.13	18.08	63.34
22.61	73.60	26.01	20.35	90.01
19.32	95.42	28.79	22.54	116.70
17.04	117.17	31.18	24.42	143.30
15.98	139.00	34.66	27.16	170.00
14.68	160.83	36.88	28.88	196.70



Brookfield Engineering Labs  
 Dibujo de análisis Herschel-B/Fluy Arch: S1  
 Ind. consistencia = 129.9 Índice de flujo = 0.54 Límite de Fluencia = 44.0 PaA11



**Dra. Edith Tello Palma**  
 DECANO  
 FACULTAD ING. QUIMICA  
 UNA - PUNO



**JEFAT M.Sc. José Miguel Castillo Prado**  
 Coordinador, Laboratorio Control de Calidad  
 FACULTAD INGENIERIA QUIMICA  
 UNA - PUNO



**Ing. M.Sc. Jorge Arhuano Cartagena**  
 INGENIERO QUIMICO  
 CI. 129956

Puno, C.U. 02 de Octubre del 2018

---

Ciudad Universitaria Av: Floral s/n Facultad de Ing. Química - Pabellón 94 - Telefax (051)366142 -352992.



Universidad Nacional del Altiplano - Puno  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD

# Certificado de Análisis



N°0507

**ASUNTO** : Análisis Viscosidad en Sedimentos Cooperativa Minera San Juan de Dios de Pampa Blanca Ltda.

**PROCEDENCIA** : Pozas de sedimentación y clarificación de la UM San Juan

**INTERESADO** : Hugo SucaPuca Nina

**MOTIVO** : Evaluacion de Parametro Reologicos

**MUESTREO** : 28/09/2018, por el interesado

**ANÁLISIS** : 02/10/2018

**COD. MUESTRA** : S02

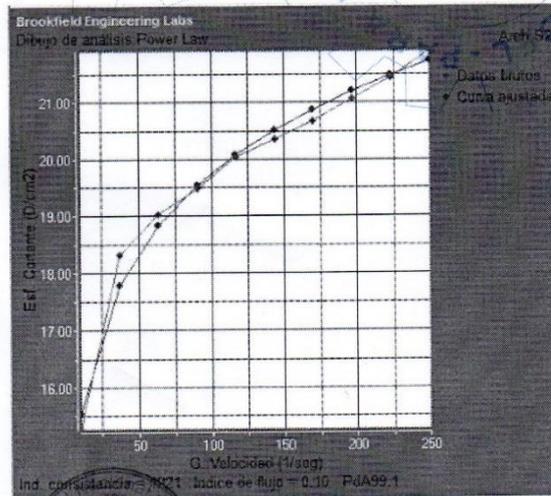
**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

Densidad : 1.5274 g/ml

**CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS**

Análisis

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad
152.48	8.18	19.49	15.26	10.01
49.93	29.99	23.41	18.32	36.68
30.03	51.79	24.34	19.02	63.34
21.65	73.60	24.92	19.49	90.01
17.17	95.42	25.59	20.04	116.70
14.20	117.17	26.00	20.35	143.30
12.16	139.00	26.40	20.66	170.00
10.70	160.83	26.92	21.06	196.70



Dra. Edith Tello Palma  
DECANA  
FACULTAD ING. QUÍMICA



M.Sc. Miguel Castillo Prado  
Coordinador, Laboratorio Control de Calidad  
FACULTAD INGENIERÍA QUÍMICA

Ing. M.Sc. Jorge Arubianca Cartagena  
INGENIERO QUÍMICO  
CIP: 128958

Puno, C.U. 02 de Octubre del 2018.  
Ciudad Universitaria Av. Floral sin Facultad de Ing. Química - Pabellón 94 - Telefax (051)366142 -352992.



Universidad Nacional del Altiplano - Puno  
 FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
 LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



# Certificado de Análisis

N° 0506

**ASUNTO** : Análisis Viscosidad en Sedimentos Cooperativa Minera San Juan de Dios de Pampa Blanca Ltda.

**PROCEDENCIA** : Pozas de sedimentación y clarificación de la UM San Juan  
**INTERESADO** : Hugo SucaPuca Nina  
**MOTIVO** : Evaluacion de Parametro Reologicos  
**MUESTREO** : 28/09/2018, por el interesado  
**ANÁLISIS** : 02/10/2018  
**COD. MUESTRA** : C01

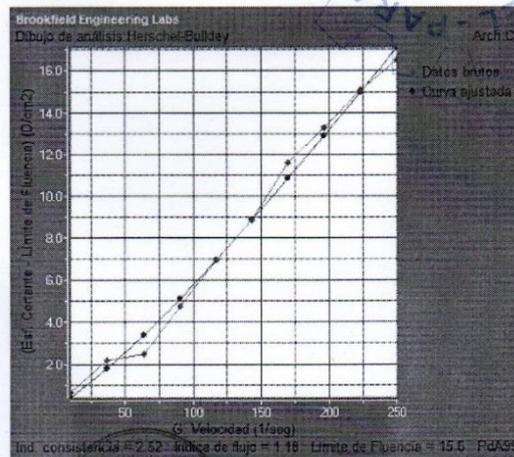
**CARACTERISTICAS FISICAS**

Densidad : 1.3259 g/ml

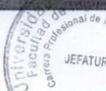
**CARACTERISTICAS ESPECÍFICAS**

Análisis

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad
161.86	8.18	20.74	16.20	10.01
48.44	29.99	22.74	17.77	36.68
28.55	51.79	23.13	18.08	63.34
22.61	73.60	26.01	20.35	90.01
19.32	95.42	28.79	22.54	116.70
17.04	117.17	31.18	24.42	143.30
15.98	139.00	34.66	27.16	170.00
14.68	160.83	36.88	28.88	196.70



Edith Tello Palma  
 DECA NA  
 FACULTAD ING. QUIMICA



M.Sc. José Miguel Castillo Prado  
 Coordinador Laboratorio Control de Calidad  
 FACULTAD INGENIERIA QUIMICA  
 UNA-PUNO

Ing. M.Sc. Jorge Aruahuaca Cariagena  
 INGENIERO QUIMICO  
 C.I.F. 128958

Puno, C.U. 02 de Octubre del 2018.  
 Ciudad Universitaria Av. Floral s/n Facultad de Ing. Química - Pabellón 94 - Telefax (051) 085142 -352992.



Universidad Nacional del Altiplano - Puno  
 FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
 LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



# Certificado de Análisis

N° 0505

**ASUNTO** : Análisis Viscosidad en Sedimentos Cooperativa Minera San Juan de Dios de Pampa Blanca Ltda.

**PROCEDENCIA** : Pozas de sedimentación y clarificación de la UM San Juan  
**INTERESADO** : Hugo Sucapuca Nina  
**MOTIVO** : Evaluacion de Parametro Reologicos  
**MUESTREO** : 28/09/2018, por el interesado  
**ANÁLISIS** : 02/10/2018  
**COD. MUESTRA** : C02

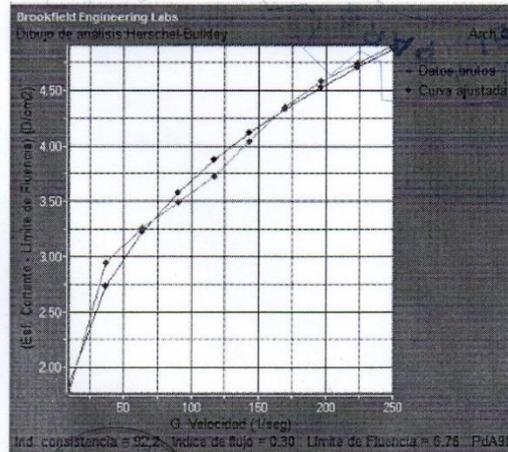
**CARACTERISTICAS FISICAS**

Densidad : 1.3230 g/ml

**CARACTERISTICAS ESPECÍFICAS**

Análisis

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad
85.23	8.18	10.94	8.53	10.01
26.46	29.99	12.39	9.71	36.68
15.82	51.79	12.79	10.02	63.34
11.39	73.60	13.07	10.25	90.01
8.99	95.42	13.42	10.49	116.70
7.54	117.17	13.79	10.80	143.30
6.54	139.00	14.15	11.11	170.00
5.77	160.83	14.47	11.35	196.70



Edith Tello Palma  
 DECAÑA  
 FACULTAD ING. QUIMICA  
 UNA - PUNO



M.Sc. José Miguel Castillo Prado  
 Coordinador, Laboratorio Control de Calidad  
 FACULTAD INGENIERIA QUIMICA  
 UNA-PUNO

Ing. M.Sc. Jorge Arribanca Cartagena  
 INGENIERO QUIMICO  
 CIP 128958

Puno, C.U. 02 de Octubre del 2018.

Ciudad Universitaria Av: Floral s/n Facultad de Ing. Química - Pabellón 94 - Telefax (051) 366142 - 352992.



Universidad Nacional del Altiplano - Puno  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



# Certificado de Análisis

N° 0504

**ASUNTO** : Análisis Viscosidad en Sedimentos **Cooperativa Minera San Juan de Dios de Pampa Blanca Ltda.**

**PROCEDENCIA** : Pozas de sedimentación y clarificación de la UM San Juan

**INTERESADO** : Hugo Sucapuca Nina

**MOTIVO** : Evaluacion de Parametro Reologicos

**MUESTREO** : 28/09/2018, por el interesado

**ANÁLISIS** : 02/10/2018

**COD. MUESTRA** : C03

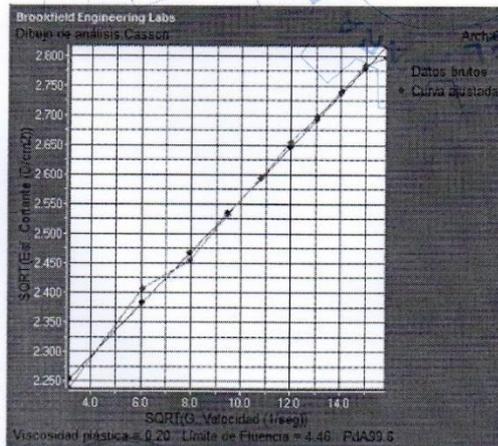
**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

Densidad : 1.3951 g/ml

**CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS**

Análisis

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad
50.04	8.18	6.42	5.01	10.01
15.79	29.99	7.36	5.79	36.68
9.52	51.79	7.69	6.03	63.34
7.13	73.60	8.16	6.42	90.01
5.77	95.42	8.57	6.73	116.70
4.92	117.17	8.97	7.04	143.30
4.28	139.00	9.33	7.28	170.00
3.82	160.83	9.62	7.51	196.70



Edith Tello Palma  
DECANA  
FACULTAD ING. QUIMICA  
UNA - PUNO



M.Sc. José Miguel Castillo Prado  
Coordinador, Laboratorio Control de Calidad  
FACULTAD INGENIERIA QUIMICA  
UNAPUNO

Ing. M.Sc. Jorge Arubuanca Cartagena  
INGENIERO QUIMICO  
CIP: 128958

Puno, C.U. 02 de Octubre del 2018.

Ciudad Universitaria Av: Floral s/n Facultad de Ing. Química - Pabellón 94 - Telefax (051)366142 -352992.



Universidad Nacional del Altiplano - Puno  
 FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA  
 LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD



# Certificado de Análisis

N° 0503

**ASUNTO** : Análisis Viscosidad en Sedimentos **Cooperativa Minera San Juan de Dios de Pampa Blanca Ltda.**

**PROCEDENCIA** : Pozas de sedimentación y clarificación de la UM San Juan

**INTERESADO** : Hugo Sucauca Nina

**MOTIVO** : Evaluacion de Parametro Reologicos

**MUESTREO** : 28/09/2018, por el interesado

**ANÁLISIS** : 02/10/2018

**COD. MUESTRA** : C04

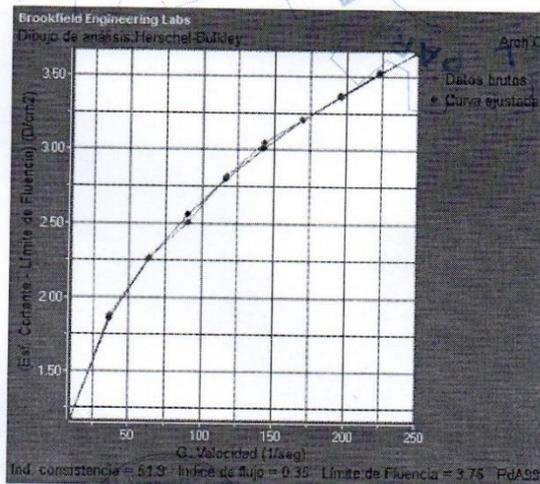
**CARACTERÍSTICAS FÍSICAS**

Densidad : 1.3388 g/ml

**CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS**

Análisis

Viscosidad	Veloc.	% Par	Esf.Cortante	G.Velocidad
49.26	8.18	6.33	4.93	10.01
15.36	29.99	7.22	5.64	36.68
9.52	51.79	7.69	6.03	63.34
6.96	73.60	8.03	6.26	90.01
5.63	95.42	8.36	6.57	116.70
4.75	117.17	8.66	6.81	143.30
4.10	139.00	8.86	6.97	170.00
3.62	160.83	9.11	7.12	196.70



*Edith Tello Palma*  
 Dra. Edith Tello Palma  
 DECANO



*Miguel Castillo Prado*  
 M.Sc. José Miguel Castillo Prado  
 Coordinador, Laboratorio Control de Calidad  
 FACULTAD INGENIERÍA QUÍMICA  
 UNA-PUNO

*Jorge Arubanca Cartageni*  
 Ing. M.Sc. Jorge Arubanca Cartageni  
 INGENIERO QUÍMICO  
 CIP 128958

Puno, C.U. 02 de Octubre del 2018.

Ciudad Universitaria Av: Floral s/n Facultad de Ing. Química - Pabellón 94 - Telefax (051) 366142 - 352992.

Anexo E. Informes de granulometrías

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA

LABORATORIO DE TECNOLOGIA  
DE CONCRETO Y SUELOS

### ANALISIS GRANULOMETRICO

SOLICITANTE: <u>HUGO SUCAPUCA NINA</u>		INO <sup>o</sup> RESP.:	ALDOES HECTOR
UBICACION: <u>UM SAN JUAN - ANANEA</u>		TECNICO:	CALDERON MONTALICO
MUESTRA: <u>S1</u>		FECHA:	28-SEP-18

PROCEDENCIA DEL MATERIAL: S1		ESPECIFICACIONES				NORMA: ASTM D - 422 MTC E - 240
MUCHOS MUEJAS EN SERIE AMER. CIVIL	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN ACUMUL	% QUE PASA	RESULTADOS DE ENSAYOS
3"	76.200					Peso Inicial : 0.542,00 Gr
2 1/2"	63.500					Humedad Natural : NP
2"	50.800		0,000	0,000	100,00	Limite Liquido : NP
1 1/2"	38.100	0,000	0,000	0,000	100,00	Limite Plastico : NP
1"	25.400	0,000	0,000	0,000	100,00	Indice Plastico : NP
3/4"	19.050	0,000	0,000	0,000	100,00	
1/2"	12.700	0,000	0,000	0,000	100,00	
3/8"	9.525	0,000	0,000	0,000	100,00	
1/4"	6.350	8,000	1,661	1,661	98,34	
N° 4	4.750	27,000	4,982	6,642	93,36	
N° 6	3.360	0,000	0,000	6,642	93,36	
N° 8	2.380	142,000	26,199	32,841	67,16	Densidad Maxima : NP
N° 10	2.000	26,000	5,166	38,007	61,99	C.H.O : NP
N°16	1.190	81,000	14,945	52,952	47,05	Peso Especifico : NP
N° 20	0.840	38,000	7,011	59,963	40,04	Abrasion : NP
N° 30	0.590	35,000	6,458	66,421	33,58	Equivalente de Area : NP
N° 40	0.426	40,000	7,380	73,801	26,20	C.B.R. Al 100 % : NP
N° 50	0.297	12,000	2,214	76,015	23,99	C.B.R. AL 95 % : NP
N° 80	0.177	65,000	11,993	88,007	11,99	Observaciones
N° 100	0.149	22,000	4,059	92,066	7,93	
N° 200	0.074	33,000	6,089	98,155	1,85	
-200		10,00	1,845	100,000	-	
		542,000				

El gráfico muestra la curva granulométrica con el eje horizontal representando la abertura de mallas en milímetros (logarítmico) y el eje vertical representando el porcentaje que pasa (%). La curva comienza en 0% para mallas de 75 mm y alcanza 100% de material que pasa a través de una malla de 4.75 mm (N° 4).

JEFE DE LABORATORIO  
ALDOES HECTOR CALDERON MONTALICO  
INGENIERO AGRICOLA  
CIP 122622



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA

LABORATORIO DE TECNOLOGIA  
DE CONCRETO Y SUELOS

**ANALISIS GRANULOMETRICO**

SOLICITANTE: HUGO SUCAPUCA NINA INO° RESP. : \_\_\_\_\_  
UBICACION : UM SAN JUAN - ANANEA ALCEDES HECTOR CALDERON MONTALICO  
MUESTRA : S-2 FECHA : 28-sep-18

PROCEDENCIA DEL MATERIAL : S-2

N° DE MALLAS EN SERIE ABERTURA (mm)	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN ACUMUL	% QUE PASA	ESPECIFICACIONES
3"	76.200					
2 1/2"	63.500					
2"	50.800		0,000	0,000	100,00	
1 1/2"	38.100	0,000	0,000	0,000	100,00	
1"	25.400	0,000	0,000	0,000	100,00	
3/4"	19.050	0,000	0,000	0,000	100,00	
1/2"	12.700	0,000	0,000	0,000	100,00	
3/8"	9.525	0,000	0,000	0,000	100,00	
1/4"	6.350	2,000	0,398	0,398	99,60	
N° 4	4.750	14,000	2,783	3,181	96,82	
N° 6	3.380	0,000	0,000	3,181	96,82	
N° 8	2.380	101,000	20,080	23,260	76,74	
N° 10	2,000	28,000	5,567	28,827	71,17	
N° 16	1,190	83,000	16,501	45,328	54,67	
N° 20	0,840	38,000	7,555	52,883	47,12	
N° 30	0,590	45,000	8,946	61,829	38,17	
N° 40	0,425	83,000	12,525	74,354	25,65	
N° 50	0,297	19,000	3,777	78,131	21,87	
N° 80	0,177	73,000	14,513	92,644	7,36	
N° 100	0,149	14,000	2,783	95,427	4,57	
N° 200	0,074	19,000	3,777	99,205	0,80	
-200		4,00	0,795	100,000	-	

NORMA: ASTM D - 422 MTC E - 240

RESULTADOS DE ENSAYOS

Peso Inicial : 0.503,00 Gr  
Humedad Natural : NP  
Limite Liquido : NP  
Limite Plastico : NP  
Indice Plastico : NP

CLASIFICACION

AASHTO : NP  
SUCS : NP

Densidad Maxima : NP  
C.H.O. : NP  
Peso Especifico :  
Abrasion :  
Equivalente de Aren :  
C.B.R. A1 100 % : NP  
C.B.R. A1 95 % : NP

Observaciones:



*[Firma]*  
JEFE DE LABORATORIO  
Centro Calderon Montalico  
Escuela Profesional de Ingenieria Agricola  
CIP: 122622



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA

LABORATORIO DE TECNOLOGIA  
DE CONCRETO Y SUELOS

**ANALISIS GRANULOMETRICO**

SOLICITANTE: HUGO SUCAPUCA NINA ING° RESP. : \_\_\_\_\_  
 UBICACIÓN : UM SAN JUAN - ANANEA TECNICO : ALCIDES HECTOR CALDERON MONTALICO  
 MUESTRA : C1 FECHA : 25-ago-18

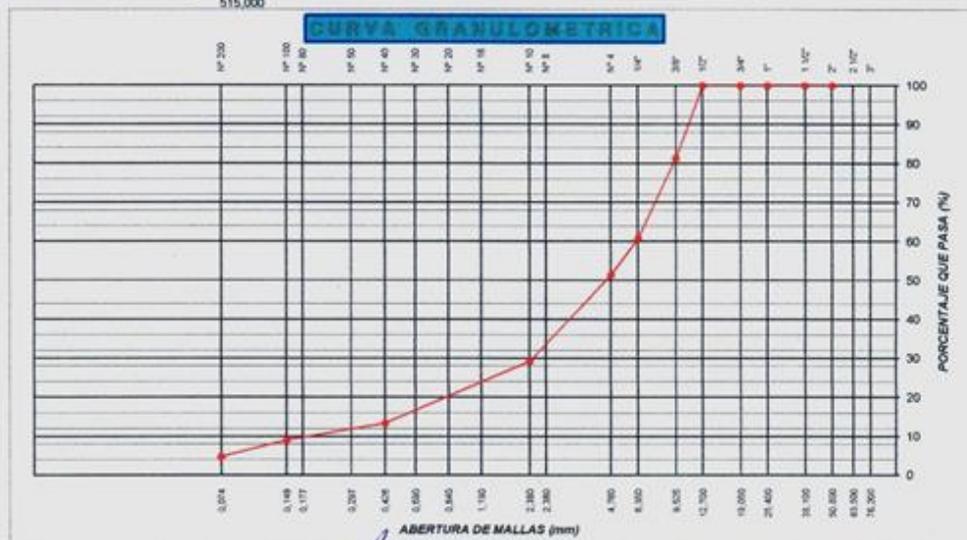
PROCEDENCIA DEL MATERIAL : C1					NORMA: ASTM D - 422 MTC E - 240	
N° DE MALLAS EN SERIE (MILÍMETROS)	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN ACUMUL	% QUE PASA	ESPECIFICACIONES
3"	76,200					
2 1/2"	63,500					
2"	50,800		0,000	0,000	100,00	
1 1/2"	38,100	0,000	0,000	0,000	100,00	
1"	25,400	0,000	0,000	0,000	100,00	
3/4"	19,050	0,000	0,000	0,000	100,00	
1/2"	12,700	0,000	0,000	0,000	100,00	
3/8"	9,525	96,000	18,641	18,641	81,36	
1/4"	6,350	106,000	20,583	39,223	60,78	
N° 4	4,750	48,000	9,320	48,544	51,46	
N° 6	3,360	0,000	0,000	48,544	51,46	
N° 8	2,380	98,000	19,029	67,573	32,43	
N° 10	2,000	16,000	3,107	70,680	29,32	
N° 16	1,190	34,000	6,602	77,282	22,72	
N° 20	0,840	15,000	2,913	80,194	19,81	
N° 30	0,590	15,000	2,913	83,107	16,89	
N° 40	0,426	18,000	3,495	86,602	13,40	
N° 50	0,297	5,000	0,971	87,573	12,43	
N° 80	0,177	10,000	1,942	89,515	10,49	
N° 100	0,149	7,000	1,359	90,874	9,13	
N° 200	0,074	22,000	4,272	95,146	4,85	
-200		25,00	4,854	100,000	-	
		515,000				

**RESULTADOS DE ENSAYOS**  
 Peso Inicial : 0 515,00 Gr  
 Humedad Natural : NP  
 Limite Liquido : NP  
 Limite Plastico : NP  
 indice Plastico : NP

**CLASIFICACION**  
 AASHTO : NP  
 SUCS : NP

Densidad Maxima : NP  
 C.H.O : NP  
 Peso Especifico :  
 Abrasion :  
 Equivalente de Arer :  
 C.B.R. Al 100 % : NP  
 C B R AL 95 % : NP

**Observaciones:**



*[Signature]*  
 JEFE DE LABORATORIO



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA

LABORATORIO DE TECNOLOGIA  
DE CONCRETO Y SUELOS

**ANALISIS GRANULOMETRICO**

SOLICITANTE: HUGO SUCAPUCA NINA INO° RESP. : ALCIDES HECTOR  
UBICACIÓN : UM SAN JUAN - ANANEA TECNICO : CALDERON MONTALVO  
MUESTRA : C2 FECHA : 28-sep-18

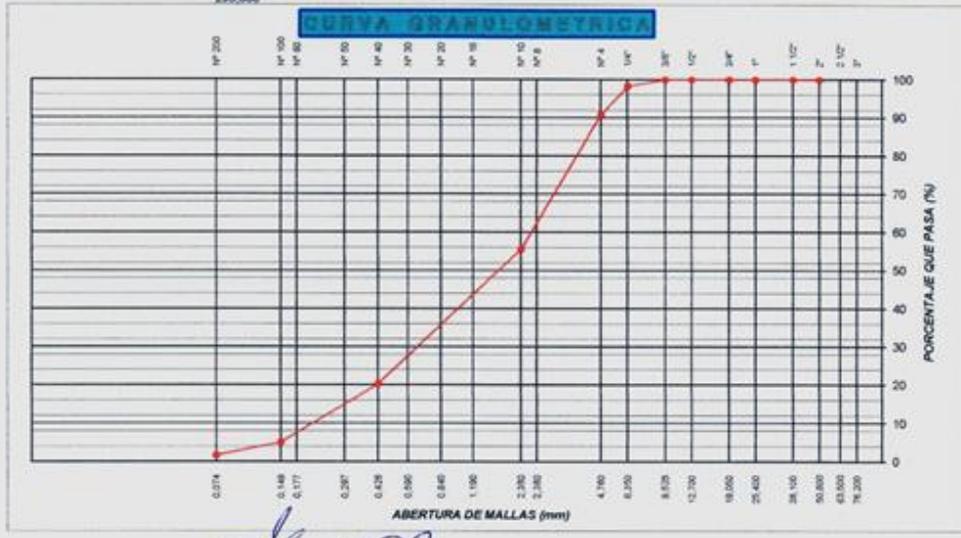
PROCEDENCIA DEL MATERIAL : C2						NORMA: ASTM D - 422 MTC E - 240
N° DE MALLAS EN SERIE AEROS. DATA	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN ACUMUL	% QUE PASA	ESPECIFICACIONES
3"	76,200					
2 1/2"	63,500					
2"	50,800		0,000	0,000	100,00	
1 1/2"	38,100	0,000	0,000	0,000	100,00	
1"	25,400	0,000	0,000	0,000	100,00	
3/4"	19,050	0,000	0,000	0,000	100,00	
1/2"	12,700	0,000	0,000	0,000	100,00	
3/8"	9,525	0,000	0,000	0,000	100,00	
1/4"	6,350	5,000	1,695	1,695	98,31	
N° 4	4,750	22,000	7,458	9,153	90,85	
N° 6	3,360	0,000	0,000	9,153	90,85	
N° 8	2,380	61,000	30,847	40,000	60,00	
N° 10	2,000	13,000	4,407	44,407	55,59	
N° 16	1,190	43,000	14,576	58,983	41,02	
N° 20	0,840	21,000	7,119	66,102	33,90	
N° 30	0,590	19,000	6,441	72,542	27,46	
N° 40	0,426	21,000	7,119	79,661	20,34	
N° 50	0,297	6,000	2,034	81,695	18,31	
N° 80	0,177	28,000	9,492	91,186	8,81	
N° 100	0,149	11,000	3,729	94,915	5,08	
N° 200	0,074	10,000	3,390	98,305	1,69	
-200		5,000	1,695	100,000	-	
		295,000				

**RESULTADOS DE ENSAYOS**  
 Peso Inicial : 0.295.00 Gr.  
 Humedad Natural : NP  
 Limite Liquido : NP  
 Limite Plastico : NP  
 Indice Plastico : NP

**CLASIFICACION**  
 AASHTO : NP  
 SUCS : NP

Densidad Maxima : NP  
 C.H.O. : NP  
 Peso Especifico :  
 Abrasion :  
 Equivalente de Arei :  
 C.B.R. A1 100 % : NP  
 C.B.R. AL 95 % : NP

Observaciones:



*[Firma manuscrita]*  
 Ing. Alcidés H. Calderón Montalvo  
 JEFE DE LABORATORIOS  
 C.R. 122022



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA

LABORATORIO DE TECNOLOGIA  
DE CONCRETO Y SUELOS

**ANALISIS GRANULOMETRICO**

SOLICITANTE: HUGO SUCAPUCA NINA INO\* RESP. : ALDRES HECTOR CALDERON MONTALVO  
UBICACION : UM SAN JUAN - ANANEA TECNICO :  
MUESTRA : C3 FECHA : 28-sep-18

PROCEDENCIA DEL MATERIAL : C3						NORMA: ASTM D - 422 MTC E - 240
N° DE MALLAS EN SERIE (CMH)	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN ACUMUL	% QUE PASA	ESPECIFICACIONES
3"	76.200					
2 1/2"	63.500					
2"	50.800		0.000	0.000	100.00	
1 1/2"	38.100	0.000	0.000	0.000	100.00	
1"	25.400	0.000	0.000	0.000	100.00	
3/4"	19.050	0.000	0.000	0.000	100.00	
1/2"	12.700	0.000	0.000	0.000	100.00	
3/8"	9.525	0.000	0.000	0.000	100.00	
1/4"	6.350	26.000	6.701	6.701	93.30	
N° 4	4.760	36.000	9.794	16.495	83.51	
N° 6	3.360	0.000	0.000	16.495	83.51	
N° 8	2.380	104.000	26.804	43.299	56.70	
N° 10	2.000	16.000	4.124	47.423	52.58	
N°16	1.190	52.000	13.402	60.825	39.18	
N° 20	0.840	23.000	5.926	66.753	33.25	
N° 30	0.590	18.000	4.897	71.649	28.35	
N° 40	0.426	27.000	6.959	78.608	21.39	
N° 50	0.297	3.000	0.773	79.381	20.62	
N° 60	0.177	51.000	13.144	92.526	7.47	
N° 100	0.149	15.000	3.866	96.392	3.61	
N° 200	0.074	12.000	3.093	99.485	0.52	
-200		2.00	0.515	100.000	-	
		388.000				

**RESULTADOS DE ENSAYOS**  
Peso Inicial : 0.388.00 Gr  
Humedad Natural : NP  
Limite Liquido : NP  
Limite Plastico : NP  
Indice Plastico : NP

**CLASIFICACION**  
AASHTO : NO  
SUCS : NP

Densidad Maxima : NP  
C.H.O. : NP  
Peso Especifico :  
Abrasion :  
Equivalente de Arer :  
C.B.R. Al 100 % : NP  
C.B.R. AL 95 % : NP

**Observaciones**



*[Firma]*  
JEFE DE LABORATORIOS  
Ing. Aldres Hector Calderon Montalvo  
INGENIERO AGRICOLA  
CIP: 122C22



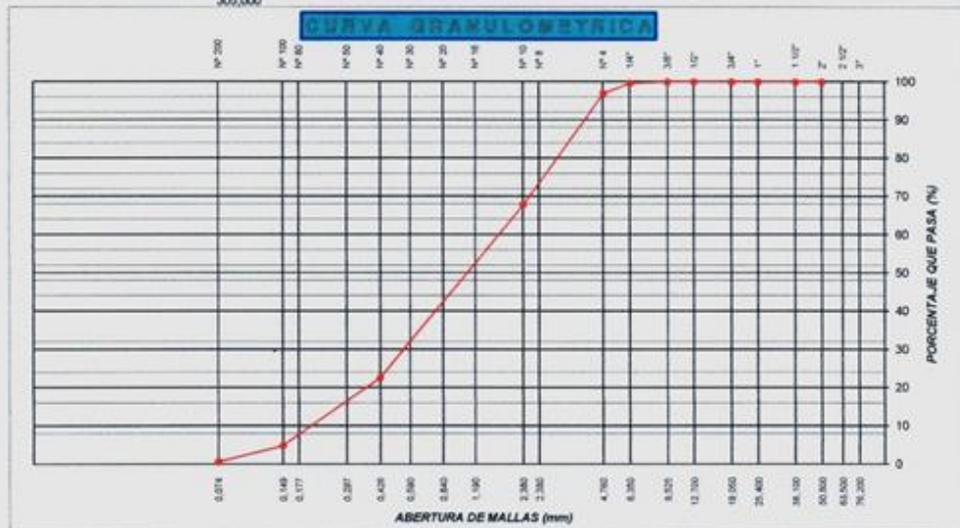
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO  
FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGRICOLA

LABORATORIO DE TECNOLOGIA  
DE CONCRETO Y SUELOS

**ANALISIS GRANULOMETRICO**

SOLICITANTE: HUGO SUCAPUCA NINA INO° RESP. : \_\_\_\_\_  
UBICACIÓN : UM SAN JUAN - ANANEA TECNICO : ALCIDES HECTOR CALDERON MONTALICO  
MUESTRA : C4 FECHA : 28-sep-18

PROCEDENCIA DEL MATERIAL : C4						ESPECIFICACIONES	NORMA: ASTM D - 422 MTC E - 240
N° DE MALLAS EN SERIE ABERTURA (mm)	ABERTURA DE MALLAS (mm)	PESO RETENIDO	% RETEN PARCIAL	% RETEN. ACUMUL	% QUE PASA		RESULTADOS DE ENSAYOS
3"	76,200						Peso Inicial : 0.305,00 Gr
2 1/2"	63,500						Humedad Natural : NP
2"	50,800		0,000	0,000	100,00		Limite Liquido : NP
1 1/2"	38,100	0,000	0,000	0,000	100,00		Limite Plastico : NP
1"	25,400	0,000	0,000	0,000	100,00		Indice Plastico : NP
3/4"	19,050	0,000	0,000	0,000	100,00		
1/2"	12,700	0,000	0,000	0,000	100,00		
3/8"	9,525	0,000	0,000	0,000	100,00		
1/4"	6,350	1,000	0,328	0,328	99,67		
N° 4	4,750	8,000	2,623	2,951	97,05		
N° 6	3,360	0,000	0,000	2,951	97,05		Densidad Maxima : NP
N° 8	2,380	72,000	23,607	26,557	73,44		C.H.O. : NP
N° 10	2,000	17,000	5,574	32,131	67,87		Peso Especifico : _____
N°16	1,190	56,000	19,016	51,148	48,85		Abrasion : _____
N° 20	0,840	29,000	9,508	60,656	39,34		Equivalente de Arei : _____
N° 30	0,590	34,000	7,869	68,525	31,48		C.B.R. AI 100 % : NP
N° 40	0,426	27,000	8,852	77,377	22,62		C.B.R. AL 95 % : NP
N° 50	0,297	7,000	2,295	79,672	20,33		Observaciones: _____
N° 80	0,177	38,000	12,459	92,131	7,87		
N° 100	0,149	9,000	2,951	95,082	4,92		
N° 200	0,074	13,000	4,262	99,344	0,66		
-200	2,00		0,656	100,000	-		
		305,000					



*[Signature]*  
JEFE DE LABORATORIO  
Alcides Hector Calderon Montalico  
INGENIERO AGRICOLA  
CIP 122022



Anexo G. Cotizaciones y tablas técnicas



DESARROLLO Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL S.A.C.  
R.U.C. 20507837159

DATOS DEL CLIENTE		CODET :	00630-2018
RUC	RAZÓN SOCIAL/NOMBRES Y APELLIDOS	ATENCIÓN:	
	GSJ MAQUINARIAS SA	Hugo Sucauca	
Teléfonos	Fax	F- Mail	<a href="mailto:huggo777@gmail.com">huggo777@gmail.com</a>

REFERENCIA : COTIZACIÓN PARA FLUIDO ESPECIAL  
Atendiendo su amable solicitud de la referencia, indicamos proforma de acuerdo a nuestra representada ORBIT (GRUPO FRANKLIN ELECTRIC) de SUDAFRICA, lo siguiente:

ITEM	QTY	UNIDAD MEDIDA	DESCRIPCION	COSTO UND (USD)	COSTO TOTAL (USD)
01	1	UND	<p>Marca: ORBIT PUMP (Franklin Electric) Procedencia: Sudáfrica MODELO: B9602</p>   <p>DATOS DEL PROCESO:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Caudal requerido (Q) = 60 m3/h</li> <li>Longitud horizontal 250m</li> <li>Longitud vertical 50m</li> <li>Fluido no newtoniano</li> </ul> <p>MATERIALES:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* CUERPO: Fierro Fundido</li> <li>* ESTATOR: Nitrilo</li> <li>* EJE: EN8 HCP</li> <li>* ROTOR: EN8 HCP</li> <li>* SELLADO: empaquetadura</li> </ul>  <p>Incluye</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Moto reductor de 25HP</li> <li>Placa base</li> </ul> <p>NOTA: Con variador de velocidad se adicionara \$3000 al monto ofertado</p>	19,850.00	19,850.00

Tipo de cambio: 3.25

CONDICIONES GENERALES		
1. AGREGAR EL IGV:	18%	
2. TIEMPO DE ENTREGA:	3 meses despuesde su adelanto	
3. LUGAR DE ENTREGA:	En sus almacenes de Lima.	
4. FORMA DE PAGO:	50% de adelanto saldo para entrega	
5. ABONO EN CUENTA :		
Banco de Crédito del Perú	Número de Cuenta Soles	Número de Cuenta Dólares
Cuenta Corriente <input checked="" type="checkbox"/>	191-1426751-0-25	191-1429570-1-10

Esperando servirles en este requerimiento, quedamos de ustedes.  
Atentamente,

Leonardo Carhuanambo Rojas  
DEPARTAMENTO DE VENTAS  
[lcarhuanambo@detecin.com](mailto:lcarhuanambo@detecin.com)

Lima, 23 de octubre de 2018.

Calle Las Letras 199  
Oficina 105  
San Borja

LIMA -PERU  
[www.detecin.com](http://www.detecin.com)  
[ventas@detecin.com](mailto:ventas@detecin.com)

Telf. :(+511)226-2561  
Fax:(+511) 226-2562

Oferta No.VL-0010033502

Lima, 25 de octubre de 2018

Señores  
**GSJ MAQUINARIAS**  
Presente.-

Atención : Señor Hugo Supacuca  
Supervisor de operaciones

Referencia : Su solicitud de cotización vía e-mail del día 09.10.18 - Electrobomba centrífugo horizontal trifásico 380V

Estimados señores:

Atendiendo su solicitud de cotización de la referencia y de acuerdo a los datos proporcionados por ustedes, nos es grato cotizarles como sigue:

**ÍTEM 01: DESCRIPCIÓN GENERAL**

Bomba centrífuga especialmente diseñada para el manejo de pulpa de mineral (slurry) con alta abrasión, marca **HIDROSTAL**, fabricada en el Perú, con certificación ISO 9001 e ISO 14001. Caja de bomba con succión axial y descarga radial. Soporte construido en fierro fundido con rodamientos lubricados por grasa. Base común de acero estructural para montaje horizontal bomba-motor, sistema de transmisión mediante acoplamiento directo con su respectivo guarda acople. Motor eléctrico, asíncrono, trifásico, marca **WEG**, totalmente cerrado, forma constructiva B3D horizontal, para operar en instalaciones trifásicas de 60 Hz, para arranque directo. Para temperatura ambiente máxima de 40° C, a 1,000 msnm, con el factor de servicio indicado.

**PRECIOS**

Ítem	Cant.	Descripción	Valor Venta Unit.	Valor Venta Total
01	1	EQ. HMP-EAS 4X3-HBK-60-18 IE2	26,220.00	26,220.00
<b>VALOR VENTA NETO</b>			<b>US\$</b>	<b>26,220.00</b>
<b>I.G.V. 18 %</b>			<b>US\$</b>	<b>4,719.60</b>
<b>PRECIO VENTA TOTAL</b>			<b>US\$</b>	<b>30,939.60</b>

Precios: En US\$ dólares americanos.

**HIDROSTAL S.A.**

DESDE 1955

**319-1000**  
[www.hidrostal.com.pe](http://www.hidrostal.com.pe)

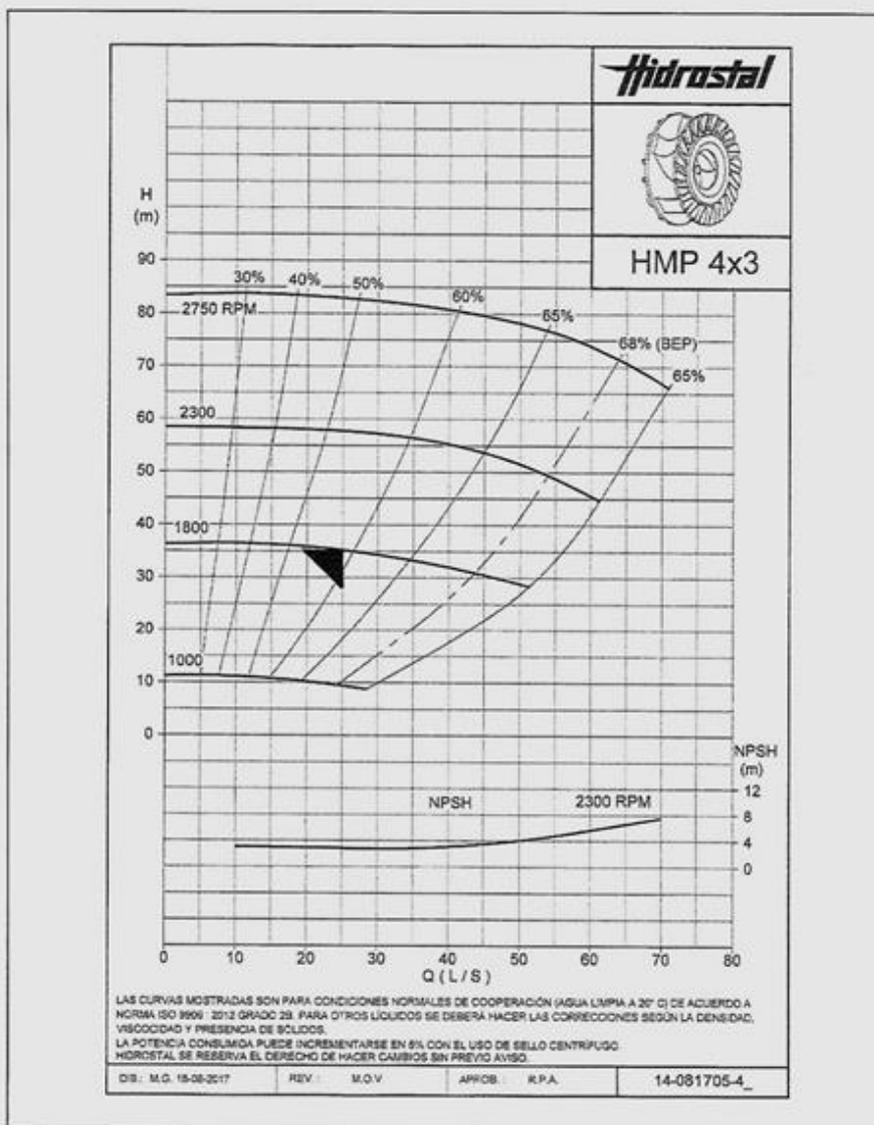
- **LIMA** Sede central, Portada del Sol 722 - Lima 36, [ventas@hidrostal.com.pe](mailto:ventas@hidrostal.com.pe)
- **LIMA** Tienda, Paseo de la República 2500 - Lima 14, fax: 441-8560, [linca@hidrostal.com.pe](mailto:linca@hidrostal.com.pe)
- **PIURA** Zona Industrial Mz. 229 Lote 1E, Telf.: (73) 331-031, [piura@hidrostal.com.pe](mailto:piura@hidrostal.com.pe)
- **AREQUIPA** Avenida Parra 306 - Cercado, Telf.: (54) 214-090, [arequipa@hidrostal.com.pe](mailto:arequipa@hidrostal.com.pe)



Banco Asociado a la Entidad Concesionaria

		DESCRIPCION No.	H70
		OFERTA No VL-0010033502 ITEM No. 1	
<b>BOMBA CENTRÍFUGA TABLA TÉCNICA</b>			
<b>MODELO DE EQUIPO EQ. HMP-EAS 4X3-HBK-60-18 IE2</b>			
<b>CÓDIGO</b>			
<b>DATOS PROPORCIONADOS POR EL CLIENTE</b>		<b>CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA BOMBA</b>	
Líquido a bombear:	Pulpa (todo al 30% en peso)	Caudal (lps):	25.00
Temperatura fluido (°C):	25.0	A.D.T. (m):	35.00
Gravedad específica:	1.6 Máx.	Efficiencia (%):	57.00
Nivel de pH:	7.3	Potencia absorbida (hp):	32.80
Viscosidad (cP):	36 Máx.	Potencia Abs. Máx. (hp):	45.20
Temperatura ambiente (°C):	12.0	Velocidad de Oper. (rpm):	1,800.0
Altitud (msnm):	4,800.0	NPSH requerido (m):	3.10
<b>DATOS BOMBA</b>		<b>MOTOR ELÉCTRICO</b>	
Marca:	HIDROSTAL	Marca:	WEG
Tipo:	Centrífuga	Tipo:	Alta Eficiencia
Montaje:	Horizontal	Norma de construcción:	IEC
Tipo de impulsor:	Cerrado	Grado de protección:	IP55
Diámetro de impulsor:	Recortado	Aislamiento:	F
Pasaje de sólidos máximo:	30%	Frame:	225 S/M
Lubricación soporte:	Grasa	Factor de servicio:	1.15
Diámetro de succión:	4.0"	Potencia nominal (hp):	60 hasta 1,000 msnm y 40°C
Diámetro de descarga:	3.0"	Potencia corregida (hp):	51.6 a 4,800 msnm y 15°C
Tipo de conexiones:	Brida	Velocidad nominal (rpm):	1,800
Tipo de bridas:	ANSI	Voltaje:	380V
<b>SELLO DE LA BOMBA</b>		Fases:	3
Tipo de sello:	Centrífugo	Frecuencia (Hz):	60
Marca:	John Crane o similar	Tipo de arranque:	Soft Starter
Materiales:	Polymide / PTFE / Lubricating oil	<b>SISTEMA DE TRANSMISION</b>	
<b>MATERIALES DE FABRICACIÓN</b>		Tipo:	Acople directo
Ejecución metalúrgica:	ESPECIAL	Marca:	Guardian Industries Modelo: TG-1070
Caja:	Hierro fundido nodular ASTM A536-806006	<b>PLACA BASE</b>	
Voluta externa:	Acero inoxidable RL	Tipo:	HBK
Impulsor:	Acero inoxidable RL	Materiales:	Acero estructural A36
Eje bomba:	Acero inoxidable AISI 431	<b>PRUEBAS</b>	
Soporte:	Hierro fundido nodular ASTM A536-806006	Prueba de desempeño:	No.
Camiseta <sup>(1)</sup> :	-	Prueba hidrostática:	No.
Tapa de succión <sup>(1)</sup> :	-	Certificado NPSH:	No.
<sup>(1)</sup> Aplicable a bombas Hidrostal con impulsor helicoidal		Otros:	No.
<b>OBSERVACIONES</b>			
Embalaje caja de madera <input checked="" type="checkbox"/> SI			
- Incluye líneas en Hidrohard			
<b>Notas importantes:</b>			
- La bomba se ha seleccionado para las condiciones máximas que se indican.			
- La eficiencia y potencia requerida de la bomba se han corregido por viscosidad y G.E.			
- Material de fabricación seleccionado para fluido con conductividad < 1500 µ s/cm.			

CURVAS CARACTERISTICAS DE LA BOMBA



Para mayor información, consulte a nuestro Dpto. de Investigación y Desarrollo.

HIDROSTAL S.A.

18 **319-1000**

www.hidrostral.com.pe

- LIMA Sede central, Portada del Sol 722 - Lima 36, ventas@hidrostral.com.pe
- LIMA Tienda, Paseo de la República 2500 - Lima 14, fax: 441-8390, lince@hidrostral.com.pe
- PUNO Zona Industrial Mz. 229 Lote 1E, Tel: (73) 331-031, puno@hidrostral.com.pe
- AREQUIPA Avenida Pampa 306 - Cercado Tel: (54) 214-090, arequipa@hidrostral.com.pe

