

**ESTUDIO REOLÓGICO DE PULPAS MINERALES DE YESO  
MINA “LA NACUMA” SANTANDER**

**EDUARD MAURICIO CUELLO MORENO  
JAVIER GUSTAVO PINEDA SANTOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2010**

**ESTUDIO REOLÓGICO DE PULPAS MINERALES DE YESO  
MINA “LA NACUMA” SANTANDER**

**EDUARD MAURICIO CUELLO MORENO  
JAVIER GUSTAVO PINEDA SANTOS**

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**DIRECTOR  
Profesor: WALTER PARDAVÉ LIVIA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2010**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento.

Al alma mater, universidad industrial de Santander, escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de materiales por permitir nuestra formación personal y profesional.

Al profesor Walter Pardavé Livia, Ingeniero Metalúrgico M. Sc., y director de éste proyecto, por su dedicación, colaboración y apoyo por brindar parte de sus conocimientos.

A Guillermo Acero Medina, Ingeniero Químico, por sus valiosos aportes en el desarrollo de este proyecto.

De igual forma agradecemos a los técnicos de nuestra escuela, Mario Navarrete, Héctor Javier Gaitán y Ambrosio carrillo, por facilitar muchas de las herramientas requeridas para el desarrollo de este estudio.

A Industria Yesera Santandereana INYESA Ltda., por su respaldo y confianza.

A Todas Aquellas Personas Que De Una u Otra Forma Colaboraron En La Elaboración Del Presente Trabajo.

*A Dios, por darme la oportunidad de alcanzar este objetivo, porque Él es quien ha sido mi  
guía y fortaleza en todo momento.*

*A mis padres Enilda Moreno Y Robinson Cuello, por darme la vida, sus consejos,  
esfuerzos, sacrificios, valores inculcados y por su apoyo total e incondicional.*

*A mis hermanos Robinson Carlos, Maryolis y mis cuatro sobrinos por su apoyo y  
colaboración ayudaron a culminar esta meta.*

*A Leslie Díaz, por su amor y permitirme hacer parte de su vida y darme el mejor motivo  
para luchar ante cualquier obstáculo, gracias.*

*A toda mi familia que me han demostrado su amor y confianza*

*A mis compañero de vida universitaria, por su amistad, compañerismo y colaboración.*

*EDUARD*

Primero y antes que nada, dar gracias a Dios, por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradecer hoy y siempre a mi familia porque a pesar de no estar presentes físicamente, se que procuran mi bienestar desde mi tierra, y está claro que si no fuese por el esfuerzo realizado por ellos, mis estudios no hubiesen sido posible. A mis padres Gustavo y Julia Marina, a mis hermanos Hugo Carlos, Juan Salvador y Jesús Miguel, por el ánimo, apoyo y alegría que al brindarme me dan la fortaleza necesaria para seguir adelante.

A María Fernanda León por ser la persona que ha compartido el mayor tiempo a mi lado, porque en su compañía las cosas malas se convierten en buenas, la tristeza se transforma en alegría y la soledad no existe.

Un agradecimiento muy especial a mis amigos Eduard Cuello, Luis Fernando Mejía, Abimael Padilla, Pedro Garrido, Jorge Arias y en general quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han compartido conmigo esta etapa universitaria, y que no necesito nombrar porque tanto ellas como yo sabemos que desde los más profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

JAVIER

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	16
INTRODUCCIÒN	18
OBJETIVOS	20
1. FUNDAMENTO TEÓRICO	21
1.1 GENERALIDADES SOBRE PULPAS MINERALES	21
1.2 MINERAL DE YESO MINA LA NACUMA	22
1.2.1 Mina La Nacuma los Santos Santander	23
1.2.2 Proceso de beneficio de yeso en INYESA LTDA	24
1.3 FUNDAMENTOS DE REOLOGIA DE PULPAS MINERALES	25
1.3.1 Parámetros que influyen sobre el comportamiento reológico	31
1.3.1.1 Defloculación	35
1.3.2 Aplicación de las pruebas reológicas a circuitos de beneficio de minerales	37
1.3.2.1 Molienda de minerales	38
1.3.2.1.1 Porcentaje de sólidos variable reológica de la molienda de minerales	40
2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	41
2.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTUDIO DE ANTECEDENTES.	41
2.2. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA.	41
2. 2.1 Muestreo de mineral de Yeso.	41
2.2.2 Caracterización del mineral de yeso	41
2.3 SELECCIÓN DEL DEFLOCULANTE	41
2.4 PRUEBAS PRELIMINARES	42
2.5 REALIZACIÓN DE ENSAYOS REOLÓGICOS	42
2.6 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
2.7 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	42
2.8 ESTUDIO REOLÓGICOS DE PULPAS MINERALES	43
2.8.1 Preparación de las mezclas	43

2.8.1.1 Determinación de la curva de defloculación	44
2.8.2 Pruebas de medición reológica	45
2.8.2.1 Etapa de molienda del mineral de Yeso	45
2.8.3 Preparación de pulpas minerales de Yeso	47
3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	49
3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL	49
3.1.1 Propiedades físicas y químicas del mineral	50
3.2 ANÁLISIS REOLÓGICO DE PULPAS MINERALES DE YESO	51
3.3 VARIACIÓN DE DENSIDAD DE LA PULPA	65
3.4 CURVA VOLUMEN – DEFLOCULACIÓN	67
3.5 ANALISIS EN LA MOLIENDA DEL MINERAL	69
CONCLUSIONES	72
RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFIA	76
ANEXOS	79

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Muestra de Mineral de Yeso. Mina La Nacuma, Los Santos Santander	22
Figura 2. Panorámica en donde se observa la falla de Los Santos controlando el cauce de la Quebrada Santera al oeste del pueblo	23
Figura 3. Flujograma INYESA LTDA con balance de materia.	24
Figura 4. Variación de viscosidad con porcentaje de sólidos aplicado en un hidrociclón	27
Figura 5. Curvas de flujo de los distintos tipos de comportamiento reológico	28
Figura 6. Tipos de flujo de los distintos tipos de comportamiento reológico.	29
Figura 7. Incremento exponencial en la viscosidad a medida que la fracción de volumen se acerca a la fracción volumétrica de máximo empaquetamiento.	33
Figura 8. Esquema de un circuito de molienda.	37
Figura 9. Molienda un húmedo, pulpa mineral de Yeso.	39
Figura 10. Diagrama de flujo para la metodología experimental.	42
Figura 11. Balanza de lodos, laboratorio Ingeniería de Petróleo UIS	44
Figura 12. Reómetro rotacional de tipo Brookfield Rheotest II. Ingeniería Química UIS	45
Figura 13. Molino de bolas planta de aceros UIS	45
Figura 14. Esfuerzo de corte Vs gradiente de velocidad Retenido malla +200 (74 $\mu$ m)	54
Figura 15. Viscosidad aparente Vs gradiente de velocidad Retenido malla +200 (74 $\mu$ m)	54
Figura 16. Esfuerzo de corte Vs gradiente de velocidad Retenido malla +270 (53 $\mu$ m)	56
Figura 17. Viscosidad aparente Vs gradiente de velocidad Retenido malla +270 (53 $\mu$ m)	56
Figura 18. Esfuerzo de corte Vs gradiente de velocidad Retenido malla +325 (43 $\mu$ m)	60
Figura 19. Viscosidad aparente Vs gradiente de velocidad Retenido malla 325 (43 $\mu$ m)	60

Figura 20. Esfuerzo de corte Vs gradiente de velocidad Pasante malla -325 (43 $\mu$ m)	60
Figura 21. Viscosidad aparente Vs gradiente de velocidad Pasante malla -325 (43 $\mu$ m)	60
Figura 22. Esfuerzo de corte Vs tasa de corte (65% peso)	61
Figura 23. Esfuerzo de corte Vs viscosidad aparente (65% peso)	62
Figura. 24. Variación de la viscosidad en función de la tasa de cizalladura, para diferentes tamaños de partículas.	62
Figura 25(A, B, C, D) Viscosidad aparente Vs % yeso en peso ( $\dot{\gamma} = 90$ T= 23 °C)	64
Figura 26. Variación de la densidad de pulpa Vs porcentaje de sólidos	65
Figura 27. Variación de la Viscosidad Vs densidad de pulpa ( $\dot{\gamma} = 70$ 1/s)	66
Figura 28. Variación de la viscosidad Vs contenido de reactivo adicionado a la pulpa.	68
Figura 29. Variación de la viscosidad con la tasa de cizalladura, mostrando la influencia del silicato de sodio en el comportamiento reológico de la pulpa.	68
Figura 30. Variación del tiempo de molienda Vs peso de mineral retenido, para dos moliendas una sin reactivo y otra con 4% silicato de sodio.	70

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla1. Algunos Modelos reológicos aplicados a pulpas minerales	30
Tabla 2. Comportamientos de algunos defloculantes y su forma de acción.	34
Tabla 3. Tamaño de alimentación y % de sólidos para dos molinos	40
Tabla 4. Tamaño de partícula. Malla Tyler y porcentaje de sólidos utilizado	43
Tabla 5. Distribución de bolas utilizadas en el proyecto	46
Tabla 6. Datos para las pruebas de molienda	46
Tabla 7 Datos de las pulpas utilizadas para el análisis Reológico	48
Tabla 8. Datos de las pulpas utilizadas para la etapa de molienda	48
Tabla 9 Peso específico de las especies mineralógicas presentes en el mineral de yeso.	49
Tabla 10. Propiedades físicas del yeso	50
Tabla 11. Propiedades químicas del yeso	50
TABLA 12.Esfuerzo de corte y viscosidad aparente. Retenido malla 200(74 $\mu$ m)	53
TABLA 13.Esfuerzo de corte y viscosidad aparente. Retenido malla 270(53 $\mu$ m)	55
TABLA 14.Esfuerzo de corte y viscosidad aparente. Retenido malla 325(43 $\mu$ m)	57
TABLA 15.Esfuerzo de corte y viscosidad aparente. Pasante malla -325(43 $\mu$ m)	59
Tabla 16. Error relativo para el modelo de Krieger-Dougherty. Viscosidad aparente Vs % yeso peso ( $\gamma = 90$ T= 23 °C)	63
Tabla 17. Valores de la densidad y viscosidad de las pulpas minerales de yeso, según la variación del porcentaje de sólidos.	65
Tabla 18. Valores determinados para la curva de defloculación.	67
Tabla 19. Pesos de mineral retenido para dos moliendas, una con y otra sin reactivo, para diferentes tiempos de moliendas.	69
Tabla 20. Resultados en porcentaje en peso para las variables en la etapa de molienda.	71

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Datos reológicos de pulpas minerales de yeso +74 $\mu$	79
ANEXO B. Datos reológicos de pulpas minerales de yeso +53 $\mu$ m	81
ANEXO C. Datos reológicos de pulpas minerales de yeso +43 $\mu$ m	83
ANEXO D. Datos reológicos de pulpas minerales de yeso -43 $\mu$ m	85
ANEXO E. Tablas de Pruebas Reológicas de Defloculación	87
ANEXO F. Análisis Granulométrico De Yeso Para Estuco (Inyesa Ltda)	89

## RESUMEN

**TITULO:** ESTUDIO REOLOGICO DE PULPAS MINERALES DE YESO MINA "LA NACUMA" SANTANDER\*.

**AUTORES:** EDUARD MAURICIO CUELLO MORENO,  
JAVIER GUSTAVO PINEDA SANTOS\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Reología, Yeso, Viscosidad, Pulpas, índice de cizalladura.

Con la realización de este estudio, se busca identificar las propiedades reológicas de pulpas minerales de yeso, como la viscosidad, índice de cizalladura y la densidad, que son las propiedades más relevantes en las pulpas minerales; Este mineral de Yeso, proviene de la mina "La Nacuma", ubicada en el municipio de Los Santos – Santander, donde se extrae la mayor parte del Yeso en el departamento de Santander, el mineral es procesado en la empresa INYESA LTDA; el proceso implica las etapas de trituración, mezclado, secado, molienda, calcinación, micropulverización y embalaje. El uso primordial del producto final es en la industria de la construcción; este estudio busca mejorar la aplicabilidad del producto al momento de fraguar.

Se preparo la pulpa mineral, teniendo en cuenta diferentes porcentajes de sólidos, con el fin de determinar las propiedades reológicas las cuales se midieron en un Reómetro rotacional de tipo Brookfield Rheotest II; Además de analizar los diferentes factores que afectan la viscosidad, como lo es el porcentaje de sólido, el tamaño del mineral, la temperatura la cual permaneció constante para no presentar cambios considerables en la viscosidad, y ver la relación reológica existente entre esta propiedad (viscosidad) y la densidad de la pulpa mineral de yeso.

Con el fin de buscar las condiciones apropiadas para la molienda, se realizaron diferentes pruebas con la adición de un defloculante, con el fin de encontrar el tiempo, porcentaje de sólidos y el tamaño de partícula adecuado.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico- Químicas. Escuela de ingeniería Metalúrgica. Director: Walter Pardavé Livia.

## ABSTRACT

**TITLE:** RHEOLOGICAL STUDY OF GYPSUM MINE MINERAL PULPS "LA NACUMA" SANTANDER\*.

**AUTHORS:** EDUARD MAURICIO CUELLO MORENO  
JAVIER GUSTAVO PINEDA SANTOS\*\*

**KEY WORDS:** Rheology, Gypsum, Viscosity, Pulps, Shear rate.

With the completion of this study, we sought to identify the rheological properties of gypsum mineral pulps, such as viscosity, shear rate and density, which are the most relevant properties in the mineral pulps. This mineral Gypsum comes from the mine "La Nacuma" located in the town of Los Santos - Santander, home to the largest amount of gypsum in this department (Santander), the mineral is processed in the company INYESA LTDA; the process involves the stages of crushing, mixing, drying, grinding, roasting, micropulverización and packaging. The primary use of the final product is in the construction industry, this study seeks to improve the applicability of the product at the time set.

Mineral pulp was prepared, taking into account different percentages of solids, in order to determine the rheological properties which were measured in a Brookfield-type rotational Rheometer Rheotest II; In addition to analyzing the different factors affecting the viscosity, as is the percentage of solid, mineral size, temperature which remained constant to show no significant changes in viscosity, and see the relationship between the rheological property (viscosity) and the density of the ore pulp plaster.

In order to create conditions suitable for milling, different tests were performed with the addition of a deflocculant, in order to find the time, percentage of solid and appropriate particle size.

---

\* Work of Degree

\*\* Faculty of engineering Physicist - Chemistries. School of Metallurgical engineering. The director: Walter Pardavé Livia.

## INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción se ha incrementado notablemente en Colombia, los materiales utilizados necesitan un mejoramiento para obtener así mejor calidad en su aplicación industrial, para esto se necesita realizar diversos estudios en cada una de las ramas involucradas, es así, como su principal producto utilizado, que es el Cemento portland, necesita mejorar sus propiedades, por ello es necesario, estudiar los componente de este y especialmente las propiedades del mineral utilizado en la fabricación del Cemento y sus derivados, como lo es el yeso.

En el departamento de Santander, en la zona del cañón del Chicamocha, más exactamente en el municipio de Los Santos, se encuentra unos de los mejores yacimientos de este mineral, el cual presenta una serie de variables en cuanto a sus propiedades físicas y químicas, el mineral extraído en estas minas, no se encuentra plenamente definido, en cuanto al manejo; por consiguiente este estudio se realizará con el fin de identificar y evaluar propiedades reológicas, al trabajarlo en forma de pulpa.

Este mineral es llevado a un proceso industrial, donde se le hace un tratamiento buscando un mejor beneficio de dicho mineral, en Bucaramanga, una de las principales plantas encargadas de éste proceso es Inyesa Ltda. La cual realiza la transformación del mineral, lo que implica una reducción de tamaño, complementándolo con un proceso pirometalúrgico pasando de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ; el mineral procesado en esta planta proviene principalmente de la mina La Nacuma, mineral en estudio, al cual se le van a estudiar las propiedades reológicas, con el fin de obtener un mejor beneficio en el mineral y conocer sus propiedades para el fraguado.

En el proceso industrial, donde ocurre la reducción de tamaño, el mineral sufre una deformación y la pulpa presenta un flujo característico, que es el objeto de estudio de la reología, donde esencialmente, la viscosidad, el índice de cizalla y la densidad, son las principales propiedades que influyen en el comportamiento de la pulpa del mineral, razón por la cual son la bases fundamental en esta investigación.

En las plantas procesadoras de éste mineral (Yeso), hay una serie de factores a tener en cuenta, como la polosidad, esto por ser un material muy liviano, es fácil que las partículas finas queden suspendidas en el ambiente, generando así una contaminación en el sector donde opere esta industria, se busca con éste estudio, mejorar ese aspecto al estudiar las propiedades reológicas, ya que se darían unos mecanismos de cómo realizar éste proceso en forma de pulpa, así mejorando la calidad del producto y los factores ambientales cercanos a la planta.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Determinar las propiedades reológicas de pulpas minerales de yeso; proveniente de la mina “La Nacuma” ubicada en el municipio de Los Santos (Santander) y procesado en la Industria Yesera de Santander (INYESA LTDA).

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Cuantificar el índice de cizalladura con el método reológico para mejorar el beneficio de dicho mineral.
- Analizar la viscosidad de la pulpa mineral de yeso y los factores que afectan esta propiedad.
- Estudiar la relación reológica que existe entre la viscosidad y densidad de la pulpa mineral de yeso.
- Realizar un estudio comparativo de molienda y clasificación del mineral de yeso, con y sin mejoramiento de las propiedades reológicas.

## **1. FUNDAMENTO TEÓRICO**

### **1.1 GENERALIDADES SOBRE PULPAS MINERALES**

En la actualidad, el estudio de la reología es muy importante para comprender el comportamiento de las partículas en forma pulpa, esto ha llevado a que en los últimos años exista un interés creciente en el diagnóstico de los efectos de la viscosidad dinámica de fluidos en forma de pulpas. Los estudios se han profundizado gracias a los grandes avances tecnológicos experimentados por los instrumentos de medición y de análisis utilizados actualmente, lo que permiten tener gran precisión y exactitud en las pruebas realizadas a nivel de laboratorio y así tener unos resultados confiables y hacer un análisis detallado de la pulpa estudiada.

La pulpa mineral, puede presentar un comportamiento reológico tipo Newtoniano, este se da cuando la viscosidad es independiente de la velocidad de corte, es decir en cualquier punto del circuito donde tomemos una medida la viscosidad, esta no va a variar, y cuando es dependiente, la pulpa tiene un comportamiento reológico no Newtoniano, en este caso la viscosidad está cambiando constantemente en función del grado de agitación de la pulpa, la homogenización entre otros factores.

El yeso es un mineral muy liviano, que al hacerle una reducción de tamaño, presenta una gran cantidad de partículas finas que disminuyen la acción de las fuerzas mecánicas, lo que implica un esparcimiento de estas partículas al medio, al llevar este mineral a forma de pulpa, se facilita el tratamiento, y así de esta forma se evita una contaminación ambiental por efectos de estas partículas suspendidas en el sector de operación de las plantas encargadas de realizar la transformación de dicho mineral.

## 1.2 MINERAL DE YESO MINA LA NACUMA

El yeso es un mineral corriente y frecuentemente se localiza en rocas sedimentarias, muchas veces formando capas gruesas, suele encontrarse asociado a calizas, margas y arcilla de cualquier edad geológica, en general su origen se atribuye a proceso evaporíticos por precipitación directa a partir de una salmuera, aunque también puede formarse naturalmente por hidratación de anhidrita, por la acción de soluciones sulfatadas ácidas sobre rocas calcáreas, o bien, por procesos diagenéticos. Es el sulfato más común, su fórmula química es  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , tiene una dureza de dos en la escala de Mohs, siendo el segundo mineral más blando después del talco; el yeso es de color blanco, pero debido a impurezas puede tornarse gris.

Figura 1. Muestra de Mineral de Yeso. Mina La Nacuma, Los Santos- Santander



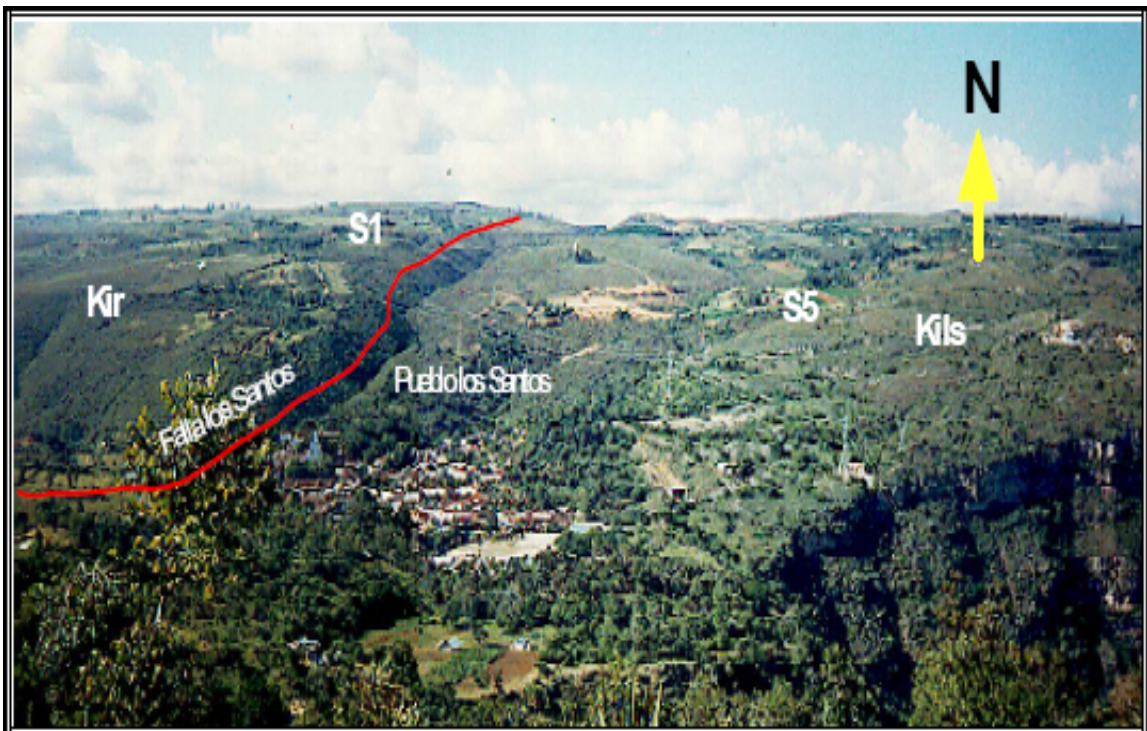
Fuente: autores del proyecto

### 1.2.1 Mina La Nacuma Los Santos Santander

La mina La Nacuma, se encuentra ubicada la formación de Los Santos, que es la más extensa del municipio de Los Santos y abarca en su totalidad la parte plana conocida como Mesa de Los Santos al oriente del pueblo.

En la formación de los santos existen dos tipos de yacimientos yesíferos; uno estratificado asociado a rocas calcáreas en la base de la formación Rosablanca y el otro de tipo de yeso es residual y consiste en concentraciones de yeso granular y laminar a lo largo de fracturas y en los niveles superiores de meteorización de la superficie.

Figura 2. Panorámica en donde se observa la falla de Los Santos controlando el cauce de la Quebrada Santera al oeste del pueblo

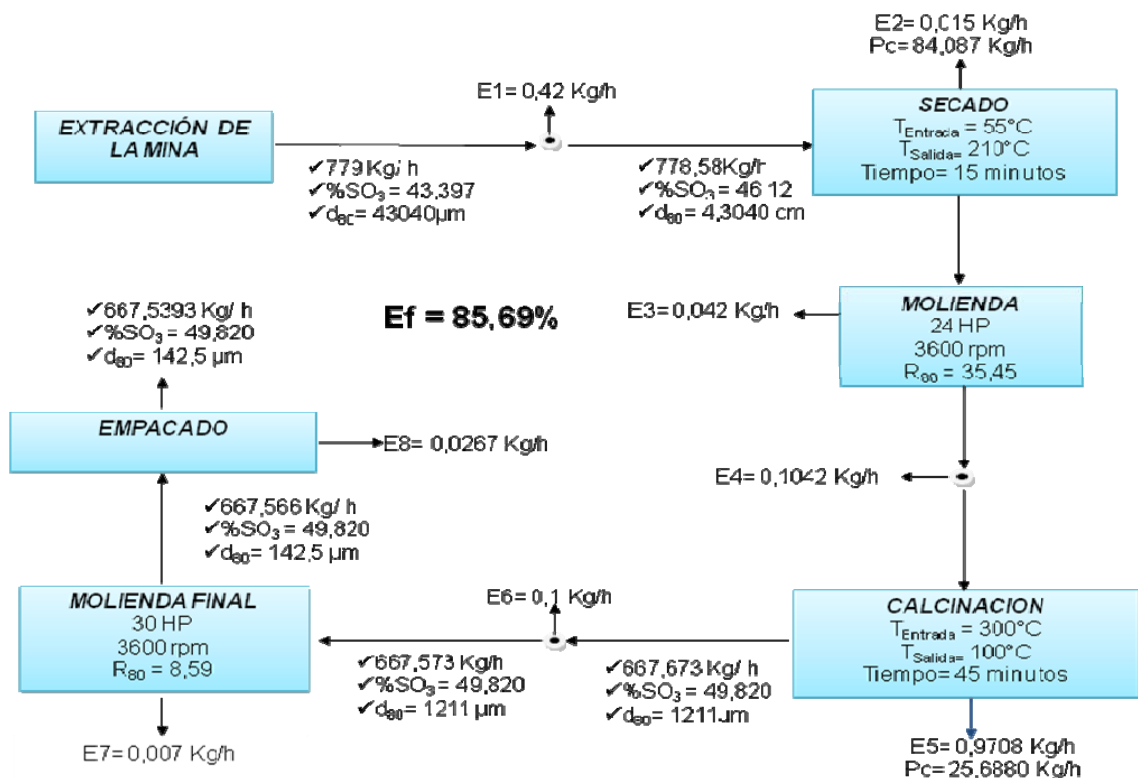


Fuente: Geología del EOT Municipio Los Santos,  
UIS -Gobernación de Santander, 2003

### 1.2.2 Proceso de Beneficio de Yeso en INYESA LTDA

La empresa denominada (INYESA LTDA), es una de las empresas más importantes en el departamento en esta área y tiene como objetivo el procesamiento de yeso blanco y gris ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) extraído de las canteras en forma de roca o granulado. El proceso de producción de la planta se divide en las siguientes etapas; trituración, mezclado, secado, molienda, calcinación, micropulverización y embalaje en sus procesos; se tienen en cuenta diferentes variables, como son la temperatura de calcinación y la pureza del mineral que son las que determinan la calidad del producto final; el cual tiene su mayor aplicación en la industria de la construcción. La figura 3 muestra las etapas y el balance de materia del proceso de Beneficio en INYESA LTDA.

Figura 3. Flujoograma INYESA LTDA con balance de materia.



Fuente: Pardave W. Mejoramiento del proceso de Beneficio de minerales de yeso en Santander UIS. 2010

### 1.3 FUNDAMENTOS DE REOLOGÍA DE PULPAS MINERALES

La Reología de las pulpas desempeña un papel importante en el procesamiento de minerales en diversos procesos como la clasificación, trituración, concentración, sedimentación y filtración, con operaciones en la velocidad de sedimentación de las partículas. Esta dependencia es más pronunciada con la disminución del tamaño de partícula. La reología también tiene participaciones en el transporte de pulpas a lo largo de los conductos no sólo en la planta de transformación, también en las tuberías externas a la planta.

La influencia de la Reología no se entiende bien y, en vista de ello, rara vez se incluye como una variable en el diseño, análisis y optimización. Una razón importante es la dificultad de su estudio en las suspensiones inestables, que se producen en muchos procesos de beneficio de minerales, y el hecho de la falta de normas para la medición de la viscosidad (Shi y Napier-Munn) (1996)<sup>1</sup>.

Hasta hace poco, cuando la fracción de partículas finas eran descartadas de los circuitos de procesamiento, en el cual se consideraba el porcentaje de sólidos como el único responsable de la viscosidad de la pulpa. Con la necesidad de beneficiarse de estas partículas se intensificaron sus estudios. Realizándose con la ayuda de instrumentos modernos, que facilitaron la medición de las propiedades de las partículas, otras variables fueron acreditadas como significativas para la viscosidad de la pulpa, estas son la distribución de tamaño de partículas, el ambiente químico y la temperatura de la pulpa.

A continuación se informa todo sobre los trabajos recientes, que muestran la influencia de la viscosidad/reología en el tratamiento de los minerales.

En un estudio muy interesante, Healy et al. (1993)<sup>2</sup> describió el comportamiento de los pigmentos de dióxido de titanio en pulpas variando el porcentaje en masa (45,

---

<sup>1</sup> POSA MARIO VALENTE, Reologia no tratamento de minérios. Capítulo 13, pág. 550. Rio de Janeiro Dezembro/2004.

<sup>2</sup> POSA MARIO VALENTE, Reologia no tratamento de minérios. Capítulo 13, pág. 551. Rio de Janeiro. Dezembro/2004

50 y 55%) y dispersante (silicato de sodio) a diferentes pH, para una misma tasa de corte (50 1 / s); encontrando una mayor viscosidad a un pH de 8.5 y para una pulpa con alto porcentaje de sólidos, determinando así la influencia de éste (porcentaje de sólidos) sobre la viscosidad de las pulpas; para pH mayores y menores al indicado, la viscosidad disminuía, de igual forma para porcentaje de sólidos bajos.

Plitt (1991)<sup>3</sup> investigó la influencia del tamaño de las partículas sobre la viscosidad de las pulpas. Trabajó una pulpa con un tamaño de partículas menor a 10 mm y un porcentaje en sólidos de 10% en volumen comparándola con una pulpa que contenía un tamaño de partícula mayor a 10 mm y 30% de peso en volumen, dando como resultado una viscosidad mayor la pulpa que tenía menor tamaño de partículas.

Shi y Napier-Munn (1996b)<sup>4</sup> describieron el comportamiento de las pulpas (sulfuro de cobre, hierro, plomo y zinc) con diferentes porcentajes de sólidos en volumen (15, 30 y 45%) y diferentes concentraciones de partículas pasantes en 38 micrones (20, 50 y 95%). Los investigadores encontraron que la reología, de estas presentaban tres tipos de comportamiento: dilatante, pseudoplástico y plástico de Bingham.

Para un bajo porcentaje de sólidos en volumen (15%), la pulpa se comportó como un material dilatante; aumentando la cantidad de finos de 20 hasta 95% (38 micrones), el comportamiento de materiales dilatante se tornó más pronunciado.

Para un porcentaje de sólidos en volumen intermedio (30%) y una pequeña cantidad de finos (20% pasante en 38 micras), la pulpa es característica de un material plástico de Bingham; a mayores cantidades de finos, la tendencia seguía siendo el comportamiento de un material dilatante.

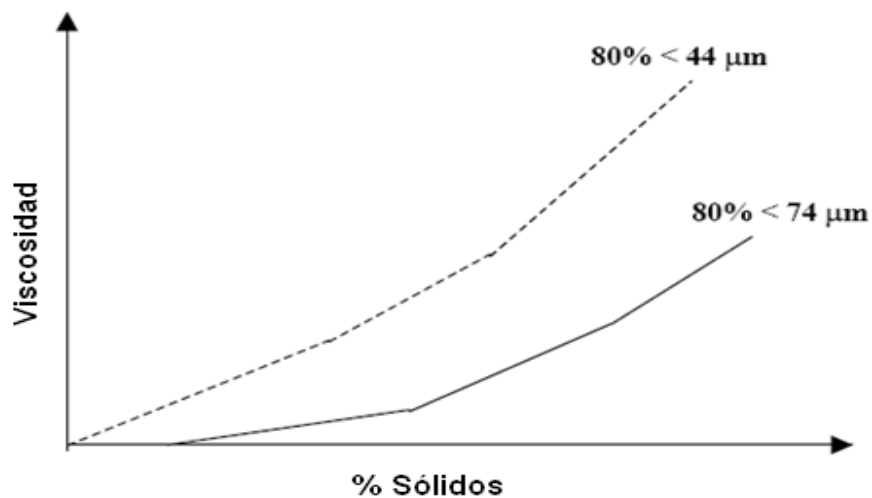
Cuando el porcentaje de sólidos en volumen aumenta a 45% y la cantidad de finos de más de 20%, la pulpa mostró un comportamiento pseudoplástico.

---

<sup>3-4</sup> POSA MARIO VALENTE, Reología no tratamento de minérios. Capítulo 13, pág. 551. Rio de Janeiro. Dezembro/2004.

En un estudio realizado por KAWATRA y Eisele (1988)<sup>5</sup> también encontraron el marcado efecto entre el porcentaje de sólidos y la cantidad de finos en la viscosidad, como se muestra en la Figura 4. En ensayos de hidrociclón, con muestras de mineral de hierro, tomando muestras en el alimento (80% pasa a 74  $\mu\text{m}$ ) y el desbordamiento (80% pasa a 44 micras), para diferentes porcentajes de sólidos.

Figura 4. Variación de viscosidad con porcentaje de sólidos aplicado en un hidrociclón



Fuente: ALVES, S.J.; DE ALMEIDA, S. L.M.; BENVINDO. Tratamiento de minérios. Cetem-mct, quatro edição, pag. 552. Rio de janeiro. 2004.

La Reología, según su definición más común, es la ciencia que describe el comportamiento de las deformaciones y flujo de cualquier material. En el ámbito de la ingeniería se ha propuesto una definición práctica para la reología, definiéndola como la caracterización de los materiales utilizando ecuaciones constitutivas que relacionan los esfuerzos aplicados sobre éste y las deformaciones que él sufre.

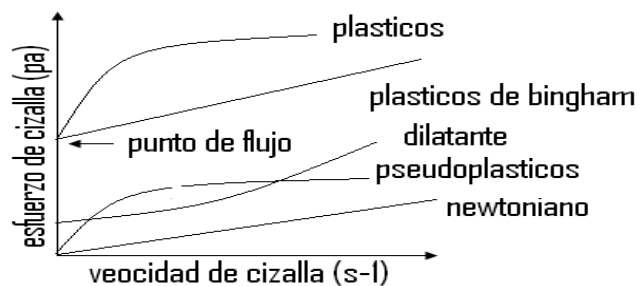
<sup>5</sup> POSA MARIO VALENTE, Reologia no tratamento de minérios. Capítulo 13, pág. 552. Rio de Janeiro. Dezembro/2004.

Por extensión se define la reometría como la determinación experimental de las propiedades reológicas. Un reómetro es un instrumento capaz de medir las propiedades reológicas, es decir, permite determinar funciones del material, un reómetro es un viscosímetro con características particulares.

Una forma práctica de clasificación se basa en el uso de diagramas reológicos. La representación gráfica del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla se denomina curva de flujo, para el caso de un fluido newtoniano, la curva de flujo es una línea recta. Otra forma de representar el comportamiento al flujo es mediante las llamadas curvas de viscosidad, en donde para un líquido newtoniano la curva de viscosidad será una recta paralela al eje de las abscisas, toda sustancia que se aleje de este comportamiento se le dice que es no newtoniana.

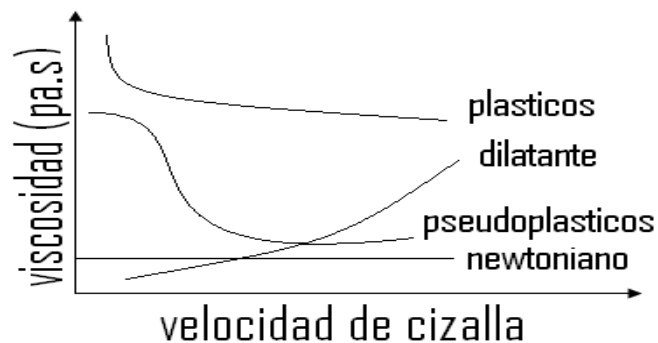
En el caso más general la viscosidad tiende a disminuir a medida que aumenta la velocidad de cizalla, comportamiento conocido como fluidificación por cizalla, la terminología clásica se refiere a este comportamiento como pseudoplasticidad, o plasticidad cuando existe un punto de flujo definido. Por el contrario, cuando la viscosidad aumenta con la velocidad de cizalla, se dice que el fluido presenta un comportamiento de espesamiento por cizalla, también referida como dilatancia. (Ver figura 5 y 6).

Figura 5. Curvas de flujo de los distintos tipos de comportamiento reológico



Fuente: MORENO. B.R. reología de suspensiones cerámicas, consejo superior de investigaciones científicas, Madrid 2005.

Figura 6. Tipos del flujo de los distintos tipos de comportamiento reológico.



Fuente: MORENO. B.R. reología de suspensiones ceramicas, consejo superior de investigaciones científicas, Madrid 2005.

Prácticamente la totalidad de las pulpas utilizadas en plantas industriales corresponden a fluidos no newtonianos, los cuales son tratados o calculados según leyes para flujos newtonianos, (velocidad proporcional al esfuerzo de corte). Se ha mostrado en estudios, el error que se comete al tratar como newtonianos, fluidos dilatantes o seudo-plásticos, de aquí la importancia del desarrollo de herramientas para el estudio de estos fluidos.

Por tanto, el comportamiento reológico es casi siempre no newtoniano. Una ecuación reológica general para estos sistemas está dada por:

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (1)$$

$\tau$  = Esfuerzo de corte

$\tau_0$  = Esfuerzo de fluencia

$K$  = Viscosidad aparente

$n$  = Índice de flujo

$\gamma$  = Tasa de corte o cizalla.

Dependiendo de los diferentes valores de  $\tau$  y  $n$  se especifican los modelos, así:

Tabla1. Algunos Modelos reológicos aplicados a pulpas minerales

Valor de $\tau_0$	Valor de $n$	Modelo reológico
Igual a 0	1	Newtoniano
Diferente de 0	1	Viscoplastico de Bingham
Igual a 0	>1	Dilatante
Igual a 0	<1	Pseudoplastico
Diferente de 0	>1	Viscoplastico-dilatante
Diferente de 0	<1	Viscoplastico- Pseudoplastico

#### Modelos reológicos empíricos

Sin embargo los modelos propuestos no son suficientes, observando el comportamiento de muchos fluidos, se han propuesto otros modelos más generales que reproducen el comportamiento de muchos materiales, que incluye a los newtonianos, ley de la potencia y plásticos de Bingham.

#### 1.3.1 Parámetros que influyen sobre el comportamiento reológico

Los parámetros que aparecen en los modelos reológicos (tensión de fluencia, viscosidad, etc.) dependen de las propiedades del material de estudio y de una larga lista de variables. En el caso de las pulpas minerales, los más importantes se relacionan con la granulometría del mineral, su concentración y el pH, además de la temperatura.

El efecto de la granulometría se relaciona con la distribución de tamaño de las partículas. La distribución de tamaños de partículas de los sólidos, influye sobre la viscosidad, de tal manera que si se mezclan partículas grandes con partículas pequeñas, los espacios vacíos disminuyen, por tanto una suspensión que tiene una amplia distribución de tamaño, presenta menor viscosidad, que una suspensión que tenga un solo tamaño de partícula.

La concentración de partículas influye tanto en la viscosidad como en el esfuerzo de fluencia de la pulpa: a medida que la concentración crece, la viscosidad y el esfuerzo de fluencia crecen, en algunos casos, en forma muy pronunciada. El efecto del pH sobre las propiedades reológicas de las pulpas minerales ha sido analizado en numerosos estudios que muestran que cambios pequeños de pH producen cambios dramáticos en la tensión de fluencia y viscosidad de una muestra.

Por otra parte, la viscosidad también depende de la temperatura. El aumento de la temperatura es inversamente proporcional a la viscosidad de la suspensión.

La relación viscosidad-temperatura puede expresarse por la ecuación de Arrhenius de la forma:

$$\mu = A \cdot e^{\frac{E}{RT}} \quad (2)$$

$\mu$ : Viscosidad dinámica [mPa·s]

E: energía de activación

R: constante de los gases

T: es la temperatura absoluta en °C

A: coeficiente

Como se muestra, la viscosidad disminuye con la temperatura. Esto es debido al hecho que conforme aumenta la temperatura, las fuerzas viscosas son superadas por la energía cinética, dando lugar a una disminución de la viscosidad. Por este hecho se deben extremar las precauciones a la hora de medir la viscosidad, teniendo en cuenta que la temperatura debe permanecer prácticamente constante. El contenido de fase interna, que suele denotarse con el símbolo  $\phi$ , es el parámetro físico de mayor importancia en el comportamiento reológico.

Generalmente, el contenido de fase interna se define como la relación entre el volumen de fase dispersa y el volumen total de dispersión, expresado como fracción o porcentaje. También puede encontrarse en unidades de g/dL o en

fracciones o porcentajes en peso. Sin embargo, desde un punto de vista teórico, la forma correcta de definir  $\phi$  es como fracción o porcentaje volumétrico.

Por tanto el factor que determina la viscosidad de las suspensiones, es la concentración de sólidos, cuan más concentrado es el sistema, más complejo es el comportamiento reológico y mayor es su viscosidad.

En la literatura actual, se presentan una serie de ecuaciones que relacionan la viscosidad relativa con la concentración en volumen de sólidos, en las cuales se encuentra la primera aproximación, conocida ecuación de Einstein para suspensiones de partículas esféricas.

$$n_s = 1 + 1.25\phi \quad (3)$$

$n_s$  = Viscosidad de la suspensión

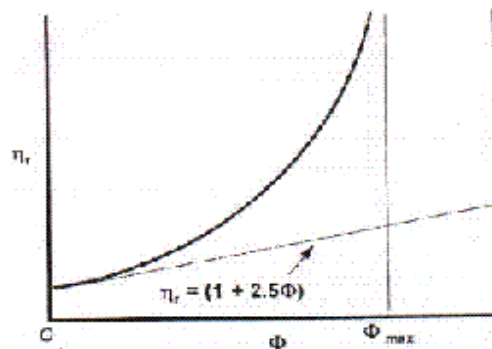
$\phi$  = fracción volumétrica de sólidos

La cual relaciona la viscosidad de la suspensión  $n_s$ , en función de la fracción volumétrica. La Ec. 3 tiene un fundamento teórico y es exacta para suspensiones muy diluidas  $\phi < 0.02$ . Dicha ecuación establece que la viscosidad del medio externo es aumentada por las interacciones hidrodinámicas que introducen las partículas suspendidas. La Ec. 3 no admite que haya interacción entre las partículas. Por esta razón su intervalo de validez es bajo; en una suspensión muy diluida las partículas están muy separadas que no pueden interactuar. Nótese también que la ecuación de Einstein establece una relación lineal entre la viscosidad y el contenido de fase interna.

Para fracciones mayores la interacción entre las partículas provoca desviaciones hacia viscosidades más grandes. A medida que se agregan más partículas la suspensión se acerca al estado rígido donde disminuye el espacio disponible para el movimiento de las partículas. Como se puede observar en la figura 7, este fenómeno causa un incremento exponencial en la viscosidad a medida que la

fracción de volumen se acerca a la fracción volumétrica de máximo empaquetamiento. ( $\phi$  máx).

Figura 7. Incremento exponencial en la viscosidad a medida que la fracción de volumen se acerca a la fracción volumétrica de máximo empaquetamiento.



Fuente: De Notta, Hugo. Introducción a la Reología, Ucar Emulsion Systems. 2003

Sin embargo, la mayor parte de los casos prácticos involucran dispersiones concentradas, en las cuales puede ocurrir todo tipo de interacciones. Pueden formarse parejas o tríos temporales que giran en el campo de flujo, disipando así aún más energía. La formación de estos aglomerados temporales tienen un efecto secundario importante; parte de la fase continua queda atrapada en los aglomerados, lo cual tiene como efecto producir un incremento aparente del contenido de fase interna.

En efecto en la viscosidad de las interacciones de segundo orden (formación temporal de parejas de partículas), la cual puede describirse mediante la expresión.

$$n_s = 1 + 1.25\phi + a\phi^2 \quad (4)$$

$a$  = Cuantifica la magnitud de la interacción de dos partículas.

Para suspensiones concentradas, cuyas concentraciones de sólidos excede el 10% en volumen, suelen describirse mediante expresiones semiempíricas, tales como:

Ecuación de Thomas (5)<sup>6</sup>:

$$n_s = 1 + 1.25\phi + 10.05\phi^2 + 0.00273 \exp(16.6\phi) \quad (5)$$

La cual permite predecir con gran exactitud la viscosidad de suspensiones de partículas sólidas de tamaño coloidal, hasta un  $\phi$  de 0,6. Cabe señalar que esta ecuación no toma en cuenta la influencia de interacciones no hidrodinámicas entre partículas. Puede observarse que, para valores de  $\phi$  pequeños, los dos últimos términos de la Ec. 5 tienen poca relevancia, obteniéndose entonces la ecuación de Einstein (Ec. 3). A medida que aumenta  $\phi$ , el último término se torna más importante, prediciendo un aumento exponencial de la viscosidad con el aumento del contenido de fase interna.

Otra expresión frecuente expresada en la literatura, es la ecuación de Krieger-Dougherty (7)<sup>7</sup>, la cual establece que:

$$n_s = \left( 1 + \frac{\phi}{\phi_m} \right)^p \quad (7)$$

En la cual  $p$  es un parámetro fenomenológico y  $\phi_m$  es lo que se ha denominado fracción de máximo empaquetamiento. Como su nombre lo indica,  $\phi_m$  cuantifica el volumen máximo de partículas que puede contener una dispersión,  $\phi_m$  es igual a 0,75 cuando partículas son de igual tamaño (o monodispersas)<sup>8</sup>. Para arreglos aleatorios de partículas monodispersas se obtienen  $\phi_m$  de 0,6 a 0,64<sup>9</sup>. La Ec. 7 es válida sólo hasta un valor de  $\phi$  igual o menor a  $\phi_m$ .

---

<sup>6</sup> Thomas, D. G. Transport Properties of Suspension: VII. A Note on the Viscosity of Newtonian Suspensions of Uniform Spherical Particles. J. of Colloid Science, 20:267-277, 1965

<sup>7</sup> Krieger, I.; Dougherty, T. Transactions of the Society of Rheology, 3:137-152, 1959

<sup>8</sup> Sherman, P. Rheological properties of emulsions. In chapter 7, Encyclopedia of Emulsions, Ed. P. Becher, Marcel Dekker, Vol. 1. New York, 1983

<sup>9</sup> Polinski, A.; Ryan, M.; Gupta, R.; Seshadi, S.; Frechette, F. Journal of Rheology, 32(7):703-735, 1988.

Igualmente Vand (10)<sup>10</sup>, sugiere la ecuación:

$$1/n_s = 1 - 2.5\phi + 11\phi^5 - 11.5\phi^7 \quad (8)$$

Para  $\phi < 0.15$

Frankel y acrivos (11)<sup>11</sup>, han determinado la siguiente expresión, hasta para valores de  $\phi_m = \phi$ :

$$n_s = 1 + \frac{\beta * \phi^{1/3}}{\phi_m^{1/3} - \phi^{1/3}} \quad (9)$$

Chong (12)<sup>12</sup>, ha propuesto para sistemas monodispersos de concentraciones de 50-60% en volumen.

$$n_s = \left( 1 + \beta * \left( \frac{\phi}{\phi_m - \phi} \right) \right)^2 \quad (10)$$

### 1.3.1.1 Defloculación

Cuando las arcillas se dispersan en agua, tienen una tendencia a agruparse, debido a la diferencia de cargas entre el borde y la superficie. Este hecho, que resulta en un comportamiento demasiado viscoso y tixotrópico que se opone a su uso en la industria cerámica sin añadir defloculantes. La tendencia de agrupamiento de estas partículas depende de la correlación de fuerzas a las que están sometidas. Las fuerzas que actúan en este sentido son las de Van der Waals y electrostáticas.

Las fuerzas de Van der Waals dependen de la constante dieléctrica del medio, la masa y la separación de las partículas. La modificación de estas es compleja y,

<sup>10</sup> yucel, o. The 7<sup>th</sup> international symposium on coal slurry fuels, u.s. department of energy. New Orleans, 1985. P. 91-101

<sup>11</sup> JINESCU, V. The rheology of suspensions. International chemical engineering. July 1974. p. 397-418

<sup>12</sup>CHONG, J.S. CHRISTIANSEN, E.B. and BAER, A.D. Rheology of concentrated suspensions. Journal of applied polymer science. 1971. P. 2007-2021

esto no es un procedimiento habitual para deflocular. Por otra parte, las fuerzas de repulsión electrostática o esférica se pueden modificar con relativa facilidad. Estos cambios pueden ser efectuados utilizando aditivos que pueden provocar un aumento en las fuerzas de repulsión a través la modificación en la carga superficial existente entre partículas, variándose, por ejemplo, el pH.

Los defloculante normalmente utilizados en la industria cerámica son electrolitos donde tanto el catión, como el anión, actúan para estabilizar la suspensión y en general son sales de sodio. Estos defloculantes (silicato de sodio, polifosfatos) puede reaccionar con la materia orgánica presente en la suspensión formando un coloide protector que actúa como defloculante estérico.

En la tabla 2 se muestra algunos ejemplos de defloculantes y su forma de acción.

Tabla 2. Comportamientos de algunos defloculantes y su forma de acción.

Defloculante	Electrostático			Estérico
	Adición de cationes	Eliminación de cationes	Modificación de la carga superficial	
Silicato de sodio	si	si	si	si
Carbonato Sodico	si	si	si	
Fosfatos	si	si	si	si
Poliacrilatos	si		si	si

Fuente: GONÇALVES. P. influência do caulim nas características reológicas de esmaltes cerâmicos. 2003.

En la literatura se presentan varias relaciones de reactivos utilizados en suspensiones con varias funciones, como plastificantes, estabilizantes, dispersantes, entre otros. Aditivos para conferir estabilidad y viscosidades adecuadas en la preparación de suspensiones.

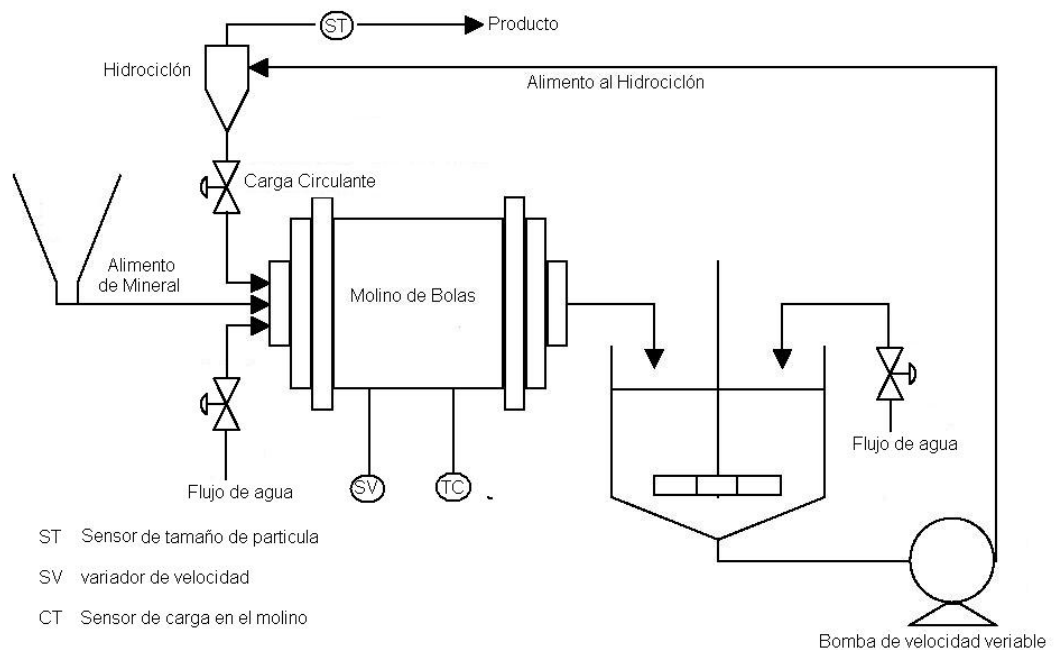
Para el estudio en curso se procuro utilizar un reactivo con la capacidad de disminuir la viscosidad de la suspensión, es decir un reactivo capaz de mantener la dispersión estabilizada y modificando el comportamiento reológico de las pastas.

El silicato de sodio presenta una diversidad de propiedades y características funcionales que pueden ser utilizadas para resolver eficientemente y económicamente la mayoría de los problemas que hay en algunos procesos industriales y químicos, por tanto, es ampliamente usado como: Detergentes y jabones, papel y cartón, Ingeniería Civil, tratamiento de agua, cementos, defloculantes, adhesivos, aislamiento de tuberías, excavación de suelos de pozos petroleros, fundición, flotación de minerales entre otros, por lo tanto y según la literatura este es un reactivo con la capacidad de realizar los cambios en las propiedades que se buscaban, es decir disminución de la viscosidad.

### **1.3.2 Aplicación de las pruebas reológicas a circuitos de beneficio de minerales**

En la figura 8, se presenta un esquema básico de un circuito de molienda, estos sistemas se caracterizan principalmente por una fragmentación de minerales en el molino y posteriormente un clasificador, que en nuestro caso es un hidrociclón, por eso desde el punto de vista reológico, se realizaron pruebas buscando la manera de observar a nivel de laboratorio en un molino de bolas, lo que se hace industrialmente, y para una segunda aplicación se realizó para un hidrociclón.

Figura 8. Esquema de un circuito de molienda de minerales.



Fuente: Radhakrishnan, 1999.

### 1.3.2.1 Molienda de minerales

La molienda, es la última etapa del proceso de reducción de tamaño; en esta etapa las partículas se reducen por la combinación de impacto, compresión, abrasión y la fricción, a un tamaño adecuado para la liberación de los minerales, por lo general se concentran en un procedimiento posterior. Cada mineral tiene un punto ideal para ser molido, dependiendo de muchos factores, incluyendo la distribución de los minerales útiles a la ganga y el proceso de separación que se utilizara posteriormente.

La molienda es el área de la reducción de tamaño que requiere mayor inversión y gasto de energía, por eso es considerada una operación importante en las plantas encargadas de este proceso, por esta razón la molienda debe ser muy bien estudiada en la etapa de dimensionamiento y selección de equipo.

La importancia de la operación de molienda en la industria radica en que la mayor parte de la energía dedicada al procesamiento del mineral es absorbida por la operación de molienda. Esto nos lleva a afirmar que la mayor parte del costo del procesamiento depende de esta operación y, por lo tanto, su optimización es un desafío constante para los ingenieros.

La energía que exige el proceso de molienda, toda no se utiliza en la partición de las partículas; el movimiento de los medios de molienda consume mucha energía de la suministrada a la fábrica, así como otros factores influyen en el consumo de energía de molinos, estos factores son: la velocidad de operación, fracción de volumen del molino ocupado por el medio moedor (factor de llenado), porcentaje de sólidos en la pulpa y el tamaño del mineral. (Ver figura 9)

Para la investigación en curso solo se trataran las dos últimas variables: porcentaje de sólidos en la pulpa y el tamaño del mineral.

Figura 9. Molienda un húmedo, pulpa mineral de Yeso.



Fuente. Autores del proyecto. 2010

### 1.3.2.1.1 Porcentaje de sólidos variable reológica de la molienda de minerales

La molienda puede ser en seco o húmedo, sin embargo, en el tratamiento de minerales, el más común es húmedo. La cantidad de agua utilizada en el molino depende del tamaño de la partícula y el tipo de molino. El uso de pulpas muy diluidas conduce a una molienda ineficiente, porque las partículas sólidas se encuentran muy dispersas en la pulpa, siendo pocos los choques efectivos entre ellas y las bolas.

Al aumentar el porcentaje de sólidos, la eficiencia de la molienda se ve influenciada de una forma positiva, pero esta mejora llega hasta un punto máximo correspondiente a una determinada concentración de sólidos, y a partir de éste la eficiencia empieza a disminuir. En la Tabla 3 se presentan los datos previstos por Taggart (13)<sup>13</sup> relacionando el tamaño de alimentación, el tipo de molino y porcentaje de sólidos.

Tabla 3. Tamaño de alimentación y % de sólidos para dos tipos de molinos

Tipos de molinos	Tamaño de alimentación (Tyler)				
	3 a 14 malla	14 a 28 malla	28 a 48 malla	48 a 65 malla	> 65 malla
Barras	80 a 60 %	75 a 70 %	70 a 65 %		
Bolas	75 a 50 %	80 a 65 %	87 a 65 %	85 a 65 %	80 a 60 %

Fuente Hedda Vargas O. Figueira, COMUNIÇÃO, Capítulo 4, pag. 162. Año 2004

Klimpel realizó una serie de estudios sobre el efecto de los aditivos químicos en la molienda húmeda y encontró que el control de la fluidez de la pulpa es una forma económica de mejorar la velocidad de molienda, sin aumentar el poder adquisitivo y el consumo a través del medio moledor<sup>14</sup>.

<sup>13</sup> Hedda Vargas O. Figueira, COMUNIÇÃO, Capítulo 4, pag. 162. Año 2004

<sup>14</sup> POSA MARIO VALENTE, Reología no tratamento de minérios. Capítulo 13, pág. 559. Rio de Janeiro Dezembro/2004

## **2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

El proyecto se desarrolló teniendo en cuenta las siguientes etapas:

### **2.1 Revisión Bibliográfica y estudio de antecedentes.**

Se realizó una completa revisión acerca del tema de reología de diferentes fuentes tales como: tesis de grado, revistas, libros, bases de datos, páginas web y papers.

### **2.2. Recolección de información técnica.**

**2.2.1 Muestreo de Mineral de Yeso:** Se efectuó una visita a la mina, La Nacuma, ubicada en el municipio de Los Santos Santander, donde se extrajo una muestra representativa de mineral de yeso, el cual se utilizó posteriormente para la realización de las pruebas pertinentes.

Se tomaron muestras representativas de 3 mantos (Churca, Lajeo y Enchaquetada), aprovechando el método de explotación que actualmente tiene la empresa; a cada una de las muestras tomadas se le hizo la medición del espesor.

**2.2.2 Caracterización del mineral:** Al mineral de yeso obtenido de la mina, en trabajos anteriores se le realizó su respectiva caracterización mineralógica.

**2.3 Selección del defloculante:** El defloculante se seleccionó teniendo en cuenta las propiedades y efectos que este causaba en el estudio de pulpas minerales, se hizo una consulta bibliográfica, donde se analizó cual debía ser el defloculante a utilizar, escogiendo finalmente Silicato de Sodio.

### **2.4 Pruebas preliminares**

Se establecerán las variables reológicas influyentes en las pulpas de yeso, como es la viscosidad, el índice de cizalladura y el porcentaje de sólidos.

## 2.5 Realización de ensayos reológicos

Una vez establecidas las variables influyentes, se realizarán las respectivas determinaciones reológicas para cada pulpa, además de las pruebas de medición de aspectos reológicos en la etapa de molienda.

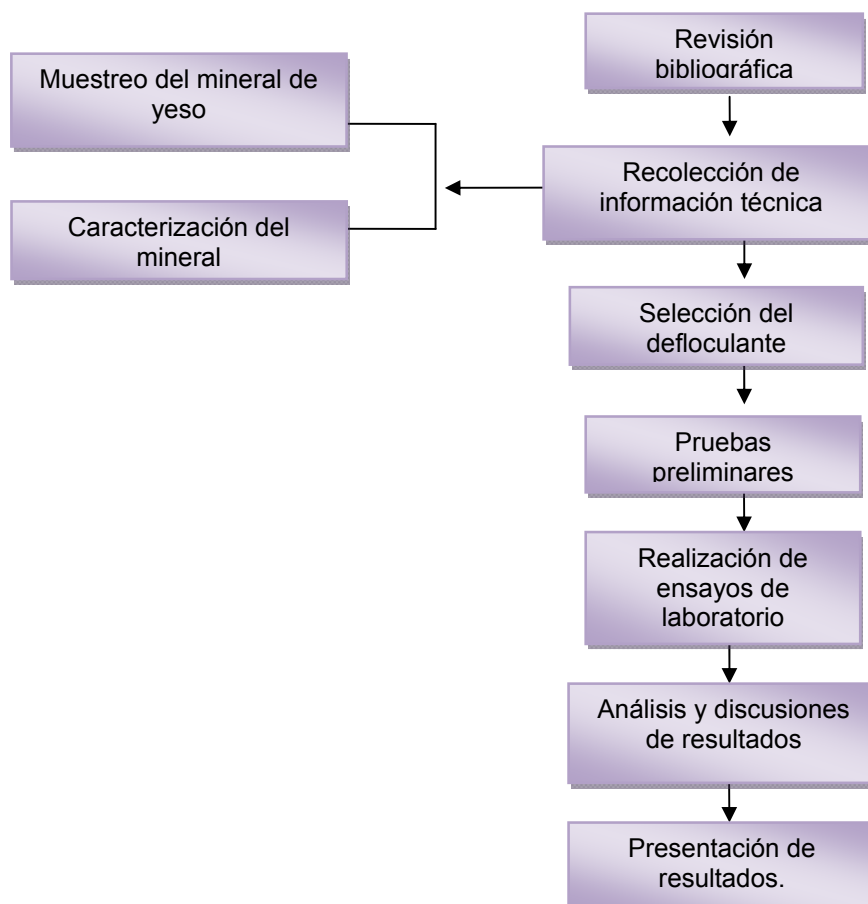
## 2.6 Análisis y discusión de resultados

En ésta etapa se analizarán los resultados, se plantean esquemas, ecuaciones y posibles modelos relacionados con la reología del mineral estudiado.

## 2.7 Presentación de resultados

Se redactará un informe completo que contenga los resultados de ésta investigación.

Figura 10. Diagrama de flujo para la metodología experimental.



## 2.8 ESTUDIO REOLÓGICO DE PULPAS MINERALES

### 2.8.1 Preparación de las mezclas

Una vez conocida la caracterización del mineral de yeso, se prosiguió con la reducción de tamaño con el fin de llevar el mineral a la granulometría adecuada para preparar la pulpa.

Primero que todo se llevó el mineral a una trituradora de mandíbulas, ubicada en el laboratorio de Geología UIS, para luego ser procesado en un molino de bolas que trabaja a 74 r.p.m, donde se le realizó el proceso de molienda, llevando el mineral a partículas finas, clasificando el material de acuerdo al tamaño, en las mallas Tyler +200, + 270, + 325 y -325.

Es necesario resaltar que se tomaron tamaños mayores a la malla Tyler # 200, pues durante la prueba de viscosimetría, estos tamaños se sedimentaron, y por tanto estos datos de viscosidad no son confiables.

Tabla 4. Tamaño de partícula y % de sólidos utilizados

Malla Tyler	Dp [ $\mu\text{m}$ ]	% sólidos
Tyler # 200	74	25 a 65
Tyler # 270	53	35 a 65
Tyler # +325	43	35 a 65
Tyler # -325	43	25 a 65

Para la determinación de la variación de la densidad de pulpa y la viscosidad se hizo necesario preparar diferentes porcentajes de sólidos de un solo tamaño de partícula Malla Tyler +325 (43 $\mu$ ), medidas en una Balanza de lodos ubicada en el laboratorio de Ingeniería de Petróleo UIS. (Ver figura 11)

Figura 11. Balanza de lodos, laboratorio Ingeniería de Petróleo UIS.



Fuente: Autores del proyecto 2010.

Para las siguientes pruebas a efectuar, es necesario realizar la curva de defloculación de la pulpa a trabajar, utilizando como reactivo el silicato de sodio.

#### **2.8.1.1 Determinación de la curva de defloculación**

La curva de defloculación fue obtenida a partir de la variación de la viscosidad en función de la concentración de defloculante utilizado para una misma condición de preparación de la pulpa.

Los pasos para determinar la cantidad de defloculante a utilizar fueron los siguientes:

En primera instancia se prepararon cinco muestras con un contenido de sólidos de 35% en peso del mineral; luego se fue adicionando silicato de sodio en proporciones iguales, tomando como punto de partida 1 ml de aditivo hasta encontrar un cambio en la viscosidad de la pulpa.

Los valores de la viscosidad de las suspensiones de muestras en función de la concentración de dispersantes utilizados fueron medidos en un reómetro rotacional de tipo Brookfield Rheotest II (Ver Figura 12).

Figura 12. Reómetro rotacional de tipo Brookfield Rheotest II. Laboratorio Ingeniería Química UIS



Fuente, Autores del proyecto. 2010

## 2.8.2 Pruebas de medición reológica

### 2.8.2.1 Etapa de molienda del mineral de Yeso

La importancia de la operación de molienda en la industria radica en el consumo de la energía utilizada en el procesamiento del mineral, teniendo en cuenta que la mayor parte de ésta (energía) es absorbida en esta operación, por lo tanto su optimización es un desafío constante, por esta razón y dado que una de las variables que influye en el consumo de energía es el porcentaje de sólidos y tamaño del mineral, además de la influencia de reactivos que aumentan la fluidez de la pulpas, se desarrollaron una series de pruebas donde se busca la cantidad apropiada de estas variables en un molino de bolas que se encuentra en el laboratorio de beneficio de minerales (ver figura 13).

Figura 13. Molino de bolas planta de aceros UIS



Fuente: autores del proyecto

Primero que todo se observó la influencia del reactivo en la molienda del mineral, realizando prueba con y sin el aditivo en las mismas proporciones, determinando así las condiciones en que se presentarían los mejores resultados en la molienda, principalmente el tiempo de la misma.

Una vez obtenido estos resultados, se encontró una notable diferencia en los porcentajes de mineral pasante en la malla Tyler # 200, indicando de esta forma que la molienda es más eficaz con la adición de aditivo.

Después, se establecieron las condiciones adecuadas para trabajar el mineral, manejando distintas variables, como porcentaje de sólidos, granulometría del mineral y tiempo de molienda, eso se hizo de acuerdo a la tabla 5, se utilizó una carga de bolas del 7% del volumen total del molino, para dos tamaños de bolas así:

Tabla 5. Distribución de bolas utilizadas en el proyecto

<b>Bolas</b>	<b>Número</b>	<b>Peso/unidad [g]</b>	<b>% En peso</b>	<b>Diámetro [cm]</b>
grande	20	190	13.64	3.68
pequeñas	20	30	86.36	1.93
total	40	220	100	

Fuente: Autores del proyecto. Año 2010

Tabla 6. Datos para las pruebas de molienda

<b>Nº de Prueba</b>	<b>% de Sólidos</b>	<b>t [min]</b>	<b>Alimento [m]</b>
1	20	15	100
2	20	15	170
3	20	25	100
4	20	25	170
5	35	15	100
6	35	15	170
7	35	25	100
8	35	25	170

Fuente: Autores del proyecto. Año 2010

Según la tabla # 3, para un molino de bolas y una malla Tyler >65, el porcentaje de sólido debe ser entre 60 y 80%, pero por las condiciones de operación del molino ubicado en el laboratorio de beneficio de minerales UIS, se debe utilizar un porcentaje de alimentación menor de 40%, razón por la cual se tomo un porcentaje de 35% para la realización de las pruebas de molienda.

### **2.8.3 Preparación de pulpas minerales de Yeso**

La pulpa se preparó de acuerdo a la distribución granulométrica obtenida en la molienda, se tomo el retenido de cada malla Tyler +200, +270 y +325 y el pasante -325, variando el porcentaje de sólidos de 35, 45, 55 y 65% para cada distribución de tamaño.

Después de preparada la pulpa se realizaron las respectivas mediciones de viscosidad, tasa de cizalladura, entre otras. En un Reómetro rotacional de tipo Brookfield Rheotest II de cilindros coaxiales, el cual el principio de medida se basa en aplicar una velocidad de giro constante y medir la resistencia (par de torsión) que ofrece la muestra al giro del rotor, estas mediciones se realizaron en un rango de 30 seg a una temperatura de 20 – 23 °C. (Ver tabla 7).

La molienda se realizó en húmedo con 30% (+/- 5%) de sólidos, y un contenido de silicato de sodio del 4% en peso. (Ver tabla 8).

Tabla 7 Datos de las pulpas utilizadas para el análisis Reológico

<b>Malla Tyler</b>	<b>% sólidos</b>	<b>Temperatura</b>
Tyler # 200	25 a 65	20 – 23 °C.
Tyler # 270	35 a 65	
Tyler # +325	35 a 65	
Tyler # -325	25 a 65	

Fuente: Autores del proyecto

Tabla 8. Datos de las pulpas utilizadas para la etapa de molienda

<b>Etapas de molienda</b>		
	<b>Preliminares</b>	<b>Ensayos</b>
	<b>Niveles</b>	
Porcentaje de sólidos	30%	25 a 35%
Silicato de sodio	4%	4%

Fuente: Autores del proyecto

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL

Basado en estudios anteriores del mineral de yeso extraído de la mina La Nacuma (Los Santos – Santander), se determinó que la principales especies mineralógicas presentes son:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$  y amorfos. La tabla 9 presenta la composición y gravedad específica del mineral, en diversos mantos de la mina LA NACUMA.

Tabla 9 Peso específico de las especies mineralógicas presentes en el mineral de yeso.

Final de fórmula inesperado	% peso Manto 1	% peso Manto 2	% peso Manto 3	Gravedad Especifica (sp-gr)
$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	7.62	1.22	6.32	2.32
$\text{SiO}_2$	9.53	2.54	10.68	2.65
$\text{CaCO}_3$	46.62	6.58	18.75	2.65
$\text{CaSO}_4$	36.08	44.17	44.14	2.94
amorfos	0.15	45.49	20.11	
Densidad del Manto (gr/ml)	2.732	2.899	2.817	

Fuente: PARDAVE. W, Beneficio de minerales de yeso provenientes de la mina La Nacuma “Municipio de Los Santos”. 2007

**3.1.1 Propiedades físicas y químicas del mineral.** La tabla 10 muestra las propiedades físicas del yeso y la tabla 11 exhibe las propiedades químicas del yeso.

Tabla 10. Propiedades Físicas del Yeso

<b>Brillo</b>	Generalmente Vítreo; también perlado y sedoso.
<b>Color</b>	Incoloro, blanco, gris; diversas tonalidades de amarillento, rojizo, castaño como consecuencia de impurezas.
<b>Densidad</b>	2.32 g/cm <sup>3</sup>
<b>Transparencia</b>	Transparente a traslucido.
<b>Dureza</b>	2 (puede ser rallado con la uña).
<b>Fractura</b>	Fibrosa paralela a (011)
<b>Exfoliación</b>	En 4 direcciones; perfecta paralela a (010), con producción fácil de hojas delgadas; con superficie concoidea paralela a (100).

Fuente: JAMES DWIGHT, Dana. HURLBUT S, Cornelius. Manual de mineralogía. Barcelona. Reverte. 2 Edición.

Tabla 11. Propiedades Químicas del Yeso

<b>Peso molecular</b>	<b>172,17 g/mol</b>			
<b>Composición</b>	<b>Ca</b>	23.28%	<b>CaO</b>	<b>32.57%</b>
	<b>H</b>	2.34%	<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>20.93%</b>
	<b>S</b>	18.62%	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>46.5%</b>
	<b>O</b>	55.76%	<b>Total</b>	<b>100%</b>
	<b>Total</b>	100%		
<b>Fórmula empírica</b>	<b>CaSO<sub>4</sub>*2H<sub>2</sub>O</b>			
<b>Nombre del compuesto</b>	<b>Sulfato cálcico hidratado</b>			

Fuente: JAMES DWIGHT, Dana. HURLBUT S, Cornelius. Manual de mineralogía. Barcelona. Reverte. 2 Edición.

### 3.2 ANÁLISIS REOLÓGICO DE PULPAS MINERALES DE YESO

Para determinar los parámetros reológicos que gobiernan el movimiento de un fluido se requiere de la obtención de datos de laboratorio que permitan su caracterización, en donde una forma práctica de clasificación se basa en la utilización de diagramas reológicos (esfuerzos versus deformaciones) correspondientes a distintos fluidos (ver Fig. 14-23).

En estas figuras (14 - 23), con sus respectivas tablas se observan los diferentes datos experimentales, de esfuerzo de corte y la viscosidad aparente, además de las diferentes ecuaciones que relacionan los datos de estas dos variables con el gradientes de velocidad, presentando un comportamiento reológico no newtoniano.

En relación con los resultados obtenidos del yeso en estudio procedente de la Mina La Nacuma, se muestra que las suspensiones tienen un comportamiento reológico propio de un fluido pseudoplástico el cual se caracteriza por el decrecimiento de la viscosidad con el incremento de la velocidad de corte, a excepción de la malla 200 que presenta un fenómeno inverso, es decir, un aumento en la viscosidad con el aumento en la velocidad de corte propio de un comportamiento dilatante, con un índice de flujo ( $n$ ), disminuyendo al aumentar el porcentaje de yeso.

Al analizar las ecuaciones encontradas se puede visualizar el comportamiento reológico del fluido, que sigue la ley de potencia sin un esfuerzo de fluencia en un amplio rango de velocidades de corte, hasta un porcentaje de sólidos menor al 55% (coeficientes de relación mayores de 0,910), pero para porcentajes de 65% este comportamiento cambia y se presentan ecuaciones potenciales de segundo y tercer grado (Ver figura 22- 23).

Para el caso del efecto del tamaño de partículas como se muestra en la figura 25, se observa que con un 100% de partículas inferior a 40  $\mu$  (malla 325) y 25% de sólidos; equivalen a una pulpa que contiene 45% de sólidos, con el 100% del material con partículas por encima de 40  $\mu$ .

De igual forma en la figura 25(A-D) se puede observar que hay una correspondencia única de la viscosidad con el porcentaje de sólidos, en donde la viscosidad es directamente proporcional a la fracción de yeso, que era lo que se esperaba. Por tanto cuanto mayor sea la concentración de sólidos mayor es la interacción entre las partículas en suspensión, facilitando la formación de enlaces secundarios, por ende aumentando la resistencia al flujo (viscosidad).

En la literatura se presentan una serie de ecuaciones que relacionan la viscosidad relativa con la concentración en volumen de sólidos, entre éstas se encuentra la primera aproximación, conocida como ecuación de Einstein, utilizada en suspensiones de partículas esféricas con un porcentaje menor a 2%, para fracciones mayores, la interacción entre las partículas provoca desviaciones hacia viscosidades más grandes, en la medida que se agregan más partículas a la suspensión, ésta se acerca al estado rígido donde disminuye el espacio disponible en el movimiento de las partículas. Tal como se muestra en la figura 26.

El modelo de Krieger-Dougherty (Ec 7), reporto buenos resultados (ver tabla 16 y figuras 25 (A-D), y se ajusto a los datos experimentales (con coeficientes de relación mayores a 0.934), para valores de  $\phi_m = 0,75$ , por tratarse de partículas de igual tamaño y además que se trabajo con valores mucho menores que  $\phi_m$ , el valor de la constante p al parecer no tiene una relación directa con el porcentaje de sólidos, ya que este no es creciente con el contenido de sólidos y tampoco decreciente con el mismo.

Aunque se obtuvieron más distribuciones de tamaños de partículas, solamente se correlacionaron los datos reológicos de cuatro de éstas, debido a que en la preparación de las pulpas, con tamaños mayores a los correspondientes a la malla Tyler # 200 se presentaba sedimentación y no se lograban obtener resultados confiables.

En las graficas 14 y 15, se presentan las curvas de esfuerzo de corte y viscosidad con la variación del gradiente de velocidad, respectivamente. Además de la tabla 12 se muestra los diferentes valores expuestos en las graficas obtenidas en las diferentes mediciones reológicas mediante la variación del porcentaje de sólidos para el mineral de yeso de 74  $\mu\text{m}$ , en el anexo A se presenta el resto de datos obtenidos para esta pulpa, como lo es torque, Temperatura, Aguja utilizada y la velocidad.

TABLA 12. Esfuerzo de corte y viscosidad aparente.  
Retenido malla Tyler +200 (74 $\mu\text{m}$ )

% sólidos	25		35		45		55		65	
$\dot{\gamma}$ 1/s	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP
90	2	2	3	4	7	8	17	20		
100	2	2	6	6	8	7	18	17	186	930
110	3	2	13	8	9	12	19	18	210	700
120	3	3	19	9	11	15	21	18	221	552
130	4	3	22	13	17	18	24	19	235	470
140	5	4	27	17	27	20	30	21	250	417
150	6	4	32	20	32	22	37	25	263	376
160	7	4	35	22	42	26	43	27		
170	8	5	41	24	52	30	54	32		
180	9	5	47	26	61	34				
190	10	5			72	38				

$\tau$  = esfuerzo de corte (y),  $\eta$  = Viscosidad aparente,  $\dot{\gamma}$  = Gradiente de velocidad (x)  
 $y = 5\text{E-}05x^{2,345}$        $R^2 = 0,982$  25%  
 $y = 3\text{E-}07x^{3,670}$        $R^2 = 0,919$  35%  
 $y = 9\text{E-}07x^{3,461}$        $R^2 = 0,971$  45%  
 $y = 0,003x^{1,838}$        $R^2 = 0,915$  55%

Figura 14. Esfuerzo de corte Vs gradiente de velocidad  
Retenido malla 200 (+74 $\mu$ m)

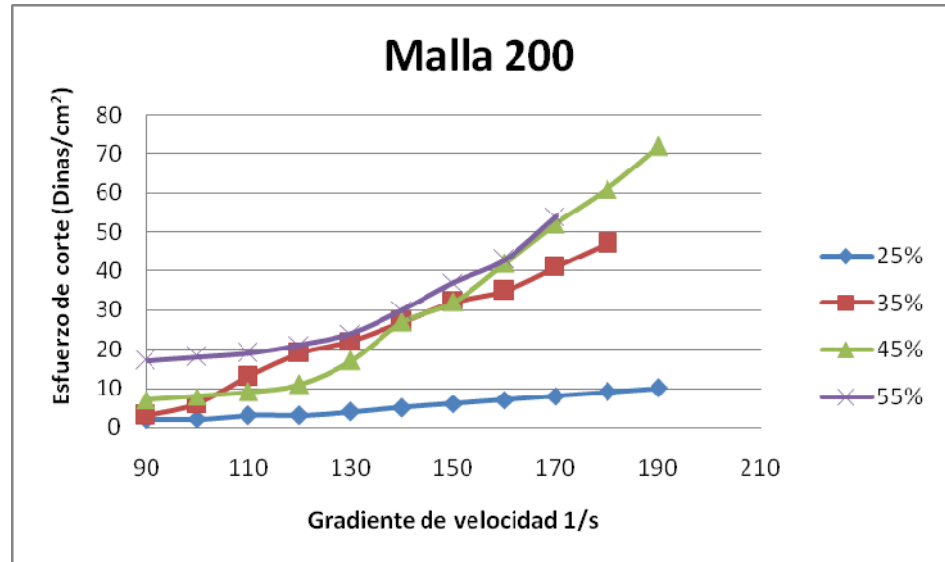
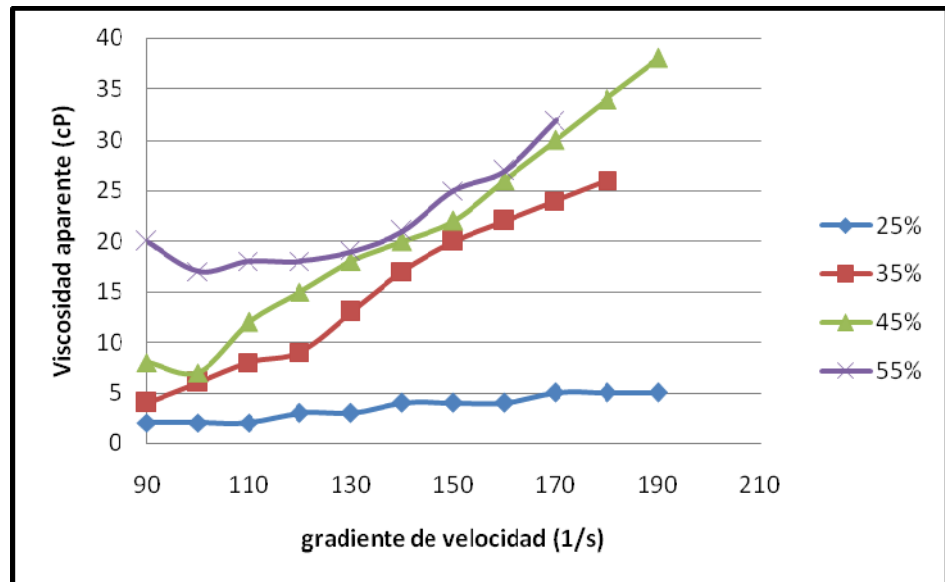


Figura 15. Viscosidad aparente Vs gradiente de velocidad  
Retenido malla 200 (+74 $\mu$ m)



En la Figura 16, se muestran las curvas de esfuerzo de corte con la variación del gradiente de velocidad, y en la figura 17, encontramos las curvas de viscosidad Vs esfuerzo de corte. Además de la tabla 13 que presenta los diferentes valores expuestos en las graficas obtenidas en las diferentes mediciones reológicas mediante la variación del porcentaje de sólidos para el mineral de yeso de 53  $\mu\text{m}$ . En el anexo B se presenta el resto de datos obtenidos para esta pulpa, como lo es torque, Temperatura, Aguja utilizada y la velocidad.

TABLA 13. Esfuerzo de corte y viscosidad aparente.  
Retenido malla +270 (+53 $\mu\text{m}$ )

% sólidos	35%		45%		55%		65%	
	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP
90	3	21	11	81	45	452	177	1582
100	5	15	12	72	52	260	299	1496
110	6	15	13	60	55	182	281	938
120	6	15	14	51	57	144	276	690
130	7	15	15	42	61	119	283	552
140	8	15	16	39	61	102	283	472
150	9	15	16	27	63	90		404
160	9	15	16	21	65	81		
170	10	15			66	73		
180	10	14			68	68		

Siendo:  $\tau$  = esfuerzo de corte (y),  $\eta$  = Viscosidad aparente,  $\gamma$  = Gradiente de velocidad(x)

$$y = 0,003x^{1,551}$$

$$y = 0,475x^{0,703}$$

$$y = 4,448x^{0,529}$$

$$R^2 = 0,912 \quad 35\%$$

$$R^2 = 0,957 \quad 45\%$$

$$R^2 = 0,939 \quad 55\%$$

Figura 16. Esfuerzo de corte Vs gradiente de velocidad  
Retenido malla 270 (+53 $\mu$ m)

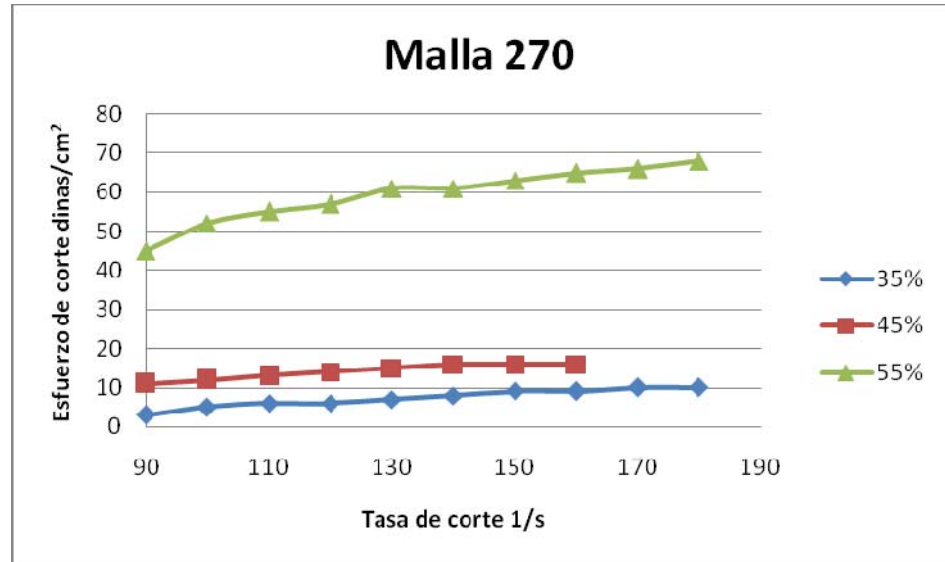
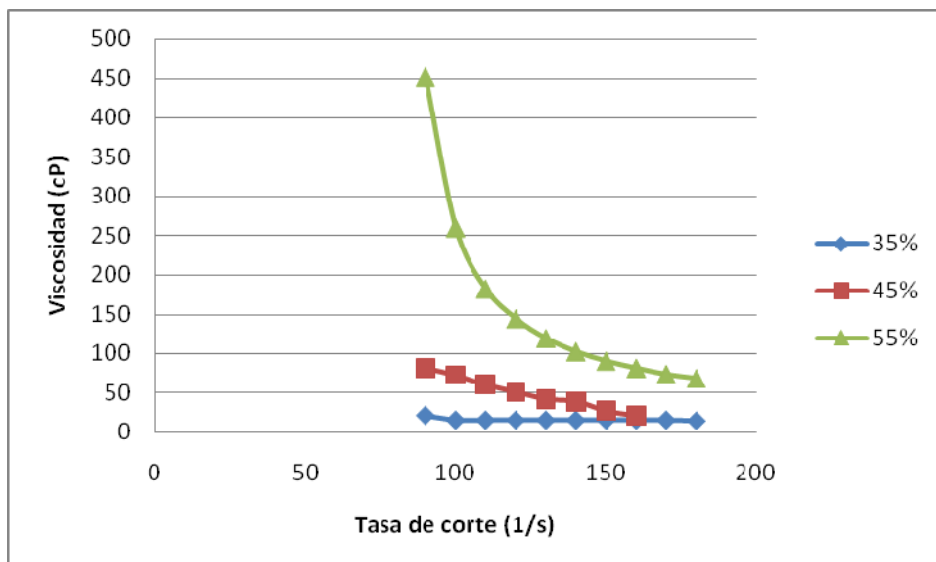


Figura 17. Viscosidad aparente Vs gradiente de velocidad  
Retenido malla 270 (+53 $\mu$ m)



En la Figura 18, se muestran las curvas de esfuerzo de corte con la variación del gradiente de velocidad, y en la figura 19, encontramos las curvas de viscosidad Vs esfuerzo de corte. Así como de la tabla 14 que exhibe los diferentes valores expuestos en las figuras obtenidas en las diferentes mediciones reológicas mediante la variación del porcentaje de sólidos para el mineral de yeso de 43  $\mu\text{m}$ . En el anexo C se presenta el resto de datos obtenidos para esta pulpa, como lo es torque, Temperatura, Aguja utilizada y la velocidad.

TABLA 14. Esfuerzo de corte y viscosidad aparente.  
Retenido malla +325 (+43 $\mu\text{m}$ )

% sólidos	35		45		55		65	
	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP
10	12	14	47	473	240	2405	462	3340
20	13	13	64	319	305	1523	507	3315
30	14	12	69	230	310	1033	582	3283
40	14	12	72	181	312	766	614	2249
50	14	11	75	150	320	588	660	1330
60	15	11	78	130	332	472	667	968
70	15	10	80	115	335	389	673	794
80	16	10	82	103				
90	16	9	85	94				
100	17	9	87	87				
110								

Siendo:  $\tau$  = esfuerzo de corte (y),  $\eta$  = Viscosidad aparente,  $\gamma$  = Gradiente de velocidad(x)

$$y = 8,604x^{0,137} \quad R^2 = 0,927 \quad 35\%$$

$$y = 29,01x^{0,241} \quad R^2 = 0,955 \quad 45\%$$

$$y = 161,9x^{0,186} \quad R^2 = 0,910 \quad 55\%$$

Figura 18. Esfuerzo de corte Vs gradiente de velocidad  
Retenido malla 325 (+43 $\mu$ m)

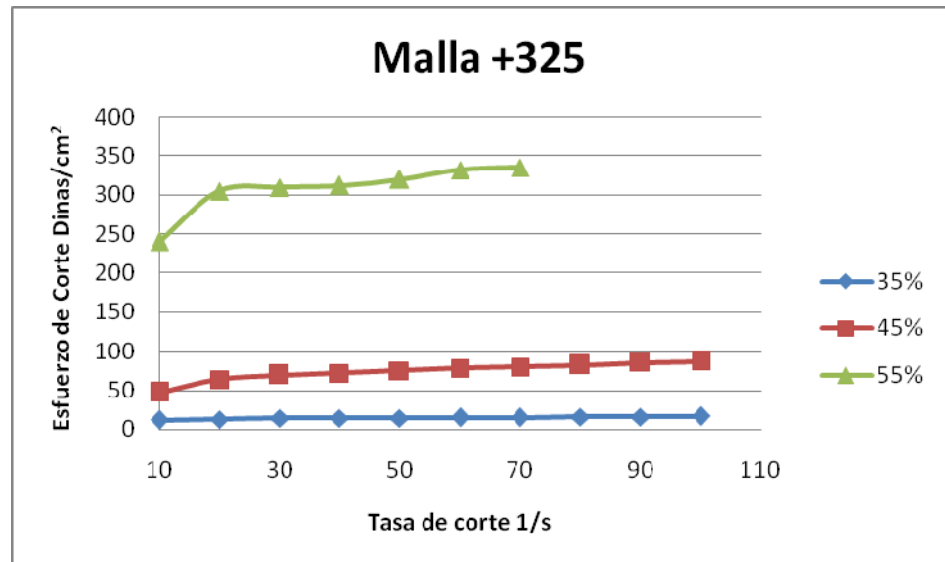
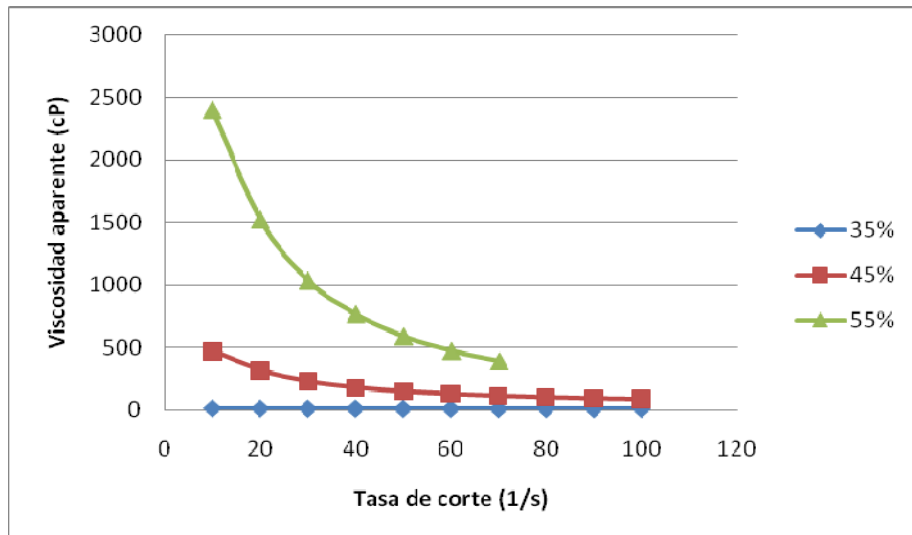


Figura 19. Viscosidad aparente Vs gradiente de velocidad  
Retenido malla 325 (+43 $\mu$ m)



En la Figura 20, se muestran las curvas de esfuerzo de corte con la variación del gradiente de velocidad, y en la figura 21, encontramos las curvas de viscosidad Vs esfuerzo de corte. Además de la tabla 15 que presenta los diferentes valores expuestos en las graficas obtenidas en las diferentes mediciones reológicas mediante la variación del porcentaje de sólidos para el mineral de yeso de 43  $\mu\text{m}$ , en el anexo D se presenta el resto de datos obtenidos para esta pulpa, como lo es torque, Temperatura, Aguja utilizada y la velocidad.

TABLA 15. Esfuerzo de corte y viscosidad aparente.  
Pasante malla 325 (-43 $\mu\text{m}$ )

% sólidos	25		35		45		55		65	
$\gamma$ 1/s	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP	$\tau$ Dinas/cm <sup>2</sup>	$\eta$ cP
10	48	477	119	1186	124	1240	139	1393	660	3602
20	57	283	124	620	136	680	151	756	763	3091
30	61	203	125	417	144	479	160	533	900	2055
40	64	159	128	321	149	373	166	416	965	1559
50	66	132	131	261	153	307	171	342	971	1165
60	68	113	133	221	158	263	174	290	981	845
70	70	100	136	194	160	228	176	252	996	660
80	72	90	139	174	161	201	178	223		
85	73	82	140	165	162	188	178	210		
90	76	76	141	161	168	186				

Siendo:  $\tau$  = esfuerzo de corte (y),  $\eta$  = Viscosidad aparente,  $\gamma$  = Gradiente de velocidad(x)

$$\begin{array}{ll}
 y = 31,47x0,190 & R^2 = 0,988 \quad 25\% \\
 y = 97,69x0,078 & R^2 = 0,939 \quad 35\% \\
 y = 92,19x0,129 & R^2 = 0,991 \quad 45\% \\
 y = 106,1x0,119 & R^2 = 0,992 \quad 55\%
 \end{array}$$

Figura 20. Esfuerzo de corte Vs gradiente de velocidad  
Pasante malla 325 (-43 $\mu$ m)

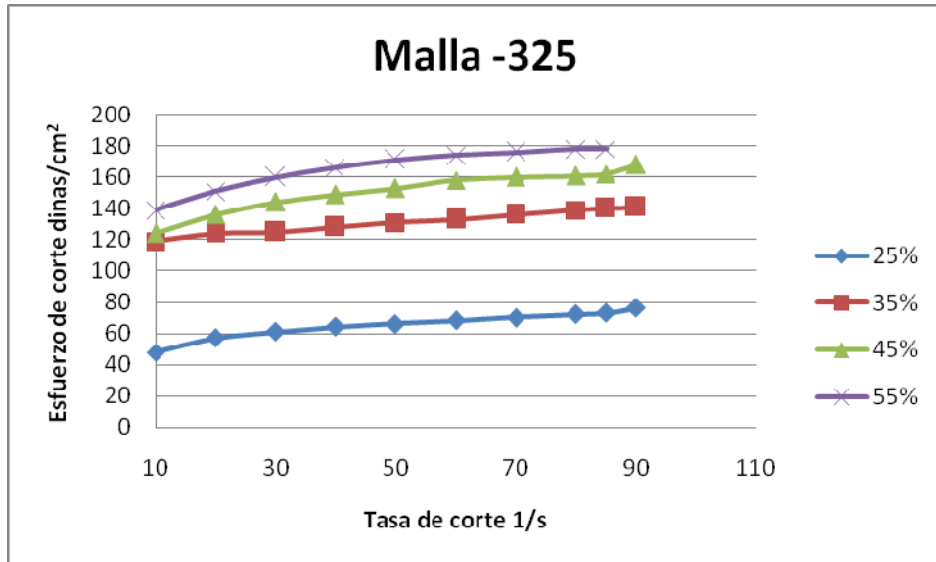
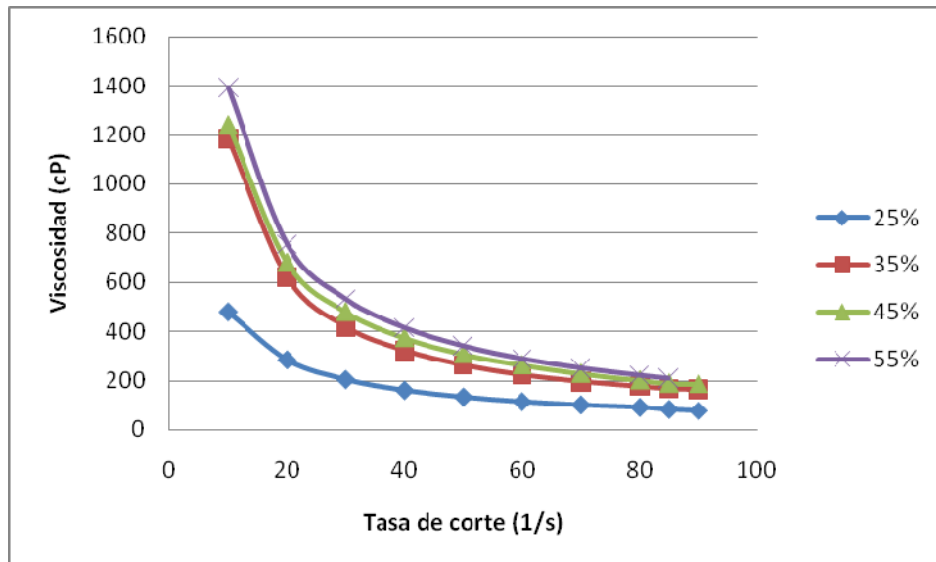
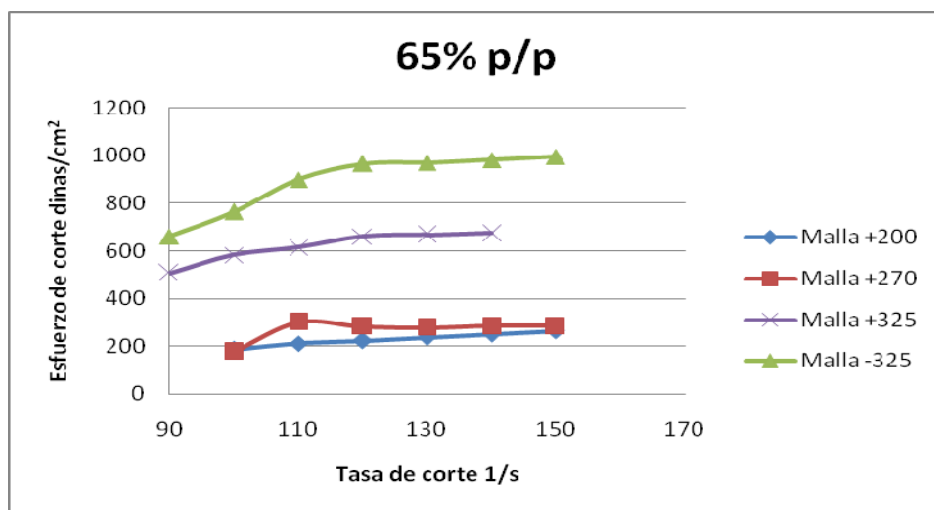


Figura 21. Viscosidad aparente Vs gradiente de velocidad  
Pasante malla 325 (-53 $\mu$ m)



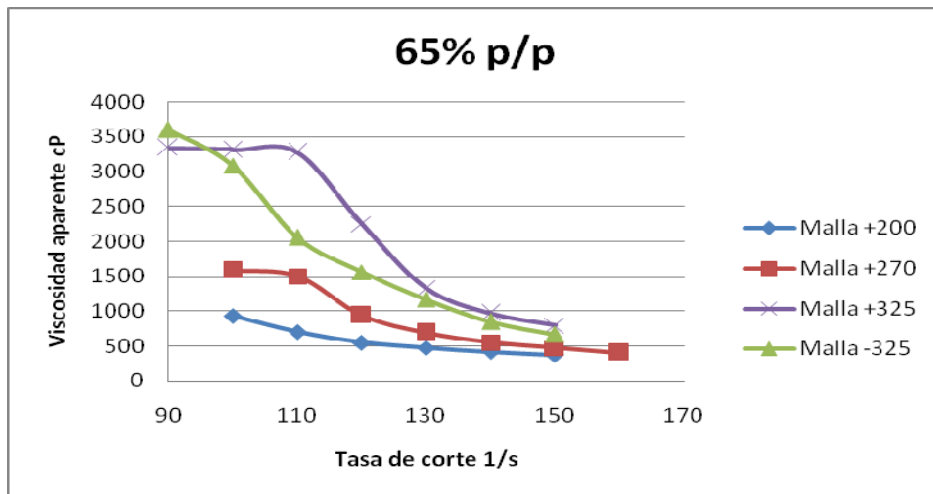
En la Figura 22, se muestran las curvas de esfuerzo de corte con la variación del gradiente de velocidad, y en la figura 23, encontramos las curvas de viscosidad Vs esfuerzo de corte, para las muestras con porcentaje de 65% de sólidos, mostrando una serie de ecuaciones de segundo y tercer grado, desviándose del comportamiento reológico de la ley de potencia que presentan las otras muestras con un porcentaje de sólidos menor a 65%.

Figura 22. Esfuerzo de corte Vs tasa de corte, 65% peso



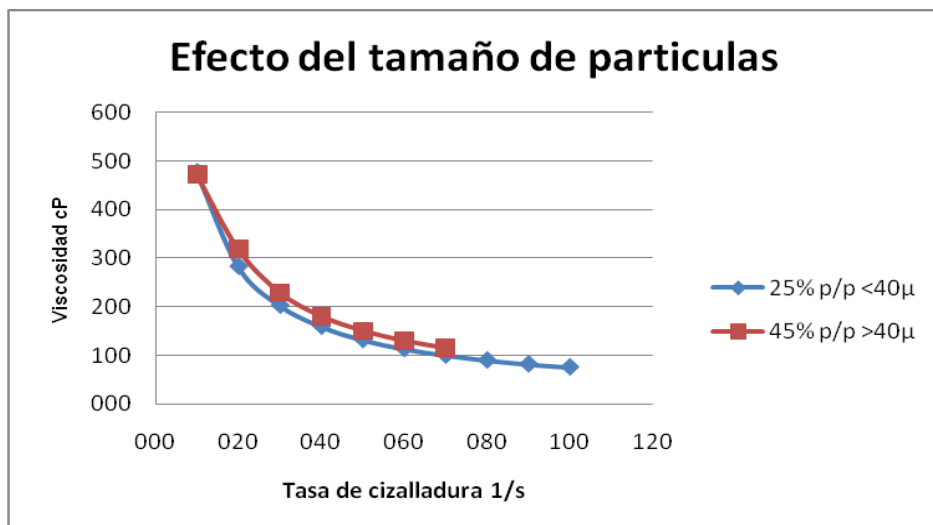
Malla 200	$y = 0,004x^2 + 1,726x$	$R^2 = 0,992$
Malla 270	$y = 0,006x^3 - 2,389x^2 + 308,3x - 12885$	$R^2 = 0,886$
Malla 325	$y = -0,060x^2 + 18,16x - 691,8$	$R^2 = 0,989$
Malla +325	$y = 0,001x^3 - 0,612x^2 + 94,98x - 3893,$	$R^2 = 0,984$

Figura 23. Esfuerzo de corte Vs viscosidad aparente, 65% peso



La gráfica 25, se muestra el efecto que tiene el tamaño de partículas en la viscosidad de las pulpas minerales de yeso.

Figura. 24. Variación de la viscosidad en función de la tasa de cizalladura, para diferentes tamaños de partículas.



En la tabla 16 se muestra los diferentes valores de viscosidad determinados para cada tamaño de partícula así como la viscosidad determinada según el modelo de Krieger-Dougherty, para una tasa de cizalladura de 90 1/s, además las diferentes ecuaciones que estos datos representan, presentándose en la figura 26 las graficas comparativas de las diferentes viscosidades encontradas por el modelo y las experimentales determinadas en el laboratorio.

Tabla 16. Valores comparativos para el modelo de Krieger-Dougherty.

Viscosidad aparente Vs % peso de yeso  $\dot{\gamma} = 90$  T= 23 °C,

%	200		270		325		-325	
	$\eta$ Exp. cP	$\eta$ modelo cP	$\eta$ Exp. cP	$\eta$ modelo cP	$\eta$ Exp. cP	$\eta$ modelo cP	$\eta$ Exp. cP	$\eta$ modelo cP
25	2	1,85					76	108,92
35	4	4,22	21	18,52	9	13,9	161	164,22
45	8	8,96	81	90,72	94	73,46	186	238,9
55	20	17,92	452	392	350	308,8	350	337,6
65			1582	1514				

Ecuaciones del modelo Krieger-Dougherty, para  $\phi_m = 0,75$

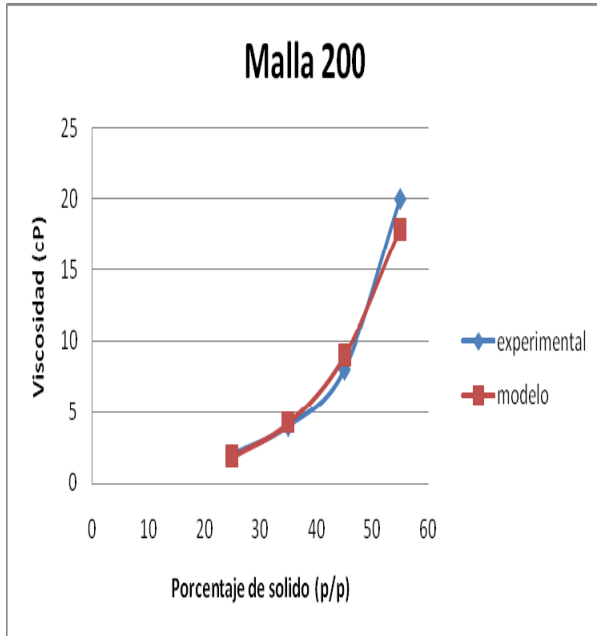
$$\text{Malla 200} \quad n_s = 0,153 \left( 1 + \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{8,660} \quad R^2 = 0,988 \quad (11)$$

$$\text{Malla 270} \quad n_s = 0,017 \left( 1 + \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{18,26} \quad R^2 = 0,996 \quad (12)$$

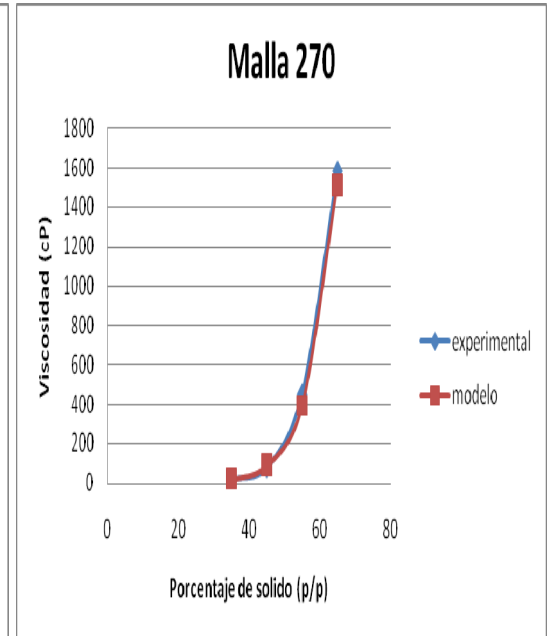
$$\text{Malla 325} \quad n_s = 0,016 \left( 1 + \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{17,94} \quad R^2 = 0,962 \quad (13)$$

$$\text{Malla -325} \quad n_s = 31,54 \left( 1 + \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{4,308} \quad R^2 = 0,934 \quad (14)$$

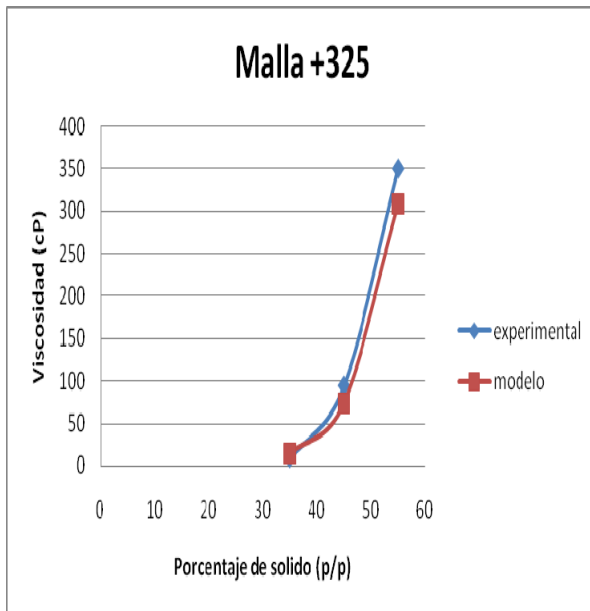
Figura 25 (A, B, C y D). Viscosidad aparente Vs % yeso en peso  $\gamma = 90$  T= 23 °C,



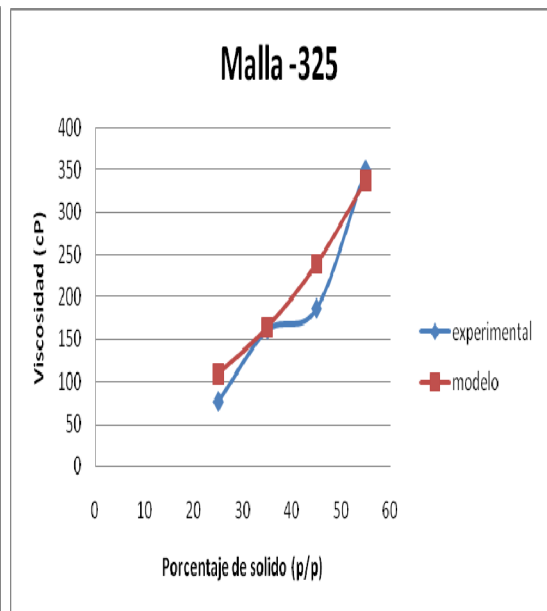
A: Tamaño de partícula +200m



B: Tamaño de partícula +270m



C: Tamaño de partícula +200m



D: Tamaño de partícula +200m

### 3.3 VARIACIÓN DE DENSIDAD DE LA PULPA

En la figura 26 y la tabla 17, se puede observar que la densidad de las muestras aumenta en la medida en que se aumenta el contenido de sólidos en la misma, presentando un aumento en la viscosidad al presentarse una variación de la densidad. (Ver fig. 27).

Tabla 17 Valores de la densidad y viscosidad de las pulpas minerales de yeso, según la variación del porcentaje de sólidos.

% sólidos	Densidad de pulpa [lb/galón]	Viscosidad [cP]
13	9	
17	9,3	
21	9,6	
25	10	100
35	10,81	194
45	12,31	228
55	14,21	252
65	16,51	660

Figura 26. Variación de la densidad de pulpa Vs porcentaje de sólidos

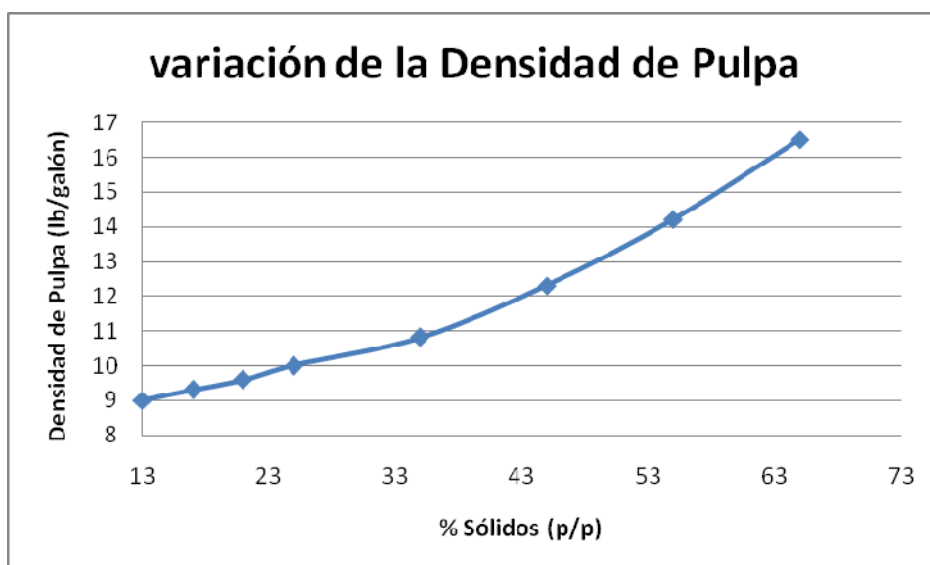
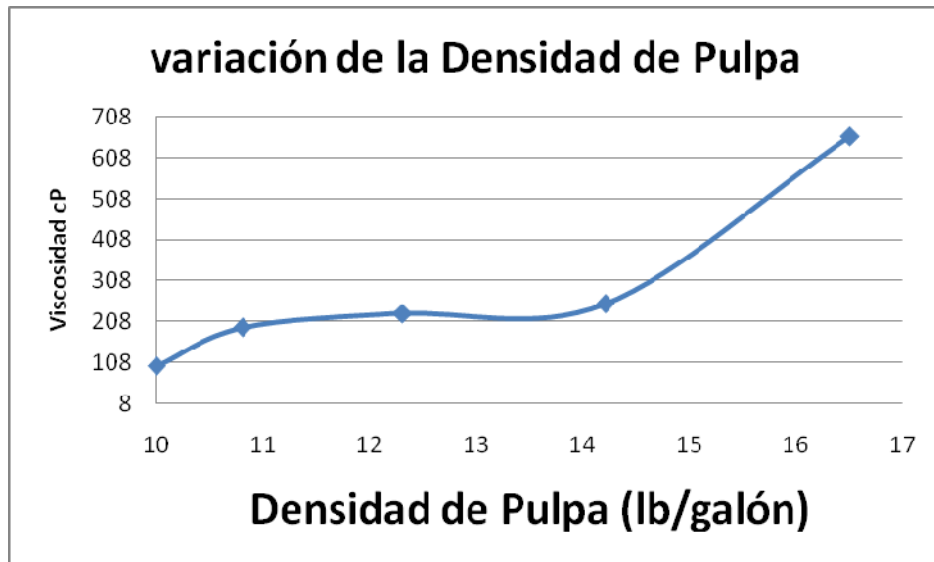


Figura 27. Variación de la Viscosidad Vs densidad de pulpa  $\dot{\gamma} = 90 \text{ 1/s}$



Las pulpas minerales fueron preparadas utilizando cada fracción de partícula (retenido en las mallas +200, +270, +325 y -350), variando únicamente el porcentaje de sólidos, manteniendo siempre constante la temperatura.

En segundo caso, las muestras se prepararon, utilizando una condición de máxima defloculación, y observando las condiciones indicadas en que se debía trabajar el mineral durante la molienda del mismo, es decir, con el objetivo de determinar la concentración adecuada de defloculante que ofreciera una reducción considerable en la viscosidad de las pulpas minerales de yeso, y ver la influencia de ésta cantidad de reactivo en la molienda del mineral.

### 3.4 CURVA DE VOLUMEN – DEFLOCULACION

Los valores de defloculación máxima determinada para las muestras de yeso, se determinaron de acuerdo con los procedimientos descritos en la sección 2.8.1.1

La curva de defloculación presentada en la figura 29 muestra que el yeso llega a la máxima defloculación con una concentración de 4%, mayor a este porcentaje se produce una pequeña estabilidad de la viscosidad y empieza a presentarse un efecto opuesto, es decir un aumento en la viscosidad.

Al examinar la figura 29 se puede visualizar que se presenta una disminución de la viscosidad considerable que era lo que se esperaba, siendo que el efecto real de este proceso de defloculación la reducción de la cantidad de agua necesitada para mantener la pasta en un rango de viscosidad constante.

Mostrándose de igual forma en la tabla 18, se puede prever que la disminución de la viscosidad no se debe a la resistencia ofrecida por el mineral al girar el rotor, ya que esta permanece constante en una tasa de cizalladura de 85 1/s. En el anexo E se presenta el resto de datos obtenidos para esta pulpa, como lo son el torque, aguja utilizada, Temperatura y la velocidad.

Tabla 18. Valores determinados para la curva de defloculación.

2% Sólido		3% Sólido		4% Sólido		5% Sólido	
Shear Rate [1/s]	Viscosidad [cP]	Shear Rate [1/s]	Viscosidad [cP]	Shear Rate[1/s]	Viscosidad [cP]	Shear Rate[1/s]	Viscosidad [cP]
85	120	85	100	85	85	85	85
85	114	85	92	85	83	85	90
85	99	85	88	85	81	85	92
85	94	85	88	85	82	85	94
85	91	85	90	85	83	85	94
85	91	85	93	85	87	85	96
85	90	85	096	85	88	85	
	$\Sigma=99,8857$		$\Sigma=92,5371$		$\Sigma=84,085$		$\Sigma=91,8667$

Figura 28. Variación de la viscosidad Vs contenido de reactivo adicionado a la pulpa de mineral de yeso.

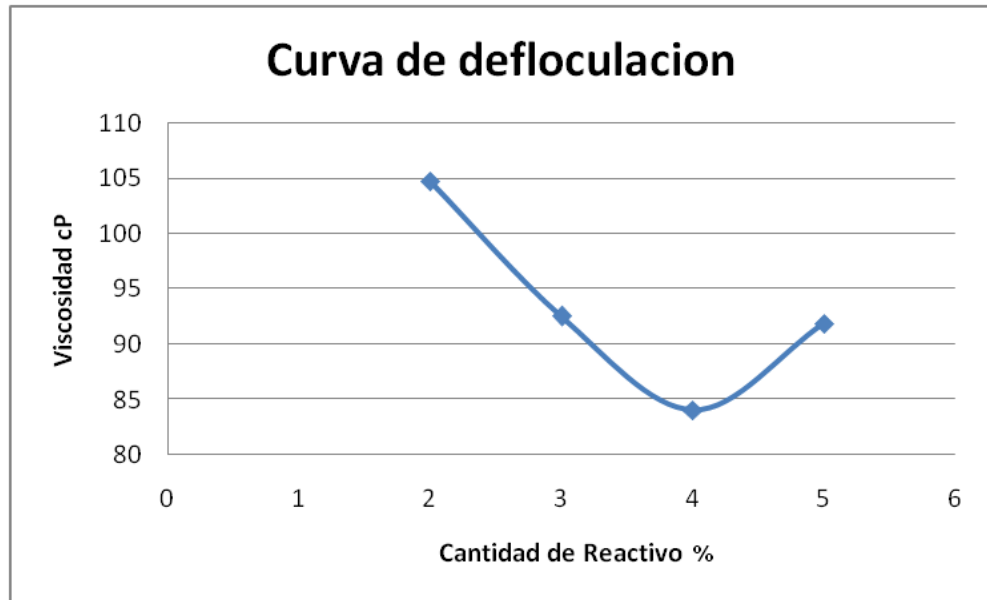
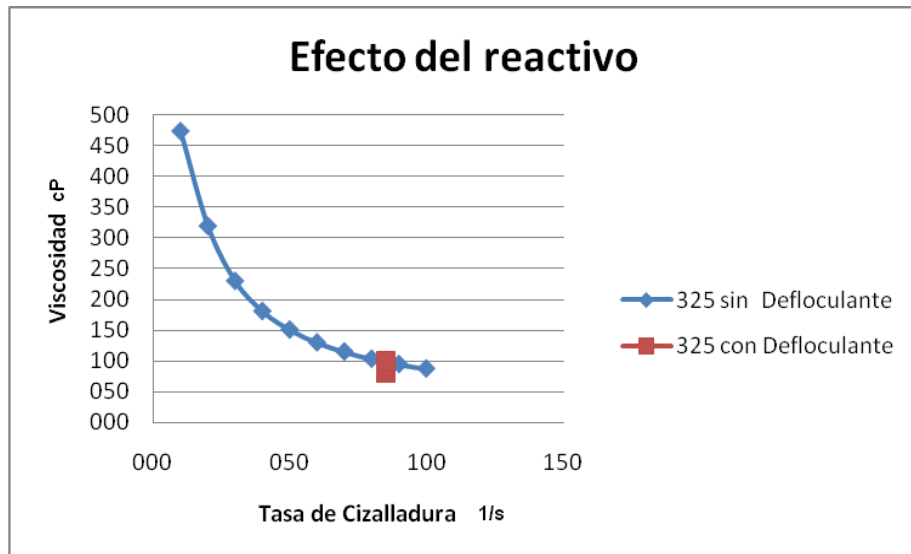


Figura 29. Variación de la viscosidad con la tasa de cizalladura, mostrando la influencia del silicato de sodio en el comportamiento reológico de la pulpa.



### 3.5 ANALISIS EN LA MOLIENDA DEL MINERAL

Para observar la aplicación del estudio reológico realizado, se hicieron pruebas para la molienda, presentando los siguientes resultados:

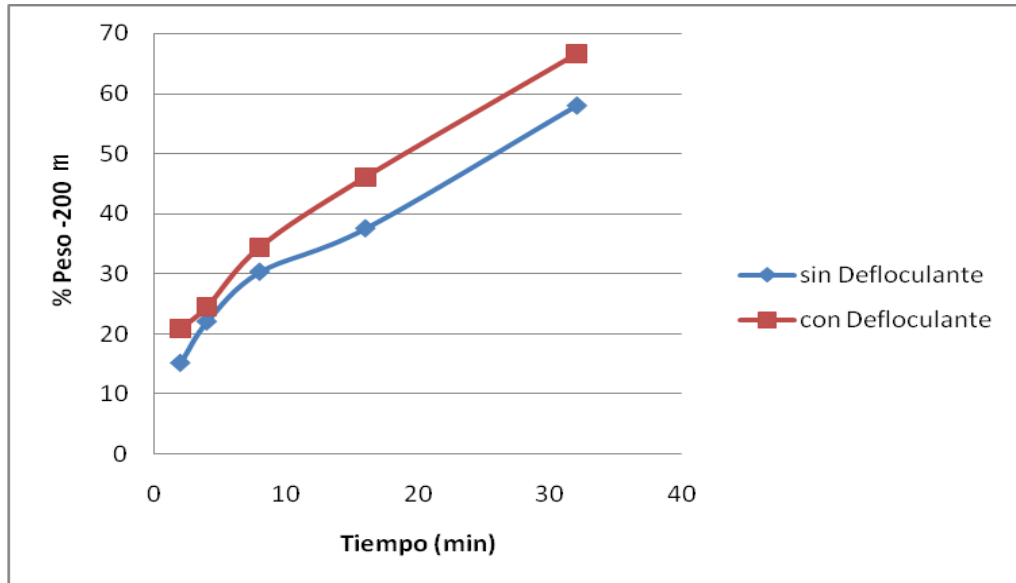
Primero se efectuaron las pruebas preliminares para observar la influencia de la viscosidad, expresado en las condiciones en que se realizaron las pruebas reológicas anteriormente presentadas.

Se realizó una molienda con y sin ningún tipo de aditivos, utilizando la cantidad indicada en la curva de defloculación (figura 28), tomando como variable de respuesta la cantidad de mineral pasante de la malla Tyler #200, mostrado en la tabla 19.

Tabla 19. Pesos de mineral retenido para dos moliendas una con y sin reactivo, para diferentes tiempos de moliendas.

<b>Tiempo de molienda (minutos)</b>	<b>Peso mineral pasante (gr) (sin reactivo)</b>	<b>% peso de mineral</b>	<b>Peso mineral pasante (gr) (con reactivo)</b>	<b>% peso de mineral</b>
<b>2</b>	130	<b>15.17</b>	<b>179</b>	<b>20.88</b>
<b>4</b>	189	<b>22.05</b>	<b>210</b>	<b>36.17</b>
<b>8</b>	269	<b>31.39</b>	<b>295</b>	<b>34.45</b>
<b>16</b>	322	<b>37.57</b>	<b>395</b>	<b>46.09</b>
<b>32</b>	497	<b>57.99</b>	<b>571</b>	<b>66.62</b>

Figura 30. Variación del tiempo de molienda Vs peso de mineral retenido, para dos moliendas una sin reactivo y otra con 4% silicato de sodio.



Como se muestra en la figura 30, la influencia que tiene la adición de un aditivo, en este caso el silicato de sodio en la molienda del mineral en estudio, expresando de la misma forma la relación que tienen las propiedades reológicas como la viscosidad, en el proceso de una molienda en la industria, indicando que a medida que la viscosidad de la pulpa se disminuye la molienda se es favorecida.

Al analizar la grafica es posible afirmar que se presenta un aumento en el pasante de la malla Tyler #200 en la medida que se aumenta el tiempo, presentando mejores resultados para tiempos mayores a 15 minutos, por esta razón se deben realizar las pruebas experimentales para aplicar a la industria estas condiciones de trabajo.

La tabla 20 muestra los resultados obtenidos para los diferentes tiempos de molienda.

Tabla 20. Resultados en porcentaje en peso para las variables en la etapa de molienda.

Nº de Prueba	% de Sólidos	t ( min)	Alimento [m]	Resultados % peso -200m
1	20	15	100	40.5
2	20	15	170	42.3
3	20	25	100	59.57
4	20	25	170	57.10
5	35	15	100	43.56
6	35	15	170	44.97
7	35	25	100	62.42
8	35	25	170	62.51

En la tabla 20, encontramos que los mejores resultados para la molienda son los obtenidos en las pruebas #7 y #8, donde se obtienen los mayores porcentajes en peso de sólidos, favoreciendo los de la prueba # 7, que muestra porcentajes similares a un tamaño de partícula menor.

Para efectos industriales, los resultados a aplicar serian los de la prueba # 7 por que los beneficios a nivel económico serian mayores, por el ahorro de energía en la etapa de reducción de tamaño del mineral.

Comparando los datos suministrados por la empresa Inyesa Ltda<sup>15</sup>, encontramos que después realizado el secado, el yeso pasa a un molino de martillos (24HP a 3600rpm y transmisión por correas), sale un 90% de la cantidad alimentada con un tamaño menor a 149 micrómetros, lo que fundamenta aun más la prueba #7.

<sup>15</sup> QUINTERO INFANTE. D.H & VERGEL ROYERO D.C. MEJORAMIENTO DEL PROCESO DE BENEFICIO DE MINERALES DE YESO EN INYESA Ltda. Pág. 31.

## CONCLUSIONES

- Para las pulpas de mineral de yeso de la Mina “LA NACUMA” se determinaron parámetros reológicos como el índice de cizalladura, permitiendo la clasificación de las pulpas estudiadas mediante los diferentes diagramas reológicos, los cual según su análisis se puede concluir en forma general que las diferentes mezclas presentan un comportamiento propio de un fluido pseudoplastico, con un índice de flujo (n) disminuyendo en la medida que aumentaba el porcentaje de yeso en las mismas.
- Para las pulpas preparadas con material retenido en la malla Tyler 200, se encontró una tendencia de un fluido dilatante, decir, un aumento en la viscosidad al aumentar la velocidad de corte, generando inestabilidad en la pulpa debido al efecto de expansión de esta.
- Los resultados obtenidos para las pulpas menores a 55% de sólidos, se ajustaron al modelo de la ley de potencia sin un esfuerzo de fluencia en el rango de velocidades de cortes trabajadas, presentando una desviación mínima entre lo observado y lo predicho por el modelo, como lo muestran los coeficientes de correlación  $R^2$  mayores a 0.910.
- Las pulpas minerales estudiadas, se caracterizaron por presentar una disminución en la viscosidad al aumentar la velocidad de corte, de manera que analizando el punto de vista de aplicación, sería un comportamiento trascendental porque facilitaría el bombeo y transportes de éste tipo de mezclas.

- Entre los factores que afectan la viscosidad de las pulpas, la mayor influencia está dada por el tamaño de las partículas y la concentración de los sólidos, que fueron las variables tenidas en cuenta en la realización de este trabajo de investigación, cuando el tamaño de partícula disminuye, aumenta la viscosidad; igualmente se pudo determinar que a medida la concentración de yeso aumenta, la viscosidad también lo hace, es decir entre mayor sea la concentración de partícula mayor será la interrelación entre estas, convirtiéndose en un aumento en la viscosidad.
- Verificamos la influencia que presentan los reactivos químicos, como el silicato de sodio en pulpas mineras de yeso, con la capacidad de modificar el comportamiento reológico de estas (pulpas), brindándole buena estabilidad y viscosidad a las diferentes mezclas estudiadas.
- Comparando los resultados obtenidos durante la etapa de molienda, con en el mejoramiento en las propiedades reológicas mediante la acción del silicato de sodio como defloculante, se puede observar que la molienda es favorecida, debido a que se presentó un aumento en el porcentaje de mineral pasante de la malla Tyler 200 con respecto al porcentaje pasante de la molienda en los diferentes tiempos sin la adición del defloculante.
- Comparando la densidad con la viscosidad, para las pulpas trabajadas en la investigación, la relación reológica existente es un aumento en la viscosidad a medida que aumenta la densidad.

- La molienda es considerada como una de las operación importantes en el procesamiento de minerales, se caracteriza por presentar el mayor gasto de energía, por lo que es importante hacer un buen diseño en el circuito de molienda y seleccionar el mineral con las características favorables, donde se reduzca la energía utilizada en el proceso; en este trabajo de investigación, se encontró que para el yeso, los mejores resultados están dados para un porcentaje de sólidos de 35 % p/p, tamaño de partículas mayor a 149 micrones, tiempo de molienda de 25 minutos y 4% p/p de silicato de sodio.

## RECOMENDACIONES

- Indicar que para estudios con estas características, hacer las pruebas siempre con el mismo reometro, teniendo en cuenta iguales parametros de calibración, utilizando una aguja de igual número para la respectiva medición de las propiedades reológicas de las pulpas minerales a estudiar.
- Tener en cuenta para estudios posteriores el efecto del pH en la pulpa mineral y mirar el efecto que causa este en las propiedades reologicas, variando el contenido del pH, tanto para la preparacion de la pulpa con aditivo como en la preparacion de la misma sin ningun tipo de aditivos.
- Realizar un análisis de la pulpa mineral, variando la temperatura y mirar como se ven afectadas las propiedades reológicas al medirlas teniendo en cuenta diferentes rangos de ésta (temperatura).
- Hacer un estudio de pulpas minerales de yeso, teniendo en cuenta mezclas de diferentes tamaños de particulas para la medición de las propiedades reológicas.
- Estudiar el comportamiento que tiene al pulpa mineral al hacer estudios con aditivos diferentes al que se utilizó en este proyecto de investigación y mirar cual es más benéfico a nivel industrial, tanto en la parte de producción como en la parte económica.
- Mirar las otras posibles aplicaciones de las pulpas minerales de yeso, en procesos como trasporte, flotación y espesamientos de pulpas.

## BIBLIOGRAFIA

- MORENO, Rodrigo. Reología de suspensiones cerámicas. Madrid: consejo superior de investigaciones científicas, 2005. P. 17-72
- BENVINDO, adao & SAMPAIO. Joao Alves. Tratamento de Minerios. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologian Mineral y Ministerio da Ciencia e tecnologia, 2004. P. 535-568
- POSA, Mario Valente, Reologia No Tratamento de Minéiros. Capitulo 13, Rio de Janeiro. 2004. P. 551
- Arias Salazar, Luis Fernando. *Caracterización de las Suspensiones Minerales en los Circuitos de Molienda en la Producción de Cemento Blanco*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2001.
- Bustamante, M. O. *Reología de suspensiones: Modelación Matemática del Tensor esfuerzo y de la Viscosidad de una Suspensión Mineral* (Tesis de Doctorado). Chile: Universidad de concepción; 2002.
- Bustamante, M. Oswaldo. *Viscosidad de Suspensiones Minerales Bajo una Aproximación Termodinámica*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas , 2001
- Claville de, Jesper. *Viscosity Models for Silicate Melts*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. Article in Press. ELSEVIER, 2004
- KLEIN, Cornelius & HULBURT C. *Manual de Mineralogía*. Reverté, 2001
- Makosko, Christopher W. Rheology. *Principles, Measurements and Application*. Wiley-VCH, 1994
- Potter, M; Wiggert, D Honzo. *Mecánica de Fluídos*. Prentice Hall, 1998.
- Wildemuth, C. R. & Williams, M. C. *A new interpretation of viscosity and yield stress in dense slurries; coal and other irregular particles*. Reologica Acta 24: 75-91, 1985

- Zaman, A. A. *Techniques in Rheological Measurements: Fundamentals and Applications*. The NSF Engineering Research Center of Particle Science & Technology, University of Florida, 1998.
- Barnes H.A., Hutton & Walters. *An Introduction to Rheology*. ELSEVIER 1989
- Arias Salazar, Luis Fernando. *Caracterización de las Suspensiones Minerales en los Circuitos de Molienda en la Producción de Cemento Blanco*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2001.
- 5. Thomas, D. G. Transport Properties of Suspension: VII. A Note on the Viscosity of Newtonian Suspensions of Uniform Spherical Particles. *J. of Colloid Science*, 20:267-277, 1965.
- 7. Krieger, I.; Dougherty, T. *Transactions of the Society of Rheology*, 3:137-152, 1959.
- 8. Sherman, P. Rheological properties of emulsions. In chapter 7, *Encyclopedia of Emulsions*, Ed. P. Becher, Marcel Dekker, Vol. 1. New York, 1983
- 9. Polinski, A.; Ryan, M.; Gupta, R.; Seshadi, S.; Frechette, F. *Journal of Rheology*, 32(7):703-735, 1988.
- 10. yucel, o. The 7<sup>th</sup> International Symposium on Coal Slurry Fuels, u.s. Eepartment of Energy. New Orleans, 1985. P. 91-101.
- 11. JINESCU, V. The Rheology of Suspensions. *International Chemical engineering*. July 1974. p. 397-418
- 12 CHONG, J.S. CHRISTIANSEN, E.B. and BAER, A.D. Rheology of Concentrated Suspensions. *Journal of applied polymer science*. 1971. P. 2007-2021
- Claville de, Jesper. *Viscosity Models for Silicate Melts*. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. Article in Press. ELSEVIER, 2004.
- Makosko, Christopher W. *Rheology. Principles, Measurements and Application*. Wiley-VCH, 1994.
- JIAHUI Peng, Y JINDONG QU, “Adsorption Characteristics Of Water-Reducing Agents On Gypsum Surface And Its Effect On The Rheology Of Gypsum Plaster”, Department of Building Materials, Chongqing University, Chongqing, 12 November 2003.

- S. Hess \*, C. Aust, L. Bennett, Y M. Kröger, “Rheology: From Simple and to Complex Fluids”, *Institut für Theoretische Physik, Technische Universität Berlin*.
- Eric Finot , Eric Lesniewska , Y Jean-Pierre Goussard, “Correlating surface forces with surface reactivity of gypsum crystals by atomic force microscopy. Comparison with rheological properties of plaster” *Laboratoire de Physique L.P.U.B., UMR CNRS-Université de Bourgogne* 2000.
- S.M.F.D. Syed Mustapha, Y T.N. Phillips. “Viscometric flow interpretation using qualitative and quantitative techniques”, Department of Computer Science, University of Wales, Aberystwyth. 2000.
- R.M. Turian. “Characterization, Settling, And Rheology Of Concentrated Fine Particulate Mineral Slurries”. *Department of Chemical Engineering, University of Illinois at Chicago*. 2000.
- Arauz. D.S. Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. 2009
- AENOR, (2004). UNE-EN 13279-2 Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.
- BURG, J., LÓPEZ, M. y MONJO, J., (1976). El yeso en España y sus aplicaciones constructivas. Madrid: Del Castillo.
- CASPAR, J.P. y ET AL, (1996). *Influencia de la microestructura del yeso fraguado sobre sus propiedades mecánicas, XXI Congreso de la Eurogypsum*, 1996.
- DELUIL, M., (1979). Gypsum construction parts. *Chemical Abstracts*, Vol. 91, pp. 145114d.
- GARATE, I., (1999). Artes de los yesos. Yeserías y Estucos. Madrid: Munilla-Lería.
- HULBURT, C. y KLEIN, C., (1991). Manual De Mineralogía De Dana. Barcelona: Reverté.

## ANEXO A

### Datos reológicos de pulpas minerales de yeso +74 $\mu$

A continuación se presentan las tablas obtenidas en las pruebas reológicas para las diferentes muestras preparadas con mineral de yeso retenido en la malla Tyler 200, en diferentes concentraciones en peso de sólidos.

25% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
2	74	2	2	90	22	00:30.2	ULA	RV
2	82	2	2	100	22	00:30.2	ULA	RV
2	90	3	3	110	22	00:30.2	ULA	RV
3	98	4	3	120	22	00:30.2	ULA	RV
3	106	5	4	130	22	00:30.2	ULA	RV
4	114	7	5	140	22	00:30.2	ULA	RV
4	123	8	6	150	22	00:30.2	ULA	RV
4	131	9	7	160	22	00:30.2	ULA	RV
5	139	10	8	170	22	00:30.2	ULA	RV
5	147	11	9	180	22	00:30.2	ULA	RV
5	155	13	10	190	22	00:30.2	ULA	RV

35% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
4	74	4	3	090	22	00:30.2	ULA	RV
6	82	7	6	100	22	00:30.2	ULA	RV
8	90	16	13	110	22	00:30.2	ULA	RV
9	98	25	19	120	22	00:30.2	ULA	RV
13	106	29	22	130	22	00:30.2	ULA	RV
17	114	35	27	140	22	00:30.2	ULA	RV
20	123	41	32	150	22	00:30.2	ULA	RV
22	131	45	35	160	22	00:30.2	ULA	RV
24	139	53	41	170	22	00:30.2	ULA	RV
26	147	59	47	180	22	00:30.2	ULA	RV

45% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
8	74	9	7	90	22	00:30.2	ULA	RV
7	82	9	7	100	22	00:30.2	ULA	RV
12	90	10	8	110	22	00:30.2	ULA	RV
15	98	14	11	120	22	00:30.2	ULA	RV
18	106	22	17	130	22	00:30.2	ULA	RV
20	114	35	27	140	22	00:30.2	ULA	RV
22	123	42	32	150	22	00:30.2	ULA	RV
26	131	53	42	160	22	00:30.2	ULA	RV
30	139	66	52	170	22	00:30.2	ULA	RV
34	147	78	61	180	22	00:30.2	ULA	RV
38	155	92	72	190	22	00:30.2	ULA	RV

55% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
20	74	23	17	90	22	00:30.1	ULA	RV
17	82	24	18	100	22	00:30.2	ULA	RV
18	90	25	19	110	22	00:30.2	ULA	RV
18	98	27	21	120	22	00:30.2	ULA	RV
19	106	31	24	130	22	00:30.2	ULA	RV
21	114	38	30	140	22	00:30.2	ULA	RV
25	123	48	37	150	22	00:30.2	ULA	RV
27	131	55	43	160	22	00:30.2	ULA	RV
32	139	69	54	170	22	00:30.2	ULA	RV

65% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
930	59	17	186	20	23	00:45.2	SC4-31	RV
700	88	19	210	30	23	00:45.2	SC4-31	RV
552	118	20	221	40	23	00:45.2	SC4-31	RV
470	147	22	235	50	23	00:45.2	SC4-31	RV
417	176	23	250	60	23	00:45.2	SC4-31	RV
376	206	24	263	70	22	00:45.2	SC4-31	RV

## ANEXO B

### Datos reológicos de pulpas minerales de yeso +53 $\mu$ m

A continuación se presentan las tablas obtenidas en las pruebas reológicas para las diferentes muestras preparadas con mineral de yeso retenido en la malla Tyler 270, en diferentes concentraciones en peso de sólidos.

35% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
21	74	7	3	90	21	00:30.2	ULA	RV
15	82	7	5	100	21	00:30.3	ULA	RV
15	90	7	6	110	21	00:30.2	ULA	RV
15	98	8	6	120	21	00:30.2	ULA	RV
15	106	8	7	130	21	00:30.2	ULA	RV
15	114	8	8	140	21	00:30.2	ULA	RV
15	123	9	9	150	21	00:30.2	ULA	RV
15	131	10	9	160	21	00:30.2	ULA	RV
15	139	11	10	170	22	00:30.2	ULA	RV
14	147	14	10	180	22	00:30.2	ULA	RV
7	155	17	13	190	22	00:30.2	ULA	RV
8	164	20	16	200	22	00:30.2	ULA	RV
9	172	24	19	210	22	00:30.2	ULA	RV

45% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
81	74	14	11	90	22	00:30.2	ULA	RV
72	82	15	12	100	22	00:30.2	ULA	RV
60	90	15	13	110	22	00:30.2	ULA	RV
51	98	16	14	120	22	00:30.2	ULA	RV
42	106	16	15	130	22	00:30.2	ULA	RV
39	114	16	16	140	22	00:30.2	ULA	RV
27	123	17	16	150	22	00:30.2	ULA	RV
21	131	18	16	160	22	00:30.2	ULA	RV

55% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
452	8	11	45	90	22	00:30.2	SC4-18	RV
260	15	12	52	100	22	00:30.2	SC4-18	RV
183	23	13	55	110	22	00:30.2	SC4-18	RV
144	30	14	57	120	22	00:30.2	SC4-18	RV
119	38	14	61	130	22	00:30.2	SC4-18	RV
102	45	15	61	140	22	00:30.2	SC4-18	RV
090	53	15	63	150	22	00:30.2	SC4-18	RV
081	61	15	65	160	22	00:30.2	SC4-18	RV
073	68	16	66	170	22	00:30.2	SC4-18	RV
068	76	16	68	180	22	00:30.2	SC4-18	RV

65% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
1.582	36	10	177	90	23	00:30.2	SC4-34	RV
1.496	71	17	299	100	23	00:30.2	SC4-34	RV
938	107	16	281	110	23	00:30.2	SC4-34	RV
690	143	15	276	120	23	00:30.2	SC4-34	RV
552	179	15	276	130	23	00:30.2	SC4-34	RV
472	214	16	283	140	23	00:30.2	SC4-34	RV
404	250	16	283	150	23	00:30.2	SC4-34	RV

## ANEXO C

### Datos reológicos de pulpas minerales de yeso +43µm

A continuación se presentan las tablas obtenidas en las pruebas reológicas para las diferentes muestras preparadas con mineral de yeso retenido en la malla Tyler +325 en diferentes concentraciones en peso de sólidos.

35% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
14	74	16	12	090	22	00:30.2	ULA	RV
13	82	17	13	100	22	00:30.2	ULA	RV
12	90	17	14	110	22	00:30.2	ULA	RV
12	98	18	14	120	22	00:30.2	ULA	RV
11	106	19	14	130	22	00:30.2	ULA	RV
11	114	19	15	140	22	00:30.2	ULA	RV
10	123	20	15	150	22	00:30.2	ULA	RV
10	131	20	16	160	22	00:30.2	ULA	RV
9	139	21	16	170	22	00:30.2	ULA	RV
9	147	21	17	180	22	00:30.2	ULA	RV

45% p/p mineral de yeso							
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle
08	11	47	90	22	00:30.1	SC4-18	RV
15	15	64	100	22	00:30.2	SC4-18	RV
23	16	69	110	22	00:30.2	SC4-18	RV
30	17	72	120	22	00:30.2	SC4-18	RV
38	18	75	130	22	00:30.2	SC4-18	RV
45	18	78	140	22	00:30.2	SC4-18	RV
53	19	80	150	22	00:30.2	SC4-18	RV
61	19	82	160	22	00:30.2	SC4-18	RV
68	20	85	170	22	00:30.2	SC4-18	RV
76	21	87	180	22	00:30.2	SC4-18	RV

55% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
2.405	36	13	240	90	21	00:30.2	SC4-34	RV
1.523	71	17	305	100	21	00:30.2	SC4-34	RV
1.033	107	17	310	110	21	00:30.2	SC4-34	RV
766	143	17	312	120	21	00:30.2	SC4-34	RV
588	179	16	320	130	21	00:30.2	SC4-34	RV
472	214	16	332	140	21	00:30.2	SC4-34	RV
389	250	15	335	150	21	00:30.2	SC4-34	RV

65% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
3.340	71	37	462	20	22	00:30.2	SC4-34	RV
3.315	107	54	507	30	22	00:30.2	SC4-34	RV
3.284	143	50	582	40	22	00:30.2	SC4-34	RV
1.330	179	37	661	50	22	00:30.2	SC4-34	RV
968	214	32	668	60	22	00:30.2	SC4-34	RV
794	250	31	674	70	22	00:30.2	SC4-34	RV

## ANEXO D

### Datos reológicos de pulpas minerales de yeso -43 $\mu$ m

A continuación se presentan las tablas obtenidas en las pruebas reológicas para las diferentes muestras preparadas con mineral de yeso pasante en la malla Tyler 325 en diferentes concentraciones en peso de sólidos.

25% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
477	8	11	48	10	22	00:30.2	SC4-18	RV
283	15	13	57	20	22	00:30.2	SC4-18	RV
203	23	14	61	30	22	00:30.2	SC4-18	RV
159	30	15	64	40	22	00:30.2	SC4-18	RV
132	38	16	66	50	22	00:30.2	SC4-18	RV
113	45	16	68	60	21	00:30.2	SC4-18	RV
100	53	17	70	70	21	00:30.2	SC4-18	RV
090	61	17	72	80	21	00:30.2	SC4-18	RV
082	68	17	73	90	21	00:30.2	SC4-18	RV
076	76	18	76	100	21	00:30.2	SC4-18	RV

35% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
1.186	29	11	119	10	22	00:45.2	SC4-31	RV
620	59	11	124	20	22	00:45.2	SC4-31	RV
417	88	11	125	30	22	00:45.2	SC4-31	RV
321	118	12	128	40	22	00:45.2	SC4-31	RV
261	147	12	131	50	22	00:45.2	SC4-31	RV
221	176	12	133	60	22	00:45.2	SC4-31	RV
194	206	12	136	70	22	00:45.2	SC4-31	RV
174	235	13	139	80	22	00:45.2	SC4-31	RV
165	250	13	140	85	22	00:45.2	SC4-31	RV
161	250	13	141	85	22	00:45.2	SC4-31	RV

45% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
1.240	29	11	124	10	22	00:30.2	SC4-31	RV
680	59	13	136	20	22	00:30.2	SC4-31	RV
479	88	13	144	30	22	00:30.2	SC4-31	RV
373	118	14	149	40	22	00:30.2	SC4-31	RV
307	147	14	153	50	22	00:30.2	SC4-31	RV
263	176	15	158	60	22	00:30.2	SC4-31	RV
228	206	15	160	70	22	00:30.2	SC4-31	RV
201	235	15	161	80	22	00:30.2	SC4-31	RV
188	250	15	162	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
186	250	15	168	85	22	00:30.2	SC4-31	RV

55% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
1.393	029	013	139	010	022	00:30.2	SC4-31	RV
756	059	014	151	020	022	00:30.2	SC4-31	RV
533	088	015	160	030	022	00:30.2	SC4-31	RV
416	118	015	166	040	022	00:30.2	SC4-31	RV
342	147	016	171	050	022	00:30.2	SC4-31	RV
290	176	016	174	060	022	00:30.2	SC4-31	RV
252	206	016	176	070	022	00:30.2	SC4-31	RV
223	235	016	178	080	021	00:30.2	SC4-31	RV
210	250	016	178	085	021	00:30.2	SC4-31	RV

65% p/p mineral de yeso								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
3.602	36	20	660	10	22	00:45.2	SC4-34	RV
3.091	71	34	763	20	22	00:45.2	SC4-34	RV
2.055	107	34	900	30	22	00:45.2	SC4-34	RV
1.559	143	35	965	40	22	00:45.2	SC4-34	RV
1.165	179	33	971	50	22	00:45.2	SC4-34	RV
845	214	28	981	60	22	00:45.2	SC4-34	RV
660	250	26	996	70	22	00:45.2	SC4-34	RV

## ANEXO E

### Tablas de Pruebas Reológicas de Defloculación

A continuación presenta las tablas totales del proceso de defloculación para las pulpas preparadas con el mineral de yeso, en diferentes concentraciones en peso del reactivo.

2% en peso del defloculante								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
120	250	9	102	85	22	00:30.1	SC4-31	RV
114	250	8	084	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
99	250	7	079	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
94	250	7	078	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
91	250	7	077	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
91	250	7	075	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
90	250	7	073	85	22	00:30.2	SC4-31	RV

3% en peso del defloculante								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
100	250	9	97	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
92	250	7	78	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
88	250	7	75	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
88	250	7	75	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
90	250	7	73	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
93	250	7	70	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
96	250	7	89	85	22	00:30.2	SC4-31	RV

4% en peso del defloculante								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
85	250	7	81	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
83	250	6	71	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
81	250	6	71	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
82	250	6	70	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
83	250	7	70	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
87	250	7	65	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
88	250	7	64	85	22	00:30.2	SC4-31	RV

5% en peso del defloculante								
Viscosity [cP]	Speed [rpm]	% Torque	Shear Stress [Dinas/cm <sup>2</sup> ]	Shear Rate [1/s]	Temperature [°C]	Time Interval [s]	Spindle	Model
85	250	7	79	85	22	00:30.2	SC4-31	RV
90	250	7	77	85	25	00:30.2	SC4-31	RV
92	250	7	76	85	24	00:30.2	SC4-31	RV
94	250	7	75	85	24	00:30.2	SC4-31	RV
94	250	7	74	85	24	00:30.2	SC4-31	RV
96	250	8	72	85	24	00:30.2	SC4-31	RV

**ANEXO F**  
**ANALISIS GRANULOMETRICO DE YESO PARA ESTUCO (INYESA LTDA)**

# malla Tyler	Abertura (Dp) [μm]	PESO [gramos]	PESO [%]	ACOMULADO RETENIDO[%]	ACOMULADO PASANTE[%]	F(X)
10	1700	0	0,00	0,00	0,00	3192,89
20	850	0	0,00	0,00	0,00	650,16
35	445	9,2	1,90	1,90	98,10	147,13
50	297	128,7	26,60	28,51	71,49	58,15
100	150	245,2	50,69	79,19	20,81	12,12
140	98	71,45	14,77	93,96	6,04	4,56
200	75	22,7	4,69	98,66	1,34	2,47
-200	0	6,5	1,34	100,00	0,00	0
TOTAL		483,75	100,00			

Ecuación Gavín Shumann  $F(x) = \left[ \frac{x}{k} \right]^m$  ;  $F(x) = \left[ \frac{3,913}{2,296} \right]^{50,61}$

