



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**ESTUDIO REOLÓGICO DE RELAVES BASADO EN TÉCNICAS DE
CARACTERIZACIÓN AVANZADA DE MINERALES**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA,
MENCIÓN METALURGIA EXTRACTIVA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

NICOLÁS IGNACIO URRUTIA CASTELLARO

PROFESOR GUÍA:

LEANDRO VOISIN ARAVENA

PROFESOR CO-GUÍA:

VICTOR MONTENEGRO GONZALEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

CHRISTIAN IHLE BASCUÑÁN

CARSTEN LAUKAMP

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas y Magíster en
Ciencias de la Ingeniería, Mención Metalurgia Extractiva
POR: Nicolás Ignacio Urrutia Castellaro
FECHA: 8/01/2016
PROFESOR GUÍA: Leandro Voisin A.

ESTUDIO REOLÓGICO DE RELAVES BASADO EN TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN AVANZADA DE MINERALES

El manejo de relaves es un tema crucial en minería por el impacto ambiental y los riesgos asociados a largo plazo. Además, el manejo de éstos dentro de la mina implica el uso de sistemas de bombeo que pueden enfrentar detenciones y fallas por cambios en su reología. Por lo anteriormente expuesto, se hace necesario establecer un control sobre la reología de relaves, con el objetivo de tomar acciones que eviten o mitiguen cambios bruscos de ésta y sus efectos adversos.

El objetivo de este trabajo es cuantificar reológicamente la incidencia del contenido de sólidos en volumen, contenido de arcillas (filosilicatos) en la fase sólida y tamaño de partículas en la viscosidad y límite de fluencia de relaves ricos en filosilicatos. Además, se evaluó el uso de técnicas de caracterización avanzada de minerales como herramienta de apoyo para el control predictivo de la reología de relaves. El trabajo desarrollado se enmarca en el proyecto Innova-Corfo “CSIRO-CHILE 10CEII-9007” desarrollado por CSIRO-Chile y el Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Universidad de Chile.

Se realizaron 108 experimentos de reometría sobre relaves con diferentes contenidos de sólidos, arcillas y granulometría de fase sólida, para luego ajustar los resultados a modelos reológicos de Bingham. Posteriormente se ajustaron modelos de regresión lineal para la viscosidad y límite de fluencia de relaves, que consideran como variables explicativas las siguientes: contenido de sólidos en volumen (entre 25% y 40%), contenido de arcillas (filosilicatos) en la fase sólida (0% - 25%), tamaño de partículas (d_{80} entre $43.79\mu\text{m}$ y $86.43\mu\text{m}$) y tipo de arcillas (caolinita y montmorillonita). Dichos modelos fueron luego evaluados con información obtenida de técnicas de caracterización avanzada (QXRD, análisis hiperespectral en HyLogger3 y granulometría por difracción láser) y se evalúa la calidad del ajuste.

Los modelos de regresión obtenidos poseen una buena calidad de ajuste sobre la viscosidad y límite de fluencia ($R^2 > 0.9$). Posteriormente, su implementación con información obtenida de técnicas de caracterización avanzada entregó resultados que muestran una sobreestimación de la viscosidad y límite de fluencia, debido a la detección de contenidos mayores a los reales de filosilicatos.

Se determinó que la influencia del pH es fundamental en el comportamiento de relaves con filosilicatos, pues regula la formación de estructuras en estos minerales, afectando de gran manera la viscosidad y límite de fluencia de las suspensiones. Esta propiedad debiese ser considerada como una variable explicativa en futuros trabajos.

Se puede concluir que las variables propuestas como determinantes del comportamiento reológico de relaves ricos en filosilicatos efectivamente son útiles para estimar con buena precisión la viscosidad y límite de fluencia de éstos, haciendo posible la implementación de sistemas de control predictivo de la reología de relaves a partir del uso de técnicas de caracterización avanzada de minerales.

RHEOLOGICAL STUDY OF TAILINGS BASED ON ADVANCED MINERAL CHARACTERIZATION TECHNIQUES

Tailings disposal is crucial in mining industry due to environmental impact and long-term risks. Transport of these materials involves pumping systems which can face detentions and massive failure due to dramatic changes in its rheological properties. Therefore, tailings control is necessary in order to avoid extreme changes in its rheology and mitigate the negative consequences of this situations.

The objective of this work is to quantify the effect of solids content by volume, clays (phyllosilicates) content in solid phase and particle size, in the viscosity and yield stress of phyllosilicate-rich tailings. Also, the use of advanced mineral characterization techniques is assessed as supporting tool for predictive control of tailings rheology.

A total of 108 rheometry tests were performed on tailings with different particle size, solids and clays content. This results were adjusted using Bingham plastics rheological model. Subsequently, linear regression models were adjusted on yield stress and viscosity, using solids content by volume, clays (phyllosilicates) content in solid phase, particle size (as d_{80}) and clay type as explanatory variables. Then, models were assessed with information obtained by using advanced mineral characterization techniques (QXRD, hyperspectral analysis on HyLogger3 and laser diffraction particle size measurements) measuring the quality of adjustment.

Obtained regression models show good adjustment quality over viscosity and yield stress ($R^2 > 0.9$). Subsequent models implementation with advanced mineral characterization techniques information overestimate viscosity and yield stress due to detection of higher levels of phyllosilicates than real contents in samples. Used regression models are showed below.

$$\mathbf{Log \tau_{model} = -2.219 + 10.282\phi - 0.009 d_{80} + 2.770wt\%_{clays} + 0.085 clay type}$$

$$\mathbf{Log \eta_{model} = -3.884 + 7.658\phi - 0.005 d_{80} + 1.348wt\%_{clays} + 0.042 clay type}$$

The influence of pH in phyllosilicates-rich tailings seems to be fundamental, since it regulates structure formations in these minerals, having great influence in yield stress and viscosity of this type of suspensions. This property should be considered as explanatory variable in further works involving rheological models.

It must therefore be concluded that the proposed tailings rheology determining variables (solids content by volume, clays (phyllosilicates) content in solid phase, particle size and clay type) are useful to estimate with great precision the viscosity and yield stress of this suspensions, making possible the implementation of predictive control systems of tailings rheology, based on advanced mineral characterization techniques.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar debo agradecer a mi familia completa, creo que todos son parte fundamental de lo que hoy soy y trato siempre de representar lo mejor de cada uno en mi vida diaria. En especial quisiera dar las gracias a mis padres, Raúl y Marietta, por darme la oportunidad de desarrollarme sin restricciones y entregarme cariño incondicional. También a mi hermana querida, María Cecilia, que se ha encargado siempre de simplificar mi vida y transformarla en algo liviano y fluido, sin exigir nada a cambio. Mención honrosa a la tía Silvia, gracias por la felicidad y compañía que trae a mi querido padre.

Connie, has sido una excelente polola, compañera, mejor amiga y fuente inagotable de risas. Eres mucho más de lo que esperaba y por cierto mucho más de lo que necesito para ser feliz. Gracias por el apoyo a lo largo de toda esta etapa, ha sido la raja crecer, viajar, ponerme viejo y gordo a tu lado. Te amo.

A los cabros y las cabras de la U: infinitos tragos y risas que han ayudado a conllevar la “miserable” vida del estudiante. Agradezco que nunca dejen de darme material para reírnos y molestarnos: Connie, Gilla, Pasita, Kol, Chino, Seba, Fanito, Mono, Vixon, Manríquez, Mauro, Gustavito y Pececillo. Gracias también Mila, Lucho, Gato, Nacho, Memo, Manyito, Mati y Diego. Espero que me sepan perdonar si se me queda alguno afuera.

A mis amigos de la vida, Felipe, Diego, Jahil, Jesús y Machuca. Es impresionante como luego de años seguimos siendo la misma tropa de pendejos, riéndonos de las mismas tallas fomes. Los quiero cabros.

Gracias a todos quienes están o pasaron por la oficina 306: Gilla, Nacho, Pau, Cami, Diego, Nico, Jeldres, Giovanni y Manuel (muchas gracias por la ayuda). Hacen que el trabajo se transforme en algo grato y poco tedioso. Muchas gracias Javierito por ayudarme con los experimentos y sobre todo por los años de amistad, desde los insuperables Gorberos y las bálticas de los sábados hasta el día de hoy.

Gracias a Leo y Victor por la ayuda, disposición y buena onda, ha sido una grata experiencia trabajar junto a ustedes. y agradezco enormemente la oportunidad que me dieron de formar parte del equipo de trabajo. También quisiera agradecer al profesor Christian Ihle por sus constantes aportes a lo largo del trabajo y, por último, a Marco por su infinita buena voluntad y paciencia para ayudarme cada vez que fue necesario.

Gracias a Codelco por financiar de forma parcial mi carrera y al P4 CSIRO-AMTC por facilitarme todos los medios necesarios para el desarrollo del magíster. Del mismo modo, agradezco al Departamento de Ingeniería de Minas por haber generado durante mi carrera diversas instancias para conocer y confraternizar con mis compañeros, creo que las tradiciones lo hacen único y espero que éstas no se pierdan nunca.

Si alguien cree que se merece un espacio en estas líneas, siéntase libre de incluirse, cuesta recordarlos a todos.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1.INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Presentación del tema | 1 |
| 1.2. Objetivos..... | 2 |
| 1.2.1. General | 2 |
| 1.2.2. Específicos..... | 2 |
| 1.3. Propuesta de dependencia de variables..... | 3 |
| 1.4. Alcance | 3 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 4 |
| 2.1. Físicoquímica de superficies..... | 4 |
| 2.1.1. Teoría DLVO | 4 |
| 2.1.2. Doble capa eléctrica..... | 4 |
| 2.1.3. Potencial superficial | 5 |
| 2.1.4. Potencial zeta (ζ)..... | 6 |
| 2.1.5. Coagulación..... | 6 |
| 2.1.6. Fuerzas no DLVO..... | 7 |
| 2.1.7. Repulsión estérica..... | 7 |
| 2.1.8. Floculación | 8 |
| 2.2. Reología y fluidos newtonianos..... | 8 |
| 2.3. Fluidos no-newtonianos..... | 9 |
| 2.3.1. Viscosidad dependiente de la tasa o esfuerzo de corte | 9 |
| 2.3.2. Viscosidad dependiente del tiempo | 12 |
| 2.4. Número de Pécelet..... | 13 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.5. | Espectroscopía de minerales | 13 |
| 2.5.1. | Rangos de longitud de onda en espectro visible-infrarrojo | 16 |
| 2.6. | Tecnologías espectrales..... | 17 |
| 2.6.1. | Equipos de Laboratorio | 17 |
| 2.6.2. | Equipos portátiles | 20 |
| 2.6.3. | Equipos de mapeo..... | 21 |
| 2.7. | HyLogging | 23 |
| 2.7.1. | HyLogger3..... | 23 |
| 2.7.2. | The Spectral Geologist (TSG) | 26 |
| 2.8. | Comparación de tecnologías espectrales | 28 |
| 3. | REOLOGÍA DE SUSPENSIONES E INFLUENCIA DE FILOSILICATOS | 31 |
| 3.1. | Filosilicatos | 31 |
| 3.1.1. | Expansión de arcillas | 31 |
| 3.1.2. | Formación de arcillas expansivas desde micas..... | 34 |
| 3.1.3. | Minerales típicos en yacimientos de Chile | 34 |
| 3.2. | Reología de suspensiones | 36 |
| 3.2.1. | Fuerzas que actúan sobre partículas suspendidas | 36 |
| 3.2.2. | Comportamiento típico de suspensiones | 37 |
| 3.3. | Factores determinantes de la reología..... | 38 |
| 3.3.1. | Contenido de sólidos en volumen (ϕ) | 38 |
| 3.3.2. | Granulometría de fase sólida | 42 |
| 3.3.3. | Forma de partículas | 47 |
| 3.3.4. | Mineralogía..... | 50 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.3.5. | Tiempo de aplicación de esfuerzos..... | 52 |
| 3.4. | Elección de variables a estudiar..... | 53 |
| 3.5. | Variables no consideradas en el trabajo..... | 53 |
| 3.5.1. | Amplitud de la distribución granulométrica..... | 53 |
| 3.5.2. | Tiempo de agitación..... | 54 |
| 3.6. | Variables estudiadas..... | 54 |
| 3.6.1. | Contenido de sólidos en volumen..... | 54 |
| 3.6.2. | Tamaño de partículas..... | 54 |
| 3.6.3. | Contenido de arcillas en fase sólida..... | 54 |
| 3.6.4. | Tipo de arcilla..... | 54 |
| 3.6.5. | Efecto del pH..... | 55 |
| 4. | METODOLOGÍA..... | 56 |
| 4.1. | Caracterización del relave..... | 56 |
| 4.1.1. | Composición mineralógica..... | 56 |
| 4.1.2. | Distribución granulométrica..... | 56 |
| 4.1.3. | Densidad..... | 57 |
| 4.2. | Caracterización de arcillas..... | 58 |
| 4.2.1. | Composición..... | 58 |
| 4.2.2. | Distribución granulométrica..... | 58 |
| 4.2.3. | Humedad..... | 58 |
| 4.2.4. | Densidad..... | 58 |
| 4.3. | Equipos utilizados..... | 59 |
| 4.3.1. | Reómetro..... | 59 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.3.2. | Rheoplus | 61 |
| 4.3.3. | Otros equipos..... | 61 |
| 4.4. | Protocolo Experimental | 63 |
| 4.4.1. | Experimentos realizados..... | 63 |
| 4.4.2. | Reometrías | 68 |
| 4.5. | Tratamiento de la información..... | 71 |
| 4.5.1. | Ajuste de modelos reológicos en Rheoplus..... | 71 |
| 4.5.2. | Creación de modelo empírico..... | 71 |
| 4.6. | Validación de resultados | 71 |
| 4.6.1. | Estadísticos utilizados | 71 |
| 4.6.2. | Validación cruzada..... | 72 |
| 4.7. | Evaluación del HyLogger3 como herramienta de predicción reológica..... | 73 |
| 4.8. | Resumen de metodología de trabajo..... | 73 |
| 5. | CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES UTILIZADOS | 75 |
| 5.1. | Caracterización del relave..... | 75 |
| 5.1.1. | Composición mineralógica..... | 75 |
| 5.1.2. | Distribución granulométrica..... | 80 |
| 5.1.3. | Densidad..... | 82 |
| 5.2. | Caracterización de arcillas | 82 |
| 5.2.1. | Difracción de rayos X..... | 82 |
| 5.2.2. | Análisis hiperespectral en HyLogger3 | 84 |
| 5.2.3. | Distribución granulométrica..... | 85 |
| 5.2.4. | Humedad..... | 88 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.2.5. | Densidad..... | 89 |
| 6. | PRUEBAS REOLÓGICAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS..... | 90 |
| 6.1. | Consideraciones previas..... | 90 |
| 6.1.1. | Mediciones eliminadas | 90 |
| 6.1.2. | Clasificaciones granulométricas..... | 91 |
| 6.2. | Ajuste de modelos en Rheoplus..... | 91 |
| 6.3. | Efecto de variables elegidas en reología de suspensiones | 94 |
| 6.3.1. | Contenido de sólidos en volumen..... | 94 |
| 6.3.2. | Contenido de arcillas de la fase sólida..... | 97 |
| 6.3.3. | Granulometría de la fase sólida | 100 |
| 6.3.4. | Tipo de arcilla..... | 102 |
| 6.3.5. | pH de la suspensión | 102 |
| 6.4. | Modelos empíricos..... | 106 |
| 6.4.1. | Consideraciones previas | 106 |
| 6.4.2. | Elección de enfoque y análisis de variables explicativas | 107 |
| 6.4.3. | Modelo de regresión lineal propuesto | 110 |
| 6.5. | Validación de modelos | 116 |
| 6.6. | Implementación del modelo con datos hiperespectrales..... | 118 |
| 6.6.1. | Determinación de abundancia de especies | 118 |
| 6.6.2. | Aplicación de datos hiperespectrales a modelo de regresión lineal. | 121 |
| 7. | DISCUSIÓN..... | 128 |
| 7.1. | Consideraciones sobre resultados obtenidos..... | 128 |
| 7.2. | Generación de modelos empíricos..... | 129 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 7.3. | Fuentes de error | 130 |
| 7.3.1. | Error de ajustes en Rheoplus. | 131 |
| 7.4. | Aplicabilidad de resultados..... | 132 |
| 7.4.1. | Propuesta de aplicación de modelos..... | 134 |
| 8. | CONCLUSIONES..... | 137 |
| 9. | RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS..... | 139 |
| | REFERENCIAS | 140 |
| | Anexo A..... | 146 |
| | Reogramas de clasificación granulométrica b, $\phi = 25\%$ | 146 |
| | Anexo B..... | 147 |
| | Especificaciones de preparación de fracción sólida de muestras para reometrías | 147 |
| | B.1 Caolinita $\phi=25\%$ | 147 |
| | B.2 Caolinita $\phi=30\%$ | 149 |
| | B.3. Caolinita $\phi=40\%$ | 151 |
| | B.4. Montmorillonita $\phi=25\%$ | 153 |
| | B.5. Montmorillonita $\phi=30\%$ | 155 |
| | B.6. Montmorillonita $\phi=40\%$ | 157 |
| | Anexo C. Difractograma del relave..... | 160 |
| | Anexo D. Distribución granulométrica del relave..... | 161 |
| | Anexo E. Difractograma de la caolinita | 162 |
| | Anexo F. Difractograma de la montmorillonita | 163 |
| | Anexo G. Distribución granulométrica caolinita..... | 164 |
| | Anexo H. Distribución granulométrica montmorillonita | 165 |

| | |
|---|-----|
| Anexo I. Detalle de ajustes de reometrías a modelo de Bingham | 166 |
| Anexo J. Mediciones de prueba en validación cruzada..... | 170 |
| J.1 Primera iteración..... | 170 |
| J.2 Segunda iteración..... | 171 |
| J.3 Tercera iteración..... | 172 |
| J.4 Cuarta iteración..... | 173 |
| J.5 Quinta iteración..... | 174 |
| Anexo I. Trabajos presentados en congresos y revistas. | 175 |
| I.1 Achievements from Application of the HyLogger3 to the Mining Industry in Chile. | 175 |
| I.2 Rheological study of tailings based on hyperspectral characterization using HyLogger3 | 176 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Tecnologías espectrales fijas..... | 29 |
| Tabla 2: Tecnologías espectrales portátiles y de mapeo. | 30 |
| Tabla 3: Aperturas utilizados para la clasificación granulométrica del relave. | 56 |
| Tabla 4: Especificaciones reómetro Anton Paar RheolabQC. | 60 |
| Tabla 5: Experimentos Caolinita Cv 25%. | 64 |
| Tabla 6: Experimentos Caolinita Cv 30%. | 64 |
| Tabla 7: Experimentos Caolinita Cv 40%. | 65 |
| Tabla 8: Experimentos Montmorillonita Cv 25%..... | 66 |
| Tabla 9: Experimentos Montmorillonita Cv 30%..... | 66 |
| Tabla 10: Experimentos Montmorillonita Cv 40%..... | 67 |
| Tabla 11: Experimentos línea base. | 67 |
| Tabla 12: Resultados del análisis QXRD del relave..... | 78 |
| Tabla 13: Distribución granulométrica relave. | 81 |
| Tabla 14: Mediciones de densidad en relave. | 82 |
| Tabla 15: Resultados de análisis QXRD de la caolinita. | 83 |
| Tabla 16: Resultados del análisis QXRD de la montmorillonita..... | 83 |
| Tabla 17: Distribución granulométrica de la caolinita..... | 86 |
| Tabla 18: Distribución granulométrica montmorillonita. | 87 |
| Tabla 19: Humedad de arcillas. | 88 |
| Tabla 20: Densidad arcillas..... | 89 |
| Tabla 21: Equivalencia de clasificaciones granulométricas y d80 de la fase sólida..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 22: Ejemplo de ajuste de modelos de Bingham a reometrías con montmorillonita, $\phi=25\%$, para todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla. | 94 |
| Tabla 23: Resultados de ajuste de modelos de Bingham a reometrías con arcillas puras a diferentes contenidos de pH. | 103 |
| Tabla 24: Comparación de regresiones de viscosidad y límite de fluencia para caolinita y montmorillonita, ambas con línea base. | 107 |
| Tabla 25: Comparación de modelos predictivos de viscosidad y límite de fluencia del enfoque conjunto. | 108 |
| Tabla 26: ANOVA de un factor para logaritmo de viscosidad y límite de fluencia medidos, categorizando por tipo de arcilla. | 109 |
| Tabla 27: Test T para muestras independientes, comparación entre tipos de arcilla. | 110 |
| Tabla 28: Coeficientes tipificados de modelos de regresión lineal. | 111 |
| Tabla 29: MAD y MAPE del modelo de regresión lineal para distintos valores de variables explicativas. | 112 |
| Tabla 30: Principales resultados de validación cruzada. | 117 |
| Tabla 31: Comparación entre abundancia real, abundancia del índice sin ajustar y abundancia del índice ajustado. | 121 |
| Tabla 32: Coeficientes de determinación para tau y eta utilizando el modelo de regresión con datos hiperespectrales. Datos calculados en comparación a valores medidos. | 123 |
| Tabla 33: MAD y MAPE del modelo de regresión lineal con datos hiperespectrales para distintos valores de variables explicativas. | 124 |
| Tabla 34: MAD y MAPE del esfuerzo de corte para tres ajustes de Bingham con respecto a mediciones reales. | 131 |
| Tabla 35: Comparación entre métodos de control propuestos. | 136 |
| Tabla B. 1: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica b para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 147 |
| Tabla B. 2: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 147 |

| | |
|--|-----|
| Tabla B. 3: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 148 |
| Tabla B. 4: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 148 |
| Tabla B. 5: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 149 |
| Tabla B. 6: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 149 |
| Tabla B. 7: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 150 |
| Tabla B. 8: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 150 |
| Tabla B. 9: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 151 |
| Tabla B. 10: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 151 |
| Tabla B. 11: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 152 |
| Tabla B. 12: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 152 |
| Tabla B. 13: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 153 |

| | |
|--|-----|
| Tabla B. 14: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 153 |
| Tabla B. 15: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 154 |
| Tabla B. 16: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 154 |
| Tabla B. 17: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 155 |
| Tabla B. 18: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 155 |
| Tabla B. 19: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 156 |
| Tabla B. 20: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 156 |
| Tabla B. 21: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 157 |
| Tabla B. 22: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 157 |
| Tabla B. 23: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 158 |
| Tabla B. 24: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 158 |

| | |
|--|-----|
| Tabla B. 25: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente. | 159 |
| Tabla D. 1: Resultados de análisis granulométrico por difracción láser del relave..... | 161 |
| Tabla G. 1: Resultados de análisis granulométrico por difracción láser de la caolinita..... | 164 |
| Tabla H. 1: Resultados de análisis granulométrico por difracción láser de la caolinita..... | 165 |
| Tabla I. 1: Detalle de ajustes de reometrías a modelo de Bingham, parte I..... | 166 |
| Tabla I. 2: Detalle de ajustes de reometrías a modelo de Bingham, parte II. | 167 |
| Tabla I. 3: Detalle de ajustes de reometrías a modelo de Bingham, parte III..... | 168 |
| Tabla I. 4: Detalle de ajustes de reometrías a modelo de Bingham, parte IV. | 169 |
| Tabla J. 1: Mediciones de prueba en primera iteración de validación cruzada..... | 170 |
| Tabla J. 2: Mediciones de prueba en segunda iteración de validación cruzada..... | 171 |
| Tabla J. 3: Mediciones de prueba en tercera iteración de validación cruzada..... | 172 |
| Tabla J. 4: Mediciones de prueba en cuarta iteración de validación cruzada. | 173 |
| Tabla J. 5: Mediciones de prueba en quinta iteración de validación cruzada..... | 174 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Modelo de doble capa eléctrica.(Martínez Luévanos 2012)..... | 5 |
| Figura 2: Fuerzas de atracción y repulsión en coloides.(CEPIS. <i>et al.</i> 1981) | 7 |
| Figura 3: Experimento de placas paralelas. (Barnes <i>et al.</i> 1989)..... | 8 |
| Figura 4: Reograma para diferentes tipos de fluidos..... | 10 |
| Figura 5: Variaciones del índice de comportamiento en modelo de Herschel-Bulkley..... | 11 |
| Figura 6: Curva típica del modelo de Casson. (Dumas <i>et al.</i> 2012)..... | 12 |
| Figura 7: Curva espectral de la Illita en el rango 1200-2600 nm: (a) alto grado de cristalinidad, (b) cristalinidad intermedia, (c) bajo grado de cristalinidad ($\nu+\delta$: estiramiento y torsión de los grupos OH ⁻ respectivos; 2ν : primer armónico de estiramiento)..... | 14 |
| Figura 8: Espectros de diferentes minerales. (Elachi & van Zyl 2006)..... | 15 |
| Figura 9: Denominación de rangos en el espectro visible-infrarrojo.(Hecker <i>et al.</i> 2010) | 16 |
| Figura 10: Curvas espectrales típicas según rango (A: VNIR-SWIR, B y C: TIR) | 17 |
| Figura 11: CoreScan HCI-3. (CoreScan Pty 2014) | 18 |
| Figura 12: GEOTEK MSCL-S. (Geotek Ltd. 2014) | 19 |
| Figura 13: SisuRock Hyperspectral Core Imaging Station. (Specim 2014)..... | 20 |
| Figura 14: Escaneo de alta resolución (0,2 mm) de un testigo unitario. (Specim 2014)..... | 20 |
| Figura 15: Apariencia general de espectrómetro PIMA. (Terrapulus Inc. 2013) | 21 |
| Figura 16: TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Spectrometer. (ASD Inc. 2013)..... | 21 |
| Figura 17: AisaEAGLE, AisaHAWK y Aisa OWL, respectivamente. (SpecTIR 2012a; SpecTIR 2012b; SpecTIR 2012c)..... | 22 |
| Figura 18: Hyperion Imaging Spectrometer. (Pearlman <i>et al.</i> 2001) | 22 |
| Figura 19: Esquema de AVIRIS. (National Aeronautics and Space Administration n.d.)..... | 23 |
| Figura 20: Principales componentes del HyLogger3.(adaptado de (Huntington, Clissold, <i>et al.</i> 2012)) | 24 |

| | |
|---|----|
| Figura 21: Imagen obtenida por el equipo con diferentes tipos de muestras. | 25 |
| Figura 22: Ejemplos de diagnóstico de cada medición en HyLogger3. | 25 |
| Figura 23: Curvas espectrales en TSG. | 27 |
| Figura 24: Contenido de filosilicatos en muestras de yacimientos chilenos.(Bulatovic <i>et al.</i> 1999) | 31 |
| Figura 25: Estructura de las arcillas y cationes inter-capa. (Ndlovu <i>et al.</i> 2014)..... | 32 |
| Figura 26: Diferencias en expansión de acuerdo a hidratación de cationes. (Madsen & Muller-Vonmoos 1989)..... | 33 |
| Figura 27: Expansión osmótica. (Madsen & Muller-Vonmoos 1989)..... | 33 |
| Figura 28: Transformación de una mica en arcilla expansiva. (Ndlovu et al. 2011)..... | 34 |
| Figura 29: Estructura general de la montmorillonita.(Bishop <i>et al.</i> 2008)..... | 35 |
| Figura 30: Estructura general de la caolinita.(Bishop <i>et al.</i> 2008)..... | 36 |
| Figura 31: Reograma de suspensiones. (Barnes <i>et al.</i> 1989)..... | 37 |
| Figura 32: Comportamiento asintótico de la viscosidad ($\dot{\gamma}=160/s$). (Becker <i>et al.</i> 2013)..... | 40 |
| Figura 33: Comparación de espacio ocupado por partículas agregadas (a) v/s partículas dispersas (b). (Alejo & Barrientos 2009)..... | 40 |
| Figura 34: Aumento de μ y τ con el contenido de sólidos en volumen.(Tangsathitkulchai 2003) | 41 |
| Figura 35: Límite de fluencia de relaves de aluminio, oro, níquel y manganeso. (Boger 2000) .. | 42 |
| Figura 36: Variación de la viscosidad con tamaño de partículas.(Tangsathitkulchai 2003)..... | 43 |
| Figura 37: Variación del límite de fluencia verdadero con el tamaño de partícula. (Tangsathitkulchai 2003)..... | 44 |
| Figura 38: Cambio en viscosidad relativa con adición de partículas gruesas. (Barnes <i>et al.</i> 1989) | 45 |
| Figura 39: Disminución de viscosidad relativa para tres tamaños de partícula, $\phi=65\%$. (Barnes <i>et al.</i> 1989)..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 40: Pruebas experimentales de aumento del factor de empaquetamiento. (Sohn & Moreland 1968)..... | 47 |
| Figura 41: Viscosidad de suspensiones considerando forma de sólidos. (Barnes <i>et al.</i> 1989)..... | 48 |
| Figura 42: Límite de fluencia para diferentes formas de partícula y contenido de sólidos en volumen. (Ndlovu <i>et al.</i> 2014) | 49 |
| Figura 43: Formas de partículas y propiedades reológicas en comparación al cuarzo. (Ndlovu <i>et al.</i> 2011)..... | 50 |
| Figura 44: Influencia de arcillas expansivas en viscosidad. Viscosidad en Pa·s. (Ayadi & Soro 2013) | 51 |
| Figura 45: Medición reológica en pulpas de distinta composición. (Becker <i>et al.</i> 2013) | 52 |
| Figura 46: Razón entre límites de fluencia del gel y del sol en función de ϕ . (de Kretser <i>et al.</i> 1998) | 53 |
| Figura 47: Variación del límite de fluencia en función del pH y formación de estructuras. (Ndlovu <i>et al.</i> 2011)..... | 55 |
| Figura 48: Malvern Mastersizer 2000. (Malvern Instruments Ltd. 2015)..... | 57 |
| Figura 49: Anton Paar RheolabQC.(Anton Paar n.d.) | 59 |
| Figura 50: Comparación de lecturas entre tipos de spindle.(Kwak <i>et al.</i> 2005)..... | 60 |
| Figura 51: WiseCube WIS-20. (witeg Labortechnik GmbH 2015)..... | 62 |
| Figura 52: San-Xin SX711. (Shangai San-Xin Instrumentation Inc. 2015)..... | 62 |
| Figura 53: Preparación de fase sólida para reometrías. | 68 |
| Figura 54: Adición de sólidos a matraz con agua. | 69 |
| Figura 55: Mezclas ubicadas en agitador..... | 70 |
| Figura 56: Diagrama de metodología de trabajo | 74 |
| Figura 57: Calcopirita libre (NP)..... | 75 |
| Figura 58: Calcopirita asociada a covelina y calcosina (NP). | 76 |
| Figura 59: Calcopirita asociada a cuprita y tenorita (NP). | 76 |

| | |
|---|----|
| Figura 60: Magnetita (NP)..... | 77 |
| Figura 61: Limonita NP (a) y NC (b). | 77 |
| Figura 62: Rutilo NC (a) y NP (b)..... | 77 |
| Figura 63: Curva espectral del relave en el rango VNIR-SWIR (verde) y espectro de referencia de la muscovita (rosado). Espectros ajustados por Hull Quotient y normalizados. | 79 |
| Figura 64: Curva espectral del relave en el rango TIR (verde) y espectro de referencia del cuarzo (rosado). Espectros normalizados..... | 79 |
| Figura 65: Curva espectral del relave en el rango TIR (verde) y espectro de referencia de la muscovita (rosado). Espectros normalizados | 80 |
| Figura 66: Curvas granulométricas completas del relave..... | 82 |
| Figura 67: Curva espectral de la muestra de caolinita en el rango VNIR-SWIR (verde) y espectro de referencia de la caolinita (rosado). Espectros ajustados por Hull Quotient y normalizados. ... | 84 |
| Figura 68: Curva espectral de la muestra de montmorillonita en el rango VNIR-SWIR (verde) y espectro de referencia de la caolinita (rosado). Espectros ajustados por Hull Quotient y normalizados..... | 85 |
| Figura 69: Curva granulométrica completa caolinita. | 86 |
| Figura 70: Curva granulométrica completa de la montmorillonita. | 88 |
| Figura 71: Reogramas erróneos..... | 90 |
| Figura 72: Ruido en reograma a bajos esfuerzos de corte..... | 91 |
| Figura 73: Ejemplos de reogramas obtenidos en Rheoplus..... | 92 |
| Figura 74: Ejemplos de ajustes a modelo de Bingham de reogramas. | 93 |
| Figura 75: Viscosidad y límite de fluencia medidos en función del contenido de sólidos en volumen. Datos agrupados por categoría considerando todos los tipos de arcilla (incluyendo línea base), clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida..... | 95 |
| Figura 76: Viscosidad medida como función del contenido de sólidos en volumen, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida..... | 96 |

| | |
|---|-----|
| Figura 77: Límite de fluencia medido como función del contenido de sólidos en volumen, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida. | 97 |
| Figura 78: Viscosidad y límite de fluencia medidos en función del contenido de arcillas en la fase sólida. Datos agrupados por categoría considerando todos los tipos de arcilla (incluyendo línea base), clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida..... | 98 |
| Figura 79: Viscosidad medida como función del contenido de arcillas en la fase sólida, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida..... | 99 |
| Figura 80: Límite de fluencia medido como función del contenido de arcillas en la fase sólida, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida. | 99 |
| Figura 81: Viscosidad y límite de fluencia medidos en función de la granulometría de la fase sólida. Datos agrupados por categoría considerando todos los tipos de arcilla (incluyendo línea base), clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida. | 100 |
| Figura 82: Viscosidad medida como función de la granulometría de la fase sólida, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida..... | 101 |
| Figura 83: Límite de fluencia medido en función de la granulometría de la fase sólida, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida..... | 101 |
| Figura 84: Viscosidad y límite de fluencia medidos en función del tipo de arcilla. Datos agrupados por categoría considerando todos los tipos de arcilla (incluyendo línea base), clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida..... | 102 |
| Figura 85: Cambio de color en suspensión de montmorillonita pura. Muestra con pH 10.87 (izq.) y pH 1.81 (der.)..... | 104 |
| Figura 86: Curva espectral medida de montmorillonita no modificada. Espectro ajustado por HullQuotient (remoción de continuo de fondo). | 105 |
| Figura 87: Curva espectral medida de montmorillonita modificada. Espectro ajustado por HullQuotient (remoción de continuo de fondo). | 105 |
| Figura 88: Viscosidad como función de contenido de sólidos en volumen, para valores medidos y del modelo. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, contenidos de arcilla en fase sólida y tipos de arcilla..... | 113 |

| | |
|---|-----|
| Figura 89: Viscosidad como función de contenido de arcillas en fase sólida, para valores medidos y del modelo. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, tipo de arcilla (incluyendo línea base) y contenido de sólidos en volumen. | 114 |
| Figura 90: Viscosidad como función de contenido de arcillas en fase sólida, para valores medidos y del modelo. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, tipo de arcilla (incluyendo línea base) y contenido de sólidos en volumen. | 114 |
| Figura 91: Diagrama de dispersión del logaritmo del límite de fluencia medido y del modelo de regresión. Contiene todas las mediciones y valores modelados. | 115 |
| Figura 92: Diagrama de dispersión del logaritmo de las viscosidad medida y del modelo de regresión. Contiene todas las mediciones y valores modelados. | 116 |
| Figura 93: Rasgo espectral utilizado para medir abundancia de caolinita en las muestras. Espectros representados fueron ajustados por Hull Quotient y normalizados. | 118 |
| Figura 94: Parámetros de creación de escalar para medir profundidad del rasgo en los 2168nm para la caolinita. | 119 |
| Figura 95: Rasgo espectral utilizado para medir abundancia de montmorillonita en las muestras. Espectros representados fueron ajustados por Hull Quotient y normalizados. | 120 |
| Figura 96: Parámetros de creación de escalar para medir profundidad del rasgo en los 1900nm para la montmorillonita. | 120 |
| Figura 97: Viscosidad como función de contenido de sólidos en volumen, para valores medidos y del modelo con datos hiperespectrales. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, contenidos de arcilla en fase sólida y tipo de arcilla (incluyendo línea base). | 125 |
| Figura 98: Límite de fluencia como función de contenido de arcillas en fase sólida, para valores medidos y del modelo con datos hiperespectrales. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, tipo de arcilla (incluyendo línea base) y contenido de sólidos en volumen. | 126 |
| Figura 99: Viscosidad como función de contenido de arcillas en fase sólida, para valores medidos y del modelo con datos hiperespectrales. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, tipo de arcilla (incluyendo línea base) y contenido de sólidos en volumen. | 126 |
| Figura 100: Diagrama de dispersión del logaritmo del límite de fluencia medido y del modelo con datos hiperespectrales. Contiene todas las mediciones y valores modelados. | 127 |
| Figura 101: Diagrama de dispersión del logaritmo de la viscosidad medida y del modelo con datos hiperespectrales. Contiene todas las mediciones y valores modelados. | 127 |

| | |
|---|-----|
| Figura 102: Viscosidad como función del contenido de sólidos en volumen y del contenido de arcillas en peso en la fase sólida. Datos agrupados por categorías para todos los tipos de arcillas y clasificaciones granulométricas..... | 128 |
| Figura 103: Diferencias de viscosidad y límite de fluencia a bajas tasas de corte entre modelo de Bingham (rojo) y reograma típico de relaves (azul)..... | 133 |
| Figura 104: Diagrama de propuesta de control predictivo | 135 |
| Figura 105: Diagrama de propuesta de control correctivo. | 135 |
| Figura A. 1: Reogramas de clasificación granulométrica b, contenido de sólidos en volumen=25%, para contenidos en peso de caolinita en la fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25%..... | 146 |
| Figura C. 1: Difractograma del relave..... | 160 |
| Figura E. 1: Difractograma de la caolinita..... | 162 |
| Figura F. 1: Difractograma de la montmorillonita..... | 163 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Presentación del tema

El manejo de relaves es un tema crucial en minería por el impacto ambiental y los riesgos asociados a largo plazo, concernientes a la presencia de reactivos, inestabilidad química y la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento masivo, lo que en su conjunto representa no solo un riesgo para la operación, sino también para las poblaciones cercanas. Además, el transporte de relaves dentro de los circuitos de la planta y la mina implica el uso de sistemas de bombeo que pueden enfrentar detenciones y fallas por cambios drásticos en la reología de dichas pulpas.

La problemática, resulta entonces en la necesidad de predecir el comportamiento de los relaves de manera fundada a partir de una robusta caracterización, identificando las principales variables que definen su reología, con el objetivo de tomar acciones tempranas que mitiguen o eviten la ocurrencia de situaciones indeseadas.

Diversos autores (de Kretser et al. 1998; Ndlovu et al. 2013; Ndlovu et al. 2014; Becker et al. 2013; Ndlovu et al. 2011; McFarlane et al. 2005; Tangsathitkulchai & Austin 1988; Tangsathitkulchai 2003; Blakey & James 2003; de Kretser et al. 1997, entre otros) identifican tres variables comunes que definen el comportamiento reológico de los relaves: el contenido de sólidos en volumen (Φ), la distribución granulométrica de sólidos y la mineralogía. Se indica además, que la adición de reactivos (dispersantes, coagulantes, floculantes y modificadores de pH) también tienen influencia en la reología de relaves.

Respecto a la mineralogía, varios estudios (Bulatovic *et al.* 1999; Farrokhpay 2012; Pownceby & Johnson 2014) reconocen la presencia de filosilicatos como un factor relevante y de importancia en el negocio productivo de cobre a partir de minerales que lo contienen, debido a que generan efectos adversos en diversas operaciones unitarias, entre ellas por ejemplo, el aumento del consumo de ácido y la disminución de valiosos durante la lixiviación, la inestabilidad de espumas y disminución de la calidad de los concentrados durante la flotación, los embanques producto de aumentos abruptos de la viscosidad durante el bombeo y el transporte de pulpas, entre otros.

Especial atención merecen las arcillas expansivas, que en presencia de agua afectan de forma considerable la reología de las suspensiones, esto asociado a fenómenos de química de superficies que se tratan con más detalle en este trabajo.

Considerando lo anteriormente expuesto, este trabajo consiste en la realización de experimentos reológicos a escala de laboratorio que permiten dilucidar la influencia de algunas propiedades de los relaves en la viscosidad (η) y límite de fluencia de corte (τ) de éstos. El trabajo se centrará en relaves ricos en filosilicatos, pues algunos de estos minerales presentan propiedades expansivas en presencia de agua, alterando fuertemente la reología de las suspensiones, incluso a bajas concentraciones.

La elaboración de modelos matemáticos descriptivos sólo ha sido abordada en escasos trabajos (Ayadi & Soro 2013; Alejo & Barrientos 2009), pero en ellos no se consideran de forma integrada las propiedades mencionadas anteriormente, por lo que generar un modelo matemático empírico

que considere el contenido de sólidos en volumen, la granulometría de fase sólida y la presencia de filosilicatos puede resultar útil para predecir el comportamiento reológico de suspensiones de forma más acertada, con el consiguiente beneficio que esto puede tener en el dimensionamiento y operación de equipos por donde transitan pulpas y relaves. Más aún, el uso de información proveniente del análisis hiperespectral de muestras no se ha conectado previamente con la elaboración de modelos reológicos.

El presente trabajo de investigación se desarrolla en el marco del programa denominado Caracterización Avanzada Mineralógica y Metalúrgica perteneciente al proyecto Innova-Corfo “CSIRO-CHILE 10CEII-9007”, desarrollado por CSIRO Chile Research Foundation en colaboración con el Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Cuantificar reológicamente la incidencia del contenido de sólidos en volumen, contenido de arcillas en la fase sólida y tamaño de partículas en la viscosidad y límite de fluencia de relaves.

1.2.2. Específicos

- Identificar, categorizar y ponderar las variables determinantes en la reología de relaves, con énfasis en aquellos ricos en filosilicatos, en base a una revisión bibliográfica de estudios relacionados.
- Evaluar el uso de técnicas avanzadas de caracterización de minerales, tales como difracción de rayos X cuantitativa (QXRD), análisis hiperespectral (Hylogger3) y análisis granulométricos infrarrojos, entre otros, para el desarrollo de sistemas de control predictivo reológico de relaves.
- Elaborar un modelo reológico empírico y predictivo que relacione cada una de las variables seleccionadas con la viscosidad y el límite de fluencia de los relaves.
- Establecer la influencia de los filosilicatos en la reología de relaves, considerando la magnitud de su carácter expansivo.
- Validar experimentalmente el modelo obtenido utilizando herramientas estadísticas apropiadas.
- Evaluar el uso del HyLogger3 como herramienta para la predicción reológica de relaves ricos en arcillas.

1.3. Propuesta de dependencia de variables

Se pretende obtener una expresión acorde a la ecuación (1), dependiente de las variables antes mencionadas, que permita predecir el comportamiento reológico de relaves ricos en filosilicatos a través de valores de viscosidad y de límite de fluencia.

$$\eta, \tau = f_1, f_2(\phi, d_{80}, wt\%_{arcillas}) \quad (1)$$

Donde:

- η : Viscosidad del relave
- τ : Límite de fluencia de corte del relave
- ϕ : Contenido de sólidos en volumen
- d_{80} : Tamaño bajo el cual se encuentra el 80 wt% de las partículas, μm
- $wt\%_{arcillas}$: Contenido en peso de filosilicatos en la fase sólida del relave.

1.4. Alcance

Secuencialmente, establecer el estado del arte afín con la investigación, realizar pruebas experimentales reológicas a escala de laboratorio y elaborar el modelo empírico predictivo con su correspondiente validación estadística y experimental. Se proyecta generar una aplicación del modelo predictivo utilizando como entrada los datos de lectura hiperspectral obtenidos con la tecnología HyLogger3, sobre la cual se realizará un análisis de los resultados y la correspondiente cuantificación del error de éstos.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se exponen los conceptos que sustentan la base científica del presente trabajo, explicando y discutiendo además, algunos modelos reológicos mencionados en la literatura asociada.

2.1. Fisicoquímica de superficies

La reología de suspensiones acuosas está fuertemente relacionada con fenómenos estudiados por la fisicoquímica de superficies, por lo mismo se realiza una breve explicación de los principales conceptos.

2.1.1. Teoría DLVO

La teoría DLVO, cuyo nombre es honor a los científicos Boris Derjaguin, Lev Landau, Evert Verwey y Theodor Overbeek, explica la agregación de partículas en suspensiones acuosas, a través de fuerzas originadas por cargas superficiales de los sólidos en suspensión. Dicha teoría ha sido esencial para explicar la estabilidad de una variedad de materiales coloidales y sienta las bases del fenómeno de coagulación (Ghosh n.d.) (ver sección 2.1.5).

2.1.2. Doble capa eléctrica

Cuando un sólido, en particular un mineral, se encuentra inmerso en un medio acuoso, su superficie se carga eléctricamente, provocando la adsorción en ella de iones disueltos con carga opuesta.

Los primeros estudios sobre la doble capa eléctrica fueron realizados por Hermann von Helmholtz hacia fines del siglo XIX, para luego ser refinados por Gouy y Chapman en la década de 1910. En la actualidad, se utiliza el modelo de Gouy-Chapman-Stern, elaborado por Otto Stern, donde se consideran tanto los modelos de Helmholtz como los de Gouy y Chapman (Martínez Luévanos 2012). La Figura 1, muestra un esquema de la doble capa.

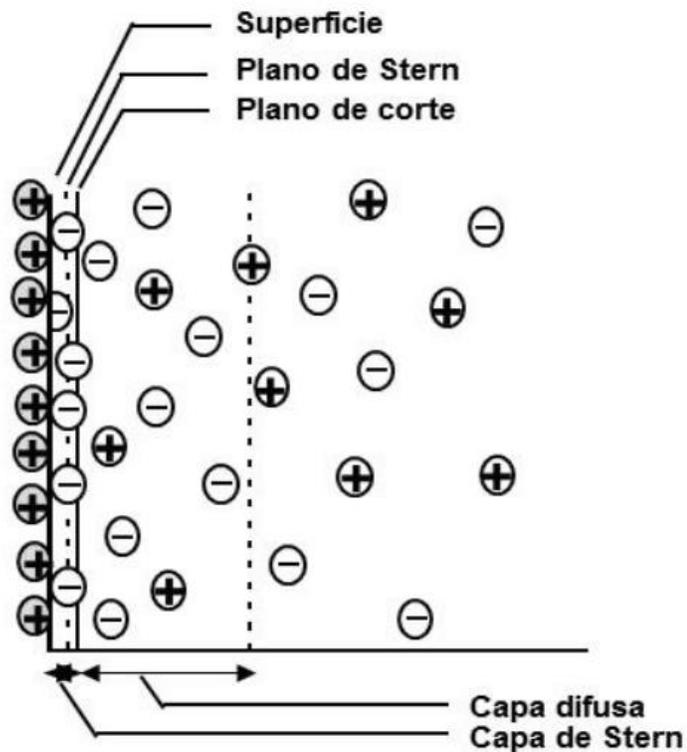


Figura 1: Modelo de doble capa eléctrica.(Martínez Luévanos 2012)

En el modelo de doble capa se identifica la capa de Stern, consistente en una distribución equivalente y opuesta de cargas sobre la superficie del mineral de iones determinantes de potencial o adsorbidos específicamente, la que está seguida de una capa denominada difusa, debido a que la agitación térmica de la solución no permite un posicionamiento fijo de cargas.

Se aprecian también dos planos en el modelo: el plano de Stern y el plano de corte. El primero corresponde al centro eléctrico de los iones determinantes de potencial, este plano marca el límite entre la capa de Stern y la capa difusa. El plano de corte se genera al desplazar la partícula en el fluido, debido a que esta mueve parte del medio circundante con ella, en particular a la capa de Stern y una porción muy pequeña de la capa difusa, luego el plano que delimita esa porción de la capa difusa que se traslada con la partícula se denomina plano de corte.

En el caso de los minerales sumergidos en agua, los iones determinantes de potencial son típicamente H^+ y OH^- , por lo que el potencial queda determinado por el pH de la solución.

2.1.3. Potencial superficial

El potencial superficial, corresponde al potencial eléctrico de la superficie del mineral. Este no es medible, sin embargo se pueden obtener aproximaciones determinando el punto cero de carga (mediante la titulación de Mular-Roberts, por ejemplo) y utilizando la ecuación de Nernst. El **punto cero de carga (PCC)** corresponde al pH al cual la carga neta de la superficie es cero (por igual densidad de adsorción de cargas positivas y negativas).

2.1.4. Potencial zeta (ζ)

Se entiende por potencial zeta al potencial medido en el plano de corte, el que puede ser determinado mediante diversas técnicas (electroforesis y medición electroacústica) y es de suma utilidad por ser una magnitud medible directamente. Este potencial indica la interacción electrostática de las partículas en suspensión, dado que si los sólidos en suspensión tienen un potencial zeta de valor absoluto menor a 5 mV se espera que fenómenos de coagulación ocurran con rapidez.

El **punto isoeléctrico (IEP)** corresponde al pH al cual el potencial zeta se hace cero. Para algunos minerales existen valores coincidentes para el IEP y el PCC, sin embargo el caso de los filosilicatos esto no es cierto debido a la anisotropía de cargas que éstos presentan (Ndlovu *et al.* 2014).

2.1.5. Coagulación

La coagulación es la agregación de sólidos debido a una fuerza resultante de atracción entre ellos, donde las fuerzas de atracción de corto alcance pasan a dominar la interacción (fuerzas de Van der Waals). Esto ocurre con particular rapidez cuando el potencial zeta de las partículas se encuentra cercano a 0 (± 5 mV), por lo que si el pH se mantiene cerca del IEP, se espera una coagulación acelerada de partículas en suspensión.

De forma adicional, se puede lograr coagulación por compresión de la doble capa eléctrica agregando iones a la solución. Debido a un incremento en la concentración de iones del medio continuo, se favorece el ingreso de contra-iones a la capa difusa, comprimiendo la doble capa y por lo mismo disminuyendo las fuerzas repulsivas (curva azul de la Figura 2) a una distancia fija en comparación al caso inicial (curva de fuerza repulsiva electrocinética de la Figura 2). Esto produce que la barrera de energía disminuya su valor (desde la línea segmentada a la roja en la misma figura) y haya una atracción neta de partículas a distancias mayores.

Si la fuerza resultante (curva roja, o negra discontinua en el caso inicial) manifiesta un mínimo local que desciende a la zona de atracción a una distancia mayor de la marcada por la barrera de energía, éste se denomina mínimo secundario, y la agregación de partículas es reversible. Por el contrario, si es capaz de superar la barrera de energía (extremadamente dificultoso), llegaría al mínimo primario (cercano al eje de las ordenadas en la Figura 2), dando lugar a una agregación irreversible.

Se debe notar que la coagulación es un fenómeno asociado netamente a interacciones eléctricas y resulta de utilidad para precipitar partículas de tamaños pequeños, debido a que su velocidad de sedimentación es extremadamente lenta.

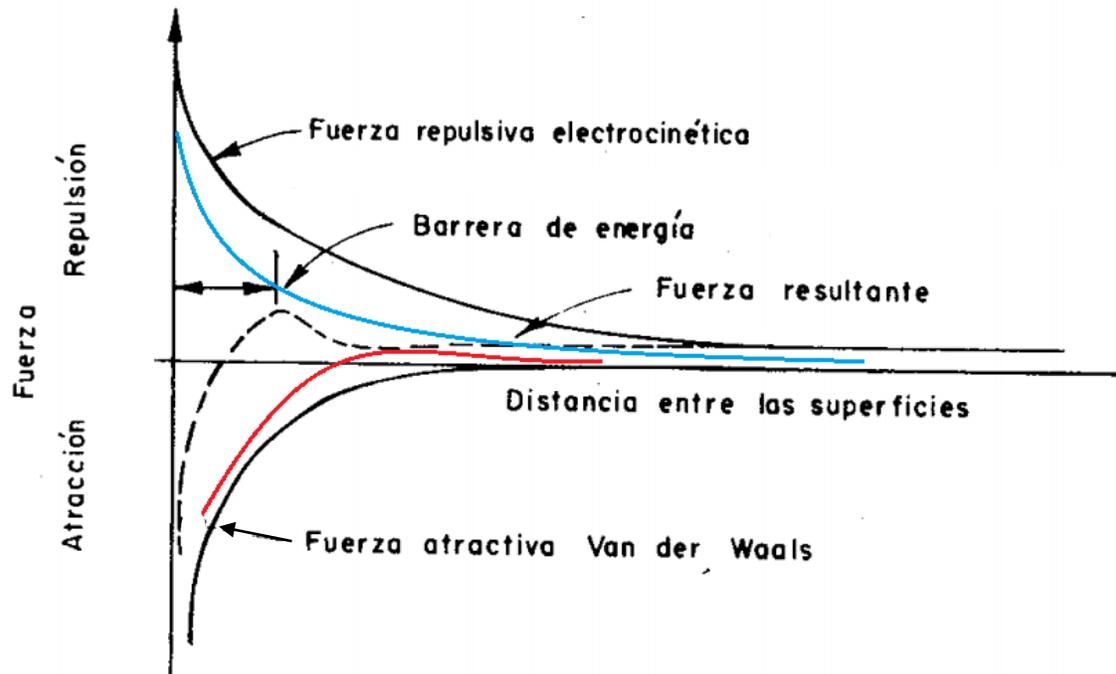


Figura 2: Fuerzas de atracción y repulsión en coloides.(CEPIS. *et al.* 1981)

2.1.6. Fuerzas no DLVO

Las más importantes fuerzas no DLVO son la fuerza de hidratación y la interacción hidrofóbica (Ghosh n.d.). La fuerza de hidratación aparece como una repulsión de corto alcance (<5nm), en experimentos donde se esperaba que la fuerza atractiva de Van der Waals fuese la que predominara, incluso a veces la fuerza de hidratación es órdenes de magnitud mayor a la repulsión de la doble capa. Existe un fenómeno conocido como hidratación secundaria, que corresponde a la adsorción de iones hidratados en una superficie hidrofóbica, transformándola en hidrofílica, e incluso los cationes son capaces de retener el agua que hidrata. Se ha establecido un orden en la magnitud de fuerzas de hidratación para algunos cationes ($Mg^{+2} > Ca^{+2} > Li^+ \sim Na^+ > K^+ > Cs^+$).

La interacción hidrofóbica se da en sustancias altamente hidrofóbicas que son inmersas en agua, como los hidrocarburos, los que, en caso de presentar un tamaño de molécula pequeño, pueden ser hidratados mediante enlaces por puente de hidrógeno, a través de un proceso conocido como hidratación hidrofóbica. Este fenómeno no se estudia en profundidad debido a su poca aplicabilidad en el trabajo presente.

2.1.7. Repulsión estérica

La repulsión estérica consiste en prevenir la coagulación de partículas mediante la adición de polímeros que se adsorben en la superficie de éstas. Dichos polímeros se repelen entre sí, evitando la coagulación, sin embargo puede ocurrir que éstos tengan cadenas que se enreden de una partícula a otra, generando floculación, efecto adverso del uso de estos compuestos.

2.1.8. Floculación

La floculación consiste en agregar partículas de sólidos mediante la acción de polímeros que se adsorben en la superficie de los minerales, “enlazando” unos con otros mediante las estructuras que éstos forman (colas, lazos trenzas). Este fenómeno se basa en la interacción química y tiene la facultad de formar agregados de partículas más grandes que si ocurre sólo coagulación. En la industria minera, como en el tratamiento de aguas se utilizan estos reactivos (floculantes) para acelerar la sedimentación de partículas.

2.2. Reología y fluidos newtonianos

Se entiende por reología al “estudio de la deformación y el flujo de la materia”. Ésta se centra en comprender el comportamiento de un fluido a partir de la relación entre dos magnitudes físicas: el esfuerzo de corte (τ [N/m²]) y la tasa de deformación ($\dot{\gamma}$ [s⁻¹]), también denominada tasa de corte, velocidad de corte o velocidad de cizalle.

El ejemplo más simple que se utiliza para graficar esta relación es el experimento de placas paralelas separadas por una distancia δ , cuya área de contacto con un fluido confinado es A y en el que una de ellas está fija y la otra, tras la aplicación de una fuerza paralela a la superficie, se mueve a velocidad u (en estado estacionario). Esto genera que la capa de fluido en contacto con la placa móvil se mueva a velocidad u y, por otro lado, la capa de fluido en contacto con la placa fija no se mueva. El movimiento del fluido en la capa superior se transmite capa a capa hasta llegar a aquella donde no existe velocidad debido al principio de adherencia, resultando así un perfil de distribución de velocidad en dicho fluido, cuya magnitud varía de acuerdo a la distancia del plano observado con respecto a la placa fija. Lo anterior se expone en la Figura 3.

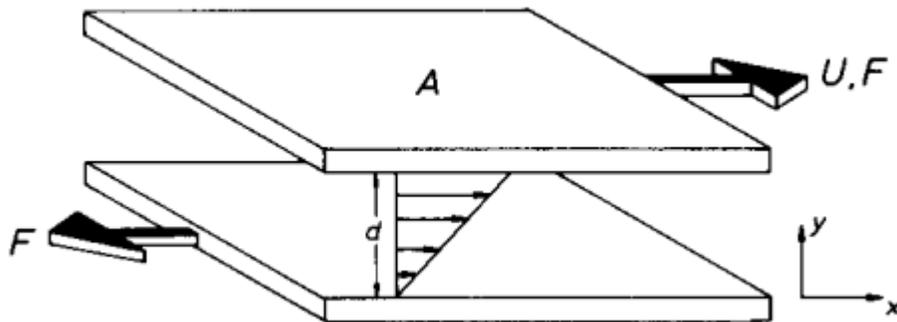


Figura 3: Experimento de placas paralelas. (Barnes *et al.* 1989)

Luego de determinar el esfuerzo o tensión que opone el fluido al movimiento (de magnitud F/A) se obtiene la fórmula matemática general que relaciona dicho esfuerzo de corte con el gradiente de velocidades a través de la viscosidad (η) del fluido, que básicamente es una medida de la resistencia a fluir o también se entiende como la medida de la transferencia de momentum de una capa de

fluido a otra. La fórmula matemática es la siguiente y se conoce como la Ley de viscosidad de Newton.

$$\tau_{yx} = \frac{F}{A} = \eta \frac{\partial u}{\partial y} = \eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

Para un fluido newtoniano la viscosidad permanece constante en el tiempo, por lo tanto el esfuerzo de corte y la tasa de corte tienen una relación lineal. Un ejemplo clásico de un fluido newtoniano es el agua.

Las pulpas, en particular los relaves, no siguen esta ley, presentando relaciones un poco más complejas entre esfuerzo de corte y velocidad. Más aún, deben permanecer en movimiento sobre una velocidad mínima (velocidad crítica de sedimentación), de lo contrario fenómenos de segregación aparecen, precipitando los sólidos y separándose de la fase dispersante (en este caso agua).

Típicamente, el símbolo de la viscosidad en fluidos newtonianos corresponde a la letra griega mu (μ), mientras que para fluidos no-newtonianos es común que se denote con la letra eta (η). Para evitar confusiones, en este documento la viscosidad, independiente de la naturaleza del fluido, siempre se denotará con la letra η , salvo que se especifique lo contrario.

2.3. Fluidos no-newtonianos

2.3.1. Viscosidad dependiente de la tasa o esfuerzo de corte.

En el caso de los relaves, se habla de fluidos no newtonianos, por lo que la viscosidad varía con la tasa o esfuerzo de corte. Para los fluidos no-newtonianos existen diferentes modelos matemáticos que los describen y por lo general tienen formas bastante definidas cuando se grafica el esfuerzo de corte v/s la tasa de corte como se muestra en la Figura 4. Dicho gráfico se denomina reograma o curva de flujo.

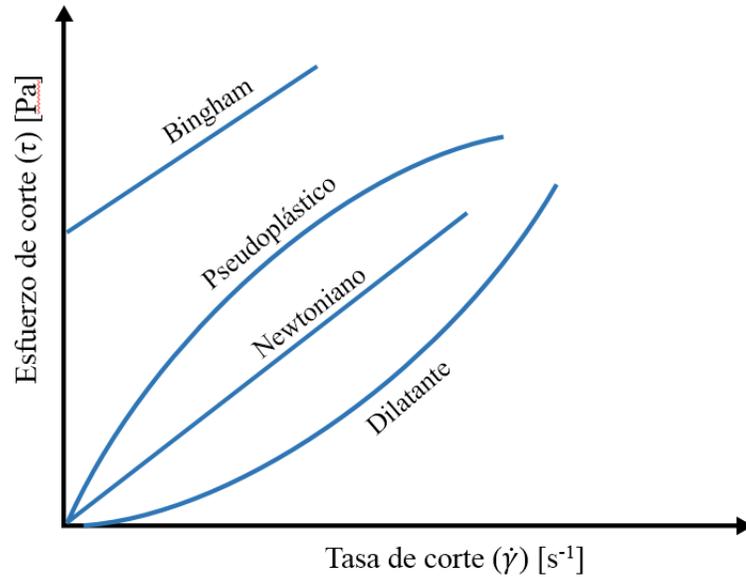


Figura 4: Reograma para diferentes tipos de fluidos.

En la Figura 4 se muestran los comportamientos más comunes de los fluidos, cada cual posee su correspondiente modelo matemático asociado. Debido a que la viscosidad no es constante en estos fluidos, se prefiere hablar de comportamiento reológico, que es una manera de describir la tendencia que sigue dicha propiedad en función de la tasa o esfuerzo de corte.

Como se mencionó, los **fluidos newtonianos** exhiben una relación lineal entre tasa de corte y esfuerzo de corte debido a que la viscosidad es constante (Ecuación (2)). Entre los que poseen relaciones no-lineales están los **dilatantes** cuya viscosidad aumenta con la tasa de corte y los **pseudoplásticos** que presentan una viscosidad decreciente con la tasa de corte. Los modelos matemáticos asociados a estos dos últimos comportamientos siguen relaciones matemáticas de potencias, sin embargo los exponentes y constantes asociados varían en cada caso particular.

Destacan en el gráfico los fluidos que se denominan **plásticos de Bingham**, debido a que comienzan a experimentar deformación sobre cierto valor de esfuerzo, denominado límite de fluencia de corte (también límite elástico de corte o esfuerzo de fluencia de corte). Esto indica que si se les aplica un esfuerzo bajo este valor mínimo, se comportan como sólidos, es decir, presentan una deformación elástica. La relación matemática es la siguiente ($\tau_{y,B}$ indica el límite de fluencia y η_B la viscosidad plástica).

$$\tau = \tau_y + \eta_B \dot{\gamma} \quad (3)$$

También existen relaciones no lineales entre esfuerzo de corte y tasa de corte que contemplan además el límite de fluencia. El modelo de **Herschel-Bulkley** sigue la ley de potencias, por lo que se usa para describir fluidos dilatantes y pseudoplásticos, con la particularidad de que incluye además un valor constante en la ecuación.

$$\tau = \tau_y + k(\dot{\gamma})^n \quad (4)$$

Como se puede apreciar en la ecuación, un plástico de Bingham es un caso particular de este modelo (con $n=1$). A la constante k se le conoce como índice de consistencia y a n como el índice de comportamiento (si es mayor a 1 indica un comportamiento dilatante y si es menor que 1 se trata de un comportamiento pseudoplástico). Los tres casos se muestran en la Figura 5.

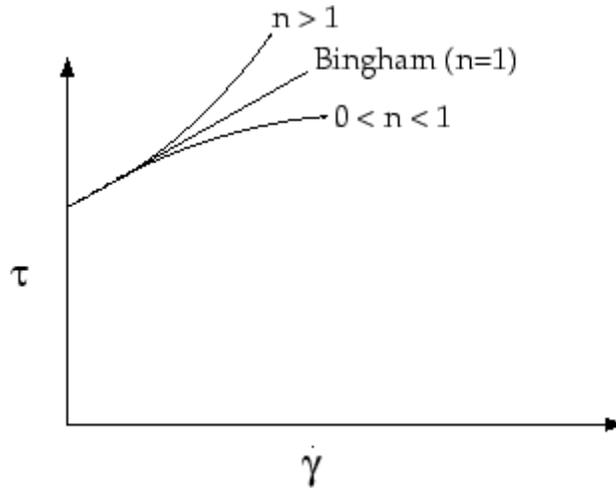


Figura 5: Variaciones del índice de comportamiento en modelo de Herschel-Bulkley.

Otro modelo bastante utilizado para comportamientos pseudoplásticos con límite de fluencia es el modelo de **Casson**, que según algunos autores (de Kretser *et al.* 1997), se ajusta bien al describir el comportamiento en el underflow de un espesador

$$\tau^{1/2} = (\tau_c)^{1/2} + (\eta_c \dot{\gamma})^{1/2} \quad (5)$$

En este caso, τ_c y η_c corresponden al límite de fluencia y a la viscosidad de Casson, respectivamente. La Figura 6 muestra la forma típica de una curva del modelo de Casson.

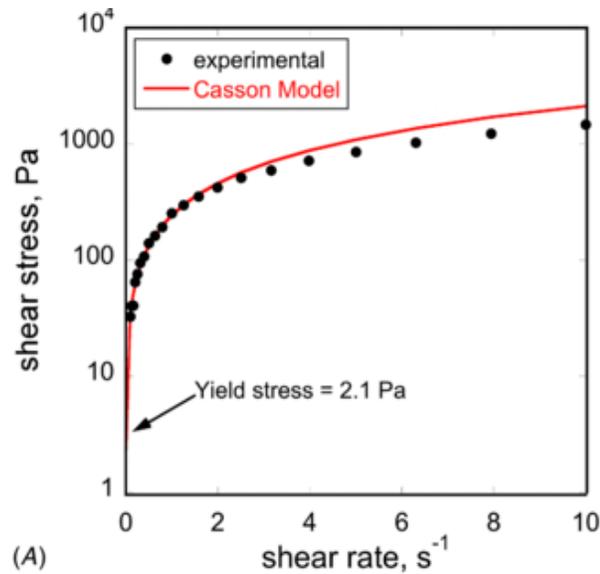


Figura 6: Curva típica del modelo de Casson. (Dumas *et al.* 2012)

2.3.2. Viscosidad dependiente del tiempo

La viscosidad de un fluido puede variar no sólo con la tasa de corte o esfuerzo aplicado, sino también con el tiempo, independiente de la tasa de corte aplicada. Este comportamiento se asocia con la formación de estructuras internas o bien el ordenamiento de las partículas con el transcurso del tiempo.

Cuando la viscosidad del fluido disminuye con el tiempo se habla de un comportamiento **tixotrópico**, por el contrario, cuando esta propiedad tiende a aumentar su valor en el tiempo se trata de un comportamiento **reopéctico**. Existen algunos modelos que se utilizan para definir estos comportamientos como aquellos de Weltman (1943), el de Hahn (1959) y el de Figoni y Shoemaker (1983). Las expresiones matemáticas se muestran a continuación, donde τ_e indica el esfuerzo de corte en el equilibrio para una tasa de corte fija.

- Modelo de Weltman:

$$\tau = A - B \ln(t) \quad (6)$$

- Modelo de Hahn:

$$\log(\tau - \tau_e) = P - at \quad (7)$$

- Modelo de Figoni y Shoemaker:

$$\tau = \tau_e + (\tau_{max} - \tau_e)exp(-kt) \quad (8)$$

Existen ejemplos de coeficientes para el modelo de Weltman para tasas de deformación entre 50 y 300 s⁻¹, aplicado a la industria del maíz (Rao 2001).

Adicionalmente, Tiu y Boger (1974), plantearon un modelo que considera la variación de la viscosidad tanto por efectos de la tasa de corte (utilizando alguno de los modelos antes vistos) como por el tiempo. Sin embargo su aplicabilidad se ha probado sólo en la industria alimenticia, debido a la gran variación de composición de algunos alimentos en un corto lapso de tiempo.

2.4. Número de Péclet

El número de Péclet es una magnitud adimensional cuya expresión matemática se puede escribir de diferentes formas, sin embargo, en este estudio el interés reside en su uso para calcular cuanta energía mecánica se debe aplicar a un fluido para provocar una deformación que no se deba a la energía térmica (fuerzas brownianas) del fluido.

La expresión matemática es la siguiente:

$$Pe = \frac{\eta\dot{\gamma}a^3}{\kappa T} = \frac{\text{energía mecánica}}{\text{energía térmica}} \quad (9)$$

Donde η es la viscosidad del medio, a es el tamaño característico de las partículas, $\dot{\gamma}$ la tasa de corte, κ es la constante de Boltzmann y T es la temperatura.

Cuando $Pe < 1$ el comportamiento (deformación) del fluido no depende del esfuerzo mecánico aplicado. A medida que se aproxima a 1, el esfuerzo mecánico comienza a ser el causante de la deformación del fluido, mientras que si Pe aumenta progresivamente su valor, la resistencia del fluido va disminuyendo hasta que se llega a un equilibrio. Finalmente cuando $Pe \gg 1$ el comportamiento del fluido depende exclusivamente del esfuerzo aplicado.

Este número sirve, por ejemplo, para clasificar el comportamiento de suspensiones con partículas muy pequeñas (bajo 10 μm).

2.5. Espectroscopía de minerales

Esta técnica consiste en la medición de rasgos espectrales únicos de las especies minerales a lo largo del espectro electromagnético, debido a la absorción y reflexión de energía en distintos rangos de longitud de onda. En este trabajo, se revisan, comparan y utilizan equipos de espectroscopía de reflexión en el rango visible-infrarrojo, que consiste en la medición del espectro reflejado por una

muestra mineral, una vez que ha incidido sobre ella un haz electromagnético de características conocidas.

Los rasgos espectrales provienen de la absorción por parte de la muestra de rangos específicos de longitud de onda del haz incidente. La energía absorbida se transforma en saltos de energía de electrones de algunos elementos específicos, además de vibraciones, torsiones y extensiones de enlaces en los grupos funcionales que conforman los cristales del mineral, como se muestra en la Figura 7. Es importante mencionar que dichas vibraciones presentan armónicos de primer y segundo orden, también detectables en el espectro. Lo anterior, sumado a que cada mineral posee una composición y estructura cristalina específica, permite identificar la especie analizada. Así, se puede entender que cada mineral tendrá su propia combinación de rasgos de absorción y reflectancia (representados en azul y rojo respectivamente, tal como se aprecia en el ejemplo de la Figura 8).

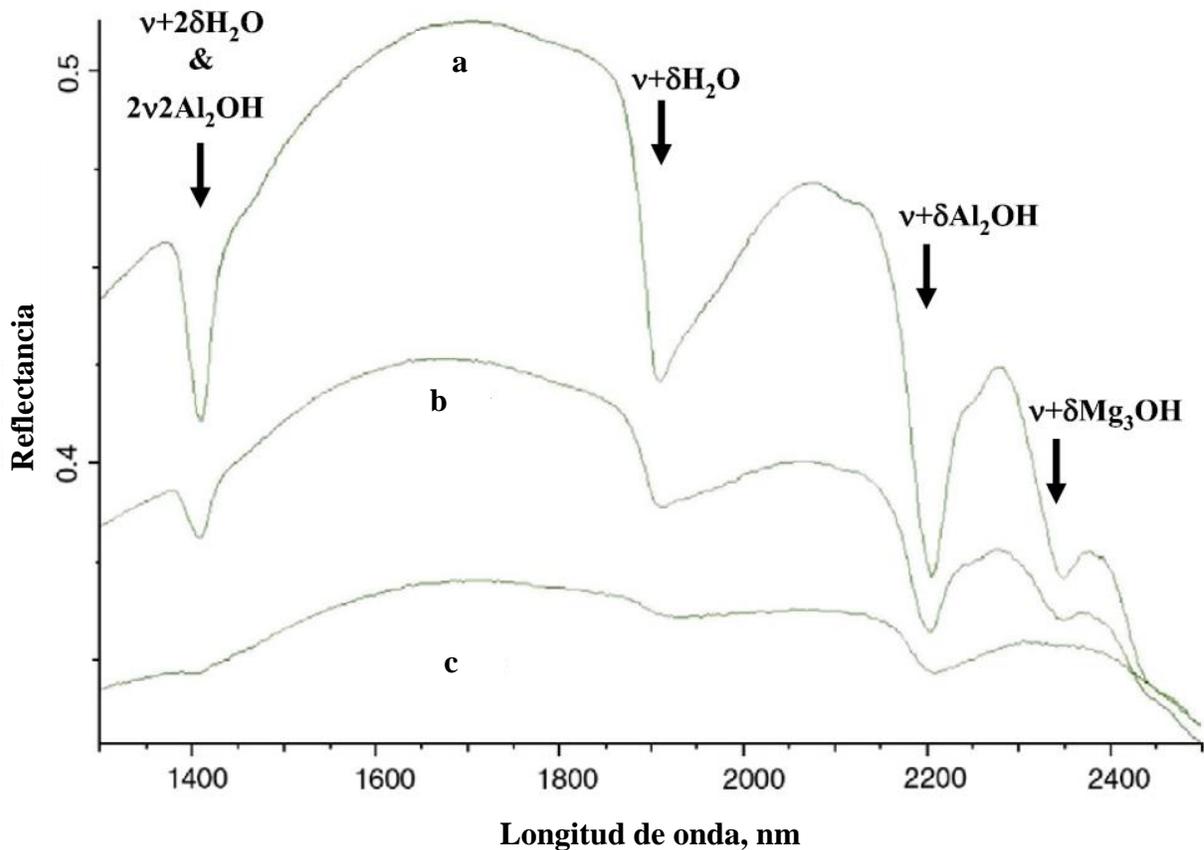


Figura 7: Curva espectral de la Illita en el rango 1200-2600 nm: (a) alto grado de cristalinidad, (b) cristalinidad intermedia, (c) bajo grado de cristalinidad ($v+\delta$: estiramiento y torsión de los grupos OH^- respectivos; $2v$: primer armónico de estiramiento).

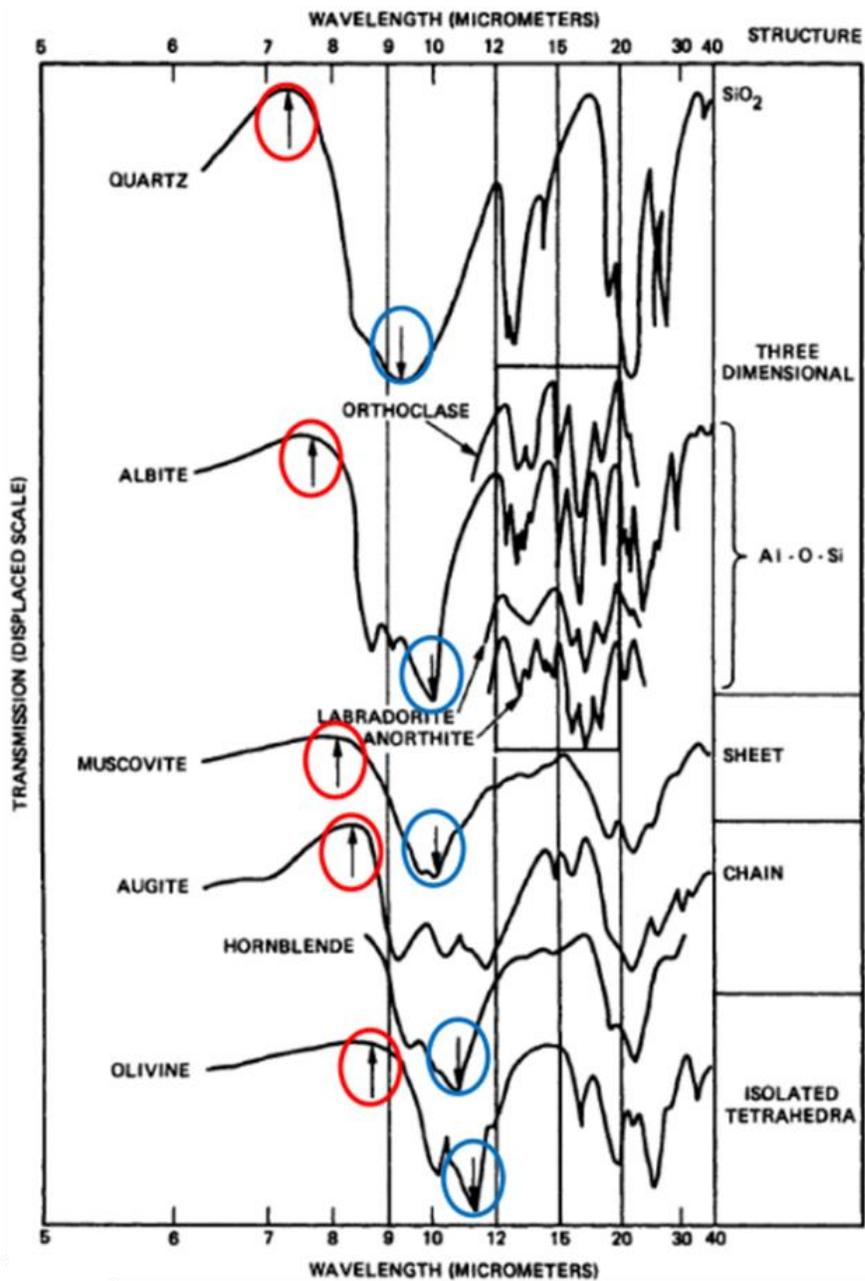


Figura 8: Espectros de diferentes minerales. (Elachi & van Zyl 2006)

La principal ventaja de utilizar la espectroscopía como herramienta para la identificación de minerales reside en el hecho de que elimina cualquier interpretación subjetiva en el momento de la identificación, entregando mediciones consistentes en el tiempo, siempre que el equipo cuente con el mantenimiento y la calibración correspondientes. Se debe entender que la espectroscopía debe ir de la mano con el conocimiento geológico de la muestra analizada, actuando como herramienta de apoyo y no sustitutiva.

2.5.1. Rangos de longitud de onda en espectro visible-infrarrojo

Dependiendo de la aplicación para la que se use la espectroscopía, la denominación que reciben las diferentes regiones dentro del espectro electromagnético varía. En el caso de los equipos de espectroscopía de minerales orientados a la industria minera, la denominación no es uniforme, sin embargo por lo general se utiliza la nomenclatura asociada a la teledetección (sensores remotos). Todos los resultados de este trabajo se expresan utilizando dicha nomenclatura, de ser necesario (Figura 9).

| Application Field | 13000 cm ⁻¹ | | 4000 cm ⁻¹ | | 400 cm ⁻¹ | | 100 cm ⁻¹ | |
|-------------------|------------------------|--|---|-----------------------|---|--|--------------------------------------|--|
| Spectroscopy | VIS | | NIR (13000 - 4000 cm ⁻¹) | | MIR (11000 - 400 cm ⁻¹) | | FIR (400 - 100 cm ⁻¹) | |
| Astronomy | VIS | | NIR (0.7/1.0 - 5μm) | | MIR (5 - 25/40μm) | | FIR (25/40 - 200/300μm) | |
| Remote Sensing | VIS | | NIR (0.7 - 1.0) | SWIR (1.0 - 2.5μm) | TIR (3 - 5 μm MWIR) (8 - 14μm LWIR) | | | |
| | 0.7μm 1.0μm | | 2.5μm | 14μm | | | | |

Figura 9: Denominación de rangos en el espectro visible-infrarrojo.(Hecker *et al.* 2010)

La separación del espectro en regiones se basa en los rasgos espectrales de los grupos funcionales típicos y en el funcionamiento de los sensores. Como regla general, los grupos funcionales poseen rasgos espectrales en alguno de los rangos recién expuestos, pudiendo incluso manifestarse en dos o incluso tres de ellos. Dichos grupos funcionales son los que dan la denominación al grupo de minerales, ya sean carbonatos, sulfatos, hidróxidos y silicatos, entre otros. A continuación se los listan los rangos, su ubicación dentro del espectro y los grupos típicamente detectables en ellos.

- **Visible-Near Infrared (VNIR) (400-1000 nm):** es el rango que agrupa el espectro visible y el infrarrojo cercano, principalmente asociado a la detección de transiciones electrónicas en Fe²⁺ (1000-1200 nm) y Fe³⁺ (860-930 nm). *Figura 10A*
- **Short Wave Infrared (SWIR) (1000-2500 nm):** corresponde al infrarrojo de onda corta, donde se manifiesta principalmente la presencia de grupos hidroxilo (OH⁻) unidos con Al, Fe, Mg. El hidroxilo presenta rasgos propios en los 400 nm, apareciendo también el espectro del agua con rasgos característicos en 1400 y 1900 nm. Algunos rasgos de los carbonatos son medibles en este rango, sin embargo no son los principales. *Figura 10B*

- **Thermal Infrared (TIR) (2500-14000 nm):** es el rango más lejano de todos los listados, permite principalmente la detección de silicatos y carbonatos. Figura 10C

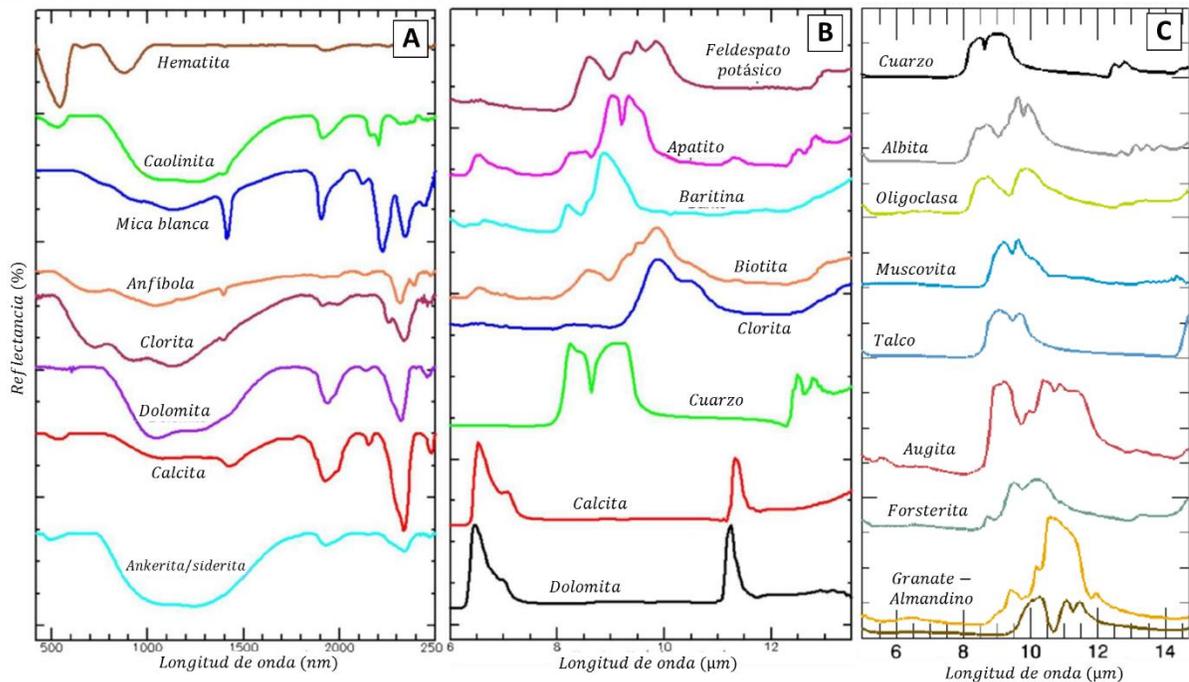


Figura 10: Curvas espectrales típicas según rango (A: VNIR-SWIR, B y C: TIR)

2.6. Tecnologías espectrales

Actualmente existen en el mercado diversos equipos que utilizan la espectroscopía de reflectancia para la identificación de minerales y zonas de interés. Dichas tecnologías se pueden dividir en 3 categorías: equipos para uso en laboratorio, equipos portátiles y equipos de mapeo.

2.6.1. Equipos de Laboratorio

Estos son equipos son estacionarios y están orientados principalmente al trabajo en un ambiente de laboratorio, de escasa o nula movilidad, donde es posible tener el control de temperatura, humedad y material particulado en suspensión. En general están enfocados al análisis de sondajes y detritos en grandes cantidades. La descripción del HyLogger3 se revisa con detalle en la sección siguiente.

2.6.1.1. CoreScan HCI-3

El equipo denominado Hyperspectral Core Imager III (HCI-3, por sus siglas) creado por la compañía CoreScan permite el análisis en los rangos VNIR-SWIR (450-2500nm) (CoreScan Pty 2014). Es capaz de detectar las zonas de la bandeja donde existe algún trozo de sondaje, de modo de determinar coordenadas de posición y altura para el análisis, que luego son confirmadas por el operador. Cada punto de análisis de la muestra corresponde a un cuadrado de 0,5 mm de lado,

pudiendo incrementarse hasta los 5 mm, permitiendo incluso 1000 metros de análisis por día. Una visión general del equipo se presenta en la Figura 11.



Figura 11: CoreScan HCI-3. (CoreScan Pty 2014)

2.6.1.2. GEOTEK MSCL

El Multi Sensor Core Logger (MSCL) (Geotek Ltd. 2014) es un equipo cuyos sensores se montan a pedido, pudiendo el usuario decidir los más adecuados para las tareas que desempeñará. Existen variantes que analizan sondajes de forma vertical y otro en múltiples secciones. Opera al igual que el equipo anterior en el rango VNIR-SWIR, permitiendo analizar sondajes de hasta 1,5 m de largo y entre 50 y 150 mm de diámetro, con un intervalo de muestreo de 1mm. Este equipo permite el uso de un equipo de fluorescencia de rayos X a través de un sensor portátil, que permite detectar desde el Magnesio al Uranio.

Entre otras características adicionales, se encuentra la posibilidad de analizar la susceptibilidad magnética, la presencia de hidratos (análisis infrarrojo) y de especies radioactivas (espectroscopía gamma), la densidad de la muestra mediante rayos gamma, realizar espectrofotometría de color (en longitudes de onda de 360 a 740 nm) entre otros. Varias de las posibilidades recién mencionadas son de suma utilidad en el análisis de sedimentos, sin embargo su aplicabilidad en la gran minería es acotada. La Figura 12 muestra la ubicación de los sensores en el MSCL-S, siendo algunos de estos omitidos en la descripción por no ser de gran utilidad en minería.

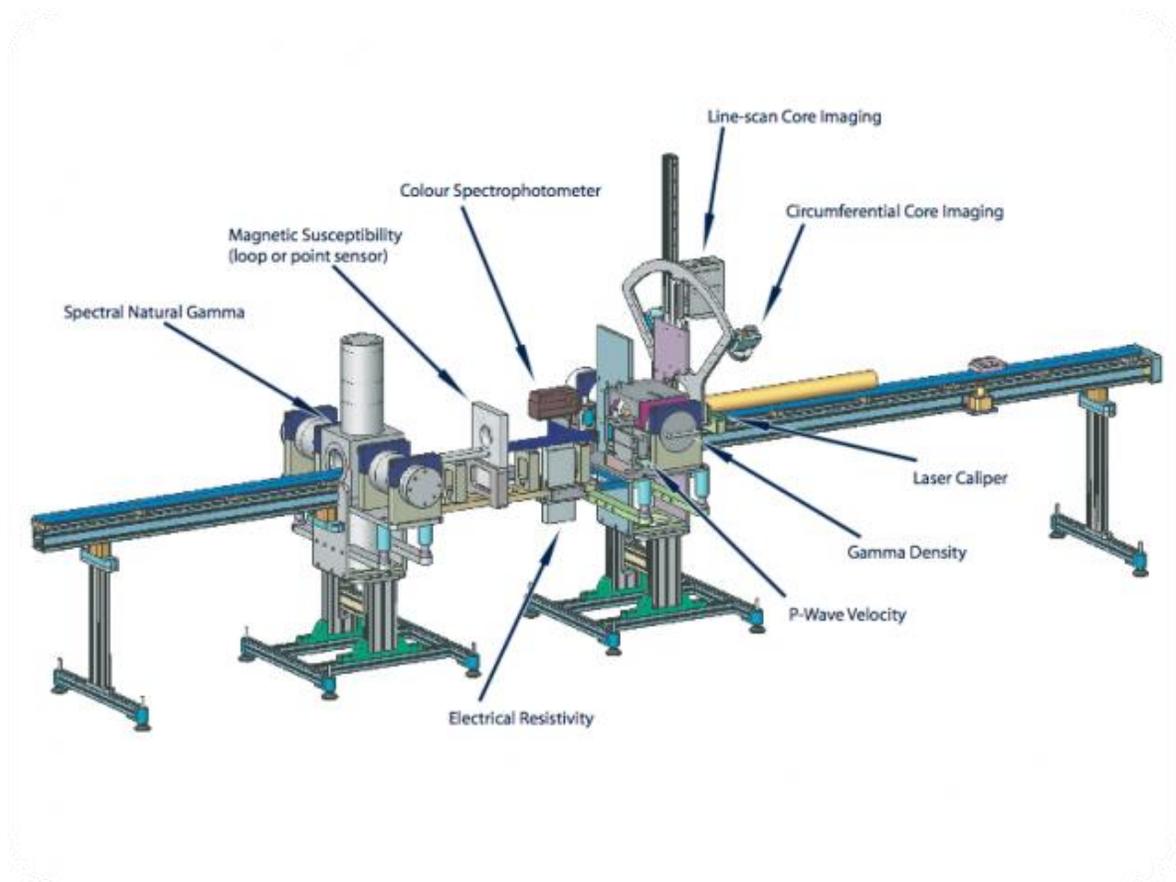


Figura 12: GEOTEK MSCL-S. (Geotek Ltd. 2014)

2.6.1.3. SisuRock

Denominado Hyperspectral Core Imaging Station –expuesto en la Figura 13- es un sistema automatizado para el escaneo de sondajes, permitiendo el análisis de bandejas de hasta 1,5 x 0,65 m de un peso de hasta 50 kg (Specim 2014). Tiene básicamente dos modos espectrales de operación; registro en el rango SWIR junto con toma de imágenes RGB de alta resolución (Figura 14), y registro espectral SWIR+VNIR, además de incorporar la opción de escaneo en el rango termal (TIR), en el rango de 800-12000 nm para el reconocimiento de más minerales.

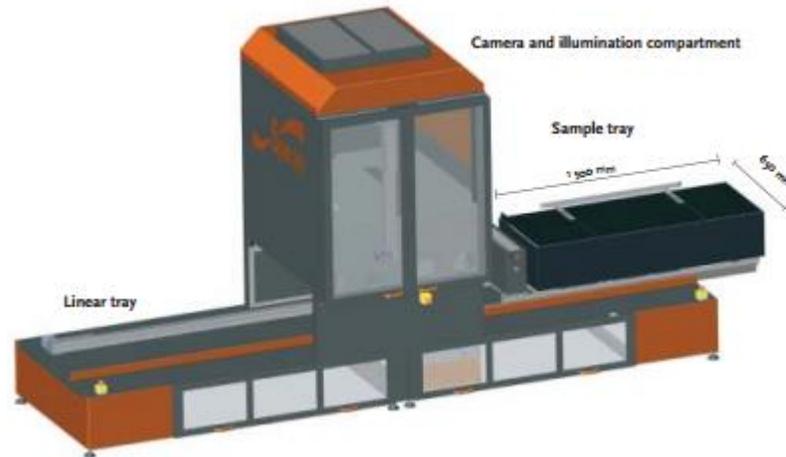


Figura 13: SisuRock Hyperspectral Core Imaging Station. (Specim 2014)

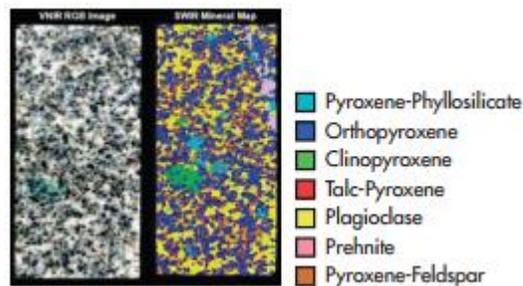


Figura 14: Escaneo de alta resolución (0,2 mm) de un testigo unitario. (Specim 2014)

2.6.2. Equipos portátiles

2.6.2.1. PIMA SP

El Portable Infrared Mineral Analyzer Spectrometer (Terraplus Inc. 2013) –en la Figura 15- es uno de los primeros equipos de espectrometría portátiles en salir al mercado. Utilizado para el análisis de muestras puntuales, opera en el rango SWIR, más específicamente desde 1300 nm a 2500 nm, siendo utilizado en el análisis de suelos, sedimentos e incluso piezas de museo. Posee una ventanilla por la cual se analiza la muestra, proceso que demora entre 30 y 60 segundos y ha sido usado como método de apoyo no-destructivo en las labores de exploración minera.



Figura 15: Apariencia general de espectrómetro PIMA. (Terraplus Inc. 2013)

2.6.2.2. TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Analyzer

Equipo similar al PIMA, capaz del análisis en el rango VNIR-SWIR (350-2500nm) (ASD Inc. 2013), con una resolución espectral de 3 a 6 nm, especialmente diseñado para minerales opacos con énfasis en los de alteración. Este equipo no requiere que la muestra reciba una preparación especial, permitiendo un análisis rápido, siendo compatible con el software The Spectral Geologist (TSG), revisado en la sección siguiente. La Figura 16 muestra al equipo, en comparación al tamaño de un computador portátil.



Figura 16: TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Spectrometer. (ASD Inc. 2013)

2.6.3. Equipos de mapeo

2.6.3.1. SpecTIR

La compañía SpecTIR desarrolla actualmente tres tipos de sensores: AisaEAGLE (VNIR, 400-970nm), AisaHAWK (SWIR, 970-2500nm) y AisaOWL (TIR, 7700-12000nm) (SpecTIR 2012a; SpecTIR 2012b; SpecTIR 2012c), cada uno con características diferentes, pero todos hechos para vuelos de mapeo -Figura 17, a,b y c respectivamente-.

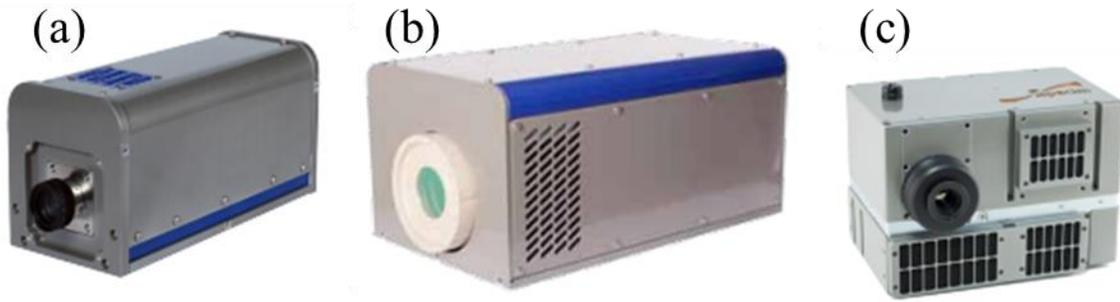


Figura 17: AisaEAGLE, AisaHAWK y Aisa OWL, respectivamente. (SpecTIR 2012a; SpecTIR 2012b; SpecTIR 2012c)

2.6.3.2. Hyperion Imaging Spectrometer

Desarrollado por la NASA, está enfocado en labores de reconocimiento, aunque posee aplicabilidad en el ámbito geológico (Pearlman *et al.* 2001). Analiza en el rango VNIR-SWIR (400-2500nm) permitiendo analizar zonas desde 15m hasta 60m de diámetro. Este equipo requiere dos calibraciones, una previa al despegue y otra en órbita. Se destaca por la facilidad con la que puede acceder a casi cualquier lugar de la tierra. La Figura 18 muestra cómo se ve el equipo antes de su puesta en órbita.

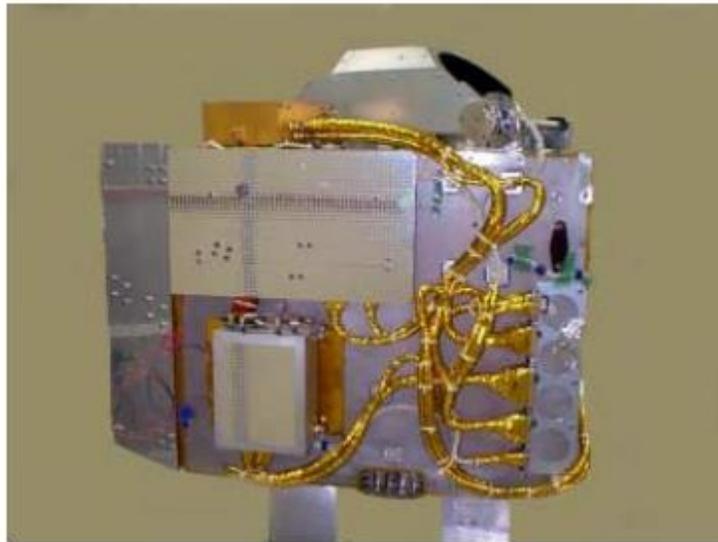


Figura 18: Hyperion Imaging Spectrometer. (Pearlman *et al.* 2001)

2.6.3.3. Aviris

El Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer –en la Figura 19- (National Aeronautics and Space Administration n.d.), también desarrollado por la NASA, es un equipo diseñado para los vuelos de mapeo, con 224 canales espectrales en el rango VNIR-SWIR (380-2500nm) y una

resolución espectral de 10 nm. A 20 km de altura permite analizar pixeles de 20m de diámetro, barriendo 11 km en cada medición. Es utilizado en estudios atmosféricos, geológicos e hídricos, entregando resultados más fiables que el Hyperion Imaging Spectrometer.

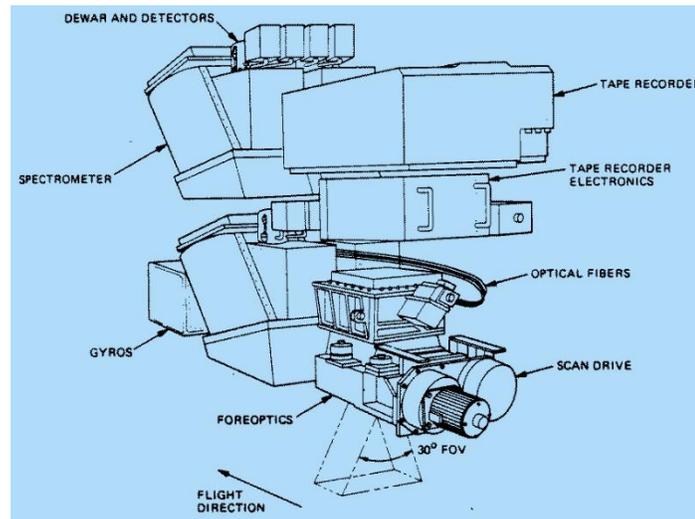


Figura 19: Esquema de AVIRIS. (National Aeronautics and Space Administration n.d.)

2.7. HyLogging

Se entiende por HyLogging al conjunto de herramientas que permite el análisis sistemático de muestras minerales por medio del uso de espectroscopía de reflectancia, donde el material analizado se puede encontrar en forma de sondaje, detritos y pulpas (secas).

El HyLogger3 ha sido utilizado en la actualidad para el análisis de una gran cantidad de muestras, con el objetivo de crear la denominada National Virtual Core Library (NVCL), en Australia, además de ser utilizada como herramienta de soporte, evitando gastos excesivos en perforación (Huntington & Quigley 2006; Huntington, Clissold, *et al.* 2012; Huntington, Hancock, *et al.* 2012).

2.7.1. HyLogger3

El Hyperspectral Logger 3 (HyLogger3 en adelante) permite recolectar una gran cantidad de datos espectroscópicos y de imágenes en alta resolución mediante el análisis no destructivo, debido a la naturaleza semi-automatizada del proceso, requiriendo sólo ingresar información básica de la bandeja analizada como el número de esta y la profundidad. Este último parámetro no es relevante cuando se analizan muestras aisladas, luego se ingresan valores correlativos de una bandeja a otra para evitar problemas en el software TSG.

El equipo cuenta con un sensor de 531 canales para el rango VNIR-SWIR (380-2500nm) y otro sensor para el rango TIR (6000-14500) de 341 canales (Huntington, Clissold, *et al.* 2012), además de una cámara de alta resolución para la adquisición de imágenes. Se debe mencionar que este equipo es casi el único en incorporar un sensor TIR de manera estándar para el análisis de muestras minerales, permitiendo la identificación de un gran número de carbonatos y silicatos, entre otros.

El tamaño del pixel proyectado en la muestra es de 10x18mm, extrayéndose datos cada 8mm de muestra, sin embargo el intervalo de muestreo puede ser aumentado con el objetivo de agilizar la adquisición de datos.

Las muestras se montan sobre una mesa automatizada que realiza los movimientos necesarios para el escaneo progresivo de las secciones de cada muestra. En la Figura 20 se pueden apreciar los principales componentes del equipo. Para cualquier tipo de muestra, la preparación sugerida es la remoción de polvo superficial y que se encuentre a una temperatura similar a la del recinto donde se realiza el escaneo, entre 23 y 25°C.

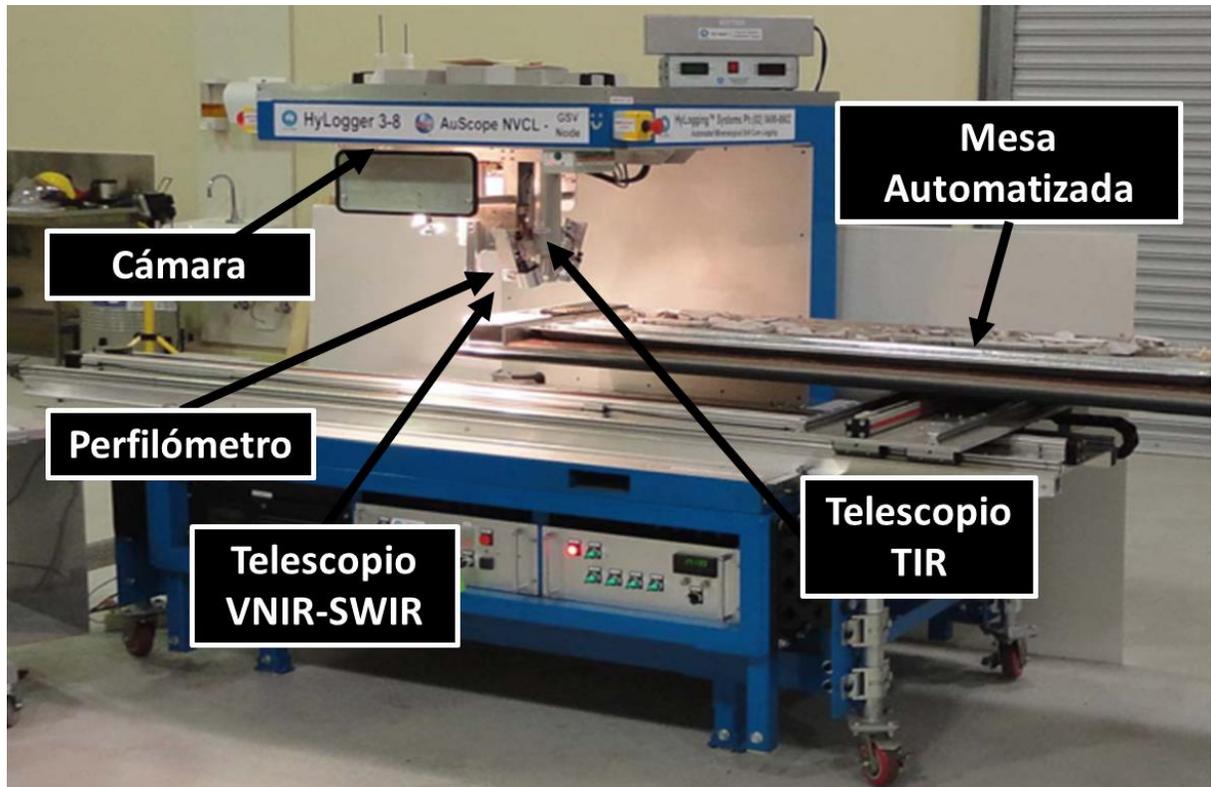


Figura 20: Principales componentes del HyLogger3.(adaptado de (Huntington, Clissold, *et al.* 2012))

Los sondajes (de diamantina y aire reverso) se pueden analizar en su propia bandeja, mientras que para el análisis de pulpas y material particulado de bajo tamaño, pueden ser analizados en las bandejas plásticas de chips existentes en el mercado. En el caso de requerir una superficie para el análisis de muestras de roca irregulares, se sugiere el uso de bandejas opacas de color negro, debido a la baja reflectancia que éstas poseen, interfiriendo mínimamente con el espectro reflejado por las muestras, tal como se observa en la Figura 21.



Figura 21: Imagen obtenida por el equipo con diferentes tipos de muestras.

El escaneo de muestras toma alrededor de dos minutos para una bandeja típica (aproximadamente 4m de sondaje), de la cual es extraída una imagen de alta resolución y la curva espectral correspondiente para cada intervalo de muestreo, obteniéndose una gran cantidad de mediciones para una sola bandeja de material (aproximadamente 600). Posteriormente, la información hiperespectral es exportada automáticamente al software TSG para evaluar la fiabilidad de las mediciones, comparando parte de la información con curvas medidas desde elementos de referencia (teflón, oro y un cuerpo negro para el rango TIR), las que son extraídas desde estos antes de cada medición de una bandeja. De no presentar anomalías, los datos se consideran confiables y un mensaje diagnóstico se puede apreciar para cada muestra medida, tal como se aprecia en la Figura 22, donde cada recuadro blanco indica mediciones sin problemas, mientras que los otros colores indican algún tipo de anomalía (en este caso coincide con mediciones en los bordes de las muestras, lo que no indica problemas).

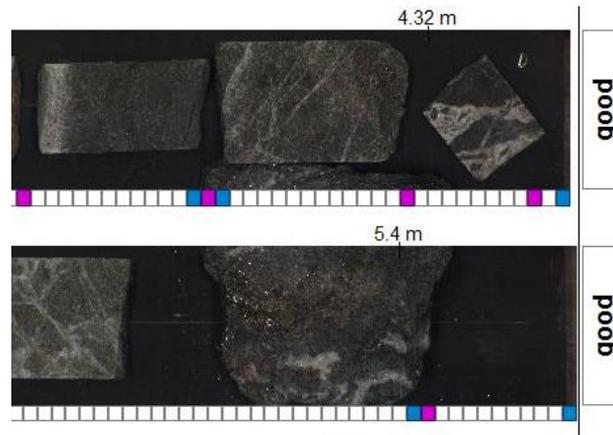


Figura 22: Ejemplos de diagnóstico de cada medición en HyLogger3.

La principal limitación del HyLogger3 es la imposibilidad de detectar sulfuros metálicos, cuyos rasgos característicos se encuentran en el rango de 25-100 micrones (Soong & Farmer 1978), más allá de lo que el sensor TIR puede percibir (14.5 micrones). Aun teniendo en cuenta lo anterior, es

posible establecer su presencia, mas no su identificación, utilizando algunas herramientas disponibles en TSG.

2.7.2. The Spectral Geologist (TSG)

Este es el software que procesa los datos espectrales y las imágenes obtenidas por el HyLogger3, posibilitando la identificación de minerales a través del algoritmo que posee, denominado TSA (The Spectral Assistant). El algoritmo TSA se encarga de procesar la señal de reflectancia de entrada para asignar una mezcla de minerales probable que más se acerque a dicha señal en las regiones VNIR-SWIR y TIR del espectro. El análisis es más preciso si se conoce la geología local, estableciendo “dominios” donde se activan y desactivan posibles minerales en intervalos de profundidad específicos, lo que evita combinaciones de minerales que en la realidad no son factibles para el yacimiento a analizar. Esta es la principal razón de porqué el HyLogging se concibe como herramienta de apoyo a la geología.

Otra etapa importante es el enmascaramiento de datos, donde según criterios ingresados en el programa, se le indica qué muestras debe considerar y cuáles no, evitando la aparición de mediciones de las bandejas, portamuestras o zonas con muestras de muy baja calidad para una medición confiable. Este procedimiento considera información del perfilómetro, valores de albedo y otras mediciones de cada muestra, por lo mismo siempre se recomienda inspección visual sobre los datos analizados.

Las curvas espectrales típicas (Figura 23) para una medición aparecen como una combinación de rasgos (picos y valles) para cada especie mineral, la que puede variar según la orientación del cristal y otros factores como la presencia de impurezas. Una vez asignada la mezcla de minerales posible (por TSA) se indica el error asociado a dicha estimación, luego se puede saber el grado de fiabilidad de la estimación realizada y descartar aquellas que sobrepasen un límite establecido por el usuario, aunque por defecto existe un límite para este error en el algoritmo.

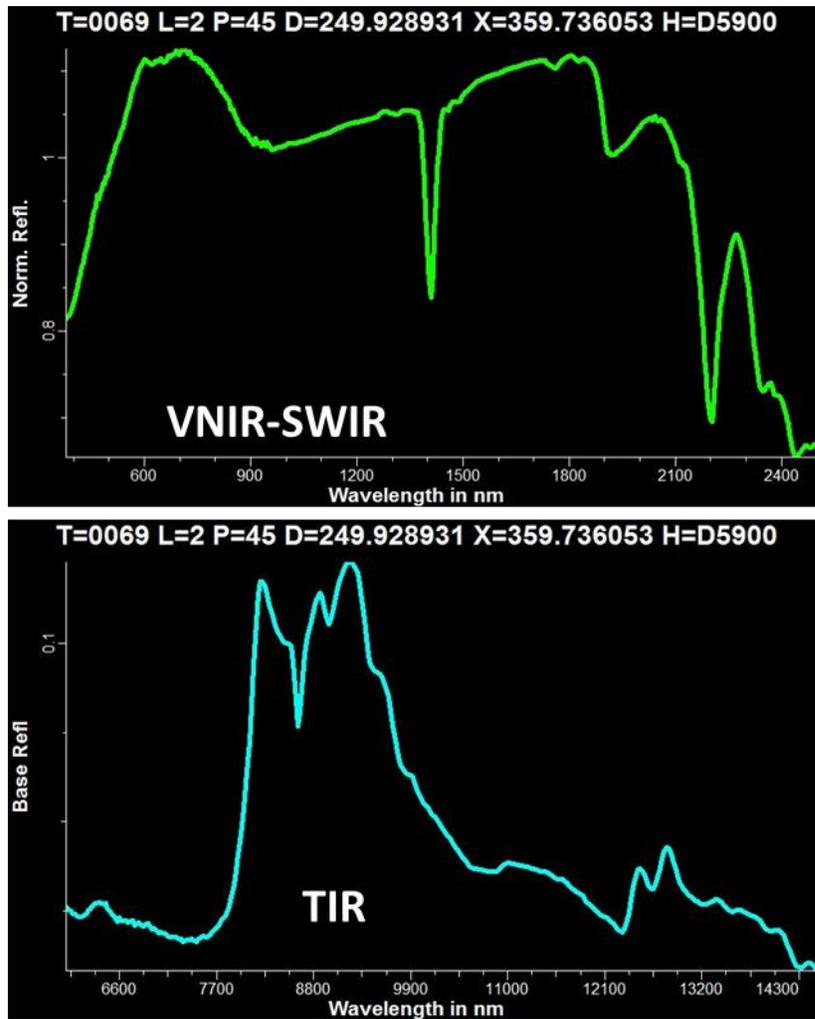


Figura 23: Curvas espectrales en TSG.

El software TSG también permite trabajar con información adicional extraída a través de los diferentes sensores del equipo, que se presenta a través de escalares (matriz de $n \times 1$, donde n es el número de mediciones realizadas a lo largo del sondaje o bandeja). En estos escalares existe información como la altura medida por el perfilómetro, minerales detectados (por orden de abundancia), validez de la medición (por criterios de albedo y profundidad) y error en el ajuste matemático del algoritmo TSA, entre otros.

También existe la posibilidad de que el usuario genere escalares, que usan como entrada cualquier tipo de información extraída por el equipo. Esta herramienta es utilizada, por ejemplo, para el mapeo de algún mineral o grupo de minerales específicos, la extracción de información de un rasgo específico de una muestra analizada, ya sea la profundidad o altura de éste, su ubicación en el rango de longitudes de onda, la asimetría, etc. Además, se pueden realizar operaciones matemáticas con los valores proporcionados por escalares, lo que posibilita la obtención abundancias relativas de minerales de una muestra en otra diferente, realizar control de calidad sobre las mediciones, medir

fracturamiento del macizo rocoso a través de sondajes y cualquier otra información que se requiera siempre y cuando se pueda extraer de la señal procesada por el equipo.

En el presente trabajo, TSG es la herramienta computacional que se utilizara para el análisis de la información hiperespectral obtenida y se utiliza en el análisis de las briquetas de pulpa que servirán como referencia para la evaluación de la factibilidad del uso del HyLogger3 como herramienta para la predicción de la reología de relaves. Esto se abordará con más detalle en la sección 6.6 de este trabajo.

2.8. Comparación de tecnologías espectrales

A continuación, se muestra un resumen de las principales especificaciones de las tecnologías espectrales revisadas. La información expuesta en la Tabla 1 y la Tabla 2 se basa en la información especificada por el fabricante, y los rendimientos de los equipos pueden variar según las condiciones de trabajo.

Tabla 1: Tecnologías espectrales fijas.

| Compañía | | Equipos fijos | | | | |
|----------------------------|---|--|---|--|--|-------------------------------------|
| | | CSIRO | CoreScan | GEOTEK | | |
| Tecnología | | <i>HyLogger 3</i> | <i>Hyperspectral Core Imager III (HCI-3)</i> | <i>Multi Sensor Core Logger (MSCL-S)</i> | <i>SisuROCK</i> | |
| Espectrometría | Rangos espectrales | VNIR, nm | 400 - 2500 | 450 - 2500 | Depende del sensor provisto por ASD, especificaciones no están publicadas (solo en rango VNIR-SWIR). | 400 - 2500 |
| | | SWIR, nm | 6000 - 14500 | N/A | | 8000 - 12000 |
| | | TIR, nm | | | | 2,8 - 10 - 100 nm (VNIR, SWIR, TIR) |
| | Resolución espectral (min, max) | 4 - 10 nm (VNIR,SWIR); 35 nm (TIR) | 4 nm | 6 nm (VNIR, SWIR) 48 nm 0,2 - 2 mm (SWIR) 0,09 - 0,64 mm (VNIR) 1,7 mm (TIR) | | |
| | Intervalo muestreo espectral | 4 nm | 0,5 - 5 mm | | | |
| Intevalo muestreo espacial | 4 mm mínimo, escanea circunferencias de 8 mm de diámetro. | | | | | |
| Características | Velocidad escaneo | Min | 100 m/día (sondajes); 2000 muestras/día (particulado) | 10 m/h (resolución de imágenes de 25 µm) | | |
| | | Max | 500 m/día (sondajes); 3000 muestras/día (particulado) | 1000 m/día | 20 m/h (resolución de imágenes de 50 µm) | 1200 m/día |
| | Tipo de muestras analizables | Sondajes, testigos, material particulado | Sondajes, testigos (bandejas de hasta 0,6 m x 1,5 m) | Sondajes (hasta 1,5 m de largo, diámetros entre 50 y 150 m) | Sondajes, bandejas o unitarios de hasta 1,5 m de largo, 0,64 x 0,3 m de ancho y alto) | |
| | Preparación previa | Remoción de polvo excesivo u otras impurezas superficiales | Remoción de polvo excesivo u otras impurezas superficiales | Remoción de polvo excesivo u otras impurezas superficiales | Remoción de polvo excesivo u otras impurezas superficiales | |
| | Registro de imágenes | Sí, resolución de 0,2 mm. | Sí, resolución de 60 µm | Sí, resolución máxima de 25 µm | Sí, resolución de 0,016 a 0,16 mm | |
| | Permite uso de software externo | Sí, especialmente diseñado para The Spectral Geologist | No, pero ofrece acceso a información a través de Coreshed. | No especificado | No especificado | |
| Otras características | Perfilómetro. | Perfilómetro, sugiere zonas a escanear de la bandeja, eliminando porciones no deseadas | Sensores a elección provistos por otras compañías (Espectrofotometría de color, radiación, XRF, etc.). Existen alternativas de sistemas de carga de bandejas. | No requiere enfriamiento externo. | | |

Se debe considerar que no es pertinente establecer comparaciones entre los distintos tipos de equipos que existen (e.g. entre equipos portátiles y de mapeo), debido a que su aplicabilidad y propósito de uso difieren. Los equipos portátiles están orientados como herramienta de apoyo en terreno para el reconocimiento de minerales, pero no fueron concebidos para el análisis de grandes cantidades de materiales, como pueden hacerlo aquellos equipos fijos como el HyLogger3. Esto mismo aplica para aquellos de mapeo, cuya principal función es la adquisición de datos de amplias zonas geográficas.

Tabla 2: Tecnologías espectrales portátiles y de mapeo.

| Compañía | Equipos portátiles | | | | Equipos de mapeo | | | | |
|-----------------------|---|---|--|-------------------------------|---|-----------------|--------------------------------------|--|---------------------------------|
| | Tecnología | No Especificado | ASD | SpecTIR | | | NASA | | |
| | | <i>Portable Infrared Mineral Analyzer Spectrometer</i> | <i>TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Spectrometer</i> | <i>AisaEAGLE</i> | <i>AisaHAWK</i> | <i>AisaOWL</i> | <i>Hyperion Imaging Spectrometer</i> | <i>AVIRIS</i> | |
| Espectrometría | Rangos espectrales | VNIR, nm | N/A | 350 - 2500 | 400 - 970 | N/A | N/A | 400-2500 | 380-2500 |
| | | SWIR, nm | 1300 - 2500 | | N/A | 970 - 2500 | N/A | | |
| | | TIR, nm | N/A | N/A | N/A | N/A | 7700 - 12000 | N/A | N/A |
| | Resolución espectral (min, max) | 7 nm | 3 nm @700 nm, 6 nm @1400/2100 nm | 3,3 nm | 12 nm | 100 nm | N/A | 10 nm | |
| | Intervalo muestreo espectral | 2 nm | | 1,15 - 9,2 nm | 6,3 nm | 48 nm | 10 nm | 10 nm | |
| | Intevalo muestreo espacial | N/A | | N/A | N/A | N/A | 15 a 60 m (en la tierra) | Según altura de vuelo, 4 - 20 km altura, 2 - 11 km | |
| Características | Velocidad escaneo | Min | 10 s/muestra (todo lo visible por ventanilla) | 0,1 s/muestra | N/A | N/A | N/A | N/A | Velocidad vuelo, 130 - 730 km/h |
| | | Max | 5 min | | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| | Tipo de muestras analizables | Sondajes, testigos, material particulado, suelos, etc. | Sondajes, material particulado, suelos, etc. | Vuelos de Mapeo | Vuelos de Mapeo | Vuelos de Mapeo | Mapeo satelital | Vuelos de Mapeo | |
| | Preparación previa | No especificada | Remoción de polvo excesivo u otras impurezas superficiales | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | |
| | Registro de imágenes | N/A | N/A | Sí, especificaciones ausentes | | | | | |
| | Permite uso de software externo | Sí, recomienda uso de TSG, aunque posee uno propio (PimaView) | RS3, compatible con TSG y SpecMin. Interactua con ENVI, ASD ViewSpec Pro, Indico Pro | RSCube | RSCube | RSCube | N/A | N/A | |
| Otras características | Tecnología antigua, predecesor del TerraSpec de ASD. Incorpora minicomputador para visualización de resultados. | | | | Montado en un satélite. Requiere dos calibraciones (una antes de salir y otra en la órbita) | | | | |

Por otro lado, se pueden establecer algunas consideraciones sobre los equipos fijos. El HyLogger3 es el único de éstos que incorpora un sensor en el rango TIR por defecto, mientras que los equipos restantes sólo lo ofrecen como un opcional. En particular, el MSCL-S tiene la limitación de que no elabora sus propios sensores, lo que implica un problema mayor pues existe la posibilidad de que los proveedores no enfoquen el uso de éstos en el análisis de sondajes.

La ventaja adicional que ofrece el HyLogger3 sobre el resto de los equipos fijos es que permite análisis de material particulado, como relaves, ampliando su campo de aplicabilidad. Esta es la razón por la que este equipo resulta de especial utilidad para este trabajo, que busca evaluar si es adecuado para nuevas aplicaciones metalúrgicas, como la predicción de la viscosidad y límite de fluencia de relaves mineros ricos en filosilicatos.

3. REOLOGÍA DE SUSPENSIONES E INFLUENCIA DE FILOSILICATOS

En esta sección se expone el estado del arte en los estudios relacionados con la reología de suspensiones y la influencia de los filosilicatos en ésta. Junto con ello, se exponen los fundamentos detrás de dichos estudios y se establece una discusión en torno a las variables que influyen mayormente en el comportamiento reológico de pulpas y relaves ricos en filosilicatos.

Se debe aclarar que de aquí en adelante, por simplicidad, los términos filosilicato y arcilla se considerarán equivalentes, a menos que se deje de forma explícita lo contrario.

3.1. Filosilicatos

Los filosilicatos son minerales con hábito foliado formados por capas de silicatos con diferentes números de coordinación. Comúnmente estos minerales son denominados “arcillosos” debido a su fina granulometría.

Estos minerales existen en diferentes yacimientos chilenos, donde su presencia puede diferir entre procesos como la lixiviación, la flotación, el bombeo de pulpas y relaves y la separación sólido líquido. Estudios sobre la flotación muestran la presencia de estos minerales en algunos de los principales yacimientos del país. Dicha información se presenta en la Figura 24.

| Ore Source/Mine | Origin | Ore Type | Rock Type | Clay Type and Amount |
|-----------------------|--------|----------|-------------------|--------------------------------------|
| Escondida (Benc 1906) | Chile | A | Porphyry/Andesite | Kaolinite 12% Illite 18% |
| Disputada (high clay) | Chile | B | Porphyry/Quartz | Montmorillonite 10% Illite 4% |
| Mansa Mina (Veta 3) | Chile | C | Andesite/Quartz | Kaolinite 8% Illite 4% |
| Escondida (Andesite) | Chile | D | Andesite | Montmorillonite 4% Brammollite 2% |

Figura 24: Contenido de filosilicatos en muestras de yacimientos chilenos.(Bulatovic *et al.* 1999)

Algunos minerales del grupo de los filosilicatos tienden a expandirse en presencia de agua, en particular dos subgrupos -las esmectitas y vermiculitas-, siendo denominados arcillas expansivas. Por otro lado, existen filosilicatos no expansivos, como los del grupo de la caolinita y la illita, que afectan a la reología sólo por su granulometría muy fina (con frecuencia con un d_{80} bajo los $38\mu\text{m}$).

3.1.1. Expansión de arcillas

En las arcillas expansivas, el agua ingresa entre las capas de estos minerales, provocando su expansión y aumentando de forma aparente el contenido de sólidos. Una suspensión con arcillas

expansivas puede aumentar dramáticamente su viscosidad y límite de fluencia, sin embargo el efecto depende de la arcilla presente. Madsen & Muller-Vonmoos 1989 indicaron que la montmorillonita sódica tiende a expandirse en mayor proporción que la montmorillonita cálcica, llegando a separar completamente las capas de dicho mineral por repulsión de doble capa electrónica.

La expansión por hidratación se produce por reemplazo catiónico en los tetraedros de sílice, donde el catión Si^{4+} es reemplazado por alguno de menor carga como Al^{3+} o Ti^{3+} , lo que deja las caras de las láminas con una carga ligeramente negativa, atrayendo cationes del medio. El problema es que los cationes ingresan hidratados, aumentando la distancia entre capas del mineral y por lo mismo el espacio que éste ocupa. La Figura 25 muestra como algunas arcillas poseen cationes inter-capas no hidratados, mientras que las expansivas presentan dichos cationes hidratados y fácilmente intercambiables.

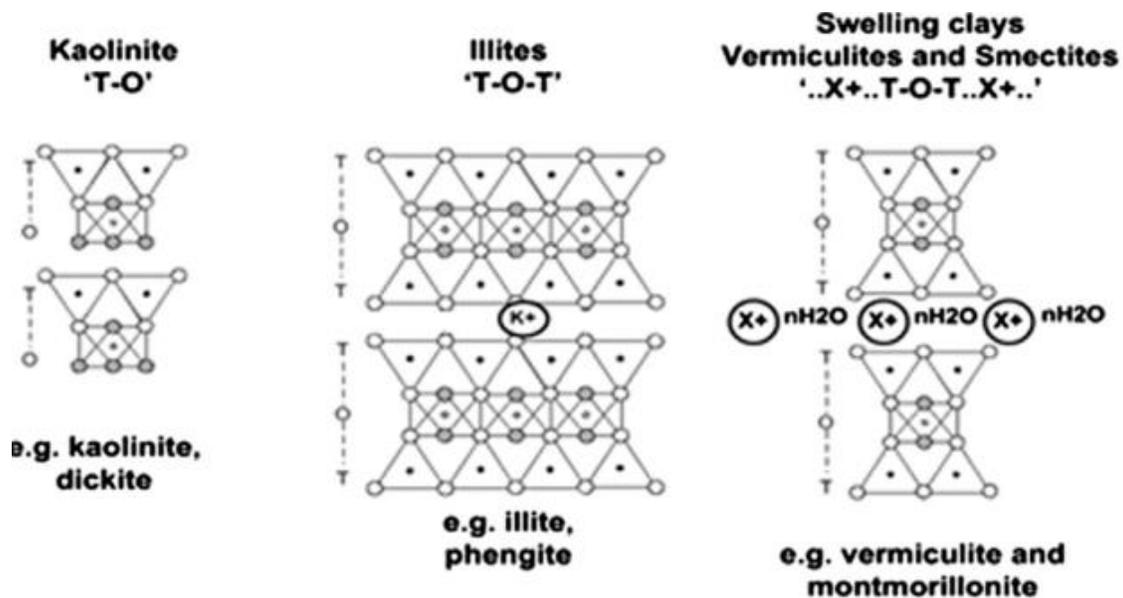


Figura 25: Estructura de las arcillas y cationes inter-capas. (Ndlovu *et al.* 2014)

El fenómeno recién explicado para las arcillas expansivas es conocido como **expansión cristalina** y su magnitud depende de cuántas moléculas de agua se coordinen con el catión hidratado, tal como se aprecia en la Figura 26.

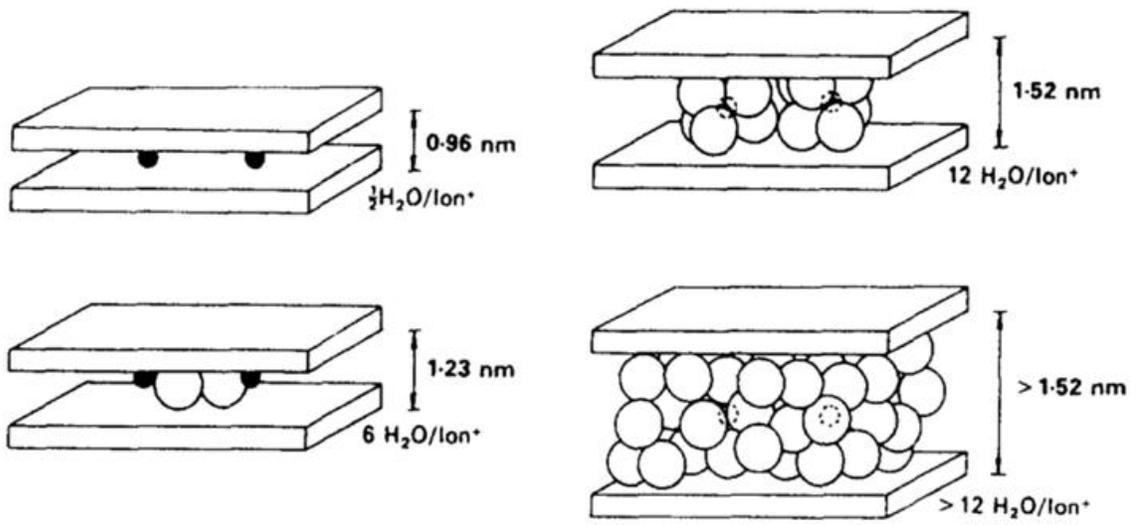


Figura 26: Diferencias en expansión de acuerdo a hidratación de cationes. (Madsen & Muller-Vonmoos 1989)

El grado de expansión intercrystalina depende fuertemente del nivel de saturación de agua del medio circundante (presión parcial de vapor) y debido a que en los relaves la fase dispersante es agua, el fenómeno siempre se manifiesta en su máxima magnitud posible.

Existe también otro mecanismo de expansión, denominado **expansión osmótica**. En este, la alta concentración de cationes en el espacio inter-capa de las arcillas (por la existencia de caras con carga negativa) promueve un flujo de agua desde fuera del mineral para igualar concentraciones (Figura 27).

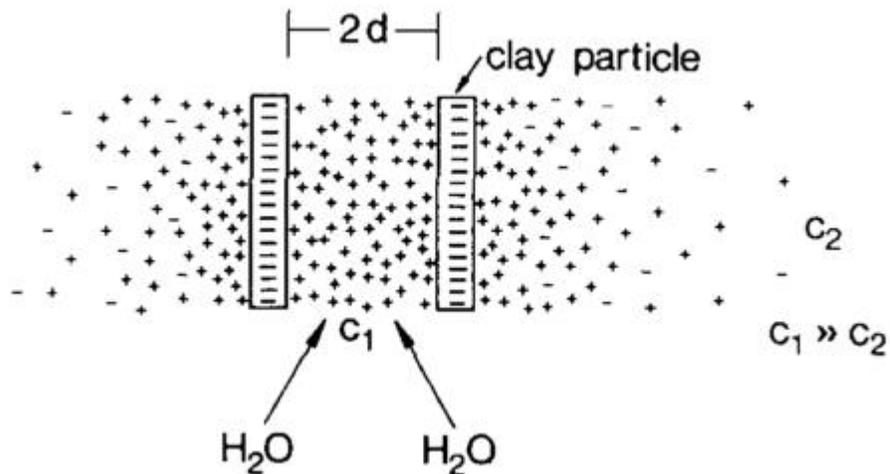


Figura 27: Expansión osmótica. (Madsen & Muller-Vonmoos 1989)

Este fenómeno está fuertemente controlado por la concentración de cationes entre las capas del mineral, por lo que se puede disminuir su magnitud aumentando la concentración del medio circundante (fase continua fuera del mineral). Debido a que la osmosis se puede controlar aplicando presión externa, la expansión osmótica es fuertemente afectada por los esfuerzos a los que se encuentra sometido el mineral. Esto explica algunos fenómenos comunes en las obras civiles, donde suelos arcillosos se expanden al realizar una excavación, debido a la liberación de presión.

3.1.2. Formación de arcillas expansivas desde micas

Algunas micas se pueden transformar en arcillas expansivas por fenómenos de meteorización y alteración, la que puede ocurrir con rapidez en soluciones acuosas con valores de pH muy ácidos o muy básicos como ocurre en una operación minera. El resumen del proceso de transformación de una mica a arcilla expansiva se muestra en la Figura 28.

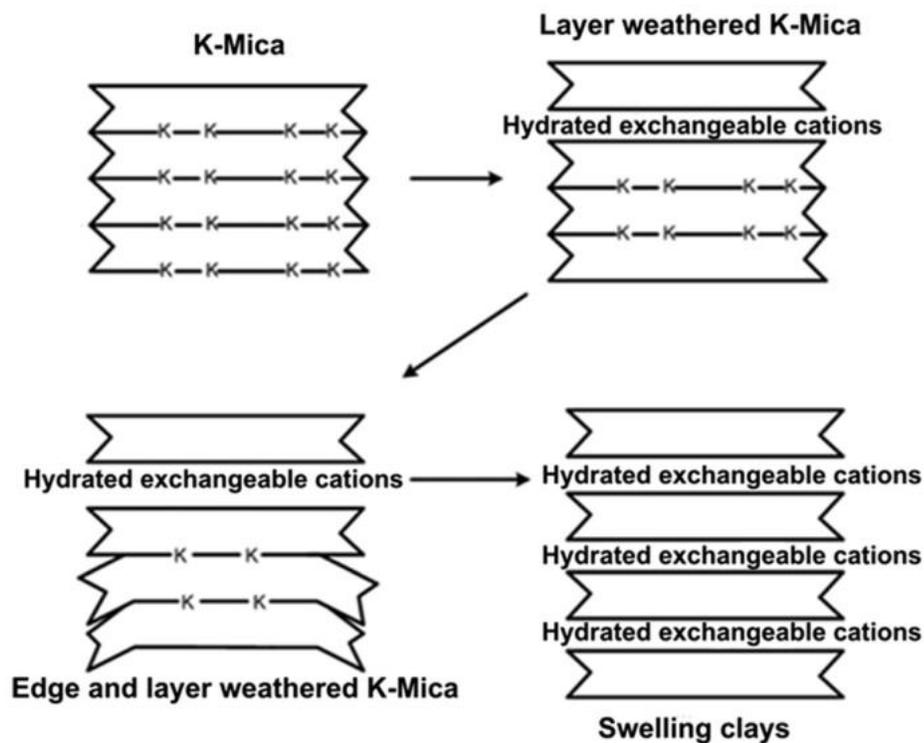


Figura 28: Transformación de una mica en arcilla expansiva. (Ndlovu et al. 2011)

3.1.3. Minerales típicos en yacimientos de Chile

El presente trabajo se centra en ejemplares de arcillas no expansivas (caolinita) y arcillas expansivas (montmorillonita). Su elección se justifica en poder estudiar un ejemplar de cada grupo, considerando su abundancia en yacimientos del país (Bulatovic *et al.* 1999).

3.1.3.1. Montmorillonita

La montmorillonita es una arcilla perteneciente al grupo de las esmectitas, que posee una estructura TOT (tetraedro-octaedro-tetraedro). Los tetraedros de sílice rodean a los octaedros compuestos de óxidos e hidróxidos de aluminio y magnesio. Entre cada estructura TOT se ubican cationes Na^+ , Ca^{+2} y K^+ fácilmente hidratables en presencia de agua (Figura 29), lo que confiere el comportamiento expansivo a esta arcilla. El tipo de catión que ingresa a la región inter-capa define el tipo de montmorillonita, ya sea sódica, cálcica o potásica.

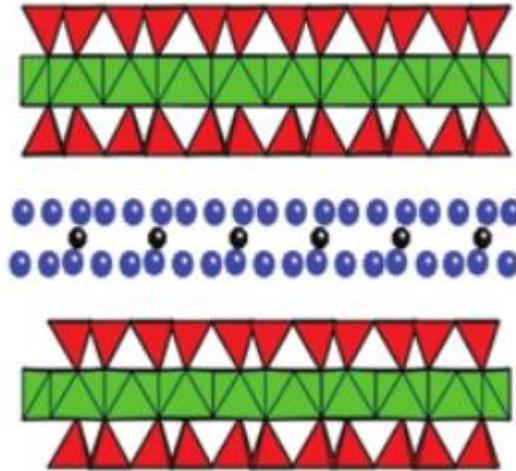


Figura 29: Estructura general de la montmorillonita.(Bishop *et al.* 2008)

La fórmula global de esta arcilla es $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ y es conocida por, poseer un comportamiento tixotrópico, además de por su carácter expansivo. Posee una dureza entre 1 y 2 en la escala de Mohs y una densidad variable, además de una alta higroscopicidad.

3.1.3.2. Caolinita

La caolinita, arcilla perteneciente al grupo de la caolinita-serpentina, presenta una estructura TO (tetraedro-octaedro, expuesta en la Figura 30), donde la capa de tetraedros de sílice está unida a octaedros de alúmina. Su fórmula global es $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, su densidad es de alrededor de 2.6 g/cm^3 y posee una dureza de 1 en la escala de Mohs. Es componente principal del caolín, utilizado ampliamente en la industria cerámica.

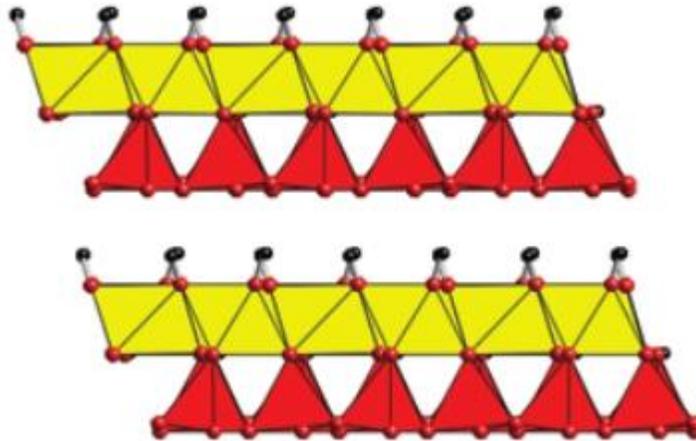


Figura 30: Estructura general de la caolinita.(Bishop *et al.* 2008)

A diferencia de la montmorillonita, esta arcilla no presenta un comportamiento expansivo ni tampoco es higroscópica.

3.2. Reología de suspensiones

Las pulpas son suspensiones mecánicas, es decir, una mezcla heterogénea de partículas sólidas no solubles (fase dispersa) en un medio líquido (fase dispersante). En este caso, los sólidos son partículas de mineral valioso y ganga en distintas proporciones, donde los concentrados poseen altas proporciones del primero en su fase sólida, mientras que los relaves se componen principalmente de partículas de ganga.

La particularidad de las suspensiones es que la fase dispersa tiende a sedimentar por efecto de la gravedad, por lo que es necesario mantener el fluido en movimiento para evitar su decantación, fenómeno indeseado en la mayoría de las etapas de la operación minera, salvo en la separación sólido-líquido.

3.2.1. Fuerzas que actúan sobre partículas suspendidas

En una partícula sólida en suspensión actúan tres tipos de fuerzas, donde la predominancia de cada una de ellas varía de acuerdo a las propiedades de las fases sólidas y líquidas.

- **Fuerzas coloidales:** Obedecen a fenómenos de carga superficial de las partículas y pueden ser de atracción (Van der Waals y electrostática) o bien de repulsión (electrostática, estérica, etc.). Ambas naturalezas –repulsiva y atractiva- conviven y resultan en una repulsión general (dispersión) o bien en una atracción general, que puede llevar a la agregación/coagulación de partículas.
- **Fuerzas brownianas:** De carácter aleatorio, dependen de la temperatura del sistema y son de gran influencia en partículas pequeñas (menor a $1\mu\text{m}$).

- **Fuerzas de naturaleza viscosa:** Dependen de la diferencia de velocidad local entre una partícula y el fluido que la rodea. Esto genera un aumento de la viscosidad de la suspensión en general.

La combinación de estas fuerzas indica el comportamiento general de los sólidos en suspensión, además de permitir entender algunos fenómenos propios de las suspensiones, como sus variaciones de viscosidad.

3.2.2. Comportamiento típico de suspensiones

El análisis de un reograma de suspensiones permite entender de mejor forma el comportamiento reológico de éstas. En particular, el reograma de la Figura 31 grafica la viscosidad v/s la tasa de corte.

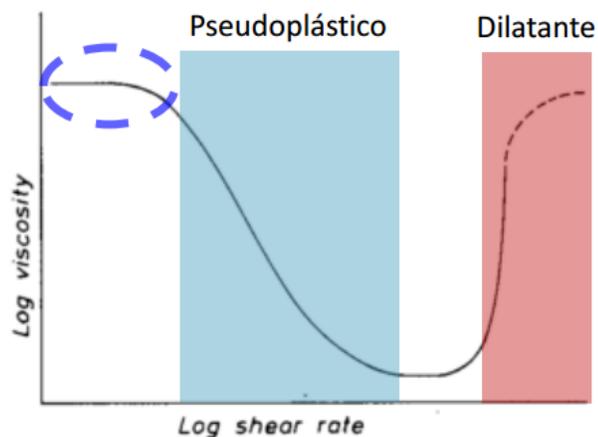


Figura 31: Reograma de suspensiones. (Barnes *et al.* 1989)

En éste se aprecia una primera meseta (indicada con línea segmentada) a bajos valores de la tasa de corte, donde la suspensión exhibe un comportamiento newtoniano. Existen algunas suspensiones donde el valor de viscosidad de esta meseta es tan alto que la instrumentación típica no lo puede medir, por lo que se manifiesta como un límite de fluencia (en un reograma τ v/s $\dot{\gamma}$ el límite de fluencia es una recta vertical, es decir de viscosidad infinita). Es importante recalcar que este límite de fluencia puede ser aparente (por limitaciones del instrumento de medición) o bien real, donde efectivamente hay que superar un esfuerzo de corte para poder iniciar el movimiento del fluido. En el caso de que se trate de un límite de fluencia aparente, se debe tener especial cuidado, pues existe movimiento del fluido cuando se presume quieto, lo que en el caso de un relave ya depositado puede tener consecuencias imprevistas.

Esta alta viscosidad a bajos valores de $\dot{\gamma}$ se debe a que el movimiento de las partículas es dominado por fuerzas brownianas, por lo que se deben desplazar rodeando unas a otras o rebotando entre sí. En esta situación, el número de Péclet (Pe) tiene valores menores a 1 debido a que la tasa de corte es muy baja y por lo tanto, una deformación ocasionada por energía mecánica despreciable en comparación a la originada por energía térmica (movimiento browniano).

Cuando la tasa de corte aumenta, el gradiente de velocidad orienta las partículas, no pudiendo el movimiento browniano restaurar la condición inicial. Esto ocasiona que las partículas se muevan con mucha menor resistencia que en el caso de tasas de deformación bajas y por lo tanto, la viscosidad disminuye (comportamiento pseudoplástico, zona azul en el gráfico). A medida que la tasa de corte aumenta, se forman capas de partículas, estructuras que permiten llegar a un valor mínimo de viscosidad (meseta inferior en el reograma).

Si la tasa de corte supera un punto crítico, las capas de sólidos desaparecen y la viscosidad comienza a aumentar con la velocidad de corte (comportamiento dilatante, zona roja en el gráfico). Además, en numerosos casos se aprecia reopexia (aumento de viscosidad con respecto al tiempo) cuando se llega a estos valores de $\dot{\gamma}$.

3.3. Factores determinantes de la reología

3.3.1. Contenido de sólidos en volumen (ϕ)

El efecto del contenido de sólidos en volumen en la viscosidad y límite de fluencia de una suspensión es muy importante. Esto se debe a que en la medida que hay un mayor espacio ocupado por sólidos, existe una mayor desviación de las líneas de flujo del medio dispersante, con el consiguiente aumento de las fuerzas viscosas y por lo mismo un incremento de la viscosidad de la suspensión. Del mismo modo, existe una mayor probabilidad de colisión entre partículas de sólidos y, en consecuencia, una mayor oposición a las partículas que se intentan mover de forma solidaria a la fase dispersante.

La base de los estudios de la influencia de ϕ en la reología viene de los estudios realizados por Einstein sobre partículas esféricas. Su modelo indica que partículas individuales aumentan la viscosidad de un líquido en función de su abundancia en volumen mediante la siguiente relación.

$$\eta = \eta_s(1 + 2.5\phi) \quad (10)$$

Donde η denota la viscosidad de la suspensión y η_s la viscosidad del medio dispersante (medio continuo).

La ecuación de Einstein no considera el efecto del tamaño de partícula ni una forma distinta a una esfera. Además está obviando el efecto de otras partículas y sus interacciones, pues fue pensada para suspensiones diluidas ($\phi < 10\%$) de esferas dispersas, por lo que no permite una adecuada representación de la realidad.

Ball y Richmond hacia el año 1980 propusieron que el efecto de todas las partículas de una suspensión concentrada ($\phi > 10\%$) es la suma de los efectos aislados, considerando además que cada partícula que se agrega requiere un espacio mayor a su volumen debido a que el conjunto de partículas tiende a no ocupar el espacio mínimo posible. La expresión que propusieron es exactamente la misma –salvo el cambio de variables– que Krieger y Dougherty propusieron en 1959 (Krieger & Dougherty 1959). Esta última es más general por considerar formas diferentes a esferas y la expresión matemática está expuesta en la ecuación (11).

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \quad (11)$$

• Donde:

- η : Viscosidad de la suspensión
- η_0 : Viscosidad de fase dispersante (medio continuo)
- ϕ : Contenido de sólidos en volumen
- ϕ_m : Fracción máxima de empaquetamiento
- $[\eta]$: Viscosidad intrínseca (depende de forma de la partícula)

El cociente η/η_0 se conoce también como viscosidad relativa (η_r) y la viscosidad intrínseca es un componente adimensional que da cuenta de la forma de las partículas. Esta ecuación ha mostrado buena aplicabilidad en el ajuste de datos obtenidos de fluidos con comportamiento pseudoplástico (donde la viscosidad disminuye con tasa de corte).

También destaca la aparición de un nuevo término, denominado “fracción máxima de empaquetamiento” (ϕ_m), que da cuenta de una situación límite donde existe contacto constante entre las partículas, es decir se encuentran ordenadas en una especie de arreglo cristalino.

Cuando el contenido de sólidos de una suspensión se aproxima al valor de ϕ_m , dicha suspensión comienza a comportarse como una pasta cada vez más viscosa debido al espacio casi nulo que tienen las partículas sólidas para moverse (Mooney 1951). Es por esto que si $\phi = \phi_m$ la suspensión se comporta como un sólido, es decir, tendrá viscosidad infinita. Como se puede notar, en la Ecuación (11), si se cumple el límite anterior la viscosidad relativa tiende a infinito.

Los valores de ϕ_m no son cercanos a la unidad si se asumen distribuciones mono-tamaño, de hecho en el caso de esferas dispersas en un arreglo cúbico centrado en las caras (FCC por sus siglas en inglés), el valor de este parámetro es 0.74. Esta situación cambia cuando se tienen partículas pequeñas y grandes, como ocurre en los relaves, donde existen distribuciones granulométricas, donde algunos estudios indican que ϕ_m se encuentra en el rango 0.45-0.48 (Ihle 2013). Este efecto se estudia con detalle en la sección 3.3.2.

El gráfico de la Figura 32, obtenido en un estudio de pulpas en las minas de platino de Sudáfrica (en el complejo de Bushveld) muestra como la viscosidad aparente (viscosidad a una tasa de corte específica) presenta un comportamiento asintótico con respecto a ϕ , siendo concordante con la existencia de un límite en el contenido de sólidos.

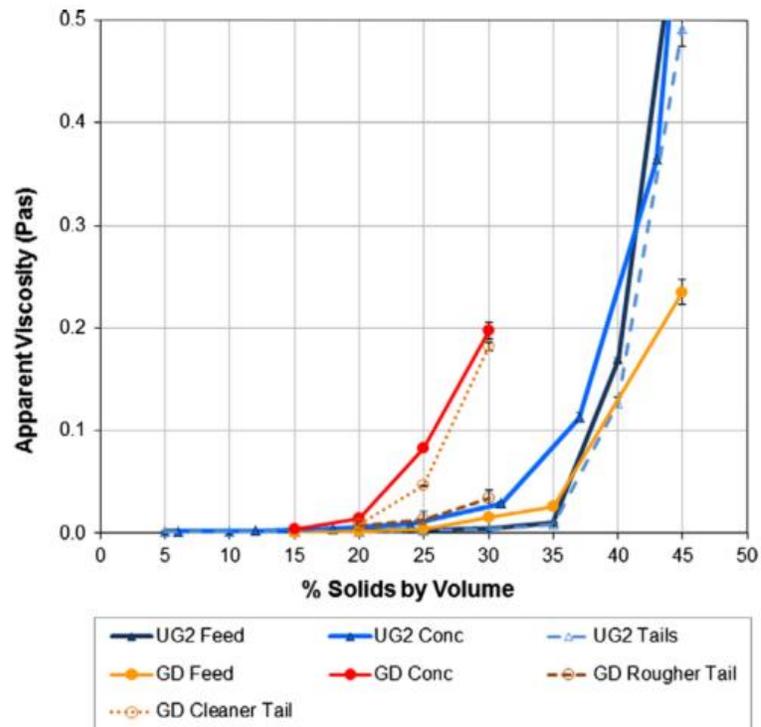


Figura 32: Comportamiento asintótico de la viscosidad ($\dot{\gamma}=160/s$). (Becker *et al.* 2013)

En el caso de existir fenómenos de agregación/floculación, el factor de empaquetamiento máximo disminuye drásticamente. La Figura 33 es un ejemplo simple de cómo la misma cantidad de partículas puede ocupar más (a) o menos (b) espacio.

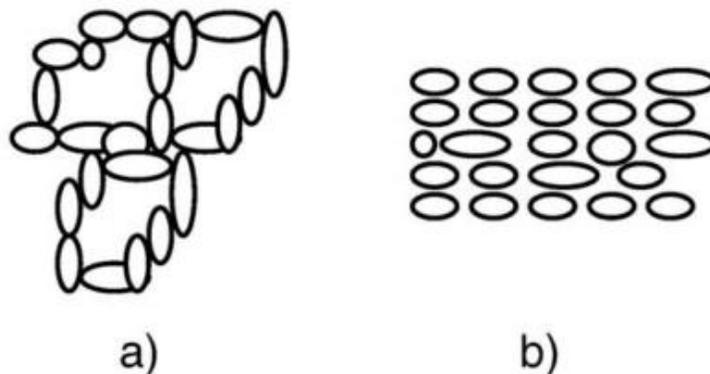


Figura 33: Comparación de espacio ocupado por partículas agregadas (a) v/s partículas dispersas (b). (Alejo & Barrientos 2009)

Estudios realizados por diversos autores (Tangsathitkulchai & Austin 1988; Tangsathitkulchai 2003; de Kretser *et al.* 1997; Becker *et al.* 2013; Alejo & Barrientos 2009;) exhiben una concordancia con la teoría propuesta, en cuanto la viscosidad y el límite de fluencia tienden a

umentar con las concentración de sólidos en volumen de una suspensión. La Figura 34 es una representación del aumento de ambas variables conforme ϕ aumenta.

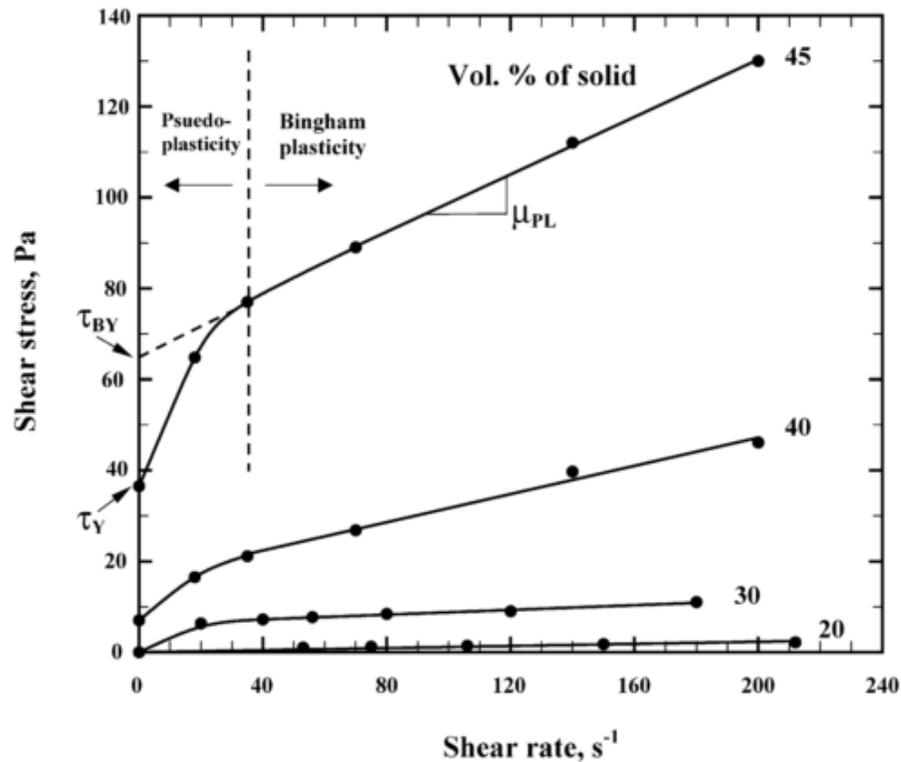


Figura 34: Aumento de μ y τ con el contenido de sólidos en volumen. (Tangsathitkulchai 2003)

Se puede notar incluso, que en un principio, cuando ϕ es de alrededor de un 20%, la suspensión analizada casi no muestra límite de fluencia.

La incidencia del contenido de sólidos en la reología de relaves ha sido estudiada principalmente para la industria del aluminio y níquel, sin embargo no existen estudios concluyentes que permitan una aplicabilidad directa a la minería del cobre. La Figura 35 muestra la relación entre el límite de fluencia y contenido de sólidos para diferentes tipos de relaves de la industria minera.

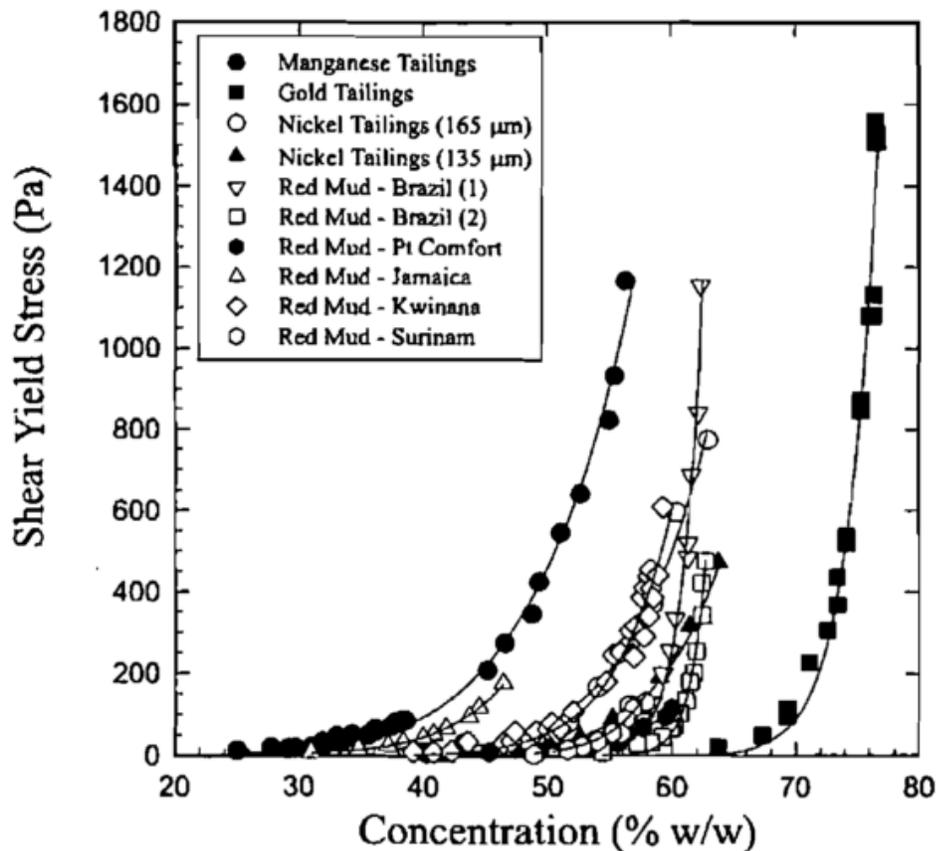


Figura 35: Límite de fluencia de relaves de aluminio, oro, níquel y manganeso. (Boger 2000)

3.3.2. Granulometría de fase sólida

La distribución granulométrica de la fase sólida tiene una influencia fuerte en la viscosidad de una suspensión. Cuando el número de Péclet es bajo (<1), el movimiento de partículas está gobernado por fuerzas brownianas, por lo que es errático (no solidario con el medio continuo) y prácticamente no depende del esfuerzo aplicado.

3.3.2.1. Efecto del tamaño de partícula

Para partículas pequeñas se tiene que Pe es mucho menor que para las de mayor tamaño (pues el numerador de este número contiene el radio de la partícula al cubo), por lo que mientras más pequeño sea el sólido suspendido, más aleatorio será su movimiento, aumentando la diferencia de velocidad entre la partícula y el medio circundante y, en consecuencia, la viscosidad de la suspensión. Este efecto es similar al que se explica que ocurre con las suspensiones a bajos valores de tasa de corte (ver sección 3.2.2). La Figura 36 muestra cómo varía la viscosidad de Bingham con el tamaño de partícula (en este caso denotada con la letra griega μ).

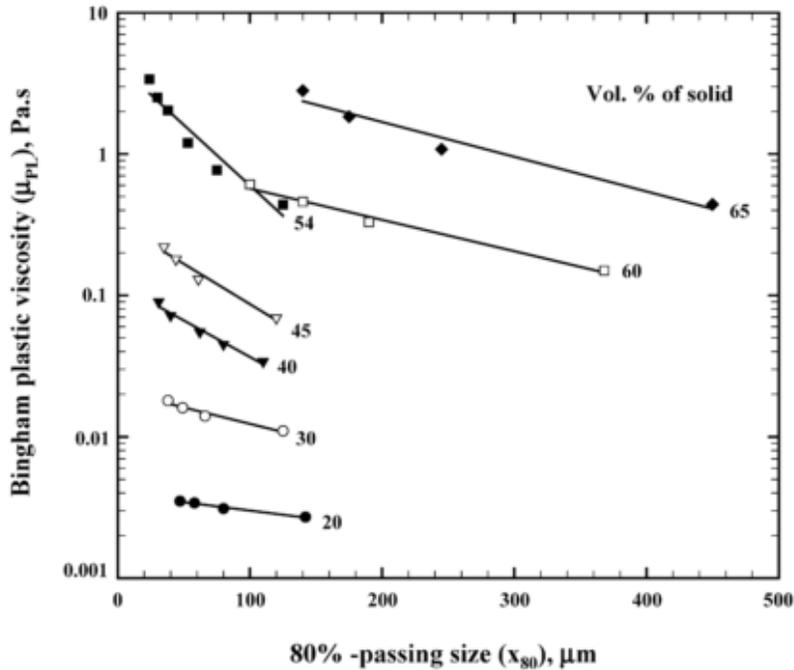


Figura 36: Variación de la viscosidad con tamaño de partículas. (Tangsathikulchai 2003)

Se puede apreciar un aumento en la viscosidad en la medida que el d_{80} (expuesto aquí como x_{80}) disminuye. Cada recta indica un ajuste lineal a las viscosidades para un valor específico de ϕ y es fácil ver que el efecto es mucho más marcado cuando ϕ es mayor. Las rectas para un contenido de sólidos en volumen de 60% y 65% no muestran una tendencia tan marcada, pero eso obedece a que en dichos casos los tamaños de la fase sólida son mucho mayores.

En el caso del límite de fluencia, se observa la misma tendencia, es decir, un aumento de τ con la disminución del tamaño de partícula. El mismo autor anterior muestra como varía el límite de fluencia verdadero (diferente al del modelo de Bingham) con el tamaño de partícula -Figura 37-.

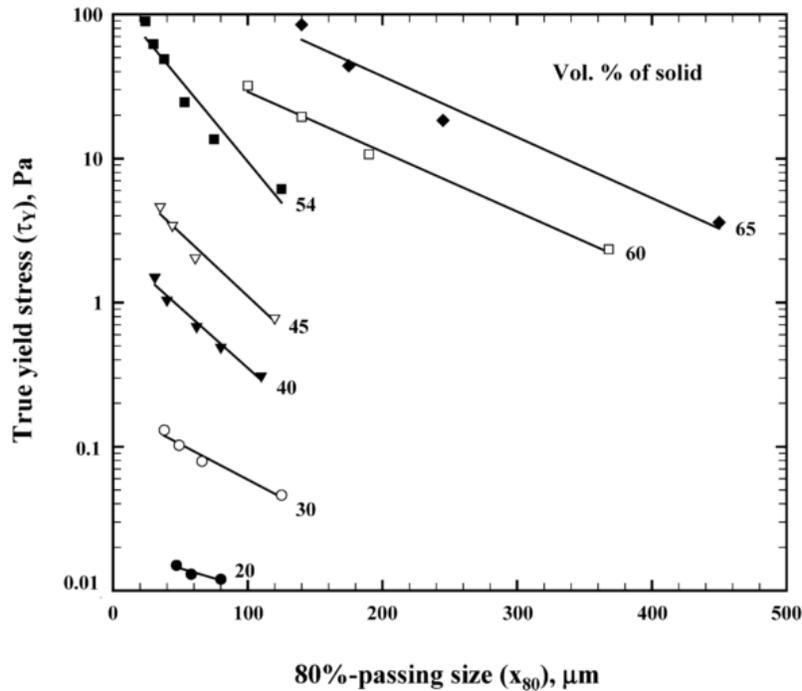


Figura 37: Variación del límite de fluencia verdadero con el tamaño de partícula. (Tangsathitkulchai 2003)

Al igual que con la viscosidad, se pueden notar efectos mucho más marcados a mayores contenidos de sólidos en volumen de la suspensión analizada.

3.3.2.2. Efecto de la distribución granulométrica

La distribución de tamaños también influye en la reología de una suspensión. Como ya se estableció anteriormente, el valor de ϕ_m para esferas mono-tamaño completamente dispersas tiene un máximo de 74%. La particularidad de poseer más de un tamaño reside en que las partículas más pequeñas pueden ingresar dentro de los espacios dejados por las más grandes, lo que permite aumentar el valor de ϕ_m y por lo tanto permitir que el fluido contenga más sólidos antes de incrementar bruscamente su viscosidad.

La primera aproximación teórica se hizo considerando una distribución bimodal. La Figura 38 muestra cómo varía la viscosidad relativa de la suspensión con la fracción de partículas de gran tamaño que se agregan a ella.

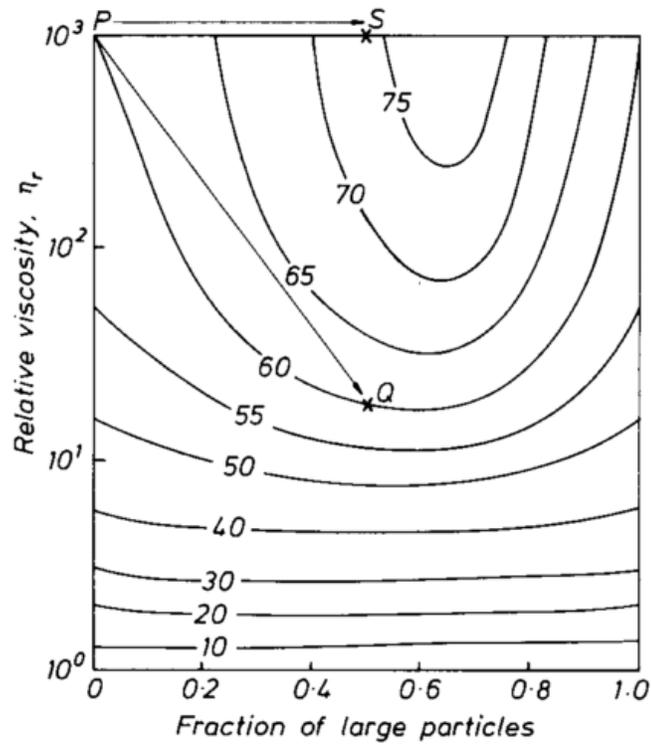
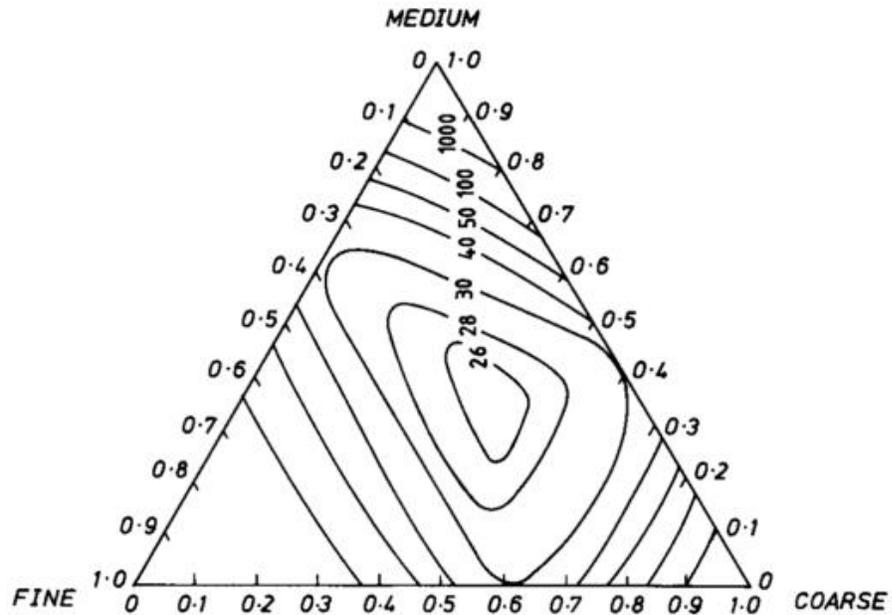


Figura 38: Cambio en viscosidad relativa con adición de partículas gruesas. (Barnes *et al.* 1989)

Partiendo del punto P (0% de gruesos) se tienen dos posibilidades. La primera es mantener la viscosidad relativa, pero con un mayor contenido de sólidos en volumen (punto S) o bien disminuirla si se mantiene el mismo valor de ϕ (60% en este caso), llegando a descender en casi dos órdenes de magnitud la viscosidad relativa. Nuevamente el efecto es mucho más marcado a valores mayores de ϕ .

El mismo efecto se aprecia con tres tamaños de partícula, donde la disminución de viscosidad para un valor fijo de ϕ es más notoria en comparación al caso bimodal (aristas del diagrama de la Figura 39).



**Figura 39: Disminución de viscosidad relativa para tres tamaños de partícula, $\phi=65\%$.
(Barnes *et al.* 1989)**

En los relaves existe una distribución granulométrica con una gran cantidad de tamaños de partícula diferentes, por lo que el efecto no es cuantificable por la fracción presente de cada tamaño de forma tan directa como lo expuesto en las figuras anteriores.

Experimentos realizados (Sohn & Moreland 1968) respaldan lo expuesto anteriormente, donde se utilizaron rangos de tamaño muy estrechos para probar que se puede lograr una mayor fracción de empaquetamiento cuando existe más de un tamaño. Esto se puede apreciar en la Figura 40.

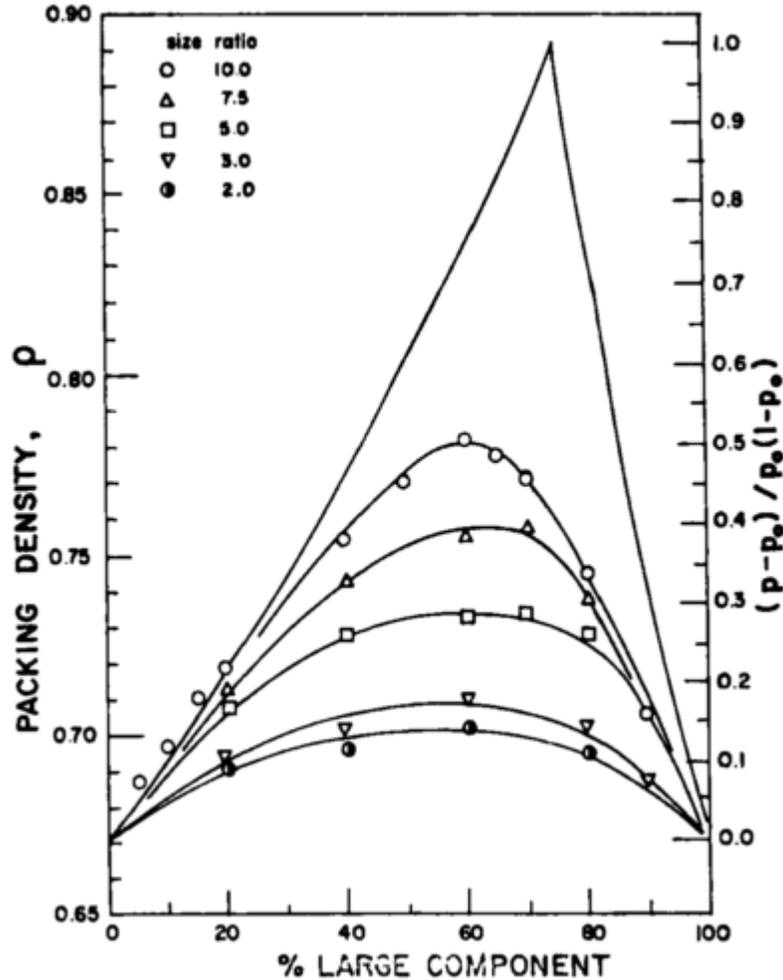


Figura 40: Pruebas experimentales de aumento del factor de empaquetamiento. (Sohn & Moreland 1968)

Es fácil ver que en torno a un 60% del contenido de gruesos se logra el máximo aumento, y que este depende fuertemente de la razón de tamaños. La situación ideal se logra cuando la razón de tamaños de gruesos a finos es infinito (línea continua sin marcadores).

3.3.3. Forma de partículas

Cuando la forma de las partículas difiere de una esfera, la viscosidad a un mismo contenido de sólidos en volumen también cambia (Figura 42), tal como lo propusieron Krieger y Dougherty en 1959 al incluir la viscosidad intrínseca en su ecuación.

Más importante resulta el hecho de que la forma de las partículas también cambia ϕ_m , debido a que el empaquetamiento de partículas planas no permite llegar a valores tan altos de este parámetro por la formación estructuras más complejas en el proceso, como la llamada “torre de naipes”. Lo

anterior obedece a la distribución no uniforme de cargas en la superficie de algunos filosilicatos y a otros fenómenos de fisicoquímica de superficies.

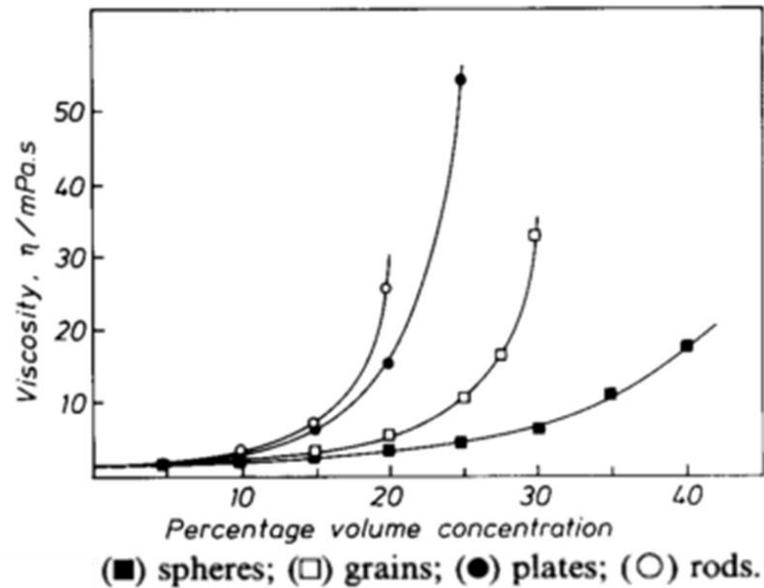


Figura 41: Viscosidad de suspensiones considerando forma de sólidos. (Barnes *et al.* 1989)

Se nota un gran aumento de la viscosidad si la forma de las partículas difiere de una esfera, sobre todo a contenidos de sólidos en volumen superiores al 20%. Así, aquellas partículas con forma de láminas y barras manifiestan una viscosidad mucho mayor a los mismos valores de ϕ . Nuevamente aparece un crecimiento exponencial de la viscosidad, casi asintótico, lo que indica concordancia con el concepto de fracción máxima de empaquetamiento.

Debido a que la viscosidad y el límite de fluencia son fenómenos estrechamente relacionados, es de esperar que la forma de las partículas también incida en esta última variable. Algunos autores (Ndlovu *et al.* 2011) han encontrado un mayor límite de fluencia cuando la forma de las partículas es de láminas -específicamente vermiculita y muscovita- en comparación a muestras de cuarzo, el cual presenta generalmente forma granular (Figura 42).

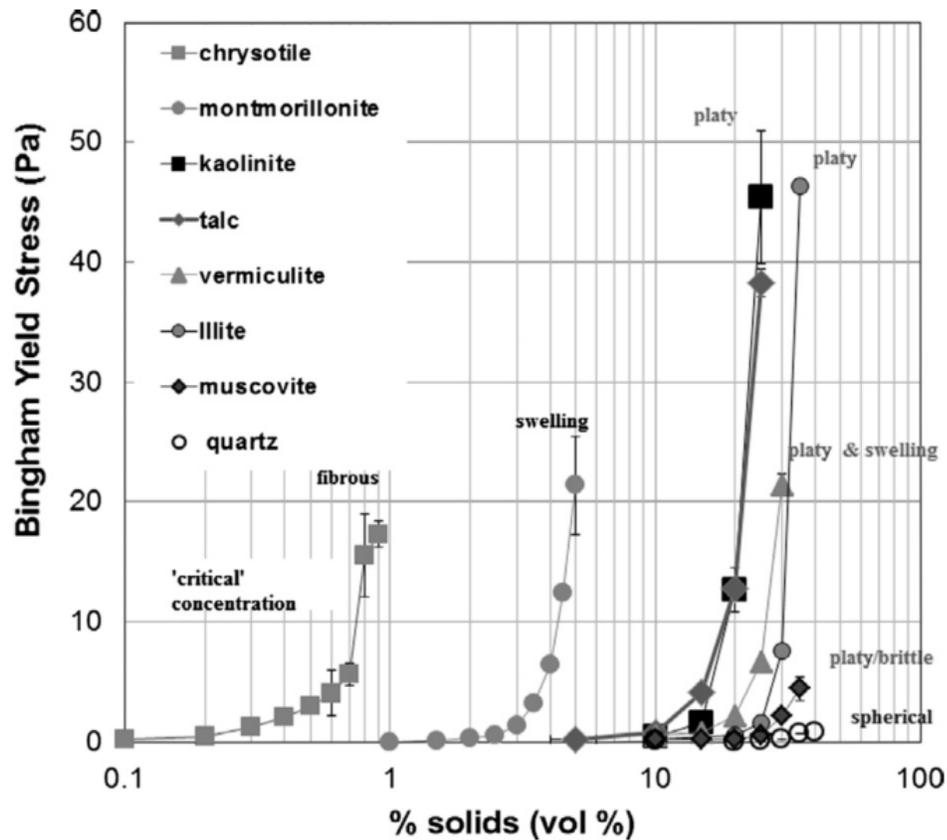


Figura 42: Límite de fluencia para diferentes formas de partícula y contenido de sólidos en volumen. (Ndlovu *et al.* 2014)

En resumen, las partículas que muestran un mayor aumento del límite de fluencia también son aquellos minerales con forma de barra o también llamados fibrosos. Es importante notar cómo los minerales fibrosos incrementan drásticamente su límite de fluencia de Bingham a contenidos de sólidos en volumen bajo 1%.

La Figura 43 resume de forma conceptual cómo aumenta la viscosidad y el límite de fluencia de Bingham de las suspensiones si la forma difiere de una esfera o grano (como el cuarzo).

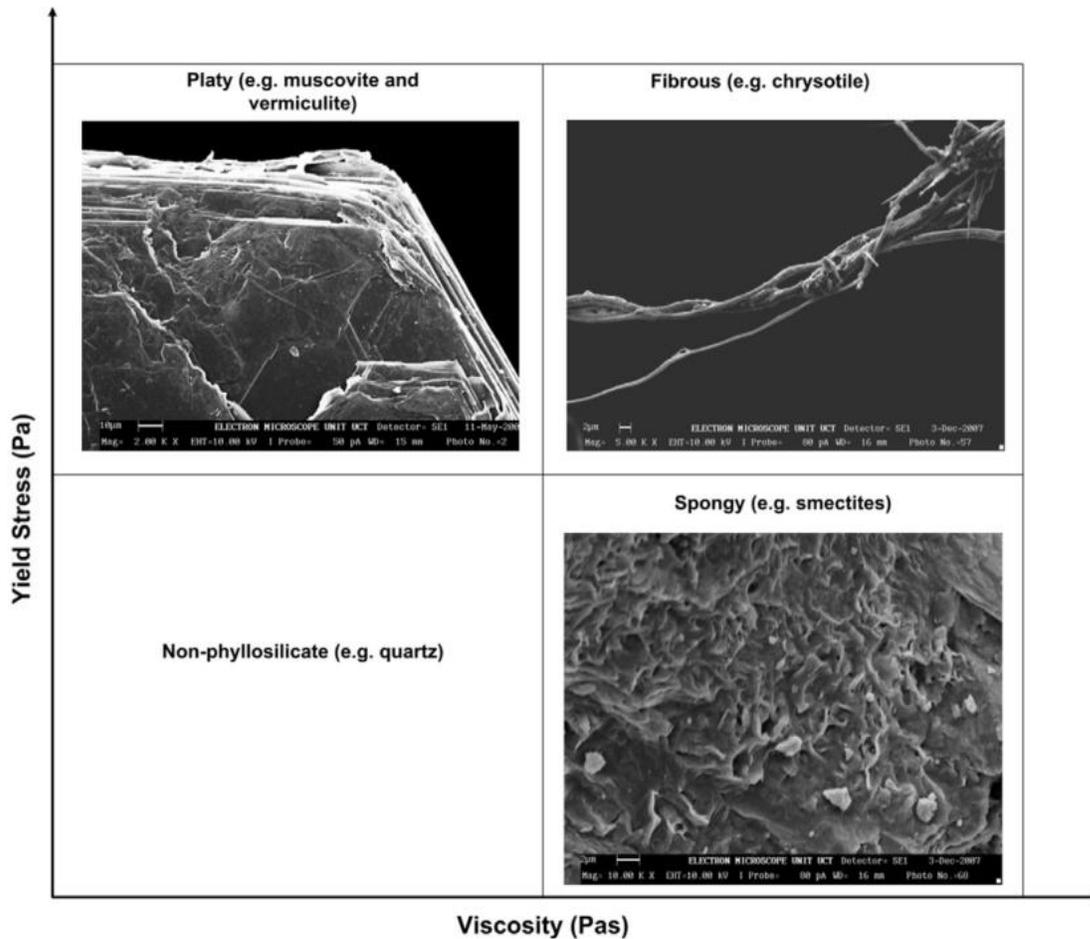


Figura 43: Formas de partículas y propiedades reológicas en comparación al cuarzo. (Ndlovu et al. 2011)

3.3.4. Mineralogía

Estudios se han desarrollado para ver como diferentes mezclas de minerales afectan la reología de suspensiones, llegando en algunos casos a desarrollar modelos matemáticos empíricos (Ayadi & Soro 2013). La Figura 44 muestra cómo la presencia de montmorillonita aumenta de forma dramática la viscosidad de una suspensión, no así la caolinita e illita.

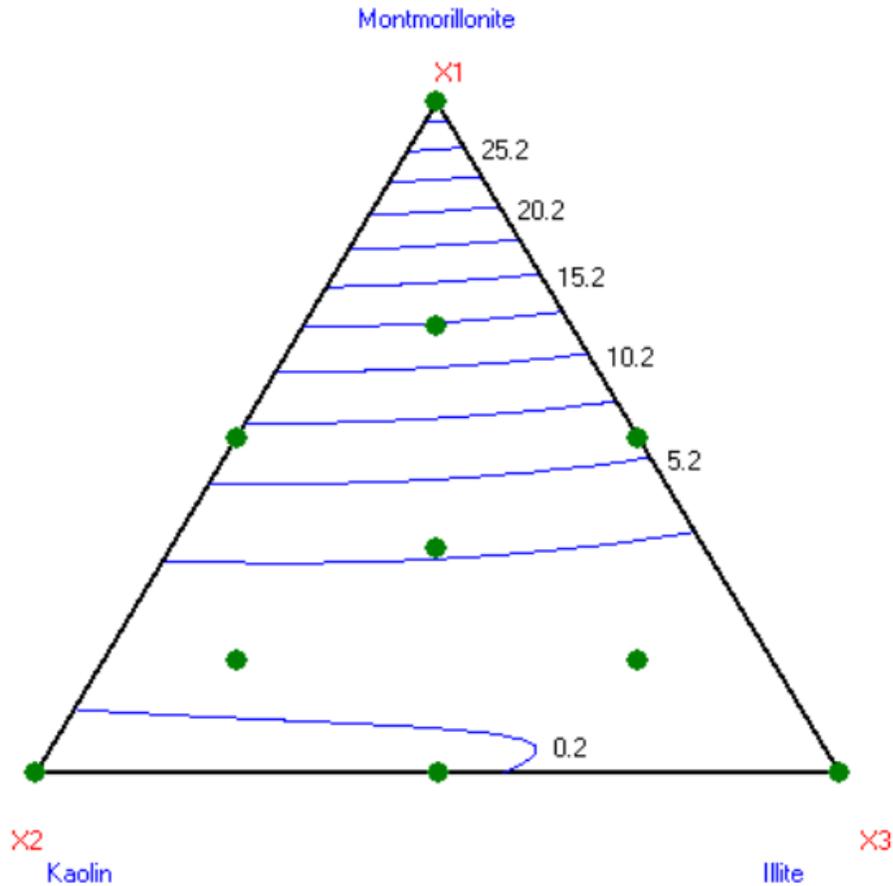


Figura 44: Influencia de arcillas expansivas en viscosidad. Viscosidad en Pa·s. (Ayadi & Soro 2013)

Del mismo modo, otros autores (Becker *et al.* 2013) han medido un incremento importante en el límite de fluencia de Bingham de algunas suspensiones cuando la presencia de filosilicatos aumenta, cuyos resultados se exponen en la Figura 45. En ésta, destacan los puntos de color rojo, correspondientes a un concentrado de la mina Great Dyke, el cual contiene un 32wt% de talco (del grupo de las esmectitas), en comparación a las otras fases analizadas (salvo los relaves de la misma mina), que contienen un nivel mucho menor de este mineral. Es importante recordar que el talco no exhibe el comportamiento más extremo de los filosilicatos en cuanto a reología se refiere, por lo que se podrían esperar diferencias mucho más marcadas ante la presencia de montmorillonita u otra arcilla altamente expansiva.

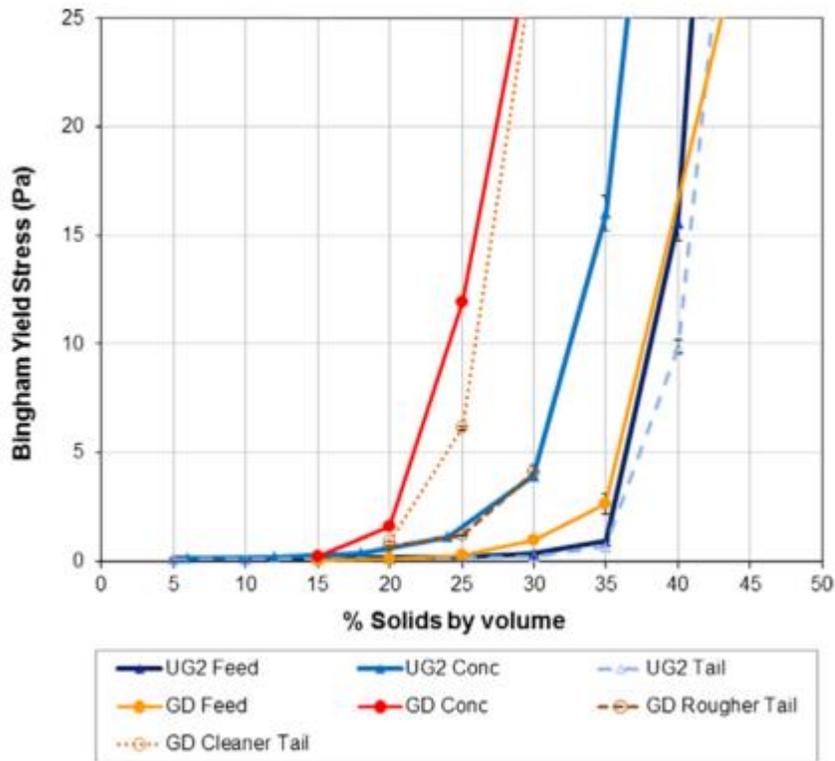


Figura 45: Medición reológica en pulpas de distinta composición. (Becker *et al.* 2013)

3.3.5. Tiempo de aplicación de esfuerzos

Autores como de Kretser *et al.* 1998, han estudiado el efecto de la concentración de sólidos en el comportamiento tixotrópico de suspensiones de arcillas expansivas, en particular de montmorillonita, donde se ha evaluado un fenómeno particular que se denomina transición sol-gel.

Este fenómeno consiste en un comportamiento de sólido elástico posiblemente asociado a la formación de estructuras (torre de naipes, para más detalle ver Ndlovu *et al.* 2011) que transforman a la suspensión en un gel. Posteriormente, una mayor agitación (entiéndase como aumento de la tasa de corte) rompe estas estructuras, disminuyendo la viscosidad y límite de fluencia con el tiempo hasta un nivel mínimo (sol). Si cesa dicha agitación, las estructuras vuelven a formarse lentamente por atracción electrostática aumentando paulatinamente los valores de las variables antes mencionadas. Este aumento ocurre de forma mucho más lenta, sin embargo es posible volver a los valores iniciales de límite de fluencia y viscosidad.

En la Figura 46 se muestra cómo varía la razón entre el límite de fluencia del gel (τ_{y00}) y del sol (τ_{y0}) con el contenido de sólidos.

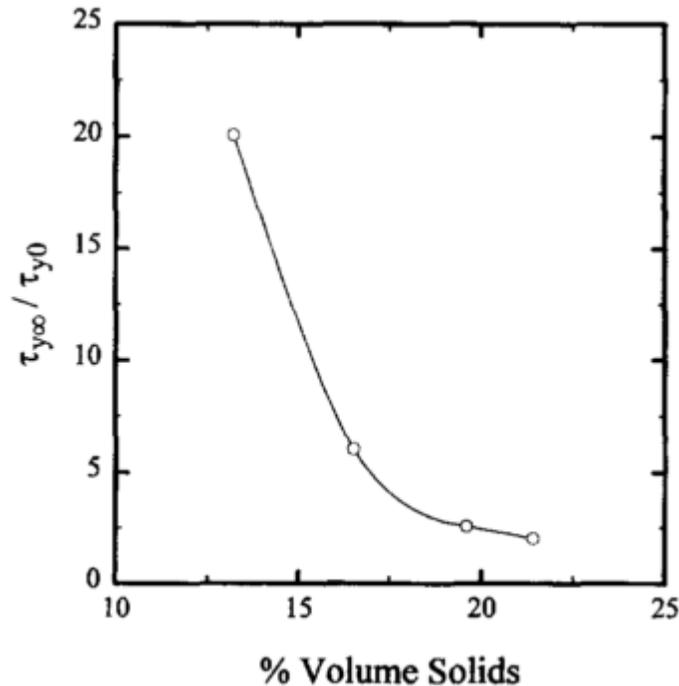


Figura 46: Razón entre límites de fluencia del gel y del sol en función de ϕ . (de Kretser *et al.* 1998)

Se puede notar que la razón entre los límites de fluencia del gel y sol tiende a disminuir a mayores contenidos de sólidos en volumen, probablemente debido a que el mayor contenido de sólidos incrementa mucho el límite de fluencia del sol, en cambio, cuando la estructura se asemeja a un gel, la influencia del contenido de sólidos es mucho menor.

3.4. Elección de variables a estudiar

La elección de variables a estudiar se basa en dos criterios principales: la influencia que tienen en la reología de suspensiones y la posibilidad de ajustar valores establecidos con un nivel de error razonablemente bajo.

3.5. Variables no consideradas en el trabajo

3.5.1. Amplitud de la distribución granulométrica

Esta variable no se considera debido a que no se tiene acceso a estudios que indiquen su efecto en la reología de relaves y la dificultad que representa fijar d_{80} modificando la amplitud de la distribución. Por lo mismo, resulta prudente el no controlar ni medir el efecto de esta variable en la reología. Incluso, se asume que la gran diversidad de tamaños de partículas en los relaves no presente el mismo efecto observado con distribuciones de dos o tres tamaños únicos, como se expone en la sección 3.3.2.2.

3.5.2. Tiempo de agitación

Debido a restricciones de disponibilidad de material no se pueden realizar experimentos con y sin agitación previa, más aun considerando que eleva el número de pruebas a realizar al doble. Es importante señalar que se conoce el efecto de la agitación previa en reometrías, tal como se señala en la sección 3.3.5 y se debe tener en consideración en el análisis de resultados.

3.6. Variables estudiadas

Antes de mencionar las variables estudiadas, es pertinente aclarar que en adelante el término arcilla se utiliza como referencia a los filosilicatos utilizados en los experimentos (caolinita y montmorillonita).

3.6.1. Contenido de sólidos en volumen

El contenido de sólidos en volumen es la variable más importante debido a que tiene una incidencia fuerte en todo el resto de las variables estudiadas. Se sabe que η y τ son fuertemente dependientes de ϕ -tal como se expone en la sección 3.3.1- y que ambas propiedades tienden a aumentar su magnitud si el contenido de sólidos en volumen aumenta. Del mismo modo, el efecto de las demás variables estudiadas tiende a exacerbarse conforme ϕ aumenta.

3.6.2. Tamaño de partículas

El tamaño de partículas de una suspensión define qué tipo de fuerzas las rigen. Cuando son muy pequeñas, por lo general dominan fuerzas brownianas, aumentando con esto la viscosidad de la suspensión debido a que en su movimiento aleatorio muchas veces se oponen al fluido. Cuanto menor es el tamaño de las partículas, mayor es el límite de fluencia y la viscosidad de la suspensión.

Se utiliza el d_{80} como tamaño característico de las partículas debido a que corresponde a un tamaño estadístico ampliamente usado en la industria en el dimensionamiento y control operacional de equipos de conminución.

3.6.3. Contenido de arcillas en fase sólida

El contenido en peso de arcillas (filosilicatos) en la fase sólida debiese utilizarse como variable a analizar por los efectos que éstas tienen en las suspensiones, entre ellos la formación de estructuras y alteración de la reología.

Resulta razonable analizar su contenido en peso pues se espera trabajar con muestras de relave secas, donde resulta más simple determinar la masa de filosilicatos presentes.

3.6.4. Tipo de arcilla

Debido a que trabaja con dos tipos de filosilicatos, caolinita y montmorillonita, cuya elección se encuentra justificada en la sección 3.1.3, se evalúa un ajuste por separado para los experimentos

correspondientes, el que se contrasta con un ajuste que considere todos los experimentos realizados. Esto obedece a que el efecto de ambas en la reología de suspensiones es muy dispar, tal como se puede apreciar en algunos estudios (Ayadi & Soro 2013).

3.6.5. Efecto del pH

Es sabido que el pH incide en el comportamiento de las suspensiones debido a que determina interacciones electrostáticas entre las partículas, por ejemplo al favorecer la coagulación de partículas cuando la suspensión se encuentra cerca del punto isoeléctrico. La anisotropía de cargas de los filosilicatos permite que se formen estructuras, tal como mencionan algunos autores (Rand & Melton 1977; Ndlovu *et al.* 2011). La Figura 47 muestra como dichos autores proponen que varía el límite de fluencia de acuerdo al pH, debido a la formación de estructuras en los filosilicatos.

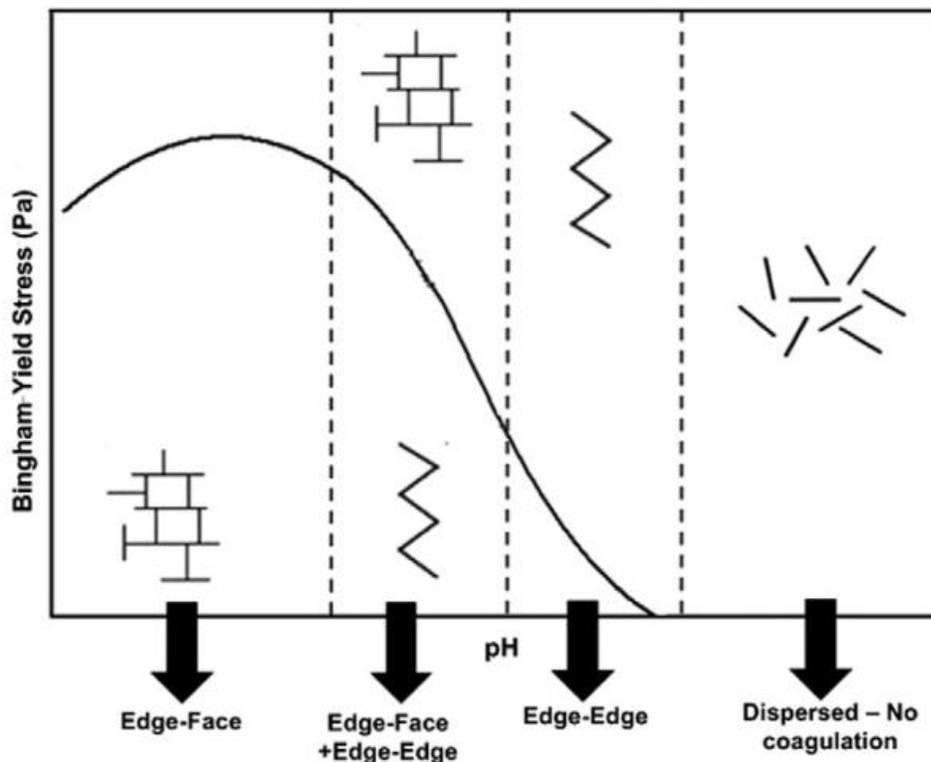


Figura 47: Variación del límite de fluencia en función del pH y formación de estructuras. (Ndlovu *et al.* 2011)

Lo recién expuesto hace necesario realizar experimentos con arcillas puras en tres valores de pH, uno ácido, otro básico y uno neutro. En el caso de la caolinita pura se realizan mediciones en los siguientes valores de pH: 3, 7 (natural) y 11, mientras que para la montmorillonita se realizan reometrías a pH 1.6 (natural), 7 y 11.

4. METODOLOGÍA

4.1. Caracterización del relave

4.1.1. Composición mineralógica

La determinación de la composición del relave se realiza utilizando el HyLogger 3, debido a que está diseñado precisamente para detectar minerales de ganga. La limitante de este equipo reside en que no es preciso en la asignación de contenidos en masa de todos los minerales, por lo que es necesario realizar un análisis posterior para determinar la mineralogía de forma cuantitativa.

Debido a esto, se utiliza la difracción de rayos X cuantitativa (QXRD) para determinar las especies mineralógicas presentes, aunque de todos modos se contrastan los resultados con los obtenidos en el HyLogger 3.

4.1.2. Distribución granulométrica

El relave fue caracterizado granulométricamente mediante tamizaje en RoTap, pero para asegurar la fiabilidad de la medición, también se determina la distribución granulométrica del relave mediante análisis por difracción láser, realizado en el equipo Malvern Mastersizer 2000 (Figura 48). Estos resultados fueron luego categorizados de acuerdo a las aperturas de malla expuestas en la Tabla 3 y comparados entre sí.

Tabla 3: Aperturas utilizados para la clasificación granulométrica del relave.

| Apertura µm | Malla ASTM |
|------------------------|-----------------------|
| 150 | 100 |
| 106 | 140 |
| 75 | 200 |
| 53 | 270 |
| 45 | 325 |
| 38 | 400 |



Figura 48: Malvern Mastersizer 2000. (Malvern Instruments Ltd. 2015)

4.1.3. Densidad

Para la correcta cuantificación del contenido de sólidos en volumen (ϕ) en los experimentos que se realizan, es necesario determinar la densidad de cada componente de la fase sólida. Se realiza un método similar a la picnometría, con la salvedad de que el recipiente no es un picnómetro, si no que un balón volumétrico de 100ml. El procedimiento utilizado se detalla a continuación.

- i. Pesaje del balón, obteniendo su masa (M_b), recordando que su volumen V_b es 100 ml.
- ii. Introducción de sólidos en el balón, obteniendo una masa conjunta (M_{s+b}).
- iii. Adición de agua destilada a temperatura conocida, formando una pulpa y aplicación de vacío para remover burbujas de aire que puedan quedar atrapadas.
- iv. Llenado del balón hasta la marca de los 100ml, con especial cuidado en que el menisco quede a la altura de la marca.
- v. Pesaje de la pulpa en el balón, obteniendo (M_{p+b}).
- vi. Vaciado y secado, para luego añadir sólo agua destilada hasta la marca, con el objetivo de determinar la masa de ésta, que al ser dividida por V_b , entrega la densidad del líquido (ρ_l)

Aplicando la siguiente fórmula:

$$\rho_s = \frac{(M_{s+b} - M_b)}{V_b - \frac{(M_{p+b} - M_b) - (M_{s+b} - M_b)}{\rho_l}} \quad (12)$$

Se obtiene la densidad del sólido en cuestión, no dependiendo de la temperatura del líquido, debido a la medición de la densidad de este al final del procedimiento. En todas las mediciones se utiliza una balanza analítica con precisión de 0.0001g.

Para determinar cualquier cambio en la densidad de acuerdo a la fracción granulométrica utilizada, la fracción -100#+140# (la más gruesa utilizada en los experimentos) se contrasta con la fracción bajo 400#. Esto permite saber si algunos minerales de densidades muy disímiles se distribuyen preferentemente en una u otra fracción.

4.2. Caracterización de arcillas

Las arcillas utilizadas en los experimentos corresponden a Caolinita natural Fluka (provista por Sigma-Aldrich) y Montmorillonita KSF, de la misma compañía. La elección de la primera es su origen natural, mientras que la montmorillonita presenta una superficie específica de 20-40 m²/g, similar en orden de magnitud a la utilizada por otros estudios (Ayadi & Soro 2013), en contraste con otros productos ofrecidos que superaban los 200 m²/g, valores que pueden alejarse de las características de la montmorillonita natural.

4.2.1. Composición

La composición de las dos arcillas utilizadas se verifica por medio de difracción de rayos X cuantitativa, con el objetivo de determinar la presencia significativa de impurezas. De forma adicional, se realiza la medición espectral de briquetas puras de ambos minerales para corroborar los resultados de QXRD.

4.2.2. Distribución granulométrica

Debido a su naturaleza, las arcillas utilizadas presentan distribuciones granulométricas que no pueden ser cuantificadas de forma apropiada mediante el uso de tamices. En este caso se utilizan como referencia los resultados obtenidos del análisis granulométrico láser, realizado en el mismo equipo con el que se mide la distribución granulométrica del relave.

4.2.3. Humedad

Conocida es la higroscopicidad de las arcillas expansivas, por lo que ambos tipos de arcilla fueron sometidos al siguiente procedimiento:

- i. Se pesan las arcillas en estado natural (sin ninguna modificación previa)
- ii. Secado por 24h a 120°C para asegurar remoción de todo tipo de humedad
- iii. Nuevamente se pesan
- iv. Se dejan 24h en el exterior para que recuperen humedad y se vuelven a pesar.

Con este procedimiento se puede determinar la humedad y capacidad de absorción de agua de ambos tipos de arcilla. Para fijar las dosificaciones en los experimentos se considera la humedad ambiente de las arcillas como parte del agua que se debe agregar.

4.2.4. Densidad

En el caso de las arcillas, se calcula la densidad utilizando el mismo procedimiento que se detalló para el relave. En este caso, se debe ajustar la densidad de los sólidos considerando la humedad de

la arcilla respectiva. Esto se hace multiplicando la masa de sólidos ($M_{s+b} - M_b$) por un factor que da cuenta de ello, tal como se muestra a continuación.

$$\rho_s = \frac{(M_{s+b} - M_b) \cdot (1 - Humedad_{base húmeda})}{V_b - \frac{(M_{p+b} - M_b) - (M_{s+b} - M_b) \cdot (1 - Humedad_{base húmeda})}{\rho_l}} \quad (13)$$

4.3. Equipos utilizados

4.3.1. Reómetro

El reómetro utilizado corresponde a un Anton Paar RheolabQC (Figura 49), que entre otras posibilidades permite el uso de *spindle* de paleta o cilindros concéntricos (este último conocido como reómetro de Couette). El sistema de medición para este tipo de reometría se denomina CC-39. Las especificaciones del equipo se muestran en la Tabla 4.



Figura 49: Anton Paar RheolabQC.(Anton Paar n.d.)

Tabla 4: Especificaciones reómetro Anton Paar RheolabQC.

| Parámetro | Rango de Medición |
|--------------------------|-----------------------------|
| <i>Velocidad de giro</i> | 0,01 - 1200 RPM |
| <i>Torque</i> | 0,25 - 75 mN·m |
| <i>Tasa de corte</i> | 0,01 - 4000 s ⁻¹ |
| <i>Viscosidad</i> | 1 - 10 ⁹ mPa·s |
| <i>Esfuerzo de Corte</i> | 0,5-3·10 ⁴ Pa |

Para las mediciones de límite de fluencia se sugiere el uso del spindle de paleta con la ecuación propuesta por Nguyen y Boger en 1983 (Nguyen & Boger 1983) debido a que se ha encontrado que los cilindros concéntricos tienden a subestimar la viscosidad por un efecto de deslizamiento en las paredes de éstos (Kwak *et al.* 2005). Tal como muestra la Figura 50, el uso de cilindros concéntricos en vez de paleta entrega una lectura menor del límite de fluencia. A medida que el contenido de agua de la muestra (calculado como el cociente entre masa de agua y masa de sólido) aumenta, este efecto es menos marcado.

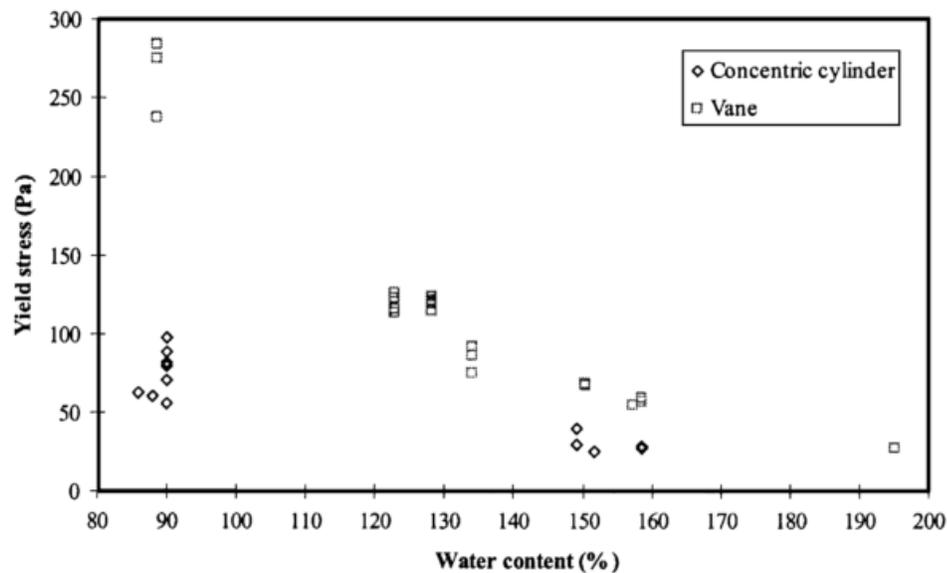


Figura 50: Comparación de lecturas entre tipos de spindle.(Kwak *et al.* 2005)

Aún en vista de lo recién mencionado, se utiliza un reómetro de Couette con un *spindle* cilíndrico arenado, sin embargo se debe tener en cuenta el efecto de deslizamiento recién mencionado. Incluso algunos autores proponen el uso del spindle de cuatro paletas como una alternativa viable para la medición de esfuerzo de corte versus tasa de corte (Fisher *et al.* 2007) y se estudian las geometrías óptimas para aquello (Stickland *et al.* 2015).

En los estudios realizados, incluso en los casos más extremos sólo se ha llegado a medir viscosidades del orden de 10⁴ Pa·s (Kwak *et al.* 2005) y muchas veces un valor tan alto de

viscosidad tiende a interpretarse como límite de fluencia. Las tasas de deformación típicas en los estudios reológicos no exceden los 250 s^{-1} e incluso se observa que a 240 s^{-1} las estructuras que forman algunas arcillas expansivas desaparecen (de Kretser *et al.* 1998).

Se debe notar una limitación en el reómetro, ya que la viscosidad mínima que puede medir es la del agua en condiciones estándar ($1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$), y cualquier suspensión cuya viscosidad es similar a ésta puede entregar valores con un error de medición elevado, debido a que se trabaja en los límites del equipo. Otra restricción considerable es, que dada la geometría del sistema de medición utilizado, se sugiere no medir partículas mayores a $150\mu\text{m}$ para evitar dañarlo, por lo que todo el material sólido que se utiliza debe estar bajo malla 100 ASTM.

4.3.2. Rheoplus

El software Rheoplus asociado al reómetro (del mismo fabricante del equipo) permite definir las características de los experimentos, desde reometrías simples hasta experimentos de histéresis y otras mediciones menos comunes. En este programa se pueden ingresar los parámetros bajo los cuales se realizan los experimentos, como duración, rango de tasas de corte, cantidad de puntos de medición, tipo de crecimiento en la variable independiente (puede ser tanto la tasa de corte como el esfuerzo o la velocidad de giro del cilindro), entre otras características.

Además, se pueden utilizar datos de reometrías para el ajuste de distintos modelos reológicos (*e.g.* Bingham, Herschel-Bulkley, etc.) seleccionando los puntos de medición que se utilizarán para esto, obteniendo como resultado ecuaciones de curvas que siguen el modelo seleccionado. En éstos también se pueden definir de antemano parámetros, como k y n en el caso de un ajuste Herschel-Bulkley.

4.3.3. Otros equipos

Además del reómetro se utiliza el agitador WiseCube WIS-20 (ver Figura 51) que permite la agitación de las suspensiones de relave con arcillas dentro de un matraz Erlenmeyer, pudiendo acomodar hasta 20 matraces y con una agitación máxima de 250 rpm.



Figura 51: WiseCube WIS-20. (witeg Labortechnik GmbH 2015)

La dosificación de los materiales se realiza utilizando la balanza ADAM PGL 203, con precisión de 0.001g y una carga máxima de 200g, mientras que el medidor de pH utilizado es el San-Xin SX711 cuya precisión es de $\pm 0.01\text{pH}$ según el fabricante (Shangai San-Xin Instrumentation Inc. 2015)(Figura 52).



Figura 52: San-Xin SX711. (Shangai San-Xin Instrumentation Inc. 2015)

4.4. Protocolo Experimental

4.4.1. Experimentos realizados

Los experimentos se realizan con contenidos de sólidos en volumen de 25%, 30% y 40%, correspondiente a al rango de 45%-65% de sólidos en peso, aproximadamente. La elección de estos valores obedece a que se prefiere obtener resultados fiables debido a las especificaciones del reómetro, ya que un contenido de sólidos menor puede resultar en mediciones excesivamente ruidosas.

Para el contenido de arcillas se utiliza como referencia los valores reportados en algunos estudios (Bulatovic *et al.* 1999), sin embargo se trabaja con porcentajes de arcillas en la fase sólida iguales para la caolinita y montmorillonita.

La clasificación granulométrica de cada experimento corresponde a una mezcla entre la granulometrías del relave original y la fracción bajo malla 400 ASTM (38 μ m) extraída de otras muestras del mismo, ponderando la el porcentaje retenido en masa de cada fracción granulométrica (fi%) tal como se muestra a continuación:

- **a:** Relave original
- **b:** Relave original \cdot 0.9 + fracción -400# \cdot 0.1
- **c:** Relave original \cdot 0.8 + fracción -400# \cdot 0.2
- **d:** Relave original \cdot 0.7 + fracción -400# \cdot 0.3
- **e:** Relave original \cdot 0.6 + fracción -400# \cdot 0.4

La granulometría b se utiliza sólo en la caolinita con $\phi=25\%$ y se reemplaza en adelante con la granulometría e, con el objetivo de poder abarcar un rango mayor de tamaños de partículas, además de que pruebas iniciales no muestran una gran diferenciación del comportamiento reológico de la granulometría b con respecto a la del relave original (a) y la granulometría c. Por lo mismo, se omitirá en las tablas siguientes, pero se pueden encontrar los reogramas en el anexo A.

El detalle de las dosificaciones de sólidos por rango granulométrico se puede encontrar en el anexo B. El resto de los detalles de cada experimento se muestran en las siguientes tablas (Tabla 5, Tabla 6, Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10). Se puede notar que los sólidos totales van variando en peso, debido a la diferencia de densidad entre el relave y las arcillas utilizadas.

4.4.1.1. Caolinita

Para esta arcilla, no se considera humedad debido a su bajo contenido de agua (ver sección 5.2.4).

Tabla 5: Experimentos Caolinita Cv 25%.

| <i>Cv (φ)</i> | <i>Clasificación Granulométrica</i> | <i>Arcillas en fase sólida, wt%</i> | <i>Sólidos requeridos, g</i> | <i>Caolinita requerida, g</i> | <i>Relave requerido, g</i> | <i>Agua requerida, ml</i> |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 25% | A | 5% | 44.64 | 2.23 | 42.40 | 50.25 |
| 25% | A | 10% | 44.51 | 4.45 | 40.06 | 50.25 |
| 25% | A | 15% | 44.39 | 6.66 | 37.73 | 50.25 |
| 25% | A | 25% | 44.15 | 11.04 | 33.12 | 50.25 |
| 25% | C | 5% | 44.64 | 2.23 | 42.40 | 50.25 |
| 25% | C | 10% | 44.51 | 4.45 | 40.06 | 50.25 |
| 25% | C | 15% | 44.39 | 6.66 | 37.73 | 50.25 |
| 25% | C | 25% | 44.15 | 11.04 | 33.12 | 50.25 |
| 25% | D | 5% | 44.64 | 2.23 | 42.40 | 50.25 |
| 25% | D | 10% | 44.51 | 4.45 | 40.06 | 50.25 |
| 25% | D | 15% | 44.39 | 6.66 | 37.73 | 50.25 |
| 25% | D | 25% | 44.15 | 11.04 | 33.12 | 50.25 |
| 25% | E | 5% | 44.64 | 2.23 | 42.40 | 50.25 |
| 25% | E | 10% | 44.51 | 4.45 | 40.06 | 50.25 |
| 25% | E | 15% | 44.39 | 6.66 | 37.73 | 50.25 |
| 25% | E | 25% | 44.15 | 11.04 | 33.12 | 50.25 |

Tabla 6: Experimentos Caolinita Cv 30%.

| <i>Cv (φ)</i> | <i>Clasificación Granulométrica</i> | <i>Arcillas en fase sólida, wt%</i> | <i>Sólidos requeridos, g</i> | <i>Caolinita requerida, g</i> | <i>Relave requerido, g</i> | <i>Agua requerida, ml</i> |
|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 30% | A | 5% | 53.56 | 2.68 | 50.88 | 46.90 |
| 30% | A | 10% | 53.42 | 5.34 | 48.08 | 46.90 |
| 30% | A | 15% | 53.27 | 7.99 | 45.28 | 46.90 |
| 30% | A | 25% | 52.99 | 13.25 | 39.74 | 46.90 |
| 30% | C | 5% | 53.56 | 2.68 | 50.88 | 46.90 |
| 30% | C | 10% | 53.42 | 5.34 | 48.08 | 46.90 |
| 30% | C | 15% | 53.27 | 7.99 | 45.28 | 46.90 |
| 30% | C | 25% | 52.99 | 13.25 | 39.74 | 46.90 |
| 30% | D | 5% | 53.56 | 2.68 | 50.88 | 46.90 |
| 30% | D | 10% | 53.42 | 5.34 | 48.08 | 46.90 |
| 30% | D | 15% | 53.27 | 7.99 | 45.28 | 46.90 |
| 30% | D | 25% | 52.99 | 13.25 | 39.74 | 46.90 |
| 30% | E | 5% | 53.56 | 2.68 | 50.88 | 46.90 |
| 30% | E | 10% | 53.42 | 5.34 | 48.08 | 46.90 |
| 30% | E | 15% | 53.27 | 7.99 | 45.28 | 46.90 |
| 30% | E | 25% | 52.99 | 13.25 | 39.74 | 46.90 |

Tabla 7: Experimentos Caolinita Cv 40%.

| <i>Cv (ϕ)</i> | <i>Clasificación Granulométrica</i> | <i>Arcillas en fase sólida, wt%</i> | <i>Sólidos requeridos, g</i> | <i>Caolinita requerida, g</i> | <i>Relave requerido, g</i> | <i>Agua requerida, ml</i> |
|-----------------------------------|---|---|--------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 40% | A | 5% | 74.61 | 3.73 | 70.88 | 42.00 |
| 40% | A | 10% | 74.41 | 7.44 | 66.97 | 42.00 |
| 40% | A | 15% | 74.21 | 11.13 | 63.08 | 42.00 |
| 40% | A | 25% | 73.81 | 18.45 | 55.36 | 42.00 |
| 40% | C | 5% | 74.61 | 3.73 | 70.88 | 42.00 |
| 40% | C | 10% | 74.41 | 7.44 | 66.97 | 42.00 |
| 40% | C | 15% | 74.21 | 11.13 | 63.08 | 42.00 |
| 40% | C | 25% | 73.81 | 18.45 | 55.36 | 42.00 |
| 40% | D | 5% | 74.61 | 3.73 | 70.88 | 42.00 |
| 40% | D | 10% | 74.41 | 7.44 | 66.97 | 42.00 |
| 40% | D | 15% | 74.21 | 11.13 | 63.08 | 42.00 |
| 40% | D | 25% | 73.81 | 18.45 | 55.36 | 42.00 |
| 40% | E | 5% | 74.61 | 3.73 | 70.88 | 42.00 |
| 40% | E | 10% | 74.41 | 7.44 | 66.97 | 42.00 |
| 40% | E | 15% | 74.21 | 11.13 | 63.08 | 42.00 |
| 40% | E | 25% | 73.81 | 18.45 | 55.36 | 42.00 |

4.4.1.2. Montmorillonita

En el caso de esta arcilla, se debe considerar además el agua que ingresa como humedad (ver sección 5.2.4).

Tabla 8: Experimentos Montmorillonita Cv 25%.

| Cv (ϕ) | Clasificación Granulométrica | Arcillas en fase sólida, wt% | Sólidos requeridos, g | Montmorillonita natural requerida, g | Relave requerido, g | Agua Montmorillonita | Agua requerida, ml | Agua añadida, ml |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| 25% | A | 5% | 46.95 | 2.66 | 44.60 | 0.31 | 52.50 | 52.19 |
| 25% | A | 10% | 47.14 | 5.34 | 42.42 | 0.63 | 52.50 | 51.87 |
| 25% | A | 15% | 47.33 | 8.05 | 40.23 | 0.95 | 52.50 | 51.55 |
| 25% | A | 25% | 47.71 | 13.52 | 35.78 | 1.59 | 52.50 | 50.91 |
| 25% | c | 5% | 46.95 | 2.66 | 44.60 | 0.31 | 52.50 | 52.19 |
| 25% | c | 10% | 47.14 | 5.34 | 42.42 | 0.63 | 52.50 | 51.87 |
| 25% | c | 15% | 47.33 | 8.05 | 40.23 | 0.95 | 52.50 | 51.55 |
| 25% | c | 25% | 47.71 | 13.52 | 35.78 | 1.59 | 52.50 | 50.91 |
| 25% | d | 5% | 46.95 | 2.66 | 44.60 | 0.31 | 52.50 | 52.19 |
| 25% | d | 10% | 47.14 | 5.34 | 42.42 | 0.63 | 52.50 | 51.87 |
| 25% | d | 15% | 47.33 | 8.05 | 40.23 | 0.95 | 52.50 | 51.55 |
| 25% | d | 25% | 47.71 | 13.52 | 35.78 | 1.59 | 52.50 | 50.91 |
| 25% | e | 5% | 46.95 | 2.66 | 44.60 | 0.31 | 52.50 | 52.19 |
| 25% | e | 10% | 47.14 | 5.34 | 42.42 | 0.63 | 52.50 | 51.87 |
| 25% | e | 15% | 47.33 | 8.05 | 40.23 | 0.95 | 52.50 | 51.55 |
| 25% | e | 25% | 47.71 | 13.52 | 35.78 | 1.59 | 52.50 | 50.91 |

Tabla 9: Experimentos Montmorillonita Cv 30%.

| Cv (ϕ) | Clasificación Granulométrica | Arcillas en fase sólida, wt% | Sólidos requeridos, g | Montmorillonita natural requerida, g | Relave requerido, g | Agua Montmorillonita | Agua requerida, ml | Agua añadida, ml |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| 30% | a | 5% | 64.39 | 3.65 | 61.17 | 0.43 | 56.00 | 55.57 |
| 30% | a | 10% | 64.64 | 7.33 | 58.18 | 0.86 | 56.00 | 55.14 |
| 30% | a | 15% | 64.90 | 11.04 | 55.17 | 1.30 | 56.00 | 54.70 |
| 30% | a | 25% | 65.43 | 18.54 | 49.07 | 2.18 | 56.00 | 53.82 |
| 30% | c | 5% | 64.39 | 3.65 | 61.17 | 0.43 | 56.00 | 55.57 |
| 30% | c | 10% | 64.64 | 7.33 | 58.18 | 0.86 | 56.00 | 55.14 |
| 30% | c | 15% | 64.90 | 11.04 | 55.17 | 1.30 | 56.00 | 54.70 |
| 30% | c | 25% | 65.43 | 18.54 | 49.07 | 2.18 | 56.00 | 53.82 |
| 30% | d | 5% | 64.39 | 3.65 | 61.17 | 0.43 | 56.00 | 55.57 |
| 30% | d | 10% | 64.64 | 7.33 | 58.18 | 0.86 | 56.00 | 55.14 |
| 30% | d | 15% | 64.90 | 11.04 | 55.17 | 1.30 | 56.00 | 54.70 |
| 30% | d | 25% | 65.43 | 18.54 | 49.07 | 2.18 | 56.00 | 53.82 |
| 30% | e | 5% | 64.39 | 3.65 | 61.17 | 0.43 | 56.00 | 55.57 |
| 30% | e | 10% | 64.64 | 7.33 | 58.18 | 0.86 | 56.00 | 55.14 |
| 30% | e | 15% | 64.90 | 11.04 | 55.17 | 1.30 | 56.00 | 54.70 |
| 30% | e | 25% | 65.43 | 18.54 | 49.07 | 2.18 | 56.00 | 53.82 |

Tabla 10: Experimentos Montmorillonita Cv 40%.

| <i>Cv</i> (ϕ) | <i>Clasificación Granulométrica</i> | <i>Arcillas en fase sólida, wt%</i> | <i>Sólidos requeridos, g</i> | <i>Montmorillonita natural requerida, g</i> | <i>Relave requerido, g</i> | <i>Agua Montmorillonita</i> | <i>Agua requerida, ml</i> | <i>Agua añadida, ml</i> |
|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|---|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 40% | a | 5% | 91.21 | 5.17 | 86.65 | 0.61 | 51.00 | 50.39 |
| 40% | a | 10% | 91.58 | 10.38 | 82.42 | 1.22 | 51.00 | 49.78 |
| 40% | a | 15% | 91.95 | 15.63 | 78.16 | 1.84 | 51.00 | 49.16 |
| 40% | a | 25% | 92.69 | 26.27 | 69.52 | 3.09 | 51.00 | 47.91 |
| 40% | c | 5% | 91.21 | 5.17 | 86.65 | 0.61 | 51.00 | 50.39 |
| 40% | c | 10% | 91.58 | 10.38 | 82.42 | 1.22 | 51.00 | 49.78 |
| 40% | c | 15% | 91.95 | 15.63 | 78.16 | 1.84 | 51.00 | 49.16 |
| 40% | c | 25% | 92.69 | 26.27 | 69.52 | 3.09 | 51.00 | 47.91 |
| 40% | d | 5% | 91.21 | 5.17 | 86.65 | 0.61 | 51.00 | 50.39 |
| 40% | d | 10% | 91.58 | 10.38 | 82.42 | 1.22 | 51.00 | 49.78 |
| 40% | d | 15% | 91.95 | 15.63 | 78.16 | 1.84 | 51.00 | 49.16 |
| 40% | d | 25% | 92.69 | 26.27 | 69.52 | 3.09 | 51.00 | 47.91 |
| 40% | e | 5% | 91.21 | 5.17 | 86.65 | 0.61 | 51.00 | 50.39 |
| 40% | e | 10% | 91.58 | 10.38 | 82.42 | 1.22 | 51.00 | 49.78 |
| 40% | e | 15% | 91.95 | 15.63 | 78.16 | 1.84 | 51.00 | 49.16 |
| 40% | e | 25% | 92.69 | 26.27 | 69.52 | 3.09 | 51.00 | 47.91 |

4.4.1.3. Línea Base

Para cuantificar el efecto de las arcillas también es necesario conocer el comportamiento del relave sin agregar ninguna de estas. La Tabla 11 muestra los experimentos realizados.

Tabla 11: Experimentos línea base.

| <i>Cv</i> | <i>Clasificación Granulométrica</i> | <i>Relave requerido, ml</i> | <i>Relave requerido, g</i> | <i>Agua requerida, ml</i> |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 25% | a | 18.75 | 50.10 | 56.25 |
| 25% | c | 18.75 | 50.10 | 56.25 |
| 25% | d | 18.75 | 50.10 | 56.25 |
| 25% | e | 18.75 | 50.10 | 56.25 |
| 30% | a | 22.50 | 60.12 | 52.50 |
| 30% | c | 22.50 | 60.12 | 52.50 |
| 30% | d | 22.50 | 60.12 | 52.50 |
| 30% | e | 22.50 | 60.12 | 52.50 |
| 40% | a | 30.00 | 80.16 | 45.00 |
| 40% | c | 30.00 | 80.16 | 45.00 |
| 40% | d | 30.00 | 80.16 | 45.00 |
| 40% | e | 30.00 | 80.16 | 45.00 |

4.4.2. Reometrías

La preparación de materiales para las reometrías consiste en la mezcla de las masas de relave y arcillas indicadas en la sección 4.4.1.

El procedimiento establecido es el siguiente:

- i. El material sólido se deposita en hojas (Figura 53) donde se rolea el material para homogenizarlo.



Figura 53: Preparación de fase sólida para reometrías.

- ii. Se añade el volumen de agua correspondiente al matraz, previa medición en probetas graduadas.
- iii. Luego, los sólidos son ingresados al matraz Erlenmeyer correspondiente, (Figura 54).

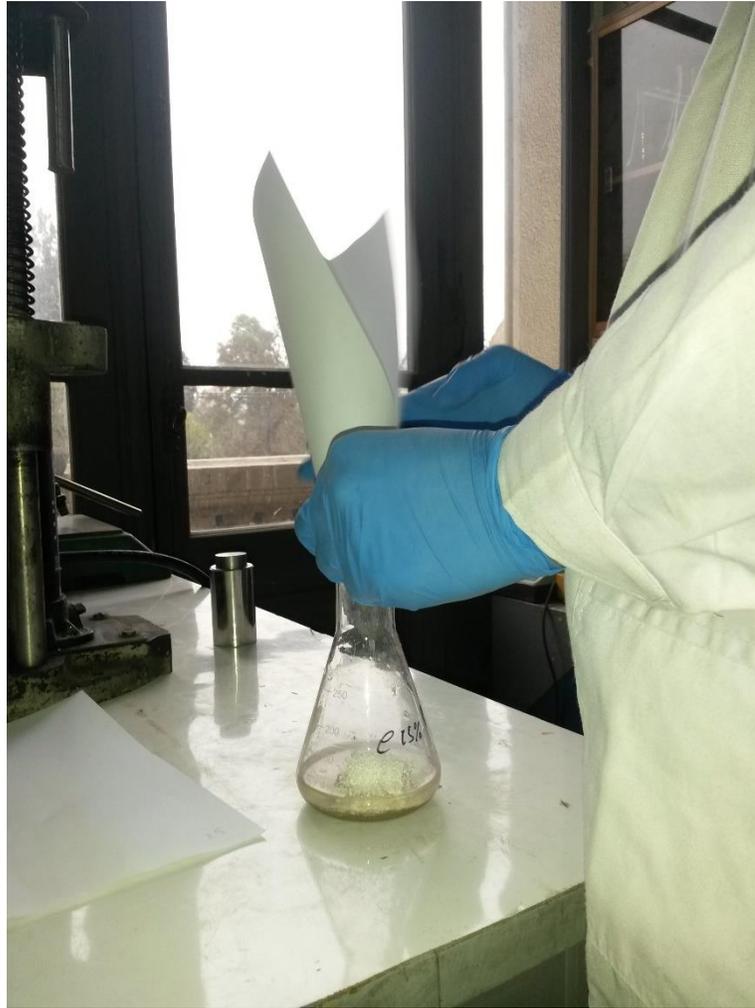


Figura 54: Adición de sólidos a matraz con agua.

- iv. Las mezclas de arcilla y relave con agua son luego puestas en el agitador (Figura 55), donde se agitan a 250 rpm durante una hora aproximadamente, con el objetivo de garantizar una buena mezcla de las fases.



Figura 55: Mezclas ubicadas en agitador.

- v. Una vez transcurrido el tiempo establecido, se comienzan a retirar una por una para la medición y ajuste de pH. Se debe mencionar que para el caso de la caolinita no se debe adicionar ningún modificador de pH debido a que las mezclas se encuentran naturalmente a pH 7. Cuando se trabaja con montmorillonita se acondicionan las muestras a pH 7 utilizando una solución de 16M NaOH para el ajuste grueso, mientras que en rangos cercanos a pH 7 se trabaja con una solución 8M NaOH.
- vi. La mezcla es insertada en la copa de medición y esta es puesta en el reómetro. Se establece un total de 200 puntos de medición en el rango de tasa de corte $0-300 \text{ s}^{-1}$, donde los valores para $\dot{\gamma}$ aumentan de forma lineal durante 60s. El tiempo transcurrido desde que la mezcla es puesta en la copa hasta el inicio de la medición es de aproximadamente cinco segundos, para evitar la sedimentación de partículas antes de la reometría.
- vii. Una vez terminada la medición se retira la copa y el cilindro del reómetro, los que son lavados con agua destilada y secados para la siguiente medición. La mezcla utilizada se desecha en un recipiente especial y se prepara la siguiente para su reometría correspondiente.

Al final de todas las reometrías se revisan los resultados en busca de anomalías importantes en la tendencia del comportamiento de la viscosidad y límite de fluencia, además de ruido significativo en las mediciones. Si se estima, en base a la teoría y criterios personales, que la medición es defectuosa, ésta se efectúa esta nuevamente, sin embargo se debe tener en cuenta la limitación de disponibilidad de materiales, por lo que no se realizan duplicados como rutina normal del procedimiento experimental.

4.5. Tratamiento de la información

4.5.1. Ajuste de modelos reológicos en Rheoplus

Los reogramas obtenidos se ajustan en el software Rheoplus utilizando modelos reológicos establecidos de antemano, como el de Bingham, Herschel-Bulkley, Casson, entre otros. Para seleccionar los puntos que entran en los ajustes, se deben considerar aquellos cuyas tasas de corte excedan 40s^{-1} , para evitar mediciones excesivamente ruidosas debido a los bajos esfuerzos de corte que manifiesta la mayoría de los relaves medidos bajo ese valor.

Si en un rango específico de valores de tasa de corte se evidencia ruido excesivo en la medición, u otra anomalía considerable, dichos puntos no se consideran en el ajuste, siempre y cuando se respete la tendencia de las mediciones y se descarte algún efecto propio de la mezcla de relave con arcillas.

4.5.2. Creación de modelo empírico

Utilizando los resultados de los ajustes a modelos reológicos conocidos, se realizan regresiones multi-lineales. Se descarta utilizar análisis de componentes principales (ACP), debido a que se plantean a lo más cuatro variables explicativas en el modelo, por lo que no se justifica una reducción del número de éstas.

Lo anterior se realiza para cada uno de los siguientes enfoques:

- i. Utilizando sólo las mediciones de un tipo de arcilla más la línea base. En este caso se obtendrían dos modelos, uno para la montmorillonita y otro para la caolinita, con tres variables explicativas cada uno (contenido de sólidos en volumen, d_{80} y contenido en peso de arcillas en la fase sólida)
- ii. Usando todas las mediciones, independiente del tipo de arcilla, incluyendo para esto una variable adicional que la identifique, teniendo un total de cuatro variables explicativas.

4.6. Validación de resultados

Los dos enfoques mencionados serán comparados utilizando los estadísticos expuestos en la sección 4.6.1 además de justificar la elección de un enfoque considerando su aplicabilidad en futuros trabajos.

4.6.1. Estadísticos utilizados

Para evaluar la calidad del ajuste del modelo, se utilizan diferentes estadísticos, expuestos abajo.

4.6.1.1. Coeficiente de determinación R²

El estadístico R² se utilizará como medida de la capacidad del modelo de predecir o replicar los resultados obtenidos. Mientras más cercano se encuentre a la unidad, mejor es el ajuste.

4.6.1.2. Test F de Fischer

El test F de Fisher (conocido también como test de ANOVA) indicará si efectivamente existe al menos una variable explicativa que se puede utilizar para predecir el modelo (Faber 2007). Considerando la siguiente ecuación (e.g. predicción de viscosidad):

$$\mu = \beta_0 + \beta_1 \phi + \beta_2 wt\% \text{ arcillas} + \beta_3 d_{80} \quad (14)$$

El test F de Fisher tiene como hipótesis nula que $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$. Si se rechaza ésta, quiere decir que al menos el contenido de sólidos en volumen, el contenido de arcillas y/o bien el tamaño de partículas puede ser utilizado como variable explicativa de la viscosidad y límite de fluencia.

4.6.1.3. Test T de Student

Por último, un test T de Student se realiza para cada uno de los coeficientes ($\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$). Éste tiene por hipótesis nula que $\beta_i = 0$, luego el rechazo de esta indica que la variable asociada a ese coeficiente sí entrega información (es variable explicativa) modelo reológico correspondiente (Faber 2007).

4.6.2. Validación cruzada

Una vez elegido el enfoque, se realiza validación cruzada sobre sus datos. Esto permite utilizar datos experimentales para establecer la calidad del modelo y no sólo ajustes estadísticos.

En este estudio se utiliza el método de validación cruzada aleatoria para la que se realizan cinco iteraciones, donde se estima el valor de viscosidad y límite de fluencia de un porcentaje de los relaves medidos (datos de prueba) utilizando como base del ajuste las mediciones restantes (datos de entrenamiento) (Faber 2007). Este método entrega un error de validación cuya cuantificación viene dada por la siguiente fórmula:

$$E = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K E_i \quad (15)$$

Donde E es el error de validación (calculado como la error porcentual medio absoluto), K el número de iteraciones y (E_i) el error porcentual medio absoluto de cada iteración. En este caso se generan cinco ajustes y cinco valores para E_i. Si los coeficientes de las cinco regresiones son similares entre ellos y el error de validación es bajo, se puede afirmar que el modelo de regresión es consistente y se puede utilizar la totalidad de los datos para predecir la reología.

4.7. Evaluación del HyLogger3 como herramienta de predicción reológica

Para evaluar la idoneidad del HyLogger3 en la predicción de la reología de relaves, se hace necesario la utilización de un formato adecuado para el análisis hiperespectral de muestras. Trabajos previos realizados en el P4 CSIRO-AMTC indican que la mejor forma de analizar pulpas y relaves es en forma de briquetas, que se generan aplicando presión equivalente a 6 toneladas sobre el sólido homogenizado.

Debido a que el agua enmascara rasgos espectrales típicos de algunos minerales, no se sugiere el análisis muestras húmedas, por lo que considerando los experimentos realizados debiesen fabricarse en total 36 briquetas:

- 16 briquetas con caolinita, considerando las cuatro clasificaciones granulométricas y cuatro contenidos de arcilla en la fase sólida que se utilizan en los experimentos.
- 16 briquetas con montmorillonita, al igual que con la caolinita por la cantidad de clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla.
- 4 briquetas de línea base, una por cada clasificación granulométrica.

Una vez escaneadas las briquetas sobre bandejas opacas de color negro, se evalúa el uso de diferentes escalares generados en TSG y se procede a la estimación de reología (viscosidad y límite de fluencia) en función de estos. Estos resultados se deben contrastar con los ajustes a modelos reológicos realizados en Rheoplus, con el objetivo de cuantificar el error y determinar la fiabilidad del HyLogger3 como herramienta de predicción reológica, además de sugerir mejoras para la predicción de reología a partir del escaneo de muestras.

4.8. Resumen de metodología de trabajo

La metodología de trabajo propuesta, desde las reometrías en adelante, se muestra en los diagrama de la Figura 56. En ésta se detalla como a partir de los modelos de regresión se obtienen valores de límite de fluencia y viscosidad tanto para el modelo con datos reales como para su implementación con datos obtenidos de análisis hiperespectral, siendo este último el que permite evaluar al HyLogger3 como tecnología útil para la predicción reológica.

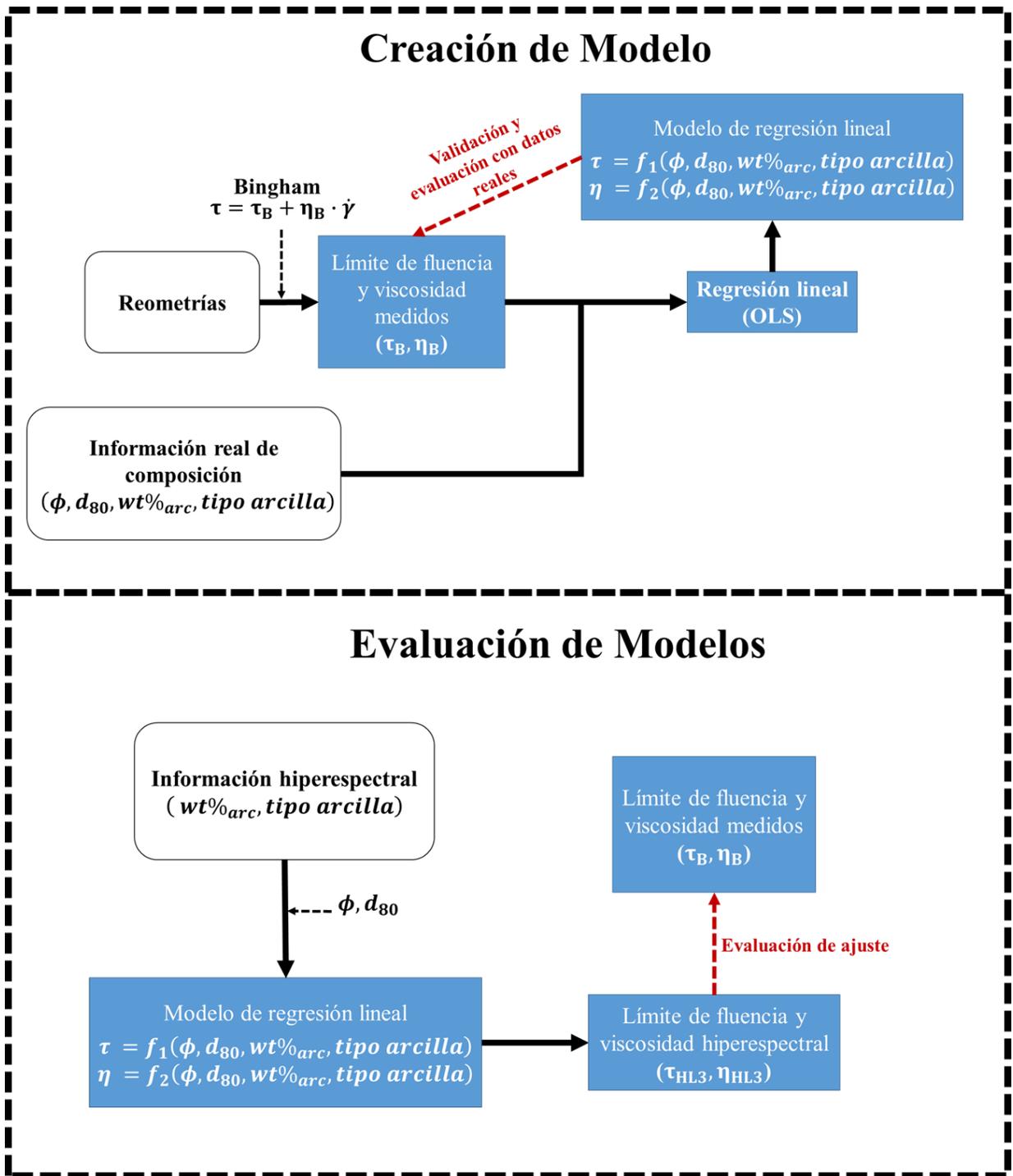


Figura 56: Diagrama de metodología de trabajo

5. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES UTILIZADOS

5.1. Caracterización del relave

5.1.1. Composición mineralógica

5.1.1.1. Microscopía de reflexión

Previo a la realización del análisis QXRD, se fabricaron briquetas de relave para analizarlas mediante microscopía de reflexión. Debido a la naturaleza del relave, es poco esperable encontrar menas de cobre opacas, sin embargo se pueden apreciar cristales de calcopirita (CuFeS_2) libre (Figura 57) y asociada con covelina (CuS) y calcosina (Cu_2S) (Figura 58), además de óxidos de cobre como cuprita (Cu_2O) y tenorita (CuO) (Figura 59). Se identifican además, óxidos e hidróxidos de hierro tales como limonita –con brillos internos característicos- ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (Figura 61) y magnetita (Fe_3O_4) (Figura 60), además de pequeños cristales de rutilo (TiO_2) (Figura 62), que también presentan sus características diagnósticas. En todas las figuras se indica si la imagen corresponde a una captura con nicoles paralelos (NP) o nicoles cruzados (NC)



Figura 57: Calcopirita libre (NP).

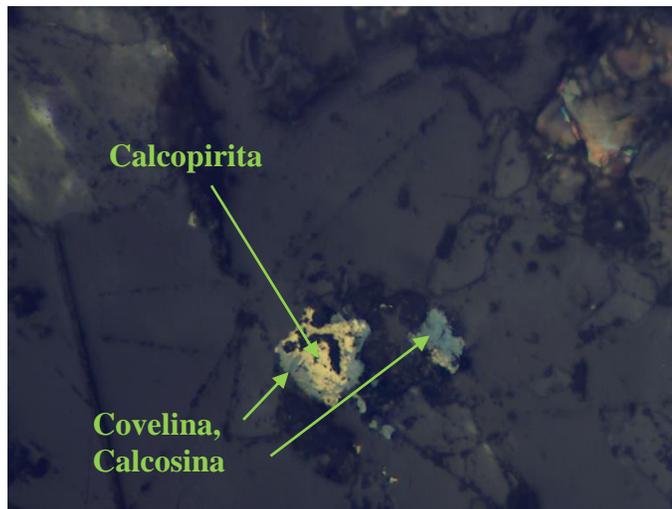


Figura 58: Calcopirita asociada a covelina y calcosina (NP).

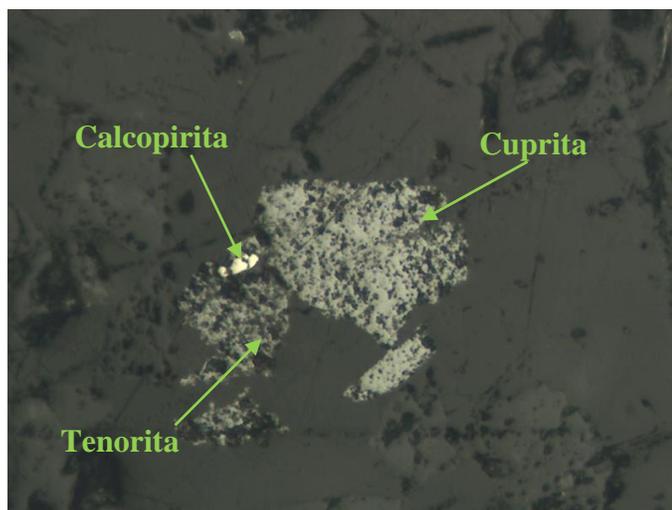


Figura 59: Calcopirita asociada a cuprita y tenorita (NP).



Figura 60: Magnetita (NP).

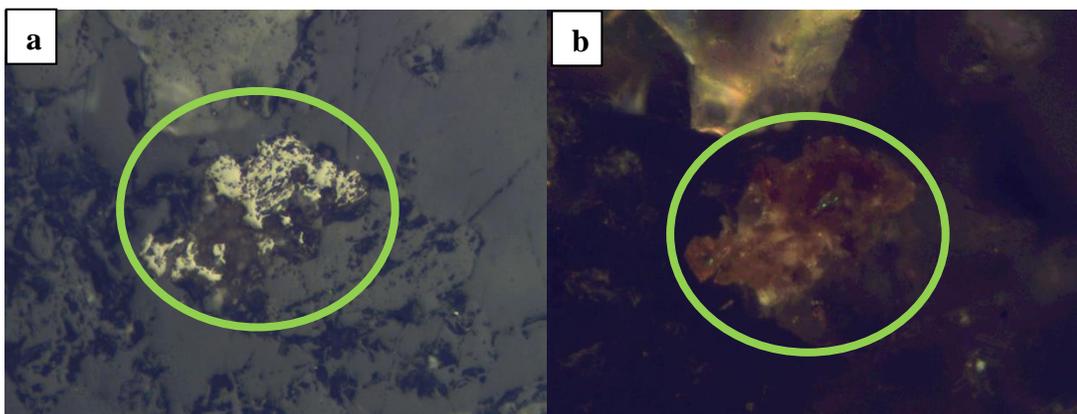


Figura 61: Limonita NP (a) y NC (b).

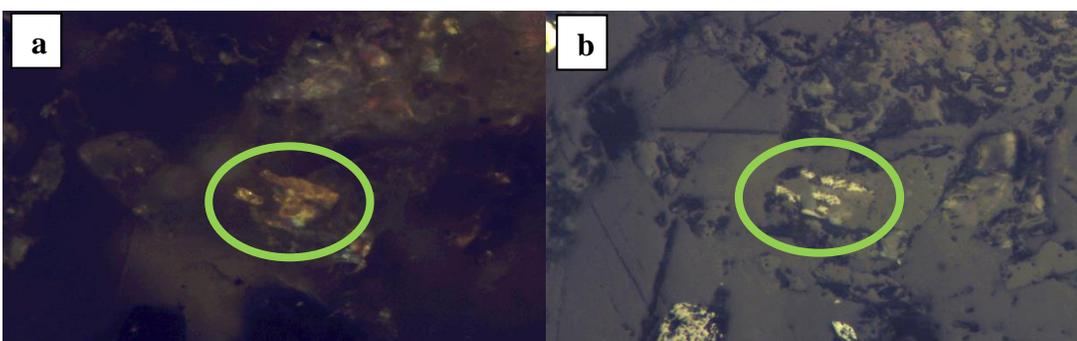


Figura 62: Rutilo NC (a) y NP (b).

5.1.1.2. Difracción de rayos X

Los resultados del análisis QXRD del relave se muestran a continuación en la Tabla 12 (el difractograma se puede ver en el anexo C).

Tabla 12: Resultados del análisis QXRD del relave.

| Compuesto | Fórmula | % |
|------------------------------------|---|----------|
| Cuarzo | SiO ₂ | 31.3 |
| Albita, rica en Ca | (Na,Ca)Al(Si,Al) ₃ O ₈ | 40.56 |
| Ortoclasa | K _{0.931} Na _{0.055} Ca _{0.009} Ba _{0.005} Al _{0.97} Si _{3.03} O ₈ | 6.93 |
| Muscovita-2M1 | KAl ₂ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH,F) ₂ | 12.77 |
| Clinocloro-1MIb, rico en Fe | (Mg,Fe) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈ | 5.71 |
| Calcita | Ca(CO ₃) | 0.72 |
| Yeso | CaSO ₄ (H ₂ O) ₂ | 2.02 |

La composición del relave indica predominancia de feldespatos (albita y ortoclasa), además de una elevada presencia de cuarzo. De acuerdo a lo expuesto en la sección 3.3.4 estos minerales no debiesen tener una gran influencia en el comportamiento reológico, al igual que la calcita y el yeso. Por otro lado, el relave contiene micas (muscovita y clinocloro), las que por su factor de forma si inciden en la reología de la suspensión en la que se encuentran. No se evidencia presencia de arcillas en el relave, por lo que un ajuste de las cantidades de arcillas de cada suspensión analizada no es necesario.

5.1.1.3. Análisis hiperespectral en HyLogger3

Los resultados del análisis hiperespectral confirman la presencia de muscovita en el rango VNIR-SWIR como indica la Figura 63, mientras que en el TIR se comprueba la presencia de cuarzo y se confirma la de muscovita, como muestran la Figura 64 y Figura 65 . En el caso del rango VNIR-SWIR se muestra la reflectancia normalizada habiendo removido el espectro continuo de fondo (Hull Quotient) para facilitar la comparación, mientras que en el TIR se exhibe la reflectancia normalizada.

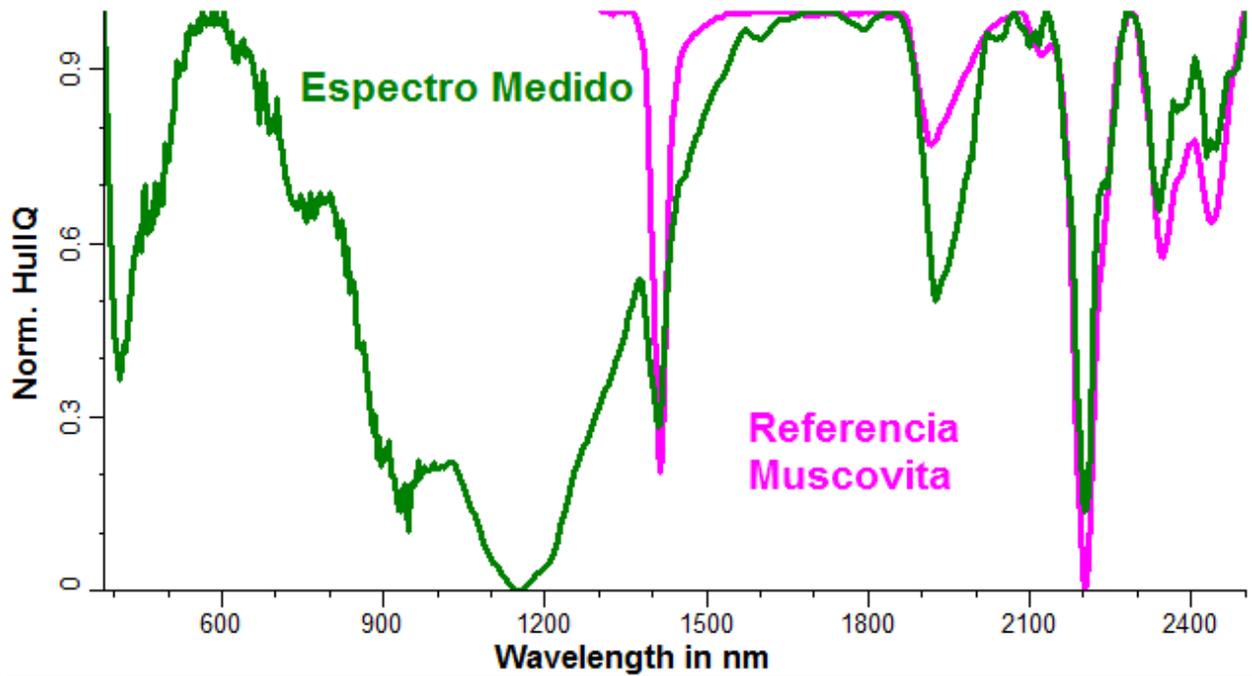


Figura 63: Curva espectral del relave en el rango VNIR-SWIR (verde) y espectro de referencia de la muscovita (rosado). Espectros ajustados por Hull Quotient y normalizados.

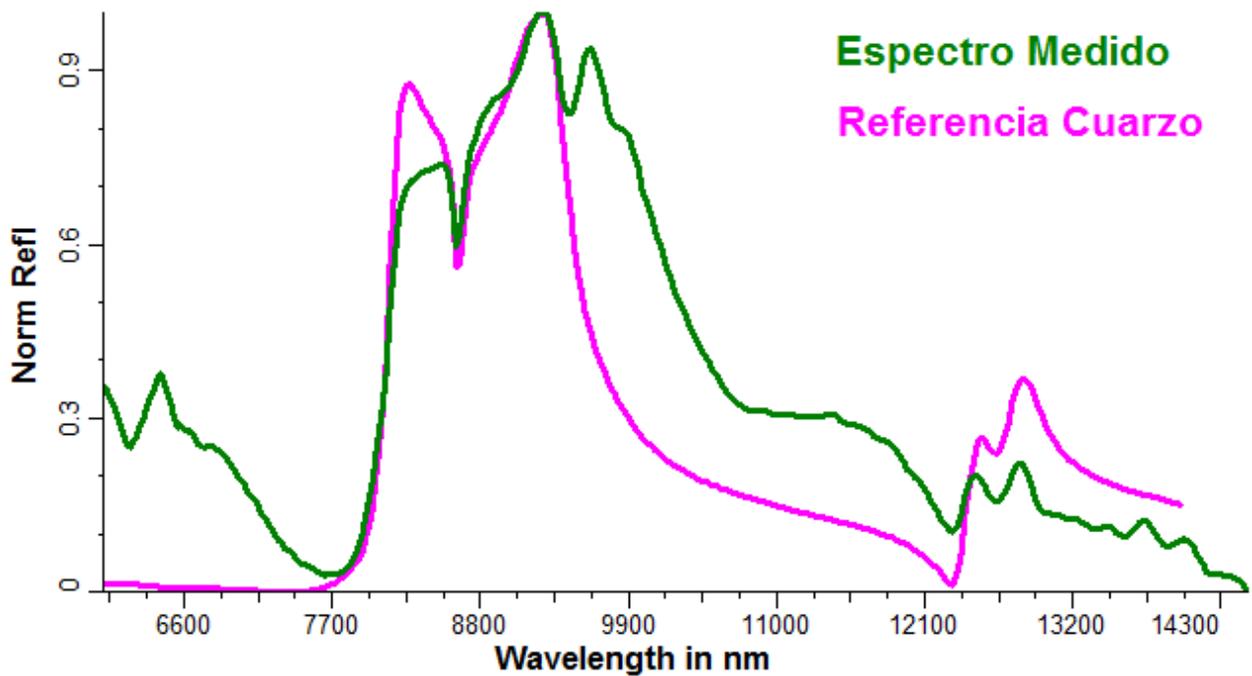


Figura 64: Curva espectral del relave en el rango TIR (verde) y espectro de referencia del cuarzo (rosado). Espectros normalizados

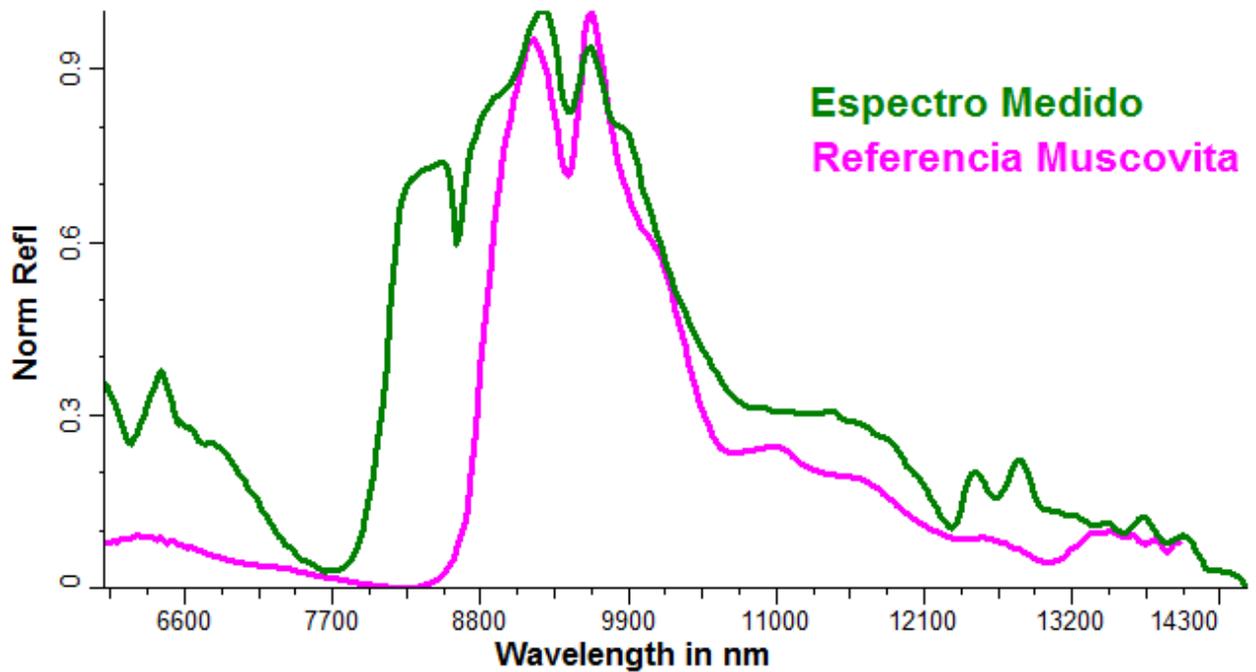


Figura 65: Curva espectral del relave en el rango TIR (verde) y espectro de referencia de la muscovita (rosado). Espectros normalizados

5.1.2. Distribución granulométrica

El resultado de los análisis granulométricos en tamices y por difracción láser difieren notoriamente (Tabla 13), probablemente debido a aglomeración de finos en el caso de los tamices, atribuible a un deslame deficiente en el proceso.

Tabla 13: Distribución granulométrica relave.

| Malla ASTM | Apertura tamiz , μm | Fu, Tamizaje | Fu, Láser |
|-------------------|--|---------------------|------------------|
| 40 | 425 | 93.84% | 99.84% |
| 50 | 300 | 84.51% | 99.12% |
| 70 | 212 | 73.00% | 95.96% |
| 100 | 150 | 58.91% | 88.56% |
| 140 | 106 | 48.94% | 77.89% |
| 200 | 75 | 39.81% | 66.74% |
| 270 | 53 | 32.16% | 59.82% |
| 325 | 45 | 29.97% | 52.40% |
| 400 | 38 | 26.21% | 48.11% |
| -400 | <38 | n/a | |

Cuando se realiza la separación en fracciones granulométricas, la fracción bajo 38 representa casi la mitad del peso total. Por esto, el análisis granulométrico láser es el más adecuado para determinar distribución granulométrica real, así que para efectos del trabajo se asumirá esta granulometría como la correcta (para ver tabla completa revisar anexo D). La Figura 66 muestra las curvas granulométricas completas generadas a partir del análisis láser.

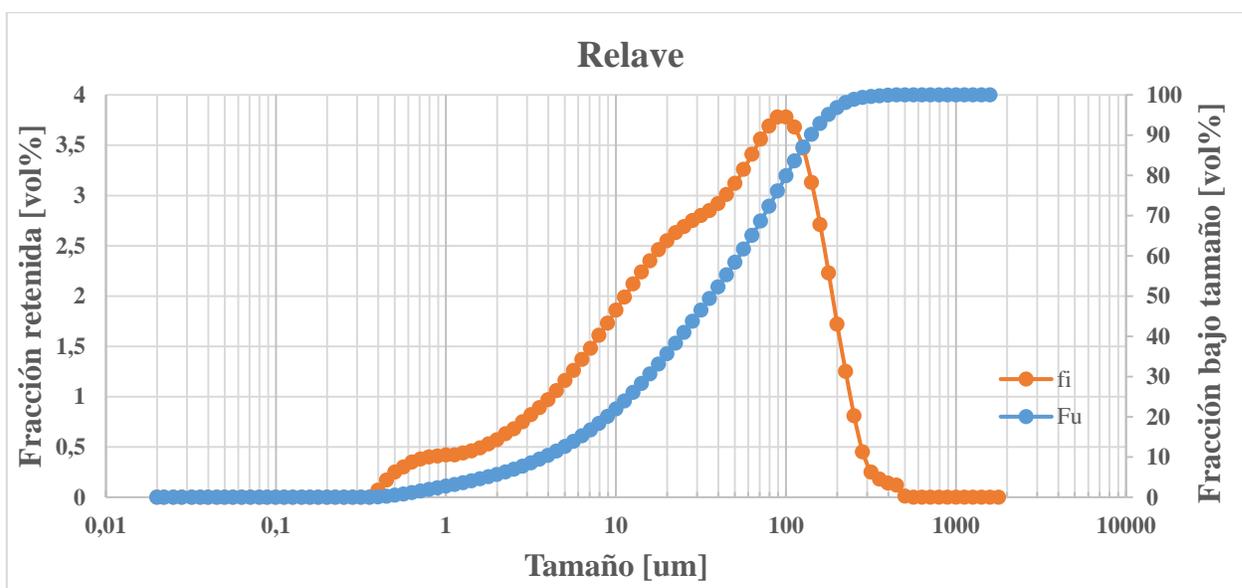


Figura 66: Curvas granulométricas completas del relave.

5.1.3. Densidad

La densidad de las dos fracciones granulométricas medidas no difiere lo suficiente como para descartar que la variabilidad está asociada al error experimental. Es por esto que se asume una densidad promedio (media aritmética de las medidas) para el relave, correspondiente a 2.6721g/cm^3 . El detalle de estas mediciones se encuentra en la Tabla 14.

Tabla 14: Mediciones de densidad en relave.

| Masas | Balón, g | Balón con mineral, g | Balón con pulpa, g | Balón con agua, g | Densidad agua, g/cm^3 | Densidad sólidos, g/cm^3 |
|----------|----------|----------------------|--------------------|-------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| -100+140 | 53.3794 | 92.011 | 177.4067 | 153.2884 | 0.9991 | 2.6594 |
| -400 | 52.7046 | 63.7166 | 159.4703 | 152.5537 | 0.9985 | 2.6848 |

5.2. Caracterización de arcillas

5.2.1. Difracción de rayos X

5.2.1.1. Caolinita

Los resultados del análisis por medio de QXRD de la Tabla 15 indica que la caolinita utilizada presenta un elevado contenido del mineral en cuestión, sin embargo aparecen contenidos considerables de feldespatos potásicos (Microclina y Ortoclasa), además de otros elementos en menor cantidad, entre los que destaca el cuarzo. El contenido amorfo puede que no sea tal, por lo

mismo se utilizará también la información hiperespectral provista por el HyLogger3. En el anexo E se puede ver el difractograma.

Tabla 15: Resultados de análisis QXRD de la caolinita.

| Compuesto | Fórmula | % |
|----------------------|--|-------|
| Caolinita 1A | $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ | 68.01 |
| Microclina | $KAlSi_3O_8$ | 8.14 |
| Ortoclasa | $K_{.931}Na_{0.055}Ca_{.009}Ba_{.005}Al_{0.97}Si_{3.03}O_8$ | 8.02 |
| Muscovita 2M1 | $K_{0.94}Al_{1.96}(Al_{0.95}Si_{2.85}O_{10})((OH)_{1.744}F_{0.256})$ | <0,5 |
| Cuarzo | SiO_2 | 4.37 |
| Tolbaquita | $CuCl_2$ | 1.35 |
| AMORPHOUS | ----- | 9.93 |

5.2.1.2. Montmorillonita

Como muestra la Tabla 16, los resultados del análisis QXRD para este mineral no son concluyentes, debido a que no se detecta montmorillonita, sólo una fase amorfa y una elevada presencia de micas (muscovita) y sulfatos (alunógeno). El anexo F contiene el difractograma.

Tabla 16: Resultados del análisis QXRD de la montmorillonita.

| Compuesto | Fórmula | % |
|----------------------|---|-------|
| Muscovita 2M1 | $(K_{0.82}Na_{0.18})(Fe_{0.03}Al_{1.97})(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$ | 18.11 |
| Voltaita | $K_2Fe_5AlFe_3(SO_4)_{12} \cdot 18H_2O$ | 2.91 |
| Cuarzo | SiO_2 | 2.71 |
| Alunógeno | $(Al(H_2O)_6)_2(SO_4)_3(H_2O)_{4.4}$ | 13.34 |
| Vertumnita | $Ca_4Al_2(Si_{2.89}Al_{2.23}O_{5.18})(OH)_{21.88}(H_2O)_{4.38}$ | 0.20 |
| AMORPHOUS | ----- | 62.75 |

5.2.2. Análisis hiperespectral en HyLogger3

El análisis de las arcillas se centra en el espectro del rango VNIR-SWIR debido a que en éste se encuentran sus principales rasgos espectrales.

5.2.2.1. Caolinita

La caolinita utilizada presenta un excelente ajuste al espectro de referencia de TSG, donde todos los rasgos espectrales coinciden, como se aprecia en la Figura 67, no apareciendo otros rasgos adicionales. Esto indica una alta presencia de caolinita en la muestra y debido a la calidad del ajuste, se asume que la muestra contiene casi en su totalidad caolinita.

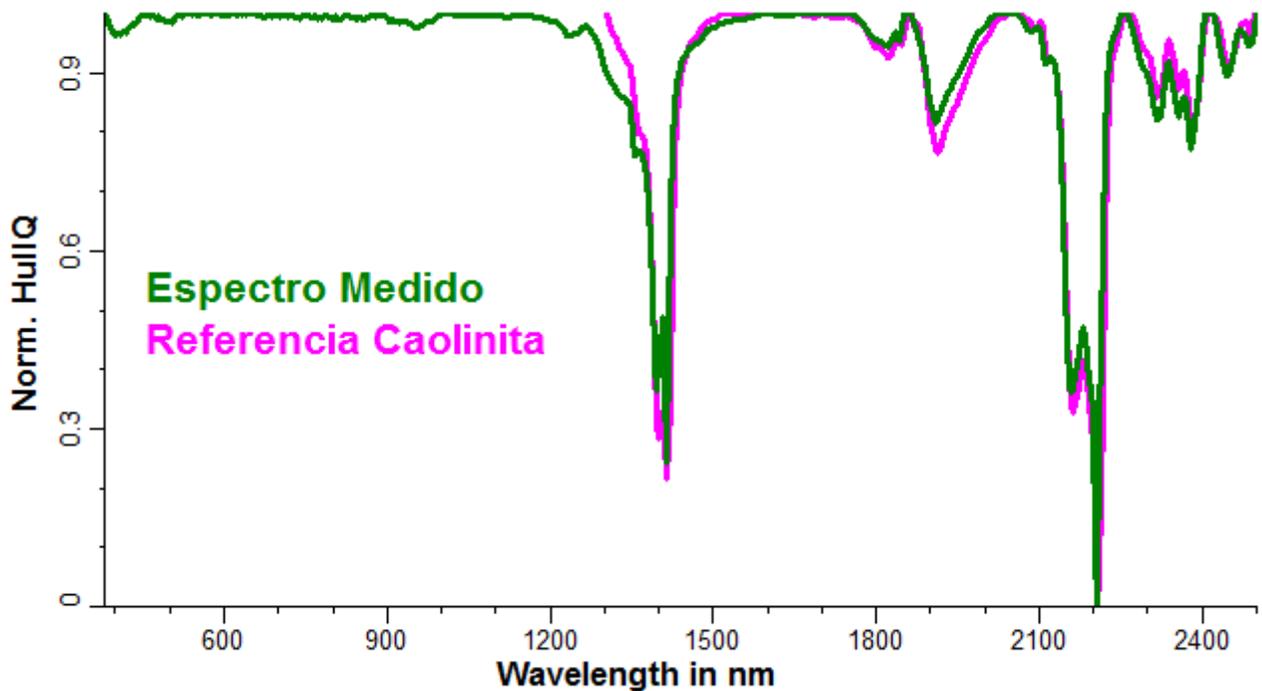


Figura 67: Curva espectral de la muestra de caolinita en el rango VNIR-SWIR (verde) y espectro de referencia de la caolinita (rosado). Espectros ajustados por Hull Quotient y normalizados.

5.2.2.2. Montmorillonita

Para la briqueta de montmorillonita, se puede notar una alta concordancia en los rasgos de los 1900 y 2200nm, mientras que el rasgo de los 1400nm se presenta más débil aunque con la misma forma, probablemente por efecto de un menor grado de cristalinidad que la muestra utilizada de referencia. Estos resultados indican que la muestra efectivamente es rica en montmorillonita (Figura 68), a diferencia de lo que indican los resultados del análisis QXRD.

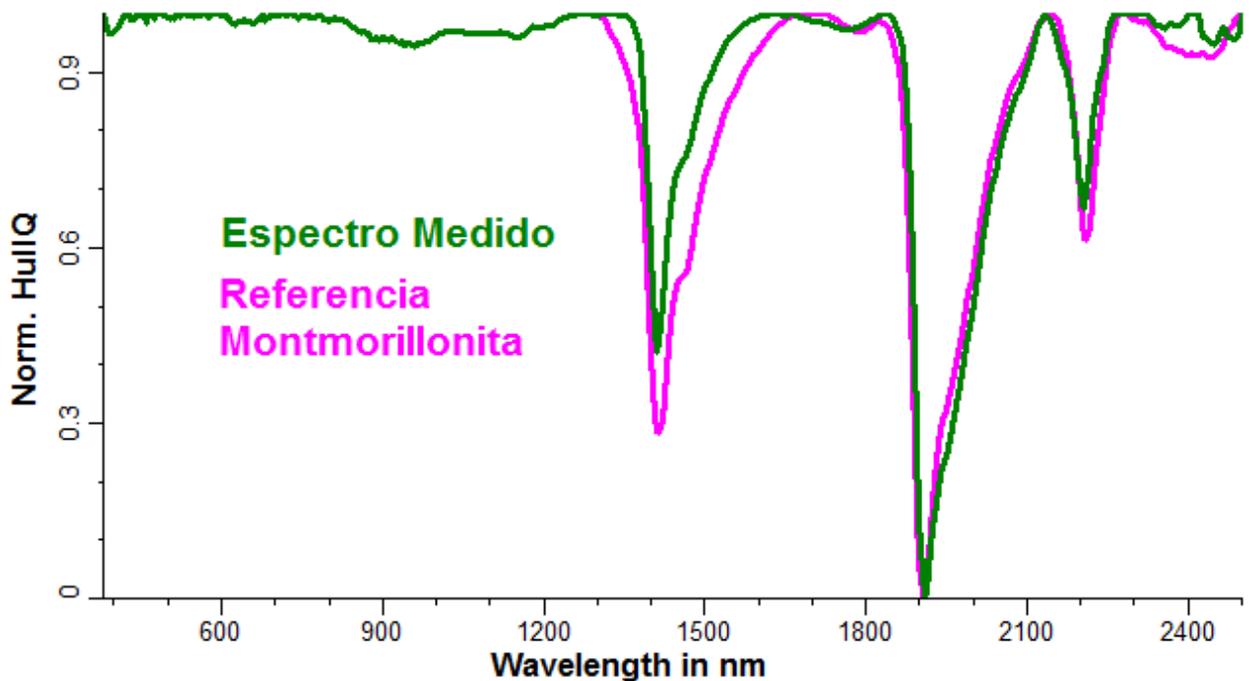


Figura 68: Curva espectral de la muestra de montmorillonita en el rango VNIR-SWIR (verde) y espectro de referencia de la caolinita (rosado). Espectros ajustados por Hull Quotient y normalizados.

5.2.3. Distribución granulométrica

5.2.3.1. Caolinita

Tal como indica la Tabla 17, casi la totalidad de la caolinita se encuentra bajo 38 micrones, y esto se puede aclarar aún más con la curva granulométrica completa (Figura 69), donde se aprecia que el d_{80} se ubica en torno a los 13 micrones. En este caso, para propósito de los experimentos, se asume que la caolinita se encuentra completa bajo la malla 400 ASTM. La distribución granulométrica completa se puede ver en el anexo G.

Tabla 17: Distribución granulométrica de la caolinita.

| Malla ASTM | Apertura tamiz , μm | Fu, Láser |
|------------|--------------------------------|-----------|
| 40 | 425 | 99.99% |
| 50 | 300 | 99.99% |
| 70 | 212 | 99.99% |
| 100 | 150 | 99.99% |
| 140 | 106 | 99.99% |
| 200 | 75 | 99.99% |
| 270 | 53 | 99.90% |
| 325 | 45 | 99.63% |
| 400 | 38 | 98.98% |
| -400 | <38 | |

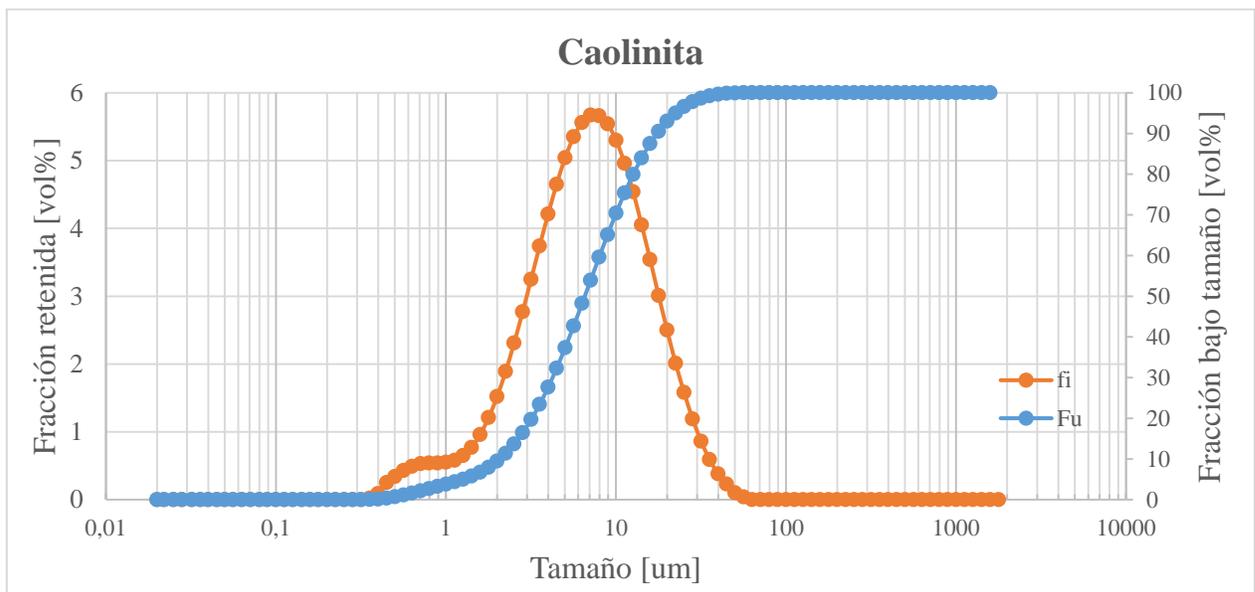


Figura 69: Curva granulométrica completa caolinita.

5.2.3.2. Montmorillonita

La Tabla 18 indica que la montmorillonita no se presenta tan fina como la caolinita, por lo que si se debe considerar su aporte a fracciones granulométricas intermedias –aquellas entre #100 y #400 ASTM-. En el caso de los experimentos, se asume que al momento de añadir montmorillonita, siempre se agrega la misma distribución granulométrica, es decir, no hay segregación dentro del contenedor ni tampoco al momento de adicionarla a los sólidos. La Figura 70 muestra la curva granulométrica completa de la montmorillonita (tabla en anexo H), donde el d_{80} se ubica en torno a los 56 micrones, valor bastante mayor al de la caolinita.

Tabla 18: Distribución granulométrica montmorillonita.

| Malla ASTM | Apertura tamiz , μm | Fu, Láser |
|-------------------|--|------------------|
| 40 | 425 | 99.99% |
| 50 | 300 | 99.99% |
| 70 | 212 | 99.99% |
| 100 | 150 | 99.99% |
| 140 | 106 | 99.99% |
| 200 | 75 | 99.99% |
| 270 | 53 | 99.90% |
| 325 | 45 | 99.63% |
| 400 | 38 | 98.98% |
| -400 | <38 | |

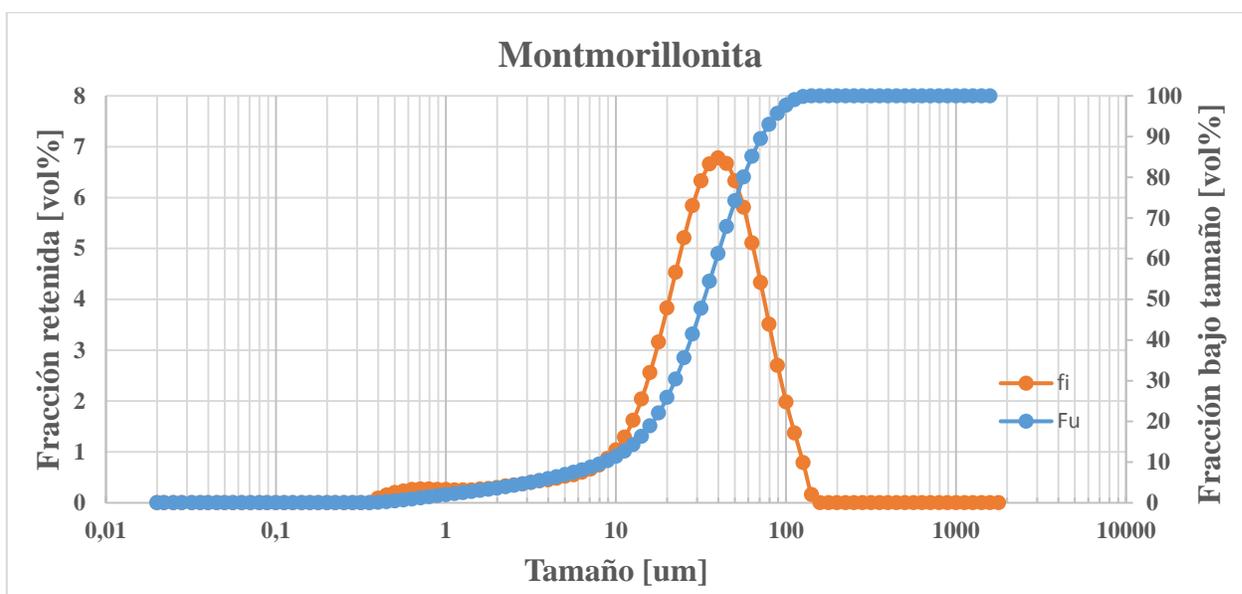


Figura 70: Curva granulométrica completa de la montmorillonita.

Estos resultados indican que existe la posibilidad de que la caolinita tenga mayor influencia en la reología por su menor tamaño de partícula, aunque se considere que la montmorillonita es mucho más expansiva. Por lo mismo, este supuesto se debe corroborar con los resultados de las reometrías.

5.2.4. Humedad

La medición de humedad de ambas muestras se resume en la Tabla 19, donde se aprecia que la caolinita posee una humedad descartable, por lo que para efecto de los experimentos se considera seca.

Tabla 19: Humedad de arcillas.

| Tipo de arcilla | Natural, g | Seca, g | Humedad, base seca | Humedad, base húmeda |
|-----------------|------------|---------|--------------------|----------------------|
| Caolinita | 10.518 | 10.477 | 0.39% | 0.39% |
| Montmorillonita | 10.784 | 9.514 | 13.35% | 11.78% |

Por otro lado, la montmorillonita pierde una cantidad considerable de agua durante el proceso de secado, y por ello se debe considerar el aporte de agua de esta arcilla a los experimentos, tal como se detalla en la sección 4.4.1. La higroscopicidad de la montmorillonita es tal que, una vez seca, su masa no deja de aumentar cuando se saca del horno y se pesa en la balanza, por lo que se debe ser cuidadoso en esta medición pues esta humedad del mineral depende fuertemente de la humedad relativa del aire.

Al cabo de un día de ser expuesta a condiciones ambientales, la caolinita no manifestó un cambio en su masa, pero la montmorillonita absorbió humedad hasta llegar a pesar 10.609g, por lo que se presume que parte de la muestra no absorbió agua por encontrarse aislada del entorno, sobre todo la que se ubica al fondo del recipiente.

5.2.5. Densidad

El detalle de la medición de la densidad de las arcillas se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20: Densidad arcillas.

| Masas | Balón, g | Balón con mineral, g | Balón con pulpa, g | Balón con agua, g | Densidad agua, g/cm ³ | Densidad sólidos, g/cm ³ |
|------------------------|----------|----------------------|--------------------|-------------------|----------------------------------|-------------------------------------|
| Caolinita | 61.1772 | 67.1130 | 164.4839 | 160.8840 | 0.9971 | 2.5337 |
| Montmorillonita | 58.9707 | 71.8053 | 166.1196 | 158.6859 | 0.9972 | 2.3696 |

En el caso de la montmorillonita, el peso del balón con mineral incluye su humedad, luego se debe ajustar dicho valor tal como se explica anteriormente en este documento. El valor real de la densidad de la montmorillonita seca es de 2.9030g/cm³.

6. PRUEBAS REOLÓGICAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta sección contiene los resultados de las pruebas reológicas y su análisis. Además, el Anexo I contiene un resumen de las publicaciones realizadas durante el desarrollo de este trabajo.

6.1. Consideraciones previas

6.1.1. Mediciones eliminadas

Debido a anomalías presentes en algunos resultados, de las 108 mediciones originales (48 por tipo de arcilla y 12 de línea base) se conservan sólo 105. De las tres mediciones eliminadas, algunas de ellas llegaban a valores de viscosidad imposibles de medir por el reómetro y otras presentaban un comportamiento anómalo, obteniendo reogramas no convencionales o erróneos, tal como se muestra en la Figura 71.

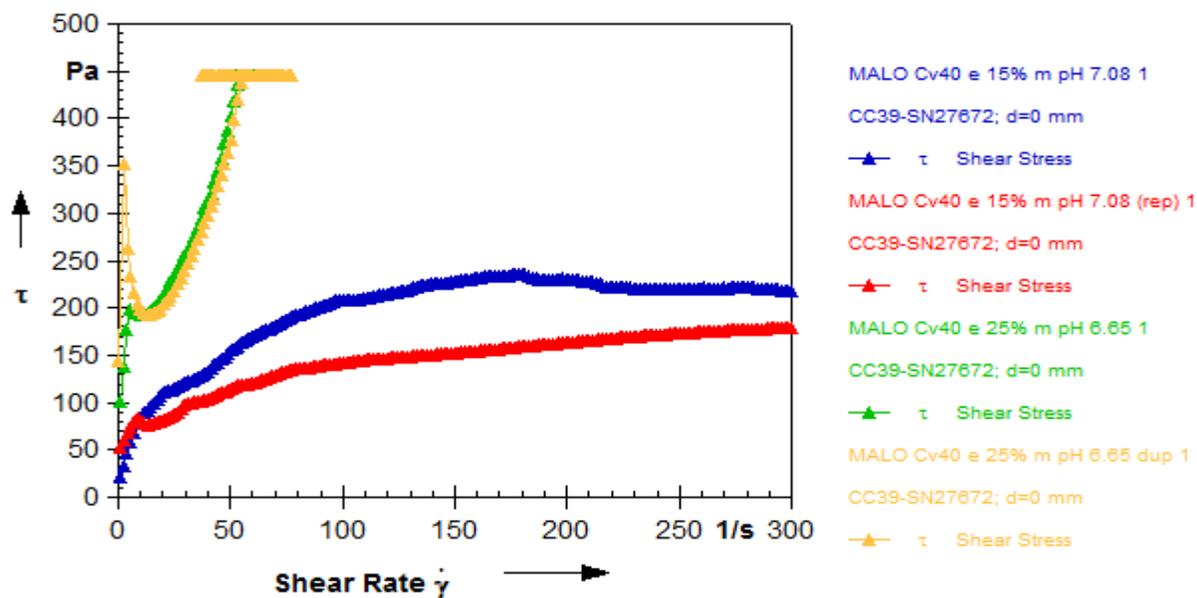


Figura 71: Reogramas erróneos

La figura anterior muestra los reogramas de dos relaves con montmorillonita y sus duplicados, ambos con un valor de $\phi = 40\%$, con 15% de arcillas en la fase sólida (rojo y azul) y 25% de arcillas en fase sólida (verde y amarillo). Ambas pruebas fueron descartadas pues en las dos mediciones para cada condición se evidenciaban comportamientos inexplicables, probablemente asociado a un pobre mezclamiento (formación de grumos por el elevado contenido de montmorillonita) y a efectos tixotrópicos importantes.

De forma adicional, también se eliminó una medición que presentaba ruido anómalo y cuando se repitió, se volvió a evidenciar el efecto. Dicha medición correspondía a un relave con montmorillonita con $\phi = 25\%$, contenido de arcillas en fase sólida de 15% y granulometría de clasificación e.

6.1.2. Clasificaciones granulométricas

La Tabla 21 indica la equivalencia entre las clasificaciones granulométricas y el d_{80} de la distribución granulométrica asociada. En adelante, las clasificaciones granulométricas serán referidas por el valor del d_{80} asociado.

Tabla 21: Equivalencia de clasificaciones granulométricas y d_{80} de la fase sólida.

| Clasificación granulométrica | d_{80} , μm |
|------------------------------|--------------------------|
| a | 86.43 |
| c | 73.99 |
| d | 63.94 |
| e | 43.79 |

6.2. Ajuste de modelos en Rheoplus

Para el ajuste de las reometrías, se evalúa el uso de los modelos de Bingham y Herschel-Bulkley. Esto se debe a que la poca fiabilidad de las mediciones a bajas tasas de corte, por lo que el límite de fluencia medido por el equipo puede diferir mucho del real.

Al realizar los primeros ajustes, los modelos de Herschel-Bulkley obtenidos indican un límite de fluencia negativo en repetidas ocasiones, ocasionado por ruidos en las mediciones a bajos valores de tasa de corte, como el ejemplo expuesto en la Figura 72. Incluso acotando el intervalo de ajuste a las zonas sin ruido, se obtenían ajustes sin sentido (con límite de fluencia negativo).

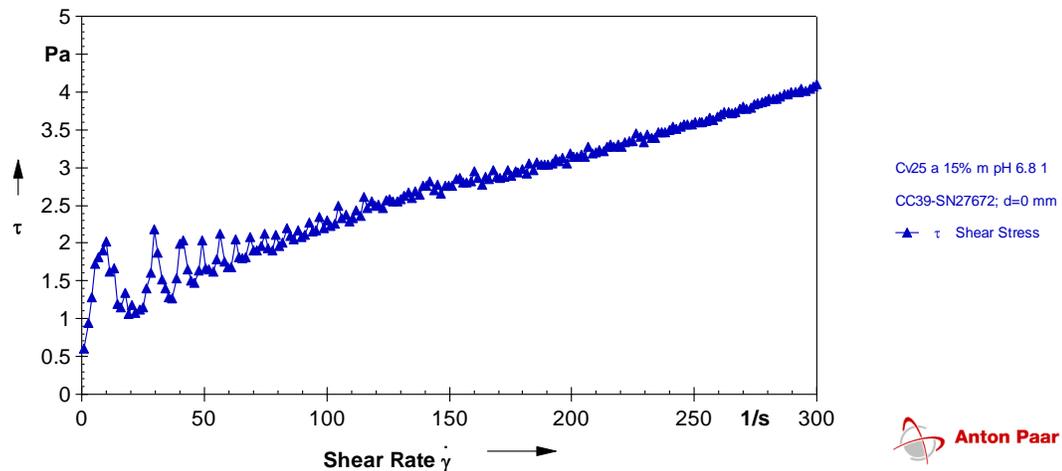


Figura 72: Ruido en reograma a bajos esfuerzos de corte.

Por lo expuesto anteriormente, se decide realizar ajustes utilizando sólo el modelo de Bingham, cuya expresión matemática se detalla en la Ecuación (3).

La Figura 73 muestra cómo se presentan los resultados de las reometrías en el software Rheoplus. En esta se aprecian tres reogramas:

- Curva azul: pulpa con 25% de sólidos en volumen, de clasificación granulométrica a, con 15% en peso de montmorillonita en la fase sólida;
- Curva roja: pulpa con 30% de sólidos en volumen, de clasificación granulométrica c, con 25% en peso de montmorillonita en la fase sólida;
- Curva verde: pulpa con 40% de sólidos en volumen, de clasificación granulométrica d, con 5% en peso de montmorillonita en la fase sólida;

La leyenda indica además el pH de cada medición luego del ajuste con NaOH (necesario en el caso de la montmorillonita).

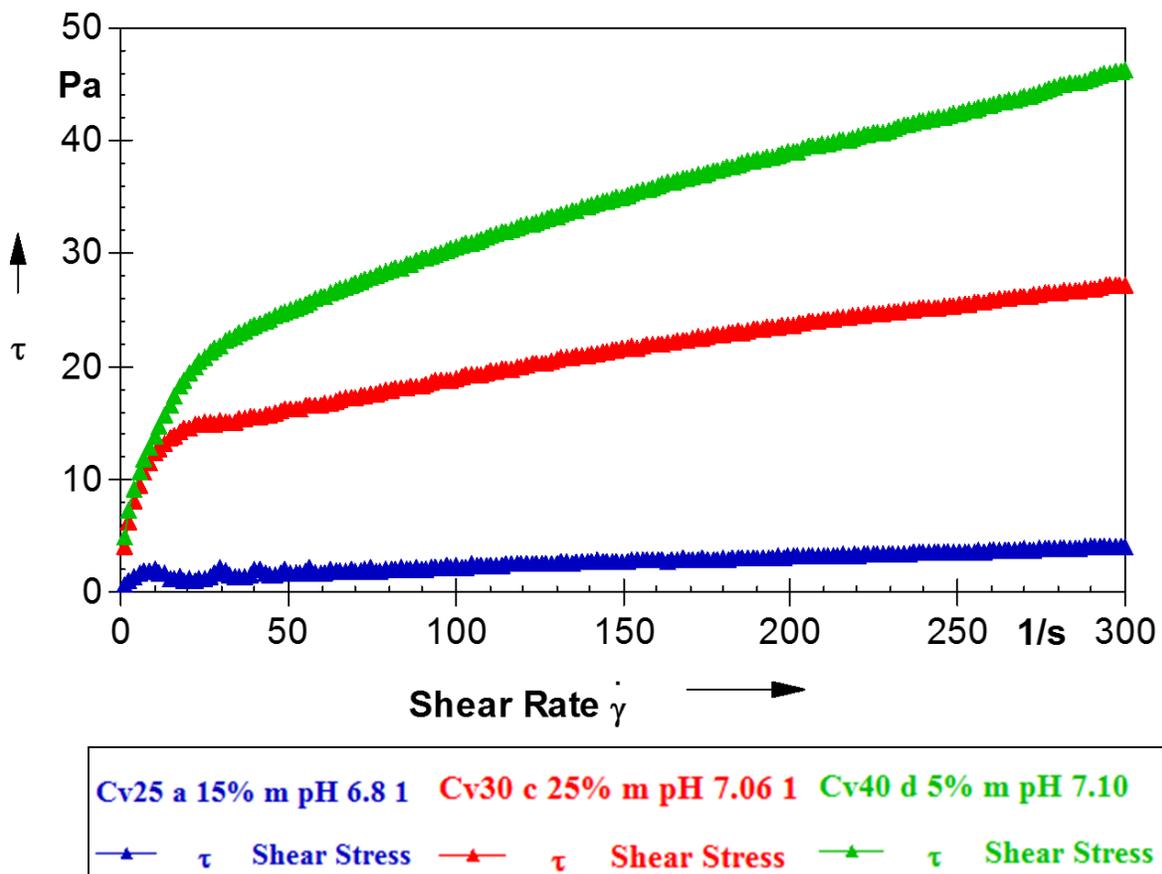
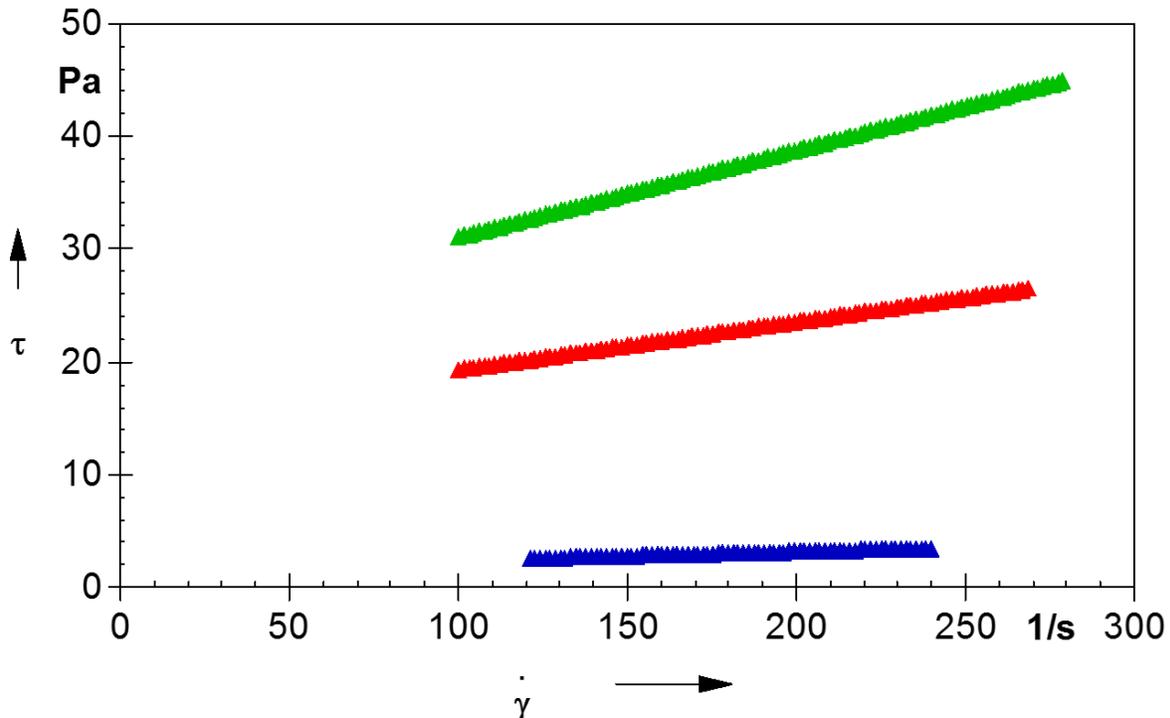


Figura 73: Ejemplos de reogramas obtenidos en Rheoplus.

Dichas curvas presentan diferentes límites de fluencia y viscosidad, sin embargo se debe aplicar un modelo reológico, pues en ocasiones las mediciones presentan ruido excesivo. El ajuste de las

curvas anteriores con el modelo de Bingham se muestra en la Figura 74. En ella se muestran dichos ajustes para cada curva por separado en el rango específico de tasas de corte en que fueron realizados. De forma adicional, se presenta la viscosidad y límite de fluencia de Bingham, que en el trabajo se denominan viscosidad medida y límite de fluencia medido, respectivamente.



Cv25 a 15% m pH 6.8 1 [Bingham I]

—▲— τ Shear Stress $\tau_{0} = 1.5771 \text{ Pa}$; $\eta_{\text{inf}} = 0.0078503 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Cv30 c 25% m pH 7.06 1 [Bingham I]

—▲— τ Shear Stress $\tau_{0} = 15.023 \text{ Pa}$; $\eta_{\text{inf}} = 0.042575 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Cv40 d 5% m pH 7.10 [Bingham I]

—▲— τ Shear Stress $\tau_{0} = 23.3 \text{ Pa}$; $\eta_{\text{inf}} = 0.077364 \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Figura 74: Ejemplos de ajustes a modelo de Bingham de reogramas.

Un ejemplo con los parámetros ajustados para cada medición de montmorillonita con 25% de sólidos en volumen, así como el rango de tasa de corte utilizado en dichos ajustes, se muestra en la Tabla 22. El anexo I contiene los ajustes de todas las pruebas realizadas, con su correspondiente identificador de prueba.

Tabla 22: Ejemplo de ajuste de modelos de Bingham a reometrías con montmorillonita, $\phi=25\%$, para todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla.

| ϕ | Arcilla | d_{80} | Contenido de arcillas en fase sólida | Tasa de corte mínima, 1/s | Tasa de corte máxima, 1/s | τ_B , Pa | η_B , Pa·s |
|--------|-----------------|----------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|-----------------|
| 25% | Montmorillonita | 86.43 | 5% | 120 | 240 | 1.08 | 0.0055 |
| 25% | Montmorillonita | 86.43 | 10% | 120 | 240 | 1.62 | 0.0066 |
| 25% | Montmorillonita | 86.43 | 15% | 120 | 240 | 1.58 | 0.0079 |
| 25% | Montmorillonita | 86.43 | 25% | 120 | 240 | 2.38 | 0.0105 |
| 25% | Montmorillonita | 73.99 | 5% | 100 | 250 | 1.51 | 0.0081 |
| 25% | Montmorillonita | 73.99 | 10% | 100 | 250 | 1.79 | 0.0091 |
| 25% | Montmorillonita | 73.99 | 15% | 100 | 250 | 1.95 | 0.0099 |
| 25% | Montmorillonita | 73.99 | 25% | 100 | 250 | 2.93 | 0.0133 |
| 25% | Montmorillonita | 63.94 | 5% | 120 | 250 | 1.90 | 0.0087 |
| 25% | Montmorillonita | 63.94 | 10% | 120 | 250 | 2.12 | 0.0095 |
| 25% | Montmorillonita | 63.94 | 15% | 120 | 250 | 2.47 | 0.0096 |
| 25% | Montmorillonita | 63.94 | 25% | 120 | 250 | 2.89 | 0.0131 |
| 25% | Montmorillonita | 43.79 | 5% | 120 | 250 | 2.64 | 0.0100 |
| 25% | Montmorillonita | 43.79 | 10% | 120 | 250 | 2.78 | 0.0116 |
| 25% | Montmorillonita | 43.79 | 25% | 120 | 250 | 2.92 | 0.0118 |

Los parámetros de Bingham obtenidos se referencian en adelante como τ_{medido} y η_{medido} o bien límite de fluencia medido y viscosidad medida.

6.3. Efecto de variables elegidas en reología de suspensiones

El efecto de las variables en la reología de suspensiones se analiza utilizando en conjunto las mediciones de relaves con caolinita, montmorillonita y la línea base. Posteriormente se muestra el análisis de los resultados obtenidos con cada tipo de arcilla por separado.

6.3.1. Contenido de sólidos en volumen

La Figura 75 muestra que tanto la viscosidad como el límite de fluencia presentan un crecimiento exponencial con respecto al contenido de sólidos en volumen. Esto puede originar problemas cuando se realiza una regresión lineal, pues los valores altos poseen una ponderación mayor en el método de mínimos cuadrados ordinarios (MCO), debido a que busca minimizar el error cuadrático entre el valor medido y el predicho por el modelo de regresión.

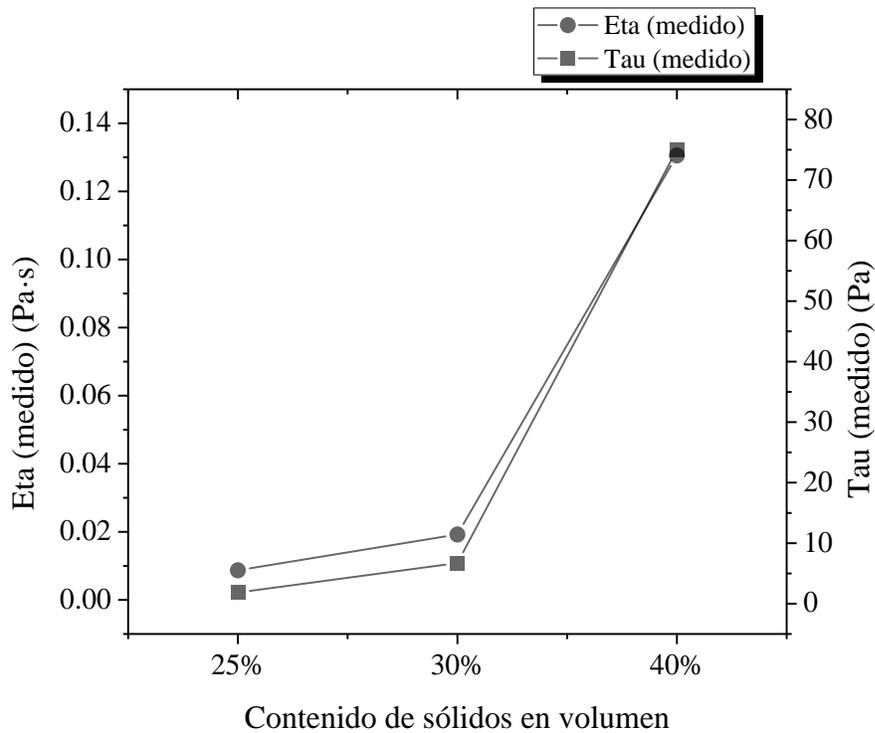


Figura 75: Viscosidad y límite de fluencia medidos en función del contenido de sólidos en volumen. Datos agrupados por categoría considerando todos los tipos de arcilla (incluyendo línea base), clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida.

Si se analiza la viscosidad como función del contenido de sólidos, separando por tipo de arcilla, no se aprecian diferencias grandes, donde la montmorillonita tiene valores levemente mayores, como muestra la Figura 76.

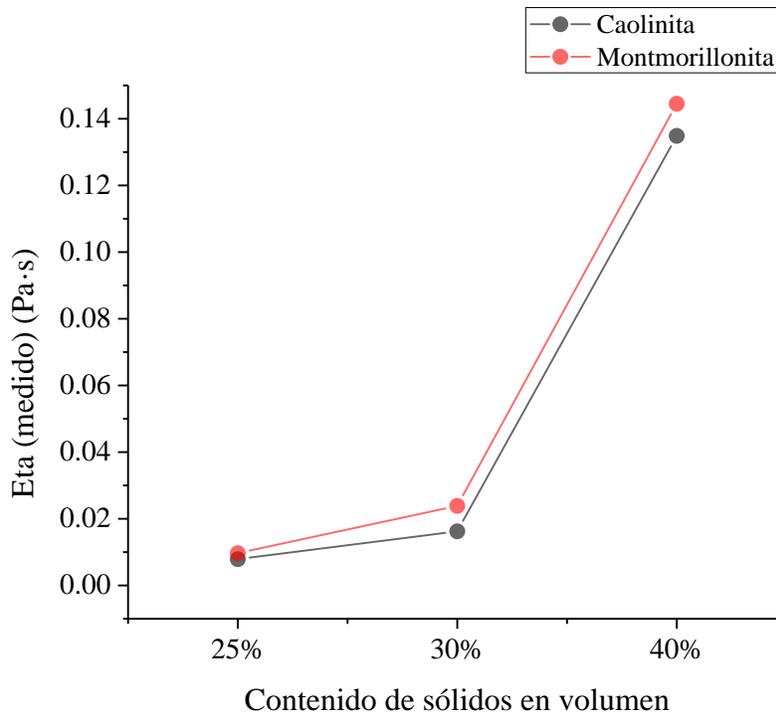


Figura 76: Viscosidad medida como función del contenido de sólidos en volumen, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida.

El límite de fluencia por arcilla tampoco presenta diferencias notables. Como indica la Figura 77 la montmorillonita presenta un crecimiento levemente menor a la caolinita en el último tramo. Esto probablemente se deba a que las 3 mediciones eliminadas corresponden a relaves con montmorillonita con contenidos de sólidos en volumen de 25% (15wt% arcillas, $d_{80}=43.79$) y 40% (15 y 25wt% arcillas, $d_{80}=43.79$). Por lo mismo, los valores promedio de límite de fluencia y viscosidad para montmorillonita se encuentran probablemente subestimados, especialmente cuando el contenido de sólidos en volumen es de un 40%.

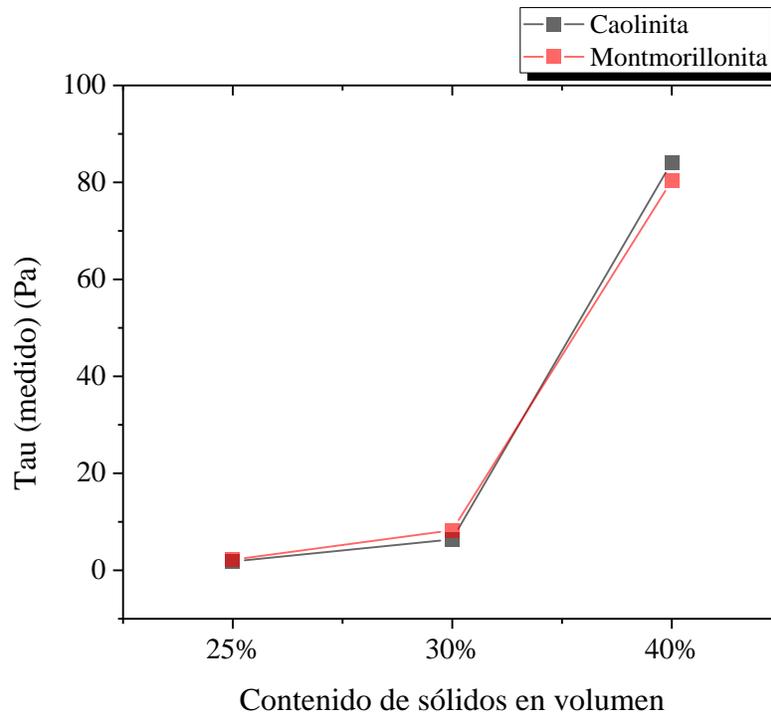


Figura 77: Límite de fluencia medido como función del contenido de sólidos en volumen, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida.

6.3.2. Contenido de arcillas de la fase sólida

La Figura 78 indica que al variar el contenido de arcillas en la fase sólida, la viscosidad y el límite de fluencia no muestran el mismo crecimiento exponencial observado en el caso del contenido de sólidos en volumen. Esto puede deberse al rango estudiado de contenidos de arcilla en la fase sólida, o bien a que efectivamente el contenido de arcillas no es la variable más importante, lo que parece más razonable, pues la teoría indica que la principal variable que explica el comportamiento reológico es el contenido de sólidos en volumen de la muestra.

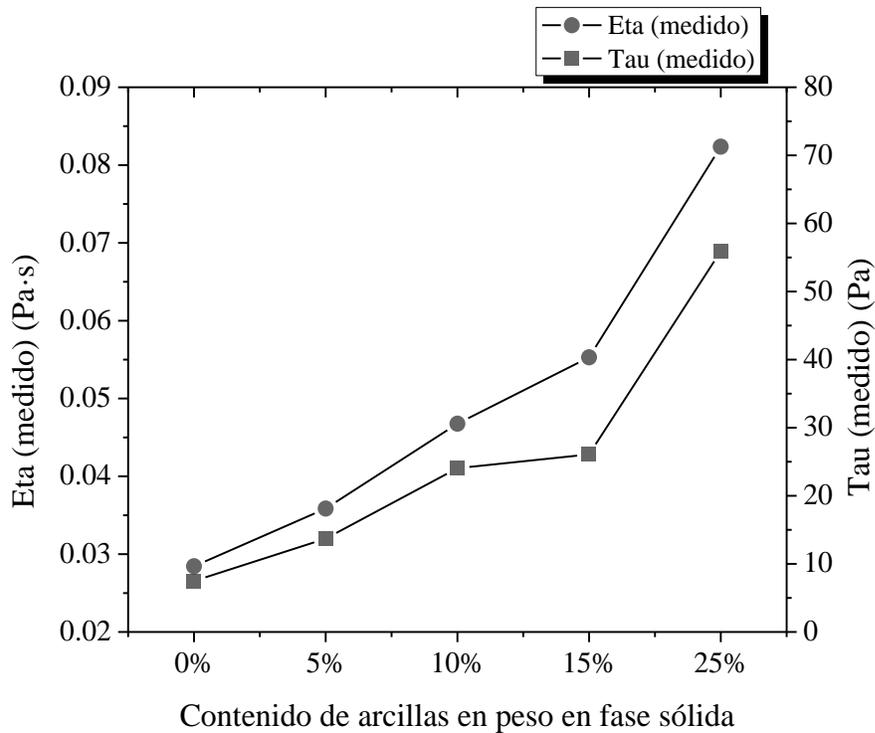


Figura 78: Viscosidad y límite de fluencia medidos en función del contenido de arcillas en la fase sólida. Datos agrupados por categoría considerando todos los tipos de arcilla (incluyendo línea base), clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida.

La Figura 79 y la Figura 80 muestran la misma información anterior separada por tipo de arcilla, donde se observa que la montmorillonita tiene valores levemente mayores para viscosidad y límite de fluencia para categorías sobre un 10% de arcillas en la fase sólida.

Se debe recordar dos de las mediciones eliminadas corresponden a muestras de con 15% de esta arcilla y un d_{80} correspondiente a $43.79\mu\text{m}$ ($\phi=25\%$ y 40%), por esto la categoría de 15% de arcillas para la montmorillonita presenta un valor menor al que debiese, lo que explica el comportamiento extraño de la curva de esta arcilla en la Figura 80.

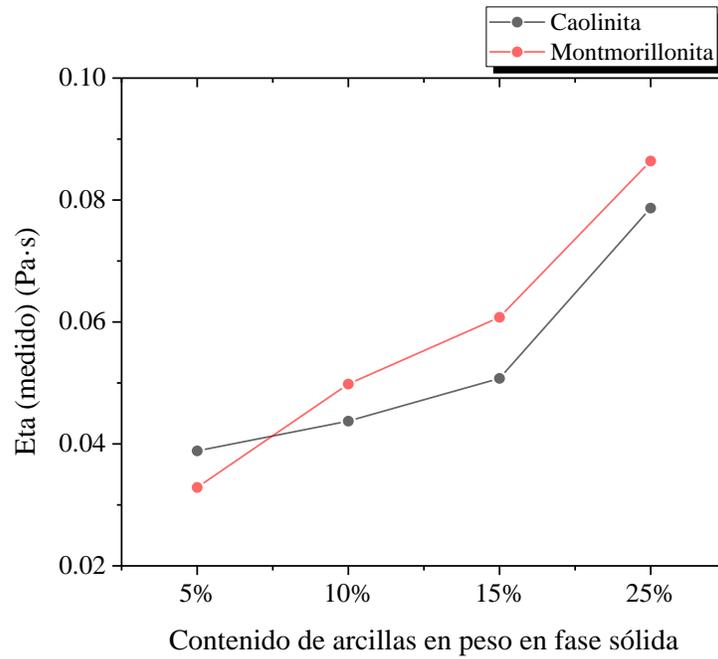


Figura 79: Viscosidad medida como función del contenido de arcillas en la fase sólida, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida.

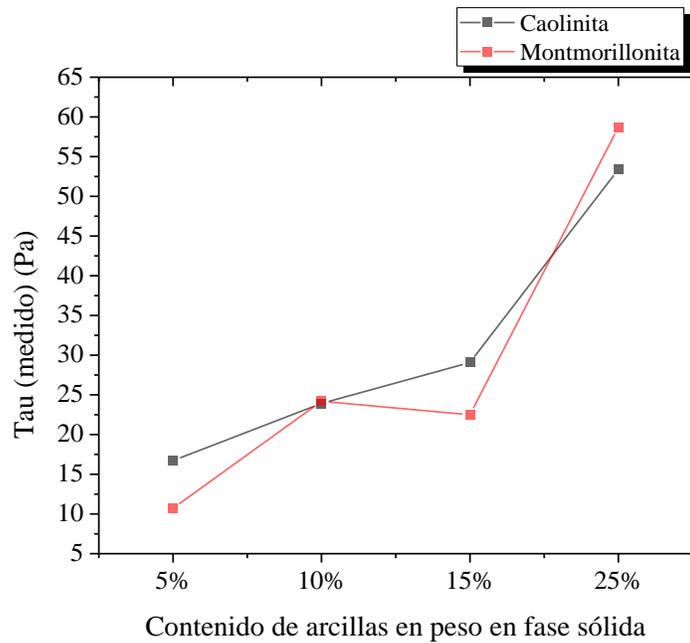


Figura 80: Límite de fluencia medido como función del contenido de arcillas en la fase sólida, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida.

6.3.3. Granulometría de la fase sólida

La granulometría de la fase sólida tiene una fuerte incidencia en el límite de fluencia, donde los dos extremos de d_{80} estudiados tienen un orden de magnitud de diferencia, mientras que con la viscosidad no ocurre lo mismo, como se muestra en la Figura 81.

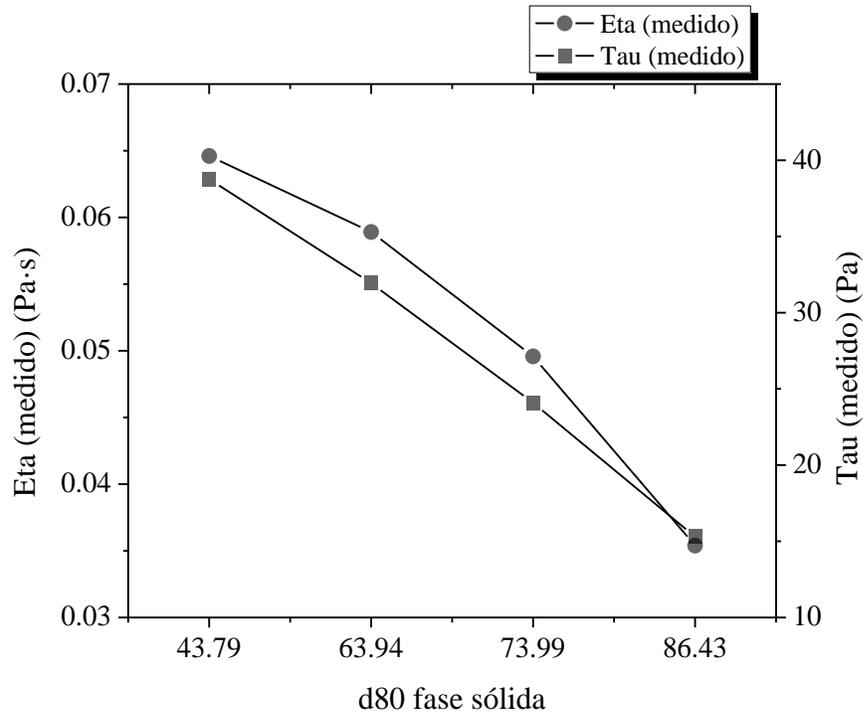


Figura 81: Viscosidad y límite de fluencia medidos en función de la granulometría de la fase sólida. Datos agrupados por categoría considerando todos los tipos de arcilla (incluyendo línea base), clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida.

Al observar la Figura 82 y la Figura 83 se evidencian las muestras eliminadas (todas ellas correspondientes a la granulometría e ($d_{80}=43.79 \mu\text{m}$), por lo que establecer una comparación para esta categoría de tamaños de partícula no resulta prudente. Aun así, para el resto de las clasificaciones granulométricas, la montmorillonita tiende a presentar mayores valores de límite de fluencia y viscosidad, explicado en gran parte por su carácter expansivo.

Es importante recalcar que los valores de viscosidad y límite de fluencia correspondientes a un d_{80} igual a $43.79 \mu\text{m}$ que se presentan en la Figura 82Figura 81 están subestimados por las muestras eliminadas ($\phi=40$, contenido de arcillas 15wt% y 25wt% $d_{80}=43.79 \mu\text{m}$, lo que se verá reflejado en el análisis estadístico correspondiente.

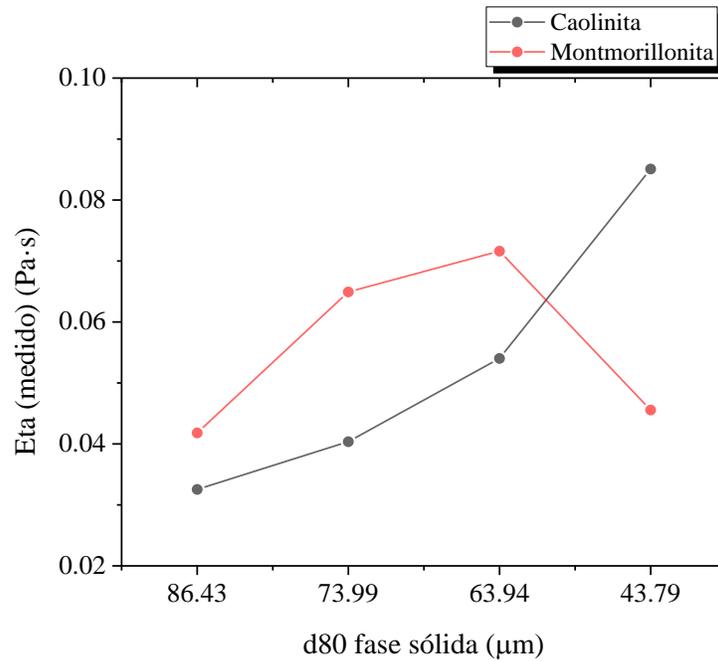


Figura 82: Viscosidad medida como función de la granulometría de la fase sólida, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida.

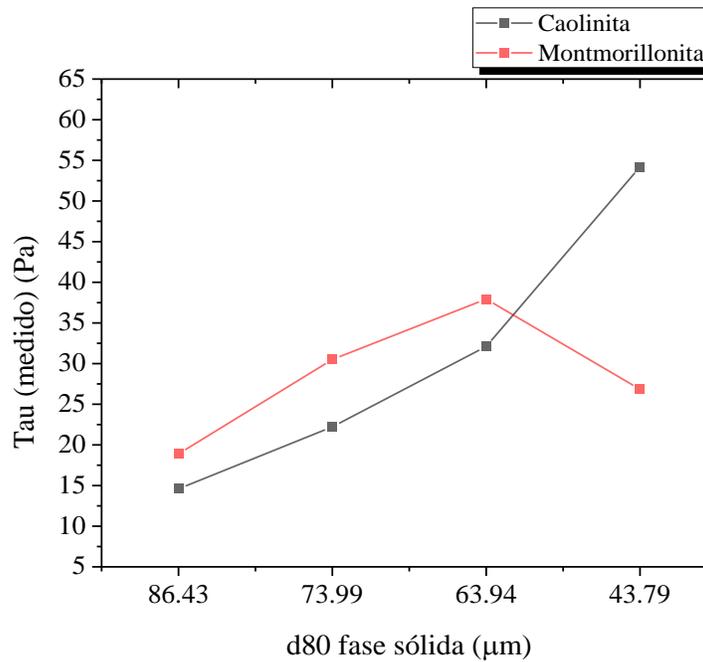


Figura 83: Límite de fluencia medido en función de la granulometría de la fase sólida, para cada tipo de arcilla por separado. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida.

6.3.4. Tipo de arcilla

Los resultados que se presentan en la Figura 84 muestran valores similares para el límite de fluencia y viscosidad según el tipo de arcilla de la muestra analizada. Como ya se ha mencionado, la montmorillonita puede estar subestimada en ambos casos pues las dos muestras más viscosas y con mayor límite de fluencia no pudieron ser medidas por limitaciones del equipo.

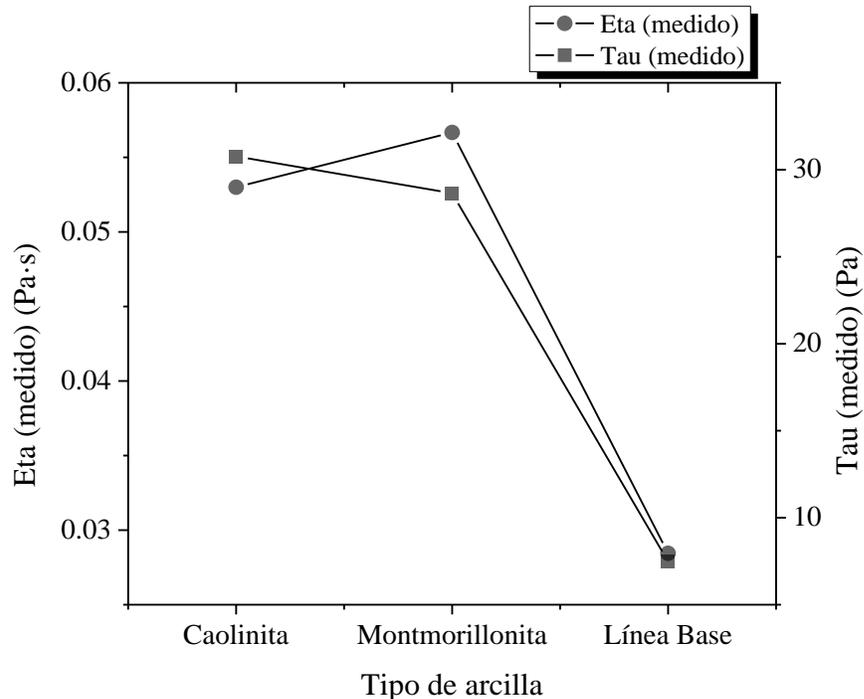


Figura 84: Viscosidad y límite de fluencia medidos en función del tipo de arcilla. Datos agrupados por categoría considerando todos los tipos de arcilla (incluyendo línea base), clasificaciones granulométricas y contenidos de arcilla en fase sólida.

La gran diferencia aparece cuando se comparan los valores promedio de las mediciones que contienen arcillas con las que fueron utilizadas como línea base (sin caolinita ni montmorillonita), donde se evidencia que los filosilicatos tienen una altísima influencia en la viscosidad y límite de fluencia. Se debe recordar que las mediciones de línea base se realizaron sobre pulpas con las mismas granulometrías y contenidos de sólidos en volumen.

6.3.5. pH de la suspensión

Aunque no es una variable elegida para la realización del modelo (sólo se controla), se estudió la influencia del pH de la suspensión en el comportamiento reológico de las arcillas puras. Esto se debe a que se observa un leve cambio del color de las suspensiones de relave con montmorillonita mientras se desarrollan las pruebas.

Tal como se expone en la sección 3.6.5, los experimentos son llevados a cabo en pH ácido, básico y neutro para cada arcilla por separado. Las reometrías de caolinita se realizan con un contenido de sólidos en volumen de 30%, mientras que las de montmorillonita se hicieron con un contenido de sólidos en volumen de 10%, ya que debido a su carácter expansivo, la suspensión tiende a transformarse en una mezcla heterogénea llena de grumos si se utilizan contenidos de sólidos en volumen sobre el 15%.

La Tabla 23 muestra los resultados de los ajustes a las reometrías, donde se aprecia que en el caso de la caolinita, la viscosidad y límite de fluencia tienen su máximo valor a pH 2.97, mientras que los valores mínimos medidos se encuentran a pH 11.05. La explicación más probable a este fenómeno es que a pH ácido se favorece la formación de estructuras, ocasionado por una anisotropía de cargas muy fuerte en esta arcilla, donde los bordes de los filosilicatos se encuentran cargados positivamente en condiciones neutras y ácidas (Farrokhpay & Bradshaw 2012). La otra posibilidad es que a dicho pH la caolinita se encuentre cerca del punto isoelectrico y las estructuras se formen por coagulación.

Tabla 23: Resultados de ajuste de modelos de Bingham a reometrías con arcillas puras a diferentes contenidos de pH.

| Tipo de arcilla | Contenido de sólidos en volumen | pH | Tau Bingham, Pa | Eta Bingham, Pa·s |
|------------------------|--|-------------------|------------------------|--------------------------|
| Caolinita | 30% | 2.97 | 163.35 | 0.2543 |
| Caolinita | 30% | 6.68 (natural) | 86.85 | 0.1857 |
| Caolinita | 30% | 11.05 | 26.64 | 0.1610 |
| Montmorillonita | 10% | 1.81 (natural) | 0.03 | 0.0023 |
| Montmorillonita | 10% | 7.06 | 0.91 | 0.0067 |
| Montmorillonita | 10% | 10.87 | 1.51 | 0.0072 |

Para la montmorillonita, la medición con máxima viscosidad y límite de fluencia corresponde al pH 10.87, donde la explicación para este fenómeno parece ser más compleja, porque la formación de estructuras generalmente es posible en condiciones neutras y ácidas como indican algunos autores (Farrokhpay & Bradshaw 2012). Es posible que para este mineral en particular, a pH 10.87 ocurra coagulación por encontrarse cerca del punto isoelectrico.

Sin embargo, no sólo un incremento en la viscosidad y límite de fluencia se evidencia al elevar el pH de la montmorillonita si no que un cambio de color que se puede explicar por un cambio composicional, debido a que el pH se ajusta utilizando NaOH. Dicha comparación de color se puede apreciar en la Figura 85.



Figura 85: Cambio de color en suspensión de montmorillonita pura. Muestra con pH 10.87 (izq.) y pH 1.81 (der.).

El análisis hiperspectral de la suspensión de caolinita a pH 10.87 se realizó luego de secarla por un día a 120°C y homogenizarla con un mortero de ágata. El material particulado es luego transformado en briqueta aplicando 6 toneladas de presión con una prensa hidráulica y se analiza en el HyLogger3. La comparación de los espectros se puede apreciar en la Figura 86 y la Figura 87.

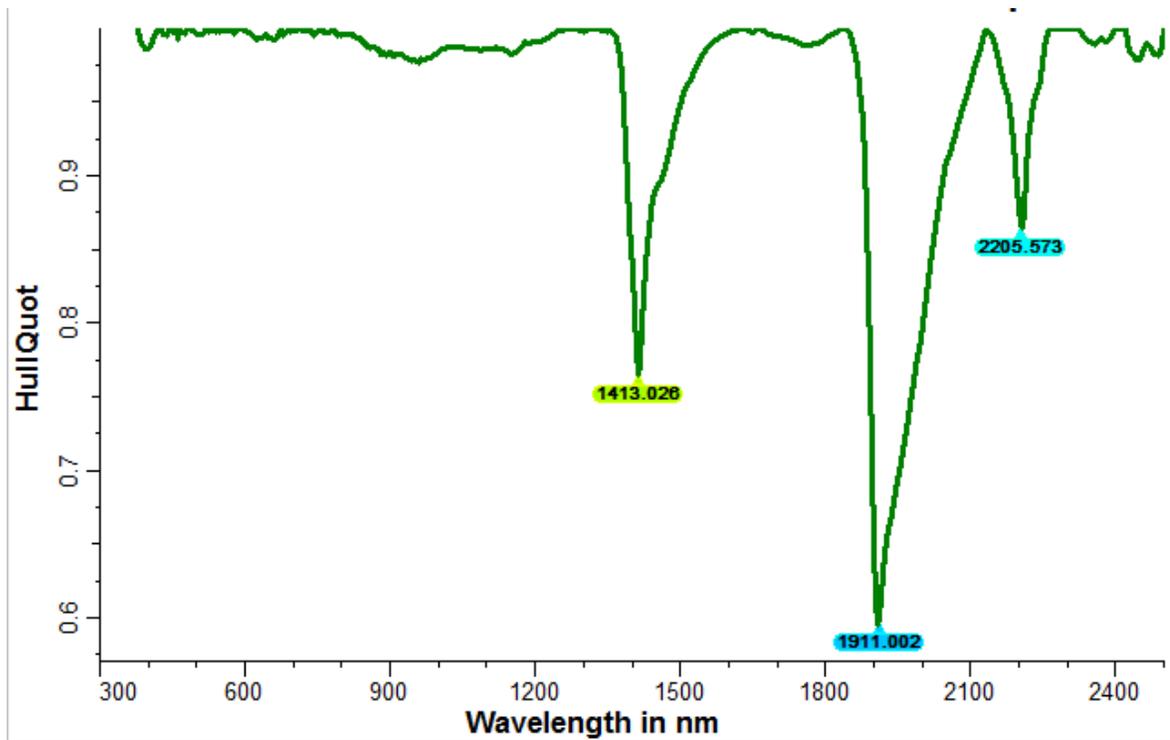


Figura 86: Curva espectral medida de montmorillonita no modificada. Espectro ajustado por HullQuotient (remoción de continuo de fondo).

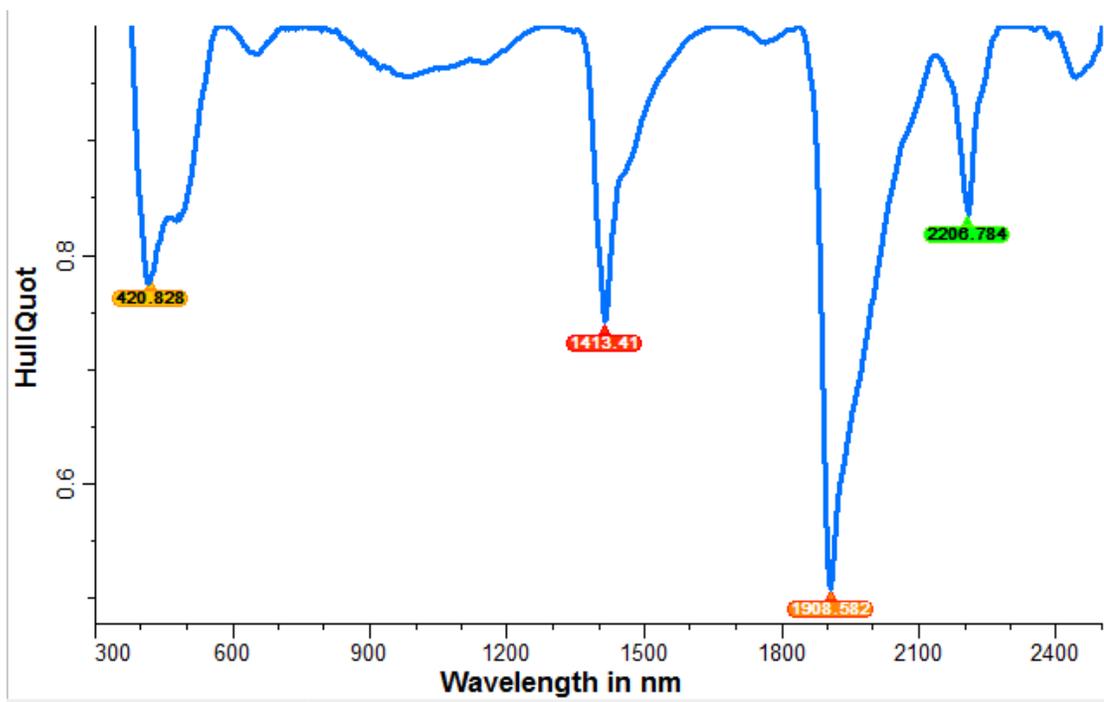


Figura 87: Curva espectral medida de montmorillonita modificada. Espectro ajustado por HullQuotient (remoción de continuo de fondo).

La principal diferencia entre los espectros a la aparición de un doble valle en la región visible (420nm), donde el equipo indica la presencia de goethita, sin embargo esta asignación parece poco confiable cuando se compara el espectro medido con el de referencia de este mineral. Lo que también llama la atención es que el valle ubicado en 1911nm en la muestra original, se desplaza levemente hacia longitudes de onda menores, llegando a los 1908nm en la muestra de montmorillonita modificada. Este desplazamiento puede ser indicador de cambios composicionales, pero dichos resultados deben ser corroborados con otras técnicas de caracterización.

6.4. Modelos empíricos

6.4.1. Consideraciones previas

Como se menciona en la sección 4.5.2, existen dos enfoques para la creación del modelo empírico. En uno se ajustan modelos de regresión considerando un modelo independiente para cada tipo de arcilla, tomando como datos de entrada las mediciones de línea base más las de la arcilla respectiva. El otro enfoque consiste en utilizar la totalidad de los datos para la regresión lineal, introduciendo una variable adicional que diferencie el tipo de arcilla.

Debido a que la viscosidad y límite de fluencia se relacionan en algunos casos de forma exponencial con las variables explicativas (ϕ , d_{80} , $wt\%_{arcillas}$), se evalúa la predicción del logaritmo de τ y η , con el fin de evitar que los valores altos tengan una mayor influencia en el modelo de regresión lineal, realizado con el método de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO). También se estudia la regresión del logaritmo de τ y η utilizando como datos de entrada logaritmos de las variables explicativas y, por último, la regresión del límite de fluencia y la viscosidad a partir del logaritmo de las variables explicativas.

La Tabla 24 muestra el coeficiente de determinación R^2 para el ajuste de viscosidad y límite de fluencia de cada arcilla (más línea base) por separado, según cómo se realizó la regresión de la viscosidad (si se predijo como logaritmo o de forma normal) y cómo se utilizaron las variables explicativas para la regresión (logarítmicas o bien sin transformación).

Tabla 24: Comparación de regresiones de viscosidad y límite de fluencia para caolinita y montmorillonita, ambas con línea base.

| Modelo | R ² Caolinita | R ² Montmorillonita |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| Log η (variables) | <u>.963</u> | <u>.964</u> |
| Log η (log variables) | .914 | .856 |
| η (variables) | .695 | .700 |
| η (log variables) | .613 | .674 |
| Log τ (variables) | <u>.988</u> | <u>.957</u> |
| Log τ (log variables) | .863 | .805 |
| τ (variables) | .607 | .480 |
| τ (log variables) | .486 | .316 |

6.4.2. Elección de enfoque y análisis de variables explicativas

La predicción del logaritmo del límite de fluencia y la viscosidad utilizando como entrada las variables explicativas sin transformar aparece como la mejor alternativa para todos los enfoques (los resultados del enfoque conjunto se muestran en la sección 6.4.2).

El coeficiente de determinación disminuye alrededor de un 1% cuando se consideran ambos tipos de arcillas en la regresión, lo que es de utilidad pues permite la elección del enfoque conjunto, utilizando un solo modelo para cada propiedad (τ y η) en vez de dos, tal como se exhibe en la Tabla 25.

Tabla 25: Comparación de modelos predictivos de viscosidad y límite de fluencia del enfoque conjunto.

| Tabla redicción de τ y η | Tau Modelo | | | | Eta Modelo | | | |
|---------------------------------------|---------------------|--------------------|-------------------|----------------------|---------------------|--------------------|-------------------|----------------------|
| | <i>Coeficientes</i> | <i>Test T Sig.</i> | <i>ANOVA Sig.</i> | <i>R²</i> | <i>Coeficientes</i> | <i>Test T Sig.</i> | <i>ANOVA Sig.</i> | <i>R²</i> |
| Constante | -118.660 | .000 | | | -.198 | .000 | | |
| Φ | 524.893 | .000 | | | .867 | .000 | | |
| d_{80} | -1.486 | .784 | .000 | .551 | .002 | .682 | .000 | .700 |
| wt% arcillas en fase sólida | -.640 | .004 | | | -.001 | .001 | | |
| Tipo de arcilla | 211.078 | .000 | | | .232 | .000 | | |
| Predicción de Log τ y Log η | Log Tau Modelo | | | | Log Eta Modelo | | | |
| | <i>Coeficientes</i> | <i>Test T Sig.</i> | <i>ANOVA Sig.</i> | <i>R²</i> | <i>Coeficientes</i> | <i>Test T Sig.</i> | <i>ANOVA Sig.</i> | <i>R²</i> |
| Constante | -2.219 | .000 | | | -3.884 | .000 | | |
| Φ | 10.282 | .000 | | | 7.658 | .000 | | |
| d_{80} | -.009 | .000 | .000 | <u>.975</u> | -.005 | .000 | .000 | <u>.960</u> |
| wt% arcillas en fase sólida | 2.770 | .000 | | | 1.348 | .000 | | |
| Tipo de arcilla | .085 | .000 | | | .042 | .011 | | |

Esto simplifica el trabajo posterior, pudiendo ingresar nuevas mediciones realizadas (con otros filosilicatos) a la base de datos que contiene las reometrías para ajustar un modelo único, que dé cuenta del tipo de arcilla con una variable explicativa adicional, en vez de generar un modelo adicional cada vez que se considera un tipo nuevo de arcilla.

Un detalle a considerar es que cuando se realiza la regresión sobre τ y η sin aplicar logaritmo, el tamaño de partículas (d_{80}) no se debe considerar como variable explicativa pues la significancia del test T es mayor al 5% (nivel de significancia) para la viscosidad y el límite de fluencia. Esto se explica en que es la variable que menos modifica la reología de las suspensiones medidas, de acuerdo a las variaciones expuestas en la Figura 81.

Al hacer la regresión sobre el logaritmo de τ y η , todas las variables consideradas son explicativas del modelo y el coeficiente de determinación mucho más alto. Para la variable tipo de arcilla, se asigna el valor 0 si corresponde a línea base, 1 si es caolinita y 2 si la muestra contiene montmorillonita. Por otro lado, el resultado del test ANOVA indica que tanto para la predicción de τ y η en su forma normal o logarítmica, existe al menos una variable explicativa de éstas

Observando la Tabla 26, que contiene el análisis de varianza sólo para Log τ y Log η categorizando por tipo de arcillas, se puede notar que para un nivel de significancia del 5%, no hay diferencias

entre los tipos de arcilla utilizados (caolinita, montmorillonita y línea base), sin embargo este resultado está condicionado a las pocas muestras sin arcilla analizadas (12) en comparación a las que sí tenían (93 válidas).

Tabla 26: ANOVA de un factor para logaritmo de viscosidad y límite de fluencia medidos, categorizando por tipo de arcilla.

| | | ANOVA de un factor | | | | |
|-------------------------------------|--------------|--------------------|--------------------|------------------|---------------|------|
| | | Suma de cuadrados | Grados de libertad | Media cuadrática | Estadístico F | Sig. |
| Log η medido | Inter-grupos | .351 | 2 | .176 | .690 | .504 |
| | Intra-grupos | 25.960 | 102 | .255 | | |
| | Total | 26.311 | 104 | | | |
| Log τ medido | Inter-grupos | 2.643 | 2 | 1.322 | 2.793 | .066 |
| | Intra-grupos | 48.255 | 102 | .473 | | |
| | Total | 50.898 | 104 | | | |

El análisis sobre la influencia del tipo de arcillas en la reología de las muestras analizadas se debe hacer entonces realizando un test T para muestras independientes, que estadísticamente es más confiable que el ANOVA. Como se muestra en la Tabla 27, en todos los casos se debe asumir igualdad de varianzas pues la significancia de la prueba de Levene (mayor a 5% en todos los casos) indica que las varianzas de los grupos son iguales, aceptando la hipótesis nula de este test.

Analizando los resultados del test T para muestras independientes, se puede concluir que cuando se comparan ambas arcillas contra la línea base para el logaritmo del límite de fluencia, existe una diferencia de las medias (significancia del test es menor al 5%), es decir, efectivamente se debe diferenciar entre las muestras que tienen arcillas y las que no.

En el caso del logaritmo de la viscosidad, los estadísticos indican que no hay diferencia (con un nivel de significancia del 5%) entre las muestras que tienen arcillas y la línea base. Por último, la comparación entre caolinita y montmorillonita indica que no hay diferencias estadísticamente significativas entre ellas, tanto para Log τ como para Log η .

Tabla 27: Test T para muestras independientes, comparación entre tipos de arcilla.

| | | Caolinita vs Línea Base | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|--|------|-------------------------------------|--------------------|--------------------|
| | | Prueba de Levene para la igualdad de varianzas | | Prueba T para la igualdad de medias | | |
| | | Estadístico F | Sig. | Estadístico t | Grados de libertad | Sig. (bilateral) |
| Log τ medido | Se han asumido varianzas iguales | .527 | .471 | -2.066 | 58 | <u>.043</u> |
| Log η medido | Se han asumido varianzas iguales | 1.974 | .165 | -.726 | 58 | <u>.471</u> |
| | | Montmorillonita vs Línea Base | | | | |
| Log τ medido | Se han asumido varianzas iguales | .004 | .948 | -2.454 | 55 | <u>.017</u> |
| Log η medido | Se han asumido varianzas iguales | 1.275 | .264 | -1.189 | 55 | <u>.240</u> |
| | | Caolinita vs Montmorillonita | | | | |
| Log τ medido | Se han asumido varianzas iguales | 1.532 | .219 | -.230 | 91 | <u>.819</u> |
| Log η medido | Se han asumido varianzas iguales | .234 | .630 | -.634 | 91 | <u>.528</u> |

Ante los resultados mostrados se puede cuestionar el hecho de incluir el tipo de arcilla en el modelo de regresión, pues sólo se evidencian diferencias estadísticas para el logaritmo del límite de fluencia. El estudio de los fenómenos que determinan la reología de suspensiones - expuesto en la sección 3.3- sugiere que se diferencie por tipo de arcillas, ya que al menos el límite de fluencia se explica en parte por la presencia de arcillas y los resultados de la regresión así lo sugieren también, por lo que la variable “tipo de arcilla” si se considerará en el modelo de regresión definitivo.

6.4.3. Modelo de regresión lineal propuesto

Considerando los datos expuestos en la Tabla 25, el modelo de regresión lineal para la viscosidad y el límite de fluencia se define de acuerdo a las ecuaciones (16) y (17).

$$\text{Log } \tau_{\text{modelo}} = -2.219 + 10.282\phi - 0.009 d_{80} + 2.770\text{wt}\%_{\text{arcillas}} + 0.085\text{tipo de arcilla} \quad (16)$$

$$\text{Log } \eta_{\text{modelo}} = -3.884 + 7.658\phi - 0.005 d_{80} + 1.348\text{wt}\%_{\text{arcillas}} + 0.042 \text{tipo de arcilla} \quad (17)$$

La variable tipo de arcilla toma los siguientes valores: 0 si es relave sin arcilla, 1 si contiene caolinita y 2 si contiene montmorillonita. Un análisis por inspección da cuenta que la variable que más afecta a la viscosidad y el límite de fluencia es el contenido de sólidos en volumen, seguido del contenido de arcillas. Estas apreciaciones se ven respaldadas por los coeficientes tipificados – expuestos en la Tabla 28-, que indican la incidencia real de cada variable en las mediciones, debido a que estos no dependen de la unidad de la variable explicativa, siendo comparables entre sí.

Para cualquier análisis posterior, los valores de límite de fluencia y viscosidad obtenidos a través del modelo de regresión lineal serán referidos como τ_{modelo} y η_{modelo} .

Tabla 28: Coeficientes tipificados de modelos de regresión lineal.

| Coeficientes tipificados | | |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| Variable explicativa | Log τ medido | Log η medido |
| ϕ | .946 | .913 |
| d_{80} | -.158 | -.194 |
| wt% arcillas en fase sólida | .221 | .327 |
| Tipo de arcilla | .055 | .082 |

Se analiza el ajuste del modelo según los diferentes valores de las variables explicativas, obteniendo para cada una la desviación media absoluta y el error porcentual medio absoluto, MAD y MAPE por sus siglas en inglés. Las fórmulas para el cálculo de estos errores se muestran en las Ecuaciones (18) y (19). Los valores de estos estadísticos se calculan para las i mediciones de una misma categoría.

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{\text{medido},i} - y_{\text{modelo},i}|}{n} \quad (18)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_{\text{medido},i} - y_{\text{modelo},i}|}{|y_{\text{medido},i}|}}{n} \quad (19)$$

La Tabla 29 contiene los valores promedio, MAD y MAPE para cada valor de las variables explicativas, donde se observa que para la viscosidad predicha, el MAPE máximo se encuentra en

torno al 11%, lo que indica una gran precisión en la estimación. El límite de fluencia manifiesta valores mayores para el MAPE, llegando al 17% en algunas categorías.

Tabla 29: MAD y MAPE del modelo de regresión lineal para distintos valores de variables explicativas.

| Variables explicativas | η_{modelo} | | | τ_{modelo} | | |
|---|------------------------|-------------------|-------------|------------------------|-----------------|-------------|
| | Media [Pa·s] | MAD [Pa·s] | MAPE | Media [Pa] | MAD [Pa] | MAPE |
| ϕ | | | | | | |
| 25% | 0.0084 | 0.000 | 3.60% | 1.99 | 0.14 | 7.63% |
| 30% | 0.0206 | 0.001 | 4.37% | 6.65 | 0.19 | 2.81% |
| 40% | 0.1149 | 0.008 | 5.80% | 64.51 | 5.66 | 7.54% |
| wt% arcillas | Media [Pa·s] | MAD [Pa·s] | MAPE | Media [Pa] | MAD [Pa] | MAPE |
| 0% | 0.0287 | 0.001 | 5.24% | 7.93 | 0.46 | 6.12% |
| 5% | 0.0388 | 0.003 | 8.88% | 14.70 | 2.06 | 15.01% |
| 10% | 0.0453 | 0.003 | 6.89% | 20.23 | 3.20 | 13.31% |
| 15% | 0.0493 | 0.005 | 8.37% | 24.55 | 1.98 | 7.58% |
| 25% | 0.0650 | 0.009 | 11.17% | 44.73 | 7.12 | 12.73% |
| d₈₀, μm | Media [Pa·s] | MAD [Pa·s] | MAPE | Media [Pa] | MAD [Pa] | MAPE |
| 86.43 | 0.0388 | 0.002 | 5.39% | 17.02 | 1.04 | 6.78% |
| 73.99 | 0.0449 | 0.004 | 9.03% | 21.89 | 1.92 | 7.98% |
| 63.94 | 0.0506 | 0.006 | 9.70% | 26.84 | 5.45 | 17.06% |
| 43.79 | 0.0548 | 0.007 | 10.43% | 30.29 | 4.55 | 11.75% |
| Tipo de arcilla | Media [Pa·s] | MAD [Pa·s] | MAPE | Media [Pa] | MAD [Pa] | MAPE |
| Caolinita | 0.0498 | 0.004 | 7.10% | 26.03 | 2.16 | 7.00% |
| Montmorillonita | 0.0491 | 0.004 | 7.19% | 25.72 | 3.61 | 12.58% |
| Línea Base | 0.0287 | 0.001 | 5.24% | 7.93 | 0.46 | 6.12% |

Al comparar los datos medidos con el modelo de regresión, se puede apreciar que las categorías de contenido de sólidos en volumen quedan muy bien ajustadas, como se muestra en la Figura 88 para el caso de la viscosidad.

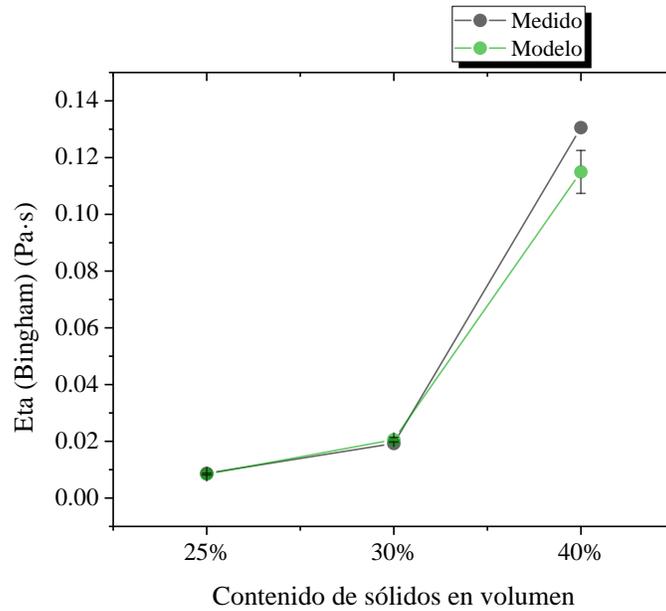


Figura 88: Viscosidad como función de contenido de sólidos en volumen, para valores medidos y del modelo. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, contenidos de arcilla en fase sólida y tipos de arcilla.

De la Figura 85, se puede concluir que el modelo se ajusta muy bien en valores de viscosidad y límite de fluencia hasta 10wt% de arcillas en fase sólida, sobre ese valor se puede apreciar una desviación del modelo medido con el real. La causa de esta desviación se debe a que la regresión es realizada sobre el logaritmo de la viscosidad y límite de fluencia. En este caso, los valores bajos y medios pueden ser estimados de mejor forma, sacrificando precisión de aquellos más altos. Este fenómeno ocurre para todas las categorías de las variables explicativas que tienen valores altos de viscosidad y límite de fluencia.

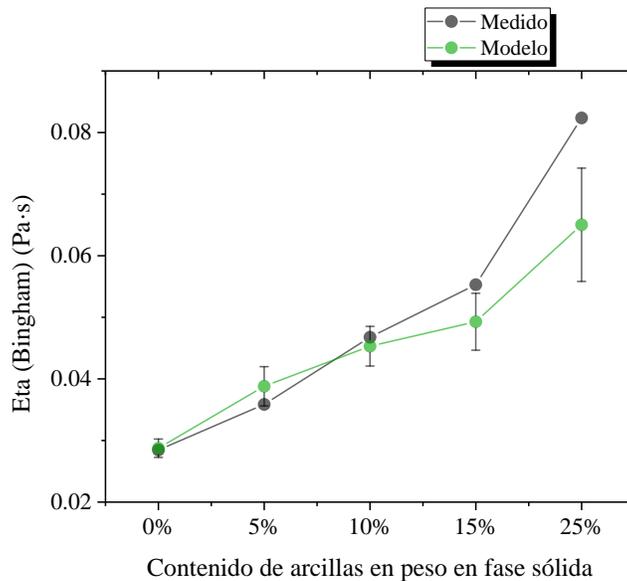


Figura 89: Viscosidad como función de contenido de arcillas en fase sólida, para valores medidos y del modelo. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, tipo de arcilla (incluyendo línea base) y contenido de sólidos en volumen.

La Figura 90 muestra modelo también suaviza la irregularidad en el crecimiento del límite de fluencia (para valores de 10% y 15% de contenido de arcillas), creando una curva de crecimiento más uniforme.

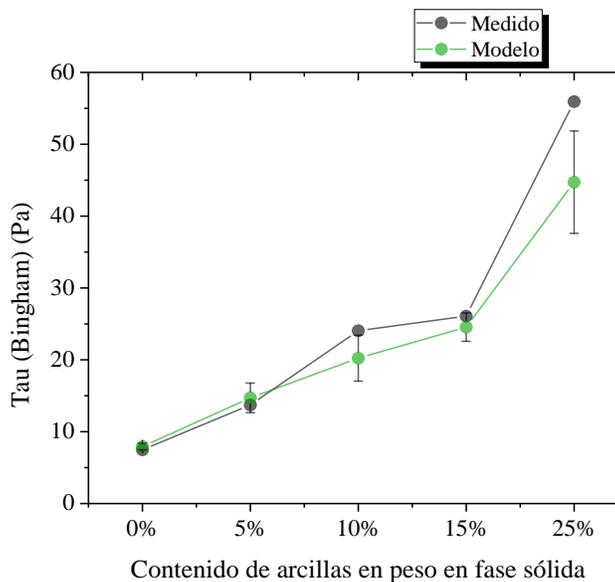


Figura 90: Viscosidad como función de contenido de arcillas en fase sólida, para valores medidos y del modelo. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, tipo de arcilla (incluyendo línea base) y contenido de sólidos en volumen.

Los diagramas de dispersión de la Figura 91 y la Figura 92 muestran la buena calidad del ajuste del modelo a los datos medidos, pero no se aprecia con claridad la leve subestimación de viscosidad y límite de fluencia que éste realiza, debido a que ésta es pequeña en comparación a la magnitud de los valores, excediendo rara vez el 10% de error.

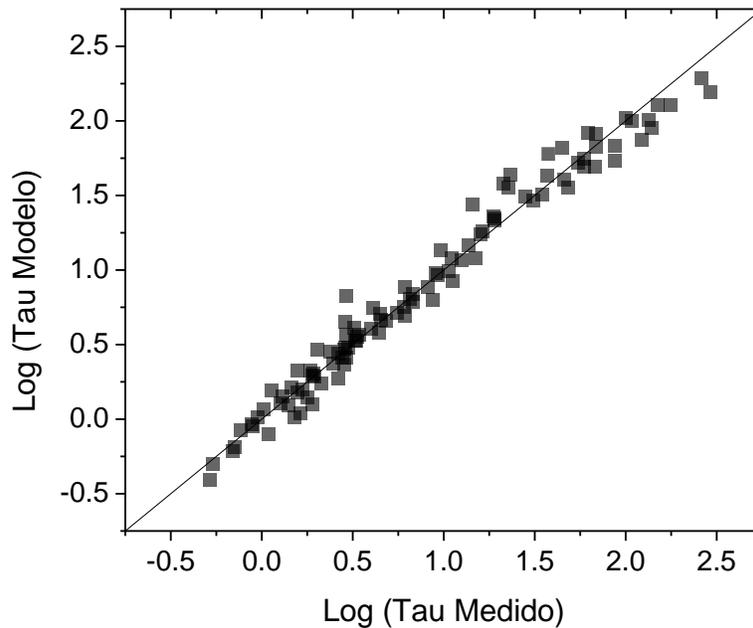


Figura 91: Diagrama de dispersión del logaritmo del límite de fluencia medido y del modelo de regresión. Contiene todas las mediciones y valores modelados.

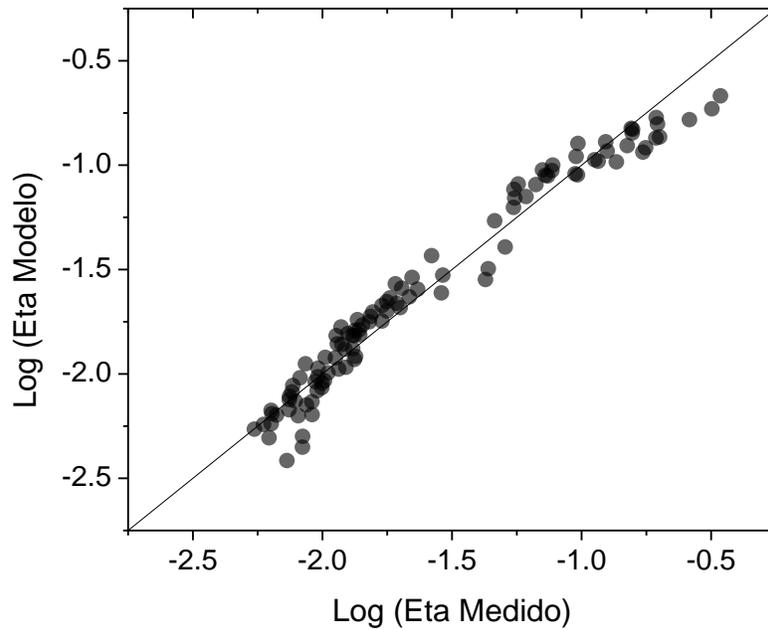


Figura 92: Diagrama de dispersión del logaritmo de las viscosidad medida y del modelo de regresión. Contiene todas las mediciones y valores modelados.

6.5. Validación de modelos

La validación cruzada se realizó con la metodología expuesta en la sección 4.6.2. Para esto se realizaron cinco iteraciones donde en cada una se eligieron aleatoriamente 90 mediciones de las 105 y se hicieron las regresiones correspondientes utilizando el mismo enfoque elegido en la sección anterior.

Luego, con los modelos generados en cada iteración se obtienen los valores de logaritmo de la viscosidad y logaritmo del límite de fluencia de aquellas mediciones no consideradas y se comparan los valores. En este caso se utilizaron los mismos estadísticos MAD y MAPE, salvo que se calcularon sin categorizar las variables explicativas, sólo sobre el total de los 15 datos que se usan como validación. La Tabla 30 contiene los principales resultados de las validaciones cruzadas. En el anexo J se pueden encontrar los identificadores de las mediciones utilizadas como prueba para cada iteración.

Tabla 30: Principales resultados de validación cruzada.

| Log η validación cruzada | | | | | | | | | | |
|---|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|
| Iteración | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
| | Coef. | Sig. Test T |
| (Constante) | - | .000 | - | .000 | - | .000 | - | .000 | - | .000 |
| | 3.929 | | 3.805 | | 3.825 | | 3.902 | | 3.881 | |
| ϕ | 7.755 | .000 | 7.528 | .000 | 7.595 | .000 | 7.749 | .000 | 7.599 | .000 |
| Tipo de arcilla | .050 | .005 | .036 | .037 | .034 | .062 | .048 | .006 | .043 | .017 |
| d80 | -.005 | .000 | -.005 | .000 | -.006 | .000 | -.006 | .000 | -.005 | .000 |
| wt% arcillas en fase sólida | 1.222 | .000 | 1.228 | .000 | 1.354 | .000 | 1.387 | .000 | 1.312 | .000 |
| R² | .964 | | .960 | | .958 | | .963 | | .957 | |
| MAD | 0.0265 | | 0.0300 | | 0.0313 | | 0.0289 | | 0.0288 | |
| MAPE | 1.71% | | 2.06% | | 1.75% | | 1.76% | | 1.72% | |
| Error de validación | 1.80% | | | | | | | | | |
| Log τ validación cruzada | | | | | | | | | | |
| Iteración | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | | 5 | |
| | Coef. | Sig. Test T |
| (Constante) | - | .000 | - | .000 | - | .000 | - | .000 | - | .000 |
| | 2.231 | | 2.143 | | 2.162 | | 2.148 | | 2.192 | |
| ϕ | 10.38 | .000 | 10.13 | .000 | 10.20 | .000 | 10.24 | .000 | 10.21 | .000 |
| | 3 | | 1 | | 5 | | 6 | | 2 | |
| Tipo de arcilla | .097 | .000 | .081 | .000 | .081 | .000 | .086 | .000 | .079 | .000 |
| d80 | -.009 | .000 | -.009 | .000 | -.009 | .000 | -.010 | .000 | -.009 | .000 |
| wt% arcillas en fase sólida | 2.681 | .000 | 2.664 | .000 | 2.693 | .000 | 2.845 | .000 | 2.741 | .000 |
| R² | .978 | | .975 | | .972 | | .978 | | .972 | |
| MAD | 0.0216 | | 0.0401 | | 0.0294 | | 0.0288 | | 0.0333 | |
| MAPE | 2.35% | | 3.76% | | 5.19% | | 3.75% | | 4.28% | |
| Error de validación | 3.86% | | | | | | | | | |

Lo primero que permite validar el modelo es la calidad del ajuste de cada iteración, donde en todos los casos se obtienen valores similares y cercanos a 1 para el coeficiente R². Además, se puede notar que los coeficientes son bastante similares entre las iteraciones, ocurriendo lo mismo con el MAPE de cada una de ellas. El único detalle a considerar es que en la tercera iteración el tipo de arcilla aparece con una significancia mayor al 5% en el test T, indicando que dicha variable no debiese ser explicativa, sin embargo el valor excede levemente lo establecido (0.05) y puede deberse a que se eliminaron muchas pruebas de una misma categoría.

En ambos casos el error de validación, establecido aquí como el MAPE promedio de las cinco iteraciones, no supera el 5%, por lo que el modelo de regresión propuesto en la sección anterior es válido estadística y experimentalmente, pudiendo utilizarse todos los datos disponibles para elaborarlo.

6.6. Implementación del modelo con datos hiperespectrales

6.6.1. Determinación de abundancia de especies

Las 36 briquetas fabricadas –como se especifica en la sección 4.7- más las dos de arcillas puras (caolinita y montmorillonita) fueron analizadas en el HyLogger3. Los espectros de las briquetas de caolinita y montmorillonita se encuentran expuestos en la sección 0, Figura 67 y Figura 68. Dichos espectros fueron utilizados para calcular la abundancia de las arcillas en las briquetas restantes.

6.6.1.1. Abundancia de caolinita

Para determinar la abundancia de caolinita en las briquetas de relave, se utilizó el doble valle ubicado entre los 2120nm y los 2200nm, más específicamente el rasgo espectral más pequeño –ubicado en torno a los 2168nm-, como se señala en la Figura 93. Esta decisión se debe a que tanto la caolinita como la montmorillonita comparten el rasgo espectral en torno a los 2200nm, sin embargo, sólo la caolinita presenta el mencionado doble valle.

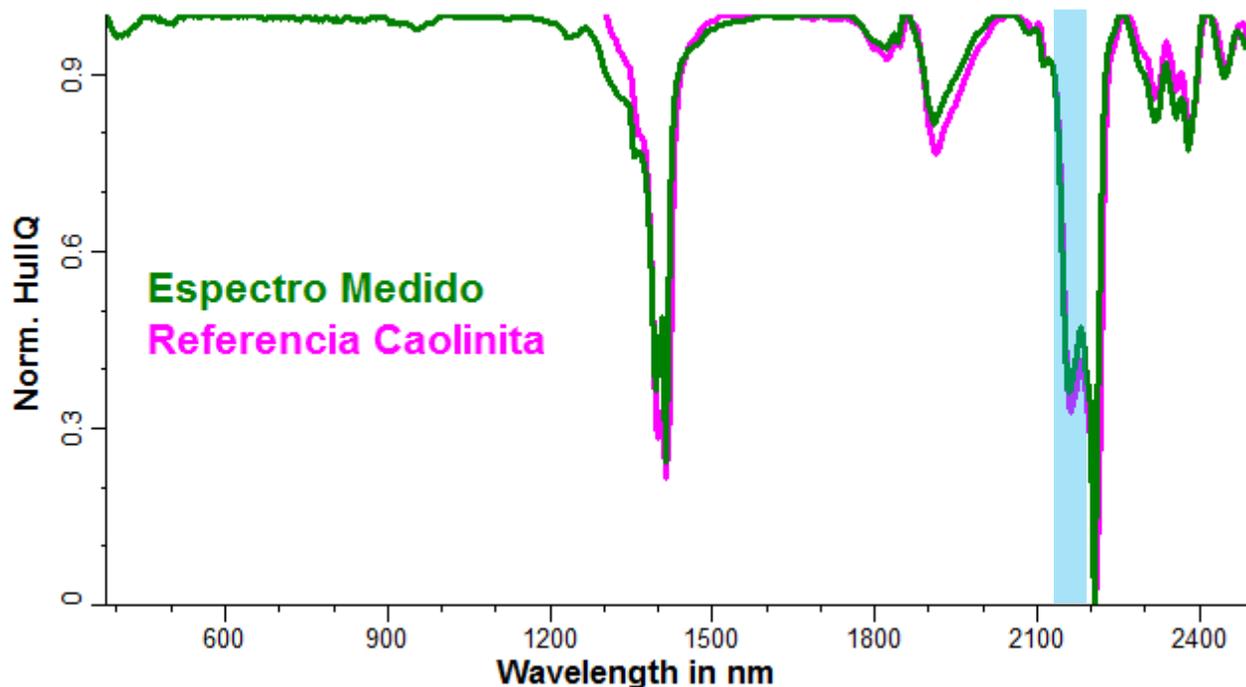


Figura 93: Rasgo espectral utilizado para medir abundancia de caolinita en las muestras. Espectros representados fueron ajustados por Hull Quotient y normalizados.

Para medir la profundidad del rasgo ubicado en los 2168nm en cada muestra, se creó un escalar de ajuste polinomial que permite medir la profundidad de dicho valle a partir de la reflectancia ajustada con hull quotient, que remueve un espectro continuo de fondo (los parámetros de creación del escalar se muestran en la Figura 94). Luego, se dividió el valor de la profundidad obtenido para cada escalar por el máximo valor reportado, que corresponde a la briqueta de caolinita. Esto permite obtener un escalar denominado “Kaolinite Index” (KI), que indica la presencia de caolinita en las muestras analizadas.

Figura 94: Parámetros de creación de escalar para medir profundidad del rasgo en los 2168nm para la caolinita.

El escalar “Kaolinite Index” permite una aproximación a las cantidades de kaolinita en las muestras, pero se debe ajustar para mejorar la calidad de los resultados. Para ello, se fijó como punto de calibración las briquetas con un 25% de caolinita, dividiendo ese 25% por el valor promedio del “Kaolinite Index” de todas las mediciones en briquetas fabricadas con ese contenido de dicha arcilla. Con esto se obtiene el “Kaolinite Adjusted Index” (KAI), cuya relación con el primer índice de abundancia se muestra en la Ecuación (20).

$$KAI = \frac{25\%}{KI \text{ promedio de briquetas con 25\% de caolinita}} \cdot KI \quad (20)$$

La elección de las muestras con 25% de caolinita como punto de calibración obedece a que con ellas se obtenían los resultados de abundancia más cercanos a los valores originales con los cuales fueron creadas las briquetas.

6.6.1.2. Abundancia de montmorillonita

El escalar “Montmorillonite Index” (MI) se construyó bajo la misma lógica que el índice de caolinita, utilizando esta vez la profundidad del rasgo ubicado en los 1900nm (indicado en la Figura 95). En este caso se debe tener cuidado pues este rasgo espectral coincide con el más característico del agua (en particular del grupo funcional OH⁻), por lo que sobreestimaciones en el contenido de montmorillonita pueden ocurrir. Los parámetros para la determinación de la profundidad del rasgo de 1900nm se muestran en la Figura 96.

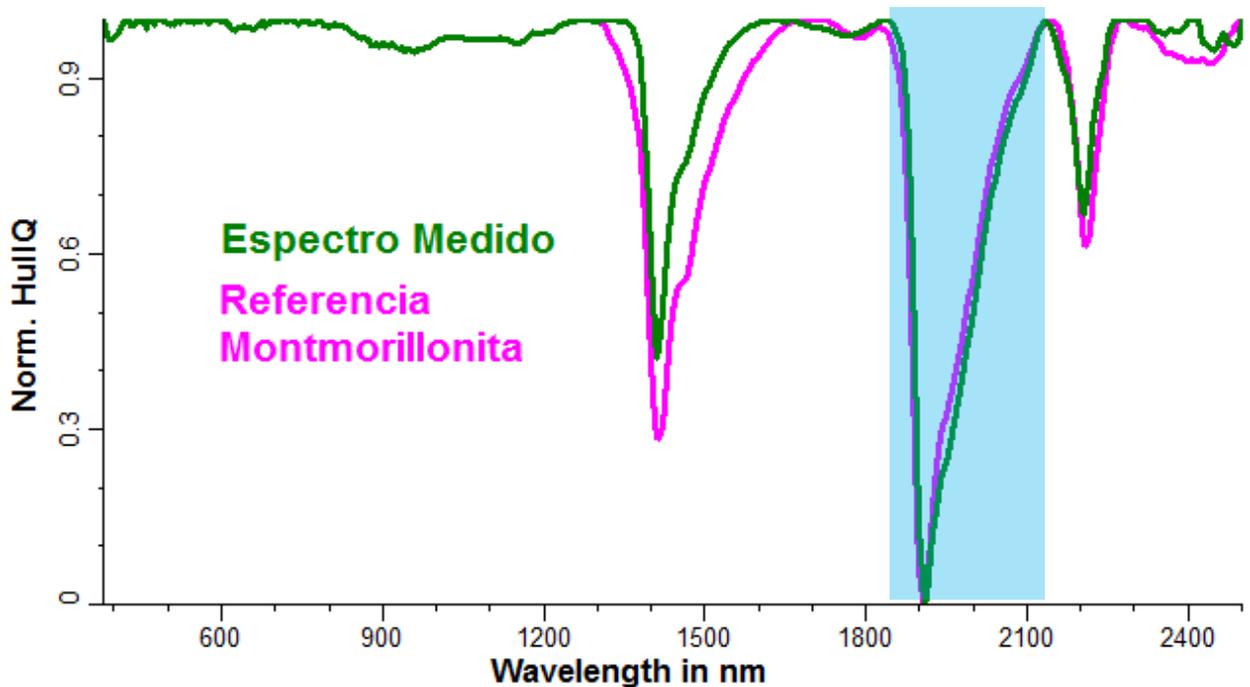


Figura 95: Rasgo espectral utilizado para medir abundancia de montmorillonita en las muestras. Espectros representados fueron ajustados por Hull Quotient y normalizados.

Wavelength units: Target:

Intervals, Fitting: to Focus: to

RMSE <= Depth >= Area >= |BkSlope| <=

Local continuum: Layer:

Polynomial order: Root: Result:

Mask output through:

Figura 96: Parámetros de creación de escalar para medir profundidad del rasgo en los 1900nm para la montmorillonita.

Una vez obtenida la profundidad del rasgo de los 1900 nm de cada muestra, ésta se divide por el máximo valor medido para dicho rasgo, que corresponde a una medición en la briqueta de montmorillonita, generando el escalar “Montmorillonite Index”. Este escalar fue luego calibrado con las briquetas fabricadas con 25% montmorillonita debido a que generaban el menor error de estimación para el resto de los contenidos de arcilla. Así se obtuvo el escalar “Montmorillonite Adjusted Index” cuya relación con el “Montmorillonite Index” se muestra en la Ecuación (21).

$$MAI = \frac{25\%}{MI \text{ promedio de briquetas con } 25\% \text{ de montmorillonita}} \cdot MI \quad (21)$$

6.6.1.3. Comparación de abundancias de arcillas con valores reales

La comparación entre el contenido real de arcillas y los índices de abundancia creados muestra que el ajuste realizado sobre los escalares permite eliminar gran parte del error que aparece al utilizar los escalares “Montmorillonite Index” y “Kaolinite Index”. Para el caso de la montmorillonita, el escalar “Montmorillonite Adjusted Index” aún sobreestima para el resto de los contenidos de arcilla en la fase sólida, aunque en menor medida. Por otro lado, el “Kaolinite Adjusted Index” no cambia sustancialmente los resultados pues de por sí el índice sin ajustar presenta un valor promedio muy cercano a 25% para las briquetas que efectivamente tenían esa abundancia de esta arcilla.

Al ajustar los índices de abundancia, se elimina la influencia de la humedad en la montmorillonita (en torno al 11% en base húmeda), pues las briquetas fueron fabricadas considerando esta humedad natural. Los valores ajustados se pueden apreciar en la Tabla 31.

Tabla 31: Comparación entre abundancia real, abundancia del índice sin ajustar y abundancia del índice ajustado.

| Arcilla | Contenido de arcillas en peso en fase sólida | Valor medio de Índice sin ajustar | Valor medio de Índice Ajustado |
|-----------------|--|-----------------------------------|--------------------------------|
| Montmorillonita | 25% | 30.11% | 25.00% |
| Montmorillonita | 15% | 20.48% | 17.00% |
| Montmorillonita | 10% | 15.90% | 13.20% |
| Montmorillonita | 5% | 11.06% | 9.18% |
| Caolinita | 25% | 24.37% | 25.00% |
| Caolinita | 15% | 13.25% | 13.59% |
| Caolinita | 10% | 7.83% | 8.03% |
| Caolinita | 5% | 3.06% | 3.14% |

La principal observación es que la montmorillonita está sobreestimada en las mediciones, mientras que la presencia de caolinita se encuentra subestimada. Esto aumentará el error del modelo de regresión al usar los datos hiperespectrales.

6.6.2. Aplicación de datos hiperespectrales a modelo de regresión lineal.

6.6.2.1. Información extraída de análisis hiperespectral

Debido a que el HyLogger3 no es apropiado para analizar pulpas minerales, debido a que el agua enmascara rasgos espectrales característicos -como el de los 1900nm en el caso de la montmorillonita-, el contenido de sólidos en volumen se fija en el modelo de regresión obtenido.

El tamaño de partículas (d_{80}) tampoco es posible de diferenciar entre las muestras, probablemente debido al estrecho rango de clasificaciones granulométricas utilizado. Se prueban escalares que miden la reflectancia promedio de las muestras, pues un menor tamaño de partícula tiende a presentar menores valores de reflectancia debido a la dispersión del haz incidente de un grano a otro (Berman *et al.* 2011). Otro enfoque para intentar determinar el tamaño de partícula es buscar rasgos espectrales característicos, sin embargo ninguno de estos intentos da resultados, por lo que el d_{80} también debe ser fijado de antemano en los modelos.

Debido a que los modelos son concebidos indicando el tipo de filossilicato presente en las muestras, se fija con variables binarias la presencia de caolinita y montmorillonita en las briquetas analizadas. Estas variables binarias fueron obtenidas de escalares generados independiente para cada arcilla.

En el caso de la montmorillonita, su presencia queda determinada por las siguientes reglas:

- El escalar 1900D (profundidad del rasgo de 1900nm) debe ser mayor a 0.035
- El escalar 2168D (profundidad del rasgo de 2168nm) debe ser menor a 0.1

Ambos escalares son los que se exponen en la sección 6.6.1, utilizados para crear los índices de abundancia. Al imponer que el escalar 2168D sea menor a 0.1 se elimina la posibilidad de que se asigne caolinita a minerales que no la tienen.

La presencia de caolinita queda definida como variable binaria mediante las siguientes reglas:

- El escalar 2168D (profundidad del rasgo de 1900nm) debe ser mayor a 0.002
- El escalar 2168D+2208D (suma de profundidades de rasgos ubicados en 2168nm y 2208nm) debe ser mayor a 0.5.

Con estas dos reglas, se puede asegurar la existencia del rasgo doble ubicado en torno a los 2200nm, eliminando la posibilidad de que las muestras con montmorillonita queden consideradas en este escalar.

Considerando lo anteriormente expuesto, la otra variable explicativa cuyo valor puede ser extraído del análisis hiperespectral es la abundancia en peso de las arcillas en las muestras (briquetas). Se debe considerar que el contenido de sólidos en volumen y la granulometría son variables operacionales que se controlan constantemente en los diferentes circuitos de la mina/planta, luego su determinación a través de análisis hiperespectral no resulta limitante para posteriores aplicaciones del modelo.

6.6.2.2. Generación de resultados a partir de información hiperespectral

Para cada combinación de d_{80} , wt%_{arcillas} y tipo de arcilla existen al menos cuatro mediciones hiperespectrales (debido al tamaño de las briquetas fabricadas), donde cada una de estas tiene su propio índice ajustado (KAI/MAI). Dichas mediciones hiperespectrales se deben repetir para cada valor de contenido de sólidos en volumen, debido a que esta variable no puede ser modificada en las briquetas.

De este modo, se obtienen al menos cuatro mediciones hiperespectrales para las diferentes combinaciones de ϕ , d_{80} , $\text{wt\%}_{\text{arcillas}}$ y tipo de arcilla que se utilizaron en los experimentos originales, con la salvedad de que el contenido de arcillas ahora viene dado por los índices ajustados expuestos en la sección 6.6.1. Todos los valores de viscosidad y límite de fluencia obtenidos a partir de la introducción de los datos hiperespectrales en el modelo de regresión se denominan η_{HL3} y τ_{HL3} respectivamente.

6.6.2.3. Evaluación de la aplicación del modelo de regresión con datos hiperespectrales

La Tabla 32 indica los coeficientes de determinación obtenidos al comparar los valores del modelo de regresión utilizando los índices de abundancia de las arcillas (KAI/MAI). Se puede notar que existe una alta correlación entre valores medidos y predichos de los logaritmos de la viscosidad y límite de fluencia, pero al transformarlos de vuelta a sus unidades originales se pierde precisión.

Tabla 32: Coeficientes de determinación para tau y eta utilizando el modelo de regresión con datos hiperespectrales. Datos calculados en comparación a valores medidos.

| | Log τ_{HL3} | Log η_{HL3} | τ_{HL3} | η_{HL3} |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| R² | 0.845 | 0.918 | 0.555 | 0.793 |

La Tabla 33 contiene los las medias, MAD y MAPE de viscosidad y límite de fluencia para cada valor de las variables explicativas considerando los datos hiperespectrales ingresados al modelo de regresión. En comparación a éste, los resultados parecen estar sobreestimados, lo que se debe a los valores de abundancia obtenidos para la montmorillonita (MAI), lo que se traduce en valores más grandes de MAPE, llegando incluso al 141% cuando el d_{80} es igual a 86.43.

Tabla 33: MAD y MAPE del modelo de regresión lineal con datos hiperespectrales para distintos valores de variables explicativas.

| Variables explicativas | η_{HL3} | | | τ_{HL3} | | |
|--|---------------------|-------------------|-------------|-------------------|-----------------|-------------|
| | Media [Pa·s] | MAD [Pa·s] | MAPE | Media [Pa] | MAD [Pa] | MAPE |
| ϕ | | | | | | |
| 25% | 0.0115 | 0.0010 | 11.66% | 4.70 | 1.06 | 57.95% |
| 30% | 0.0285 | 0.0021 | 10.94% | 15.87 | 3.14 | 46.80% |
| 40% | 0.1547 | 0.0113 | 8.67% | 144.75 | 28.08 | 37.44% |
| wt% arcillas | Media [Pa·s] | MAD [Pa·s] | MAPE | Media [Pa] | MAD [Pa] | MAPE |
| 0% | 0.0287 | 0.0015 | 5.24% | 7.93 | 0.46 | 6.12% |
| 5% | 0.0480 | 0.0068 | 18.92% | 24.52 | 6.58 | 47.95% |
| 10% | 0.0594 | 0.0067 | 14.31% | 38.72 | 8.97 | 37.28% |
| 15% | 0.0660 | 0.0060 | 10.88% | 49.80 | 14.17 | 54.34% |
| 25% | 0.1005 | 0.0127 | 15.39% | 128.21 | 37.84 | 67.66% |
| d_{80}, μm | Media [Pa·s] | MAD [Pa·s] | MAPE | Media [Pa] | MAD [Pa] | MAPE |
| 86.43 | 0.0588 | 0.0093 | 26.25% | 52.42 | 21.63 | 141.36% |
| 73.99 | 0.0644 | 0.0056 | 11.21% | 58.09 | 20.56 | 85.34% |
| 63.94 | 0.0693 | 0.0053 | 8.95% | 62.73 | 18.02 | 56.43% |
| 43.79 | 0.0829 | 0.0093 | 14.34% | 80.21 | 8.33 | 21.49% |
| Tipo de arcilla | Media [Pa·s] | MAD [Pa·s] | MAPE | Media [Pa] | MAD [Pa] | MAPE |
| Caolinita | 0.0478 | 0.0041 | 7.73% | 23.96 | 3.11 | 10.11% |
| Montmorillonita | 0.0900 | 0.0076 | 13.36% | 98.04 | 21.12 | 73.73% |
| Línea Base | 0.0287 | 0.0015 | 5.24% | 7.93 | 0.46 | 6.12% |

Al comparar los resultados del modelo con datos hiperespectrales versus las mediciones, se puede notar la sobreestimación de valores de viscosidad y límite de fluencia, cuyo origen está en los índices ajustados de montmorillonita, que para todas las categorías, salvo 25wt% de arcillas en fase sólida, entrega valores superiores a las dosificaciones reales, tal como muestra la

Tabla 31: Comparación entre abundancia real, abundancia del índice sin ajustar y abundancia del índice ajustado.

. Incluso, aunque la caolinita se encuentra subestimada por los índices ajustados, las diferencias en esta arcilla son mucho menores.

La Figura 97 muestra que no solo ocurre sobreestimación, si no que los valores difieren en todos los rangos en más del MAD. Se debe recordar que cuando se agrupan los datos por contenido de sólidos en volumen, el ajuste de la regresión original es muy bueno, sin embargo, al incorporar los datos hiperespectrales se pierde calidad en el ajuste.

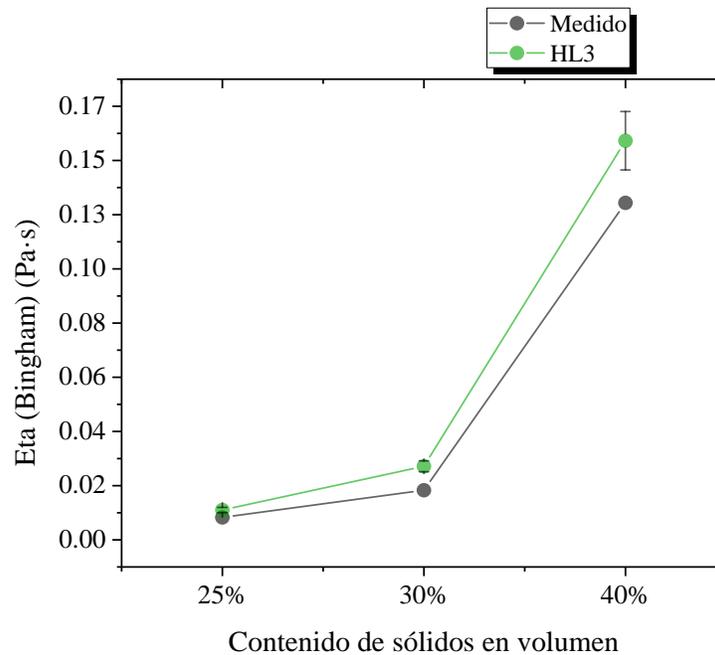


Figura 97: Viscosidad como función de contenido de sólidos en volumen, para valores medidos y del modelo con datos hiperespectrales. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, contenidos de arcilla en fase sólida y tipo de arcilla (incluyendo línea base).

La Figura 98 y la Figura 99 indican que el ajuste es de mejor calidad para la viscosidad en comparación al límite de fluencia, sin embargo en ambos casos se aprecia la sobreestimación causada por los índices ajustados de montmorillonita, donde la diferencia excede el valor del MAD.

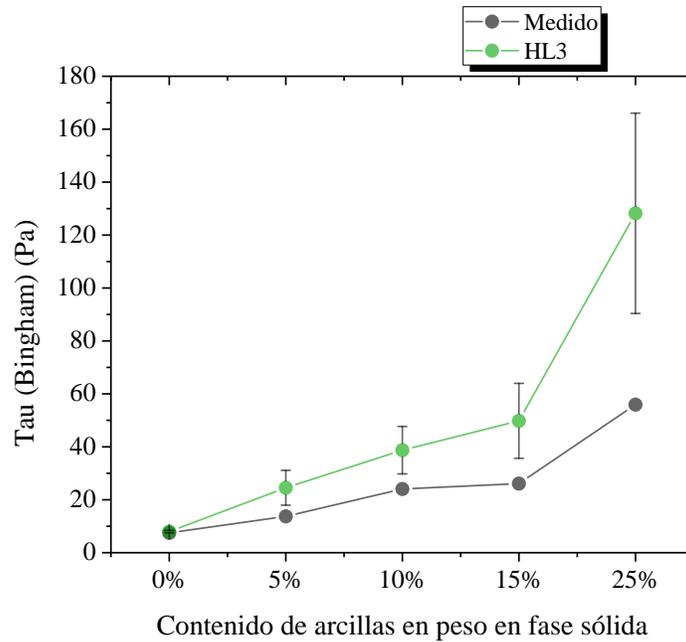


Figura 98: Límite de fluencia como función de contenido de arcillas en fase sólida, para valores medidos y del modelo con datos hiperespectrales. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, tipo de arcilla (incluyendo línea base) y contenido de sólidos en volumen.

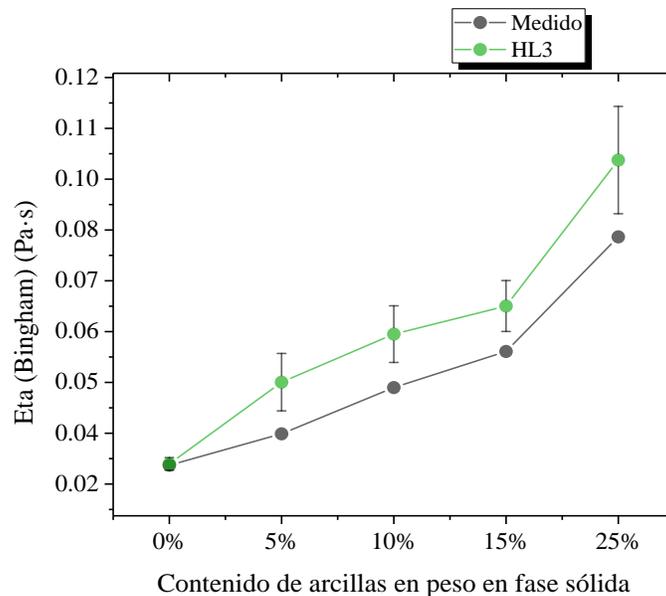


Figura 99: Viscosidad como función de contenido de arcillas en fase sólida, para valores medidos y del modelo con datos hiperespectrales. Datos agrupados por categoría considerando todas las clasificaciones granulométricas, tipo de arcilla (incluyendo línea base) y contenido de sólidos en volumen.

El análisis de diagramas de dispersión también permite observar la sobreestimación de valores de límite de fluencia y viscosidad, tal como se aprecia en la Figura 100 y la Figura 101. Ésta se explica por los índices ajustados de montmorillonita.

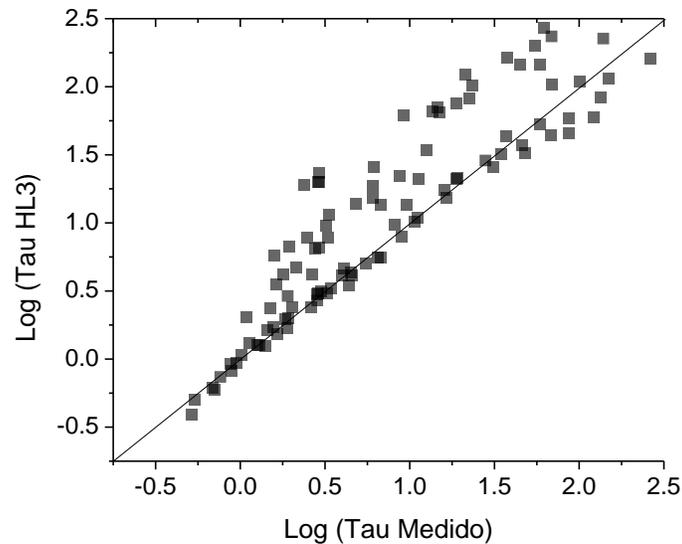


Figura 100: Diagrama de dispersión del logaritmo del límite de fluencia medido y del modelo con datos hiperespectrales. Contiene todas las mediciones y valores modelados.

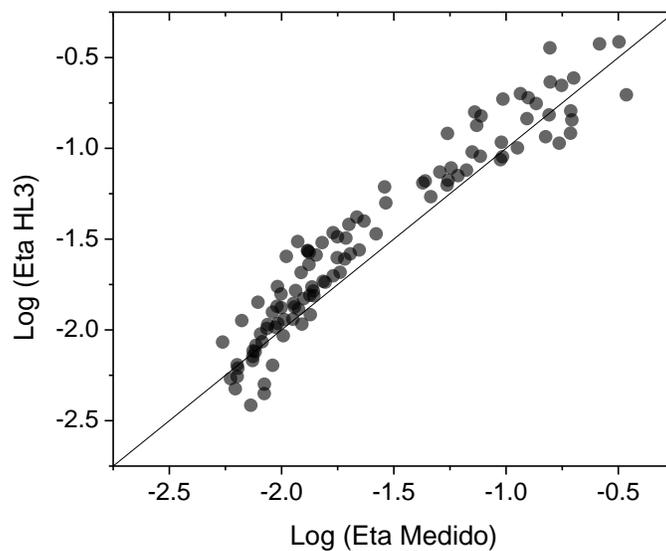


Figura 101: Diagrama de dispersión del logaritmo de la viscosidad medida y del modelo con datos hiperespectrales. Contiene todas las mediciones y valores modelados.

7. DISCUSIÓN

7.1. Consideraciones sobre resultados obtenidos

Los resultados experimentales de este trabajo demostraron que el contenido de sólidos en volumen es la variable más influyente en el modelo de regresión obtenido, sin embargo en el intervalo $\phi=25\%-30\%$, la viscosidad y el límite de fluencia no presentan un gran crecimiento. Como se observa en la Figura 102, en dicho rango de contenido de sólidos, la presencia de arcillas parece dominar el crecimiento de la viscosidad, más que el contenido de sólidos en volumen.

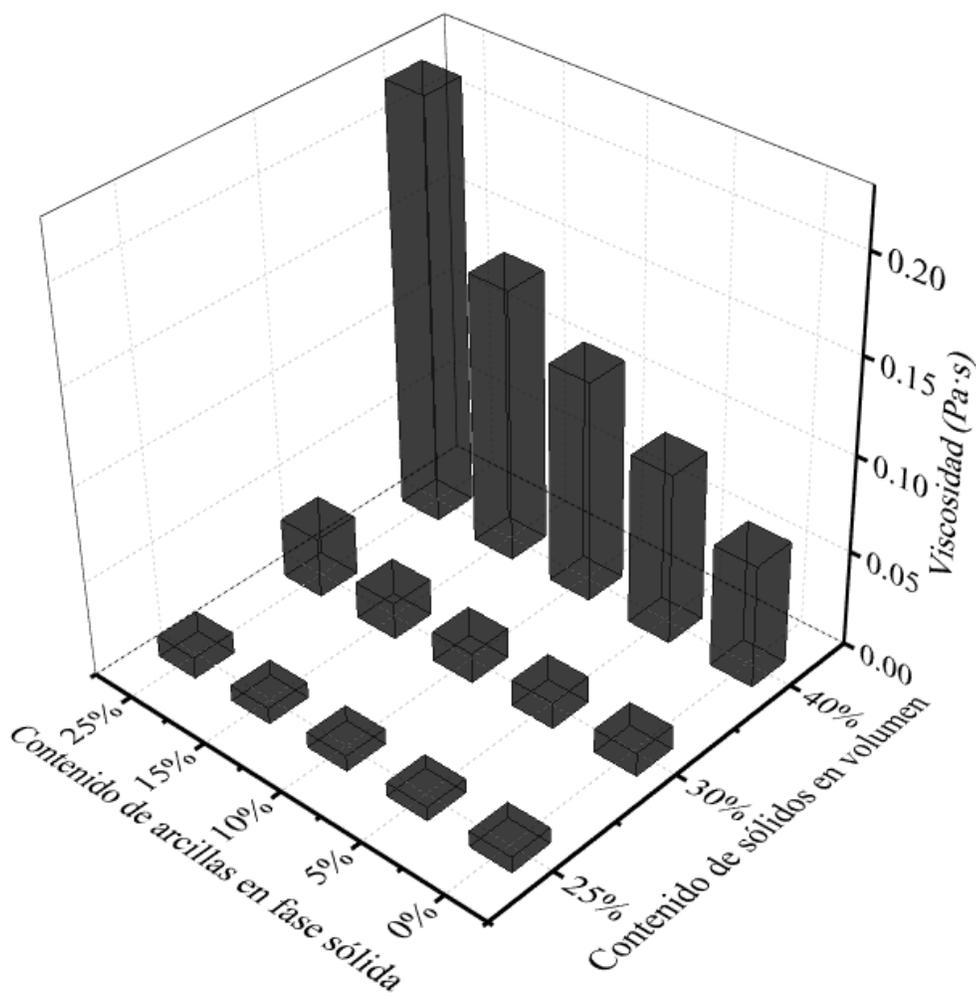


Figura 102: Viscosidad como función del contenido de sólidos en volumen y del contenido de arcillas en peso en la fase sólida. Datos agrupados por categorías para todos los tipos de arcillas y clasificaciones granulométricas.

Aunque se desprende que el contenido de arcillas si influye en la reología, los resultados indican ésta no depende mayormente del tipo de arcilla (caolinita v/s montmorillonita), tal como muestran los coeficientes tipificados de la Tabla 28. Estos resultados van en contra de la teoría, que indica que la montmorillonita debiese influir más en la reología de relaves.

Este fenómeno se puede atribuir a la distribución granulométrica de ambos filosilicatos. La caolinita utilizada es mucho más fina que la montmorillonita, las que poseen un d_{80} equivalente a 13 y 56 micrones respectivamente, por lo que el tamaño de partículas de la caolinita parece equiparar el efecto expansivo de la montmorillonita. Es por esto que no se puede descartar que el tipo de filosilicatos (arcillas) presente mayor influencia en la reología de experimentos futuros.

El análisis del efecto del pH sobre suspensiones de caolinita y montmorillonita pura, indica que la reología de suspensiones es fuertemente dependiente de la concentración de iones del medio, en particular de la fuerza iónica, pues esto afecta directamente la doble capa electrónica, y en consecuencia, los fenómenos de coagulación.

Algunos autores mencionan la formación de estructuras como un factor clave en la reología de suspensiones con filosilicatos (Rand & Melton 1977; Ndlovu et al. 2011) y este proceso está controlado por el pH del medio dispersante. Así, considerando que es posible el control reológico de suspensiones a partir de la modificación del pH, se puede concluir que las mezclas de relave con montmorillonita pueden presentar un comportamiento diferente si no se ajusta el pH como se hace en este trabajo.

7.2. Generación de modelos empíricos

Como se expone en la sección 6.6.2, la implementación del modelo con datos hiperespectrales exhibe una clara sobreestimación de la viscosidad y límite de fluencia en comparación a las muestras analizadas. Debido a que los tipos de arcilla presente en las muestras se pueden diferenciar sin problemas, la única fuente de error es la estimación de la cantidad de caolinita/montmorillonita en éstas. En particular, el caso de la montmorillonita es crítico pues aunque sobreestima en torno a un 3 wt% el contenido de la arcilla, esta es la segunda variable de mayor preponderancia en el modelo de regresión, por lo que afecta notablemente los resultados.

Para solucionar esto se puede analizar parte de las briquetas con QXRD para luego ajustar las cantidades en el módulo PLS del software TSG. Este procedimiento parece ser un requerimiento esencial para la futura implementación del modelo.

Cuando los valores de los parámetros sobre los cuales se aplica regresión lineal tienen órdenes de magnitud de diferencia, aquellos más altos ponderan más en el método de mínimos cuadrados ordinarios, debido a que éste minimiza derivando con respecto a los coeficientes la diferencia entre los valores medidos y estimados. Al realizar regresión lineal sobre el logaritmo de la viscosidad y límite de fluencia, los valores altos no tienen la misma influencia en la estimación en comparación al caso recién mencionado. Esta consideración parece ser fundamental para la elaboración de modelos donde se evidencia crecimiento exponencial, como el caso de la viscosidad y límite de fluencia en función del contenido de sólidos en volumen.

Otra forma de enfrentar el problema recién mencionado es usar modelos no lineales para la regresión, sin embargo la validación estadística de estos es más complicada, no basándose sólo en pruebas comunes como ANOVA y el Test T de Student para el análisis de los coeficientes.

Un mejor ajuste para η_{HL3} and τ_{HL3} se puede obtener si se aplica un tratamiento más complejo de los rasgos espectrales de la caolinita y la montmorillonita. En el trabajo se evalúa el uso de combinaciones lineales de las profundidades de los distintos rasgos para incrementar la precisión, sin embargo no se tuvo éxito en mejorar más la cuantificación de la presencia de arcillas en las muestras.

El uso de un conjunto de técnicas avanzadas de caracterización permite que se complemente la información que no puede ser obtenida por cada una de ellas por separado. Un ejemplo de ello es la composición de la montmorillonita, que según el análisis QXRD se evidenciaba una gran proporción de fase amorfa, sin embargo el análisis hiperespectral indica que se trata de montmorillonita casi pura. Lo mismo sucede con la información que entrega el análisis granulométrico infrarrojo, imposible de extraer desde el HyLogger3.

La propuesta experimental se puede mejorar, sobre todo en la consideración de comportamientos reológicos dependientes del tiempo, que en este trabajo fueron obviados, asumiendo que el efecto de la transición sol-gel (ver sección 3.3.5) es menor en los rangos de contenidos de sólidos en volumen en que se realizaron los experimentos. Se pueden conseguir modelos más precisos si se enfocan los experimentos en condiciones más particulares de contenidos de sólidos en volumen y granulometría.

Resulta crucial realizar validación estadística y experimental sobre los modelos obtenidos, para descartar que un buen ajuste sea producto de una elección conveniente de datos. En este caso la validación experimental se realiza mediante validación cruzada, donde el error de validación se calcula con mediciones no utilizadas en cada una de las cinco iteraciones (ver sección 6.5). La validación estadística se lleva a cabo comparando los estadísticos, coeficientes y errores obtenidos en cada iteración.

7.3. Fuentes de error

Además de lo anteriormente expuesto, la metodología utilizada puede dar cabida a diversos errores experimentales. Uno de ellos importantes es el ajuste de pH, debido a la adición de cationes y aniones al medio dispersante, por lo que puede modificar la fisicoquímica de superficies de la suspensión en cuestión. En este caso el ajuste de pH se realiza con el objetivo de hacer comparables los resultados, obviando el efecto de esta variable en los resultados.

Dentro de la caracterización de los materiales, el mayor error viene de la cuantificación de especies en los minerales usados (relaves y filosilicatos), debido a que los resultados de QXRD no parecen ser fiables y deben ser corroborados con análisis hiperespectral.

Entre otros procedimientos realizados durante los experimentos, se asume que la preparación de la fase sólida y la adición de agua no afectan los resultados de forma perceptible, debido a que las

masas de sólidos y agua retenidos tienen valor muy pequeño para incidir en la reología de los relaves medidos, con variaciones menores a 0.01g y 1 ml respectivamente. El control de temperatura tampoco parece ser crucial en los experimentos, debido a que los experimentos fueron realizados en días consecutivos con condiciones de temperatura similar (19-22°C) por lo que tanto la viscosidad como la densidad del agua no cambian lo suficiente para afectar los resultados.

Cuando se traspasan las mezclas más viscosas desde sus matraces a la copa de medición, puede ocurrir decantación por ausencia de agitación, sin embargo se asume que la alta viscosidad evita que este fenómeno ocurra a una tasa que pueda afectar las mediciones.

7.3.1. Error de ajustes en Rheoplus.

Al ajustar el modelo de Bingham a las diferentes reometrías realizadas mediante las herramientas de Rheoplus, se incorpora un error a la viscosidad y límite de fluencia medidos. La regresión lineal sobre un rango específico de tasas de corte en cada reometría contiene un error que puede ser cuantificado, comparando en este caso el esfuerzo de corte medido a una tasa de corte dada con el que resulta del modelo de Bingham a dicha tasa.

Debido a la gran cantidad de experimentos, se utilizan tres reometrías para cuantificar el error y tener una idea de su comportamiento dependiendo de cuán viscoso es el relave medido. En este caso se utilizan las mismas mediciones expuestas en la sección 6.2, Figura 73 y sus respectivos ajustes de Bingham. El error se cuantifica sólo sobre el rango de tasas de corte en que se realiza el ajuste, dado que este modelo pierde aplicabilidad a bajos valores de esta variable, tal como se expone en la sección 7.4.

La Tabla 34 muestra la desviación media absoluta (MAD) y el error porcentual medio absoluto (MAPE) para cada una de los tres ajustes de Bingham sobre la reometría en el rango de tasas de corte especificado.

Tabla 34: MAD y MAPE del esfuerzo de corte para tres ajustes de Bingham con respecto a mediciones reales.

| Ajuste | Rango de tasas de corte | MAD Esfuerzo de corte | MAPE Esfuerzo de corte |
|---------------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| Cv25 a 15% m pH 6.8 (Bingham) | [1/s] 120 - 240 | [Pa] 0.0029 | 0.10% |
| Cv30 c 25% m pH 7.06 (Bingham) | 100 - 270 | 0.0255 | 0.11% |
| Cv40 d 5% m pH 7.10 (Bingham) | 100 - 280 | 0.0274 | 0.07% |

La denominación de los ajustes se explica a continuación:

- **Cv25 a 15% m pH 6.8 (Bingham):** Ajuste de Bingham sobre pulpa con 25% de sólidos en volumen, de clasificación granulométrica a, con 15% en peso de montmorillonita en la fase sólida, pH 6.8;
- **Cv30 c 25% m pH 7.06 (Bingham):** Ajuste de Bingham sobre pulpa con 30% de sólidos en volumen, de clasificación granulométrica c, con 25% en peso de montmorillonita en la fase sólida, pH 7.06;
- **Cv40 d 5% m pH 7.10 (Bingham):** Ajuste de Bingham sobre pulpa con 40% de sólidos en volumen, de clasificación granulométrica d, con 5% en peso de montmorillonita en la fase sólida, pH 7.10.

Los resultados indican que, dentro del rango de tasas de corte indicado, cada punto del modelo de Bingham es estimado con un error aproximado de 0.1% con respecto al valor real de la medición y que los relaves con mayor viscosidad y límite de fluencia tienden a mostrar menor error porcentual. Sin embargo, los valores son muy pequeños como para asegurar que esto siempre ocurre.

Por lo anteriormente expuesto, se puede aseverar que el error introducido al ajustar un modelo de Bingham a la reometría es despreciable dentro del rango de tasas de corte donde se realiza dicho ajuste.

7.4. Aplicabilidad de resultados

La utilización de relaves en los experimentos permite realizar una buena aproximación al comportamiento de pulpas que ingresan a la planta concentradora, debido a que los minerales que tienen mayor influencia en la reología no son valiosos en la industria cuprífera.

Debido a que los modelos de regresión se basan en los ajustes de Bingham realizados sobre las reometrías, éstos son útiles en condiciones de altas tasas de corte, por ejemplo, en el transporte de relaves dentro de tuberías. Sin embargo, no son fiables a bajas tasas de corte porque tienden a subestimar la viscosidad y sobreestimar el límite de fluencia. La Figura 103 indica cómo un ajuste de Bingham (en color rojo) difiere del comportamiento real de un relave típico (en color azul).

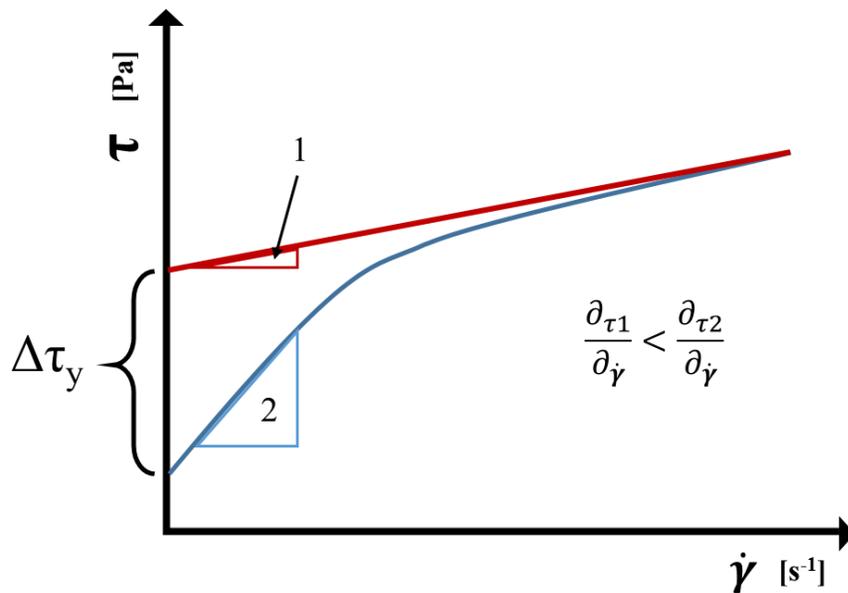


Figura 103: Diferencias de viscosidad y límite de fluencia a bajas tasas de corte entre modelo de Bingham (rojo) y reograma típico de relaves (azul).

Es importante mencionar que también puede existir una desviación del comportamiento del modelo de Bingham con respecto al de un relave convencional a tasas de corte mayores, donde la viscosidad del relave puede disminuir aún más, siendo sobreestimado por este modelo.

Para obtener modelos de predicción reológica que sean aplicables a bajas tasas de corte, por ejemplo en una descarga gravitacional de relave, se debe utilizar un reómetro capaz de medir bajos esfuerzos con menor ruido, con el objetivo de poder ajustar modelos de Herschel-Bulkley a las reometrías correspondientes sin tener que hacer un tratamiento exhaustivo de las mediciones del equipo. Este modelo reológico es apropiado para representar el comportamiento de relaves a bajas tasas de corte.

Ante escenarios de incremento drástico en la viscosidad se pueden tomar diversas medidas. La que más efecto puede tener es diluir la pulpa/relave, con el objetivo de disminuir el contenido de sólidos en volumen, y por consiguiente la viscosidad.

Como se menciona anteriormente, en el rango de 25%-30% de sólidos en volumen, esta variable no presenta una influencia tan marcada en la reología de suspensiones, pudiendo por ejemplo, realizar mezclas con mineral proveniente de sectores de explotación de la mina con menor contenido de filosilicatos, con el objetivo de prevenir un aumento drástico en la viscosidad y límite de fluencia de las pulpas o relaves.

Otra forma de prevenir o controlar aumentos considerables en la viscosidad de las pulpas es el control granulométrico. Se puede disminuir el tiempo de residencia de las pulpas en los molinos con el objetivo de generar una fase sólida más gruesa, disminuyendo la viscosidad y límite de

fluencia. Esto tiene repercusiones en procesos posteriores, pues un mayor tamaño de puede conducir a la disminución de la recuperación de valioso en procesos de concentración.

Modificar el pH también puede ser una solución para el transporte de pulpas ricas en filosilicatos. En la sección 6.3.5 se muestra cómo el límite de fluencia y la viscosidad de suspensiones de caolinita y montmorillonita pura pueden variar con el pH. Por lo mismo, se puede ajustar esta propiedad del medio dispersante para disminuir la viscosidad en caso de ser posible. Nuevamente esta medida requiere realizar pruebas previas sobre los filosilicatos más abundantes, para determinar el pH óptimo al cual minimiza la viscosidad y el límite de fluencia. En este caso, las limitaciones están en el efecto que puede tener esto sobre el revestimiento de tuberías y equipos, además del efecto que el cambio acidez o alcalinidad del medio puede tener en etapas de concentración.

7.4.1. Propuesta de aplicación de modelos

Los modelos obtenidos pueden aplicarse para el control de procesos de dos formas: predictiva y correctiva. La primera apunta a evitar crecimientos bruscos en la viscosidad y límite de fluencia de las pulpas mediante el control de la mineralogía que se envía a planta, para luego determinar de forma cuantitativa estas propiedades reológicas. Para esto se debe extraer información mineralógica de los sondajes y pozos de tronadura de los diferentes sectores de la mina (QXRD, HyLogger3) y así identificar aquellos potencialmente perjudiciales para el transporte y los procesos posteriores. En este punto, se pueden realizar correcciones a la mineralogía, mezclando sectores de alto contenido de filosilicatos con otros que tengan menor abundancia de estos.

La información anterior se complementa con parámetros operacionales normalmente controlados (contenido de sólidos en volumen y d_{80}) para luego ingresarla al modelo y obtener como output la viscosidad y límite de fluencia de la mezcla. La Figura 104 resume cómo funciona este tipo de control.

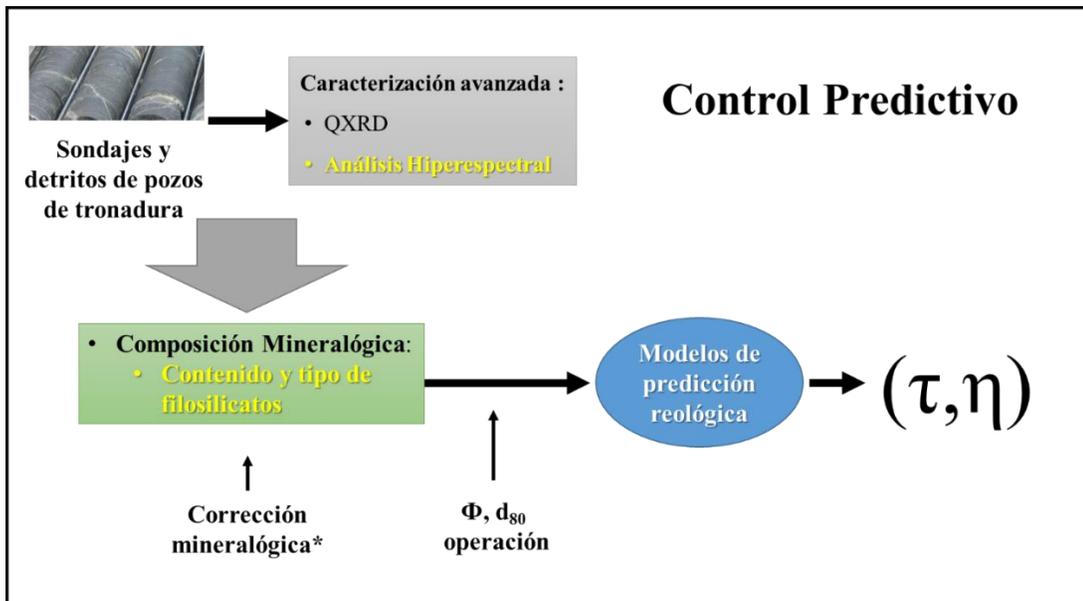


Figura 104: Diagrama de propuesta de control predictivo

Si se desea establecer un control de tipo correctivo, se puede utilizar la información de caracterización (QXRD y d_{80}) de la salida del molino, o bien de la alimentación a la planta concentradora, y complementarla con el análisis hiperespectral (HyLogger3) para obtener una cuantificación precisa de las especies minerales presentes. Luego, se ingresan los datos al modelo, junto con el contenido de sólidos en volumen, obteniéndose una estimación de la viscosidad y límite de fluencia del mineral que entra a la concentradora. El diagrama de la Figura 105 indica cómo funciona este tipo de control.

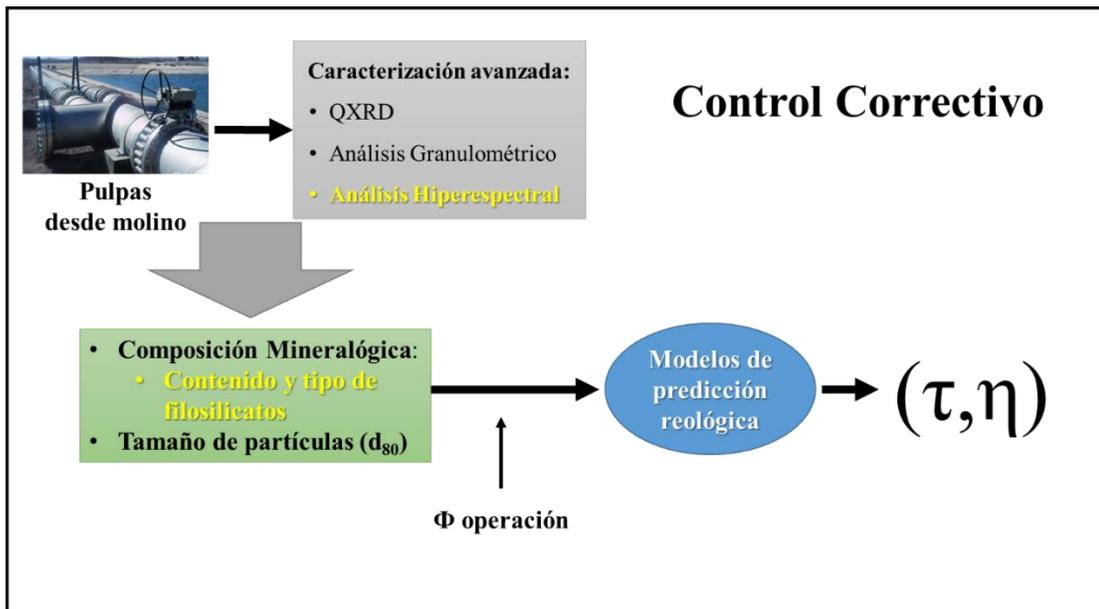


Figura 105: Diagrama de propuesta de control correctivo.

Finalmente, la comparación expuesta en la Tabla 35 resume las ventajas y desventajas de cada tipo de control.

Tabla 35: Comparación entre métodos de control propuestos.

| Ventajas | Desventajas |
|--|--|
| <p>Control Predictivo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Permite evitar escenarios de alta viscosidad y límite de fluencia mezclando mineral de diferentes sectores de la mina • Utilidad a mediano y largo plazo • El muestreo no es constante, solo se basa en información de sondajes y pozos, además de los parámetros operacionales de planta • No requiere equipo en faena | <ul style="list-style-type: none"> • La información mineralógica puede tener un error mayor debido a la fuente de la información (sondajes y pozos de tronadura): menor confiabilidad de resultados |
| <p>Control Correctivo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mineralogía y tamaño de partículas es medida directamente antes de la entrada a la concentradora: menor error asociado. • Útil en corto plazo | <ul style="list-style-type: none"> • No permite evitar escenarios de cambios bruscos en reología, sólo mitigar su efecto. • Requiere muestreo constante para caracterizar alimentación. • Equipo de caracterización hiperspectral debe estar en terreno |

8. CONCLUSIONES

A partir de los experimentos realizados se pudo cuantificar influencia del contenido de sólidos en volumen (25%-40%), contenido de arcillas en peso en la fase sólida (0%-25%), tamaño de partículas (d_{80} entre 43.79 y 86.43 μm) y tipo de arcilla (caolinita y montmorillonita) en la viscosidad y límite de fluencia de relaves ricos en filosilicatos a pH 7, dentro de los rangos indicados para cada una de las variables.

Las técnicas de caracterización avanzada utilizadas en el trabajo (QXRD, análisis hiperespectral en HyLogger3 y análisis granulométrico infrarrojo) permitieron una caracterización adecuada de los minerales utilizados, debido a que se complementan bien entre sí, como por ejemplo al corroborar la composición de la montmorillonita utilizada.

Se generó un modelo de regresión lineal con una buena calidad de ajuste ($R^2 > 0.9$) sobre el logaritmo de la viscosidad y límite de fluencia, que considera las variables explicativas planteadas en el trabajo (ϕ , d_{80} , contenido en peso de arcillas en la fase sólida y tipo de arcilla) dentro de los rangos especificados con anterioridad. Estos modelos se exponen en las ecuaciones (22) (23).

$$\begin{aligned} \text{Log } \tau_{\text{modelo}} = & -2.219 + 10.282\phi - 0.009 d_{80} + 2.770\text{wt}\%_{\text{arcillas}} \\ & + 0.085\text{tipo de arcilla} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \text{Log } \eta_{\text{modelo}} = & -3.884 + 7.658\phi - 0.005 d_{80} + 1.348\text{wt}\%_{\text{arcillas}} \\ & + 0.042\text{tipo de arcilla} \end{aligned} \quad (23)$$

Los coeficientes tipificados obtenidos de los modelos de regresión lineal indican que el contenido de sólidos en volumen es la variable más importante para explicar el comportamiento reológico de las suspensiones (0.946 para viscosidad y 0.913 para límite de fluencia), apareciendo en segundo orden el contenido de filosilicatos (arcillas) (0.221 y 0.327 para viscosidad y límite de fluencia respectivamente).

Los resultados indican que no parece haber diferenciación entre el tipo de filosilicato utilizado (caolinita o montmorillonita), pero esto obedece a la diferencia de granulometría entre ambos, por lo que se concluye que el tipo de arcilla utilizada sí incide en el comportamiento reológico de relaves y pulpas en general, siendo este comportamiento fuertemente dependiente del pH de la suspensión.

En este trabajo la validación experimental y estadística permite confirmar que el modelo obtenido es robusto y que la cantidad de experimentos es suficiente en relación al número de variables explicativas de éste.

Los resultados de la aplicación de datos hiperespectrales al modelo de regresión lineal confirman que el HyLogger3 es una herramienta útil para obtener una buena aproximación a la viscosidad y límite de fluencia de relaves ricos en arcillas, pudiendo diferenciar bien el tipo de filosilicato utilizado y estimado la presencia de éstos con diferencias menores a 5% en peso para caolinita y montmorillonita.

De acuerdo a los resultados obtenidos sobre las mediciones de arcillas puras a pH ácido (2), neutro (7), y básico (11), la influencia de esta variable es fundamental en el comportamiento de relaves con filosilicatos, pues regula la formación de estructuras en estos minerales, afectando de gran manera la viscosidad y límite de fluencia de las suspensiones medidas. Esta variable tiene una incidencia comparable al contenido de filosilicatos, e incluso al contenido de sólidos en volumen.

Se puede concluir que las variables propuestas como determinantes del comportamiento reológico de relaves ricos en filosilicatos estiman con buena precisión la viscosidad y límite de fluencia de éstos, posibilitando la implementación de sistemas de control predictivo y/o correctivo basados en técnicas de caracterización avanzada de minerales.

9. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Como ya se mencionó, resulta importante saber cuándo transformar los datos sobre los que se realiza regresión para incrementar la precisión de los modelos obtenidos. Dependiendo de los datos sobre los que se quiera tener más precisión, se debe aplicar la transformación matemática adecuada.

Se sugiere la elaboración de modelos reológicos que consideren la presencia de múltiples arcillas, además de las variables explicativas expuestas en este trabajo (contenido de sólidos en volumen, tamaño de partículas). Se pueden crear variables explicativas adicionales por cada tipo de arcilla o bien agrupar por comportamiento (*e.g.* variables que indiquen abundancia de arcillas expansivas y no expansivas).

Lo anterior obedece a la necesidad de estudiar el comportamiento de mezclas de arcillas, pues no existe evidencia que asegure que el comportamiento reológico de una mezcla de dos arcillas sea una ponderación de la viscosidad y/o límite de fluencia de cada arcilla por separado. Para de evitar tener que realizar cantidades excesivas de experimentos se puede enfocar el trabajo en condiciones de operación específicas (tamaño de partículas y contenido de sólidos en volumen).

Otra recomendación es el uso de spindle de paletas para realizar las mediciones de límite de fluencia, pues diversos autores (Fisher *et al.* 2007; Kwak *et al.* 2005; Jeldres *et al.* 2014; Stickland *et al.* 2015) indican que existen discrepancias entre el uso de este tipo de reómetros y los de cilindros concéntricos.

Mediciones de potencial zeta también deben ser realizadas en futuros experimentos, pues algunos autores (Farrokhpay & Bradshaw 2012) indican que la carga de los bordes de los filosilicatos depende fuertemente del pH del medio acuoso, mientras que la carga de las caras no dependen de esta propiedad. El control sobre esta variable permite establecer si incrementos en la viscosidad y límite de fluencia pueden ser explicados por cambios en el pH. Por esto, se sugiere incluir el pH como variable explicativa de la reología en futuros trabajos.

Por último, se recomienda la realización de agitación previa por 24 horas para todos los experimentos, con el objetivo de eliminar el efecto de cualquier comportamiento reológico dependiente del tiempo de agitación. En el presente trabajo no se pudo realizar debido a la gran cantidad de experimentos realizados con diferentes composiciones, tamaños de partícula y contenido de sólidos en volumen.

REFERENCIAS

- Alejo, B. & Barrientos, A., 2009. Model for yield stress of quartz pulps and copper tailings. *International Journal of Mineral Processing*, 93(3-4), pp.213–219. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751609001793> [Accessed April 28, 2014].
- Anton Paar, RheolabQC Reómetro rotacional de Control de Calidad. Available at: <http://www.anton-paar.com/?eID=documentsDownload&document=53547&L=15> [Accessed October 10, 2015].
- ASD Inc., 2013. TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Spectrometer. Available at: <http://www.asdi.com/products/terraspec/terraspec-hi-res-mineral-spectrometer> [Accessed April 22, 2014].
- Ayadi, A. & Soro, J., 2013. STUDY OF CLAY'S MINERALOGY EFFECT ON RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF CERAMIC SUSPENSIONS USING AN EXPERIMENTAL DESIGN. *International Journal of ...*, 14(February), pp.374–384. Available at: http://arpapress.com/Volumes/Vol14Issue2/IJRRAS_14_2_17.pdf [Accessed July 27, 2014].
- Barnes, H., Hutton, J. & Walters, K., 1989. *An introduction to rheology*, Available at: <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=B1e0uxFg4oYC&oi=fnd&pg=PR5&dq=Introduction+to+Rheology&ots=YUUV-sBwrt&sig=4fnR9Qcyid0qMEjiVJzRYawrO9U> [Accessed June 10, 2014].
- Becker, M. et al., 2013. A rheological investigation of the behaviour of two Southern African platinum ores. *Minerals Engineering*, 49, pp.92–97. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687513001489> [Accessed April 28, 2014].
- Berman, M., Bischof, L. & Lagerstrom, R., 2011. An Unmixing Algorithm Based on a Large Library of Shortwave Infrared Spectra.
- Bishop, J.L. et al., 2008. Reflectance and emission spectroscopy study of four groups of phyllosilicates: smectites, kaolinite-serpentines, chlorites and micas. *Clay Minerals*, 43(1), pp.35–54. Available at: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=0009-8558&volume=43&issue=1&spage=35>.
- Blakey, B.C. & James, D.F., 2003. Characterizing the rheology of laterite slurries. *International Journal of Mineral Processing*, 70(1-4), pp.23–39. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751602001473> [Accessed May 30, 2014].
- Boger, D.V., 2000. Rheology and the Minerals Industry. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 20(1), pp.1–25. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/08827509908962460> [Accessed May 28, 2014].

- Bulatovic, S., Wyslouzil, D. & Kant, C., 1999. Effect of clay slimes on copper, molybdenum flotation from porphyry ores. *Proceedings of Copper*. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Effect+of+clay+slimes+on+copper,+molybdenum+flotation+from+porphyry+ores#0>.
- CEPIS., Valencia, J.A. & OPS., 1981. *Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua*, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Available at: <https://books.google.cl/books?id=C1LUMgEACAAJ>.
- CoreScan Pty, 2014. The CoreScan System. Available at: <http://www.corescan.com.au/assets/Corescan HCI-III v1.pdf> [Accessed April 22, 2014].
- Dumas, J.E. et al., 2012. Injectable reactive biocomposites for bone healing in critical-size rabbit calvarial defects. *Biomedical materials (Bristol, England)*, 7(2), p.024112. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22456057>.
- Elachi, C. & van Zyl, J., 2006. *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing: Second Edition*,
- Faber, M., 2007. Statistics and Probability Theory A. Gheorghe, ed. *ETH Lecture Notes*, 53, p.160.
- Farrokhpay, S., 2012. The importance of rheology in mineral flotation: A review. *Minerals Engineering*, 36-38, pp.272–278. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687512002002> [Accessed May 26, 2014].
- Farrokhpay, S. & Bradshaw, D., 2012. Effect of clay minerals on froth stability in mineral flotation: a review. *26th International Mineral ...*, 2(313), pp.4601–4611. Available at: <http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:282993> [Accessed January 7, 2016].
- Fisher, D.T. et al., 2007. The bucket rheometer for shear stress-shear rate measurement of industrial suspensions. *Journal of Rheology*, 51(5), p.821. Available at: <http://scitation.aip.org/content/sor/journal/jor2/51/5/10.1122/1.2750657> [Accessed October 10, 2015].
- Geotek Ltd., 2014. MSCL-S System Description. Available at: <http://www.geotek.co.uk/products/mscl-s> [Accessed April 22, 2014].
- Ghosh, P., DLVO Theory and Non-DLVO Forces. *nptel.ac.in*, pp.1–17. Available at: <http://nptel.ac.in/courses/103103033/module3/lecture5.pdf> [Accessed October 13, 2015].
- Hecker, C., der Meijde, M. Van & van der Meer, F.D., 2010. Thermal infrared spectroscopy on feldspars — Successes, limitations and their implications for remote sensing. *Earth-Science Reviews*, 103(1-2), pp.60–70. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012825210000851> [Accessed August 25, 2015].

- Huntington, J., Clissold, M., et al., 2012. Achievements from building the AuScope National Virtual Core Library (NVCL) in Australia. In *34th International Geological Congress*. Brisbane, Australia.
- Huntington, J., Hancock, L., et al., 2012. Rare Earth Reflectance Spectroscopy Basics and Australian NVCL Applications Why Study Rare Earth Elements? In *34th International Geological Congress*. Brisbane, Australia.
- Huntington, J. & Quigley, M., 2006. A geological overview of HyLogging 18,000 m of core from the Eastern Goldfields of Western Australia. In *6th International Mining Geology Conference*. Darwin, Australia, pp. 21–23. Available at: <https://publications.csiro.au/rpr/pub?list=BRO&pid=procite:4d65c1f7-6da1-4ccb-9325-577726760243> [Accessed November 30, 2014].
- Ihle, C.F., 2013. A cost perspective for long distance ore pipeline water and energy utilization. Part I: Optimal base values. *International Journal of Mineral Processing*, 122, pp.1–12. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751613000859> [Accessed January 7, 2016].
- Jeldres, R.I. et al., 2014. Impact of seawater salts on the viscoelastic behavior of flocculated mineral suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 461, pp.295–302. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775714006682> [Accessed October 10, 2015].
- De Kretser, R., Scales, P.J. & Boger, D. V., 1997. Improving clay-based tailings disposal: Case study on coal tailings. *AIChE Journal*, 43(7), pp.1894–1903. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/aic.690430724>.
- De Kretser, R.G., Scales, P.J. & Boger, D. V., 1998. Surface chemistry-rheology inter-relationships in clay suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 137(1-3), pp.307–318. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927775797003725>.
- Krieger, I. & Dougherty, T., 1959. A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres. *Transactions of The Society of Rheology ...*, 152, pp.137–152. Available at: <http://scitation.aip.org/content/sor/journal/tsor/3/1/10.1122/1.548848> [Accessed July 27, 2014].
- Kwak, M., James, D.F. & Klein, K. a., 2005. Flow behaviour of tailings paste for surface disposal. *International Journal of Mineral Processing*, 77(3), pp.139–153. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751605000499> [Accessed June 25, 2014].
- Madsen, F.T. & Muller-Vonmoos, M., 1989. The Swelling Behaviour of Clays. , 4, pp.143–156.

- Malvern Instruments Ltd., 2015. Malvern Masterizer 2000. Available at: <http://www.malvern.com/en/support/product-support/mastersizer-range/mastersizer-2000> [Accessed October 9, 2015].
- Martínez Luévanos, A., 2012. *Fisicoquímica de Superficies e Interfases, Uso de Surfactantes Aniónicos en la Flotación de Minerales No Metálicos* 1st ed. A. Martínez Luévanos, ed., Saltillo, Coahuila, México: Universidad Autónoma de Coahuila.
- McFarlane, A.J., Bremmell, K.E. & Addai-Mensah, J., 2005. Optimising the dewatering behaviour of clay tailings through interfacial chemistry, orthokinetic flocculation and controlled shear. *Powder Technology*, 160(1), pp.27–34. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0032591005002123> [Accessed June 4, 2014].
- Mooney, M., 1951. The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles. *Journal of colloid science*, (113), pp.3–4. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0095852251900360> [Accessed July 25, 2014].
- National Aeronautics and Space Administration, AVIRIS. Available at: <http://aviris.jpl.nasa.gov/aviris/index.html> [Accessed April 22, 2014].
- Ndlovu, B. et al., 2014. A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals. *Minerals Engineering*, 55, pp.190–200. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687513001921> [Accessed April 28, 2014].
- Ndlovu, B. et al., 2011. The influence of phyllosilicate mineralogy on the rheology of mineral slurries. *Minerals Engineering*, 24(12), pp.1314–1322. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687511001828> [Accessed April 28, 2014].
- Ndlovu, B., Farrokhpay, S. & Bradshaw, D., 2013. The effect of phyllosilicate minerals on mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, 125, pp.149–156. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751613001968> [Accessed April 28, 2014].
- Nguyen, Q.D. & Boger, D.V., 1983. Yield Stress Measurement for Concentrated Suspensions. *Journal of Rheology*, 27(4), p.321. Available at: <http://scitation.aip.org/content/sor/journal/jor2/27/4/10.1122/1.549709> [Accessed July 31, 2014].
- Pearlman, J., Carman, S. & Segal, C., 2001. Overview of the Hyperion Imaging Spectrometer for the NASA EO-1 Mission Hyperion Imaging Spectrometer.
- Pownceby, M.I. & Johnson, C., 2014. Geometallurgy of Australian uranium deposits. *Ore Geology Reviews*, 56, pp.25–44. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169136813001595>.

- Rand, B. & Melton, I.E., 1977. Particle interactions in aqueous kaolinite suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 60(2), pp.308–320. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0021979777902909>.
- Rao, M.A., 2001. *Rheology of Fluids and Semisolid Foods, Principles and Applications* Second Edi. G. Barbosa-Cánovas, ed., New York, NY: Springer.
- Shangai San-Xin Instrumentation Inc., 2015. San-Xin SX711. Available at: <http://www.shsan-xin.com/en/productsdetail.asp?ID=261> [Accessed October 9, 2015].
- Sohn, H. & Moreland, C., 1968. The effect of particle size distribution on packing density. *The Canadian Journal of Chemical ...*, 46. Available at: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cjce.5450460305/abstract> [Accessed June 11, 2014].
- Soong, R. & Farmer, V.C., 1978. The Identification of Sulphide Minerals by Infra-Red Spectroscopy. *Mineralogical Magazine*, 42(322), pp.277–M20. Available at: http://www.minersoc.org/pages/Archive-MM/Volume_42/42-322-277.pdf.
- Specim, 2014. Sisurock. Available at: http://www.specim.fi/files/pdf/sisu/datasheets/SisuROCK_Datasheet-ver1-13.pdf [Accessed April 22, 2014].
- SpecTIR, 2012a. AisaEAGLE Datasheet. Available at: [http://www.specim.fi/files/pdf/aisa/datasheets/AisaEAGLE_datasheet_ver1-2013\(1\).pdf](http://www.specim.fi/files/pdf/aisa/datasheets/AisaEAGLE_datasheet_ver1-2013(1).pdf) [Accessed April 22, 2014].
- SpecTIR, 2012b. AisaHAWK Datasheet. Available at: http://www.specim.fi/files/pdf/aisa/datasheets/Hawk_datasheet_ver2-2012.pdf [Accessed April 22, 2014].
- SpecTIR, 2012c. AisaOWL Datasheet. Available at: http://www.specim.fi/files/pdf/aisa/datasheets/AisaOWL_ver1-2013.pdf [Accessed April 22, 2014].
- Stickland, A.D. et al., 2015. The effect of premature wall yield on creep testing of strongly flocculated suspensions. *Rheologica Acta*, 54(5), pp.337–352. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s00397-015-0847-x> [Accessed October 10, 2015].
- Tangsathitkulchai, C., 2003. The effect of slurry rheology on fine grinding in a laboratory ball mill. *International Journal of Mineral Processing*, 69(1-4), pp.29–47. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301751602000613>.
- Tangsathitkulchai, C. & Austin, L.G., 1988. Rheology of concentrated slurries of particles of natural size distribution produced by grinding. *Powder Technology*, 56(4), pp.293–299. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0032591088800123>.

Terraplus Inc., 2013. PIMA Spectrometer. Available at:
<http://terraplus.ca/products/properties/pima.aspx> [Accessed April 22, 2015].

witeg Labortechnik GmbH, 2015. WiseCube Incubators. , p.99. Available at:
http://www.witeg.de/shop_hacc/1749797951/dokumente/Wisd_catalogue_english/Witeg_Wisd_81-104_Incubators.pdf [Accessed October 9, 2015].

Anexo A

Reogramas de clasificación granulométrica b, $\phi = 25\%$

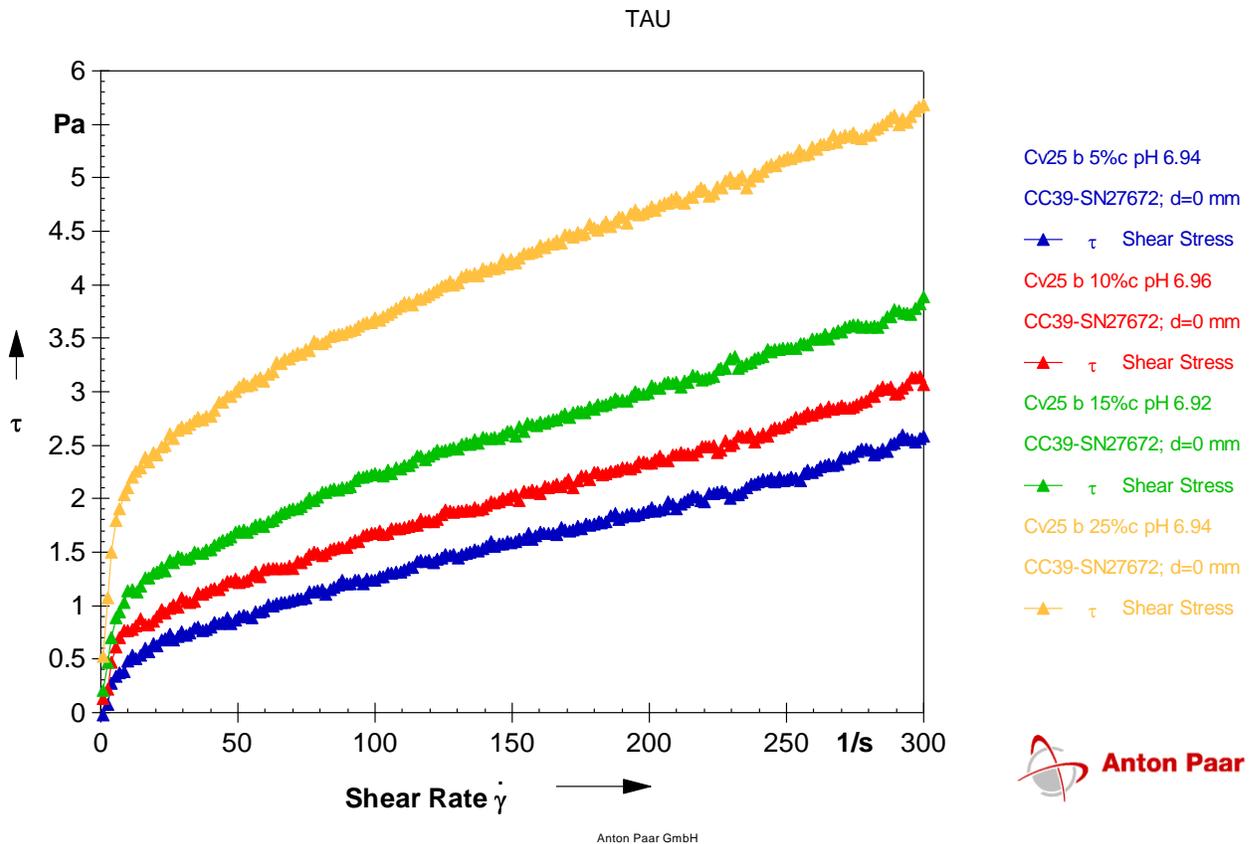


Figura A. 1: Reogramas de clasificación granulométrica b, contenido de sólidos en volumen=25%, para contenidos en peso de caolinita en la fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25%.

Anexo B

Especificaciones de preparación de fracción sólida de muestras para reometrías

B.1 Caolinita $\phi=25\%$

Tabla B. 1: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica b para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| Malla um | ASTM | P80 80.96 | | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
|-------------|------|-----------|--------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | | Fu IR | fi, % | Sólidos g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 89.15% | 10.85% | 4.841 | 4.841 | 0.000 | 4.841 | 0.000 | 4.841 | 0.000 | 4.841 | 0.000 |
| 75 | 200 | 77.82% | 11.33% | 5.058 | 5.058 | 0.000 | 5.058 | 0.000 | 5.058 | 0.000 | 5.058 | 0.000 |
| 53 | 270 | 70.79% | 7.04% | 3.141 | 3.141 | 0.000 | 3.141 | 0.000 | 3.141 | 0.000 | 3.141 | 0.000 |
| 45 | 325 | 63.25% | 7.53% | 3.362 | 3.362 | 0.000 | 3.362 | 0.000 | 3.362 | 0.000 | 3.362 | 0.000 |
| 38 | 400 | 58.89% | 4.37% | 1.949 | 1.949 | 0.000 | 1.949 | 0.000 | 1.949 | 0.000 | 1.949 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 58.89% | 26.285 | 24.054 | 2.232 | 21.822 | 4.464 | 19.590 | 6.695 | 15.127 | 11.159 |
| | | | | 44.636 | 42.404 | 2.232 | 40.172 | 4.451 | 37.940 | 6.659 | 33.477 | 11.039 |

Tabla B. 2: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| Malla um | ASTM | P80 86.43 | | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
|-------------|------|-----------|--------|---------------------|---------------|----------------|---------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 87.95% | 12.05% | 5.379 | 5.379 | 0.000 | 5.364 | 0.000 | 5.379 | 0.000 | 5.364 | 0.000 |
| 75 | 200 | 75.36% | 12.59% | 5.620 | 5.620 | 0.000 | 5.605 | 0.000 | 5.620 | 0.000 | 5.605 | 0.000 |
| 53 | 270 | 67.54% | 7.82% | 3.490 | 3.490 | 0.000 | 3.480 | 0.000 | 3.490 | 0.000 | 3.480 | 0.000 |
| 45 | 325 | 59.17% | 8.37% | 3.735 | 3.735 | 0.000 | 3.725 | 0.000 | 3.735 | 0.000 | 3.725 | 0.000 |
| 38 | 400 | 54.32% | 4.85% | 2.165 | 2.165 | 0.000 | 2.159 | 0.000 | 2.165 | 0.000 | 2.159 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 54.32% | 24.247 | 22.015 | 2.232 | 19.729 | 4.451 | 22.015 | 2.232 | 19.729 | 4.451 |
| | | | | Total 44.636 | 42.404 | 2.232 | 40.063 | 4.451 | 42.404 | 2.232 | 40.063 | 4.451 |

Tabla B. 3: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| P80 73.99 | | | | | 5% | | 10% Caolinita | | 15% Caolinita | | 25% Caolinita | |
|------------------|-------------------|--------------|-----------|----------------|---------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|
| c | | | | | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita |
| um | Malla ASTM | Fu IR | fi | Sólidos | g | g | g | g | g | g | g | g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 90.36% | 9.64% | 4.303 | 4.303 | 0.000 | 4.292 | 0.000 | 4.280 | 0.000 | 4.257 | 0.000 |
| 75 | 200 | 80.29% | 10.07% | 4.496 | 4.496 | 0.000 | 4.484 | 0.000 | 4.472 | 0.000 | 4.448 | 0.000 |
| 53 | 270 | 74.03% | 6.25% | 2.792 | 2.792 | 0.000 | 2.784 | 0.000 | 2.777 | 0.000 | 2.762 | 0.000 |
| 45 | 325 | 67.34% | 6.69% | 2.988 | 2.988 | 0.000 | 2.980 | 0.000 | 2.972 | 0.000 | 2.956 | 0.000 |
| 38 | 400 | 63.46% | 3.88% | 1.732 | 1.732 | 0.000 | 1.727 | 0.000 | 1.723 | 0.000 | 1.713 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 63.46% | 28.324 | 26.093 | 2.232 | 23.796 | 4.451 | 21.512 | 6.659 | 16.980 | 11.039 |
| Total | | | | 44.636 | 42.404 | 2.232 | 40.063 | 4.451 | 37.735 | 6.659 | 33.116 | 11.039 |

Tabla B. 4: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| P80 63.94 | | | | | 5% | | 10% Caolinita | | 15% Caolinita | | 25% Caolinita | |
|------------------|-------------------|--------------|-----------|----------------|---------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|---------------|
| d | | | | | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita |
| um | Malla ASTM | Fu IR | fi | Sólidos | g | g | g | g | g | g | g | g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 91.56% | 8.44% | 3.765 | 3.765 | 0.000 | 3.755 | 0.000 | 3.745 | 0.000 | 3.725 | 0.000 |
| 75 | 200 | 82.75% | 8.81% | 3.934 | 3.934 | 0.000 | 3.923 | 0.000 | 3.913 | 0.000 | 3.892 | 0.000 |
| 53 | 270 | 77.28% | 5.47% | 2.443 | 2.443 | 0.000 | 2.436 | 0.000 | 2.430 | 0.000 | 2.416 | 0.000 |
| 45 | 325 | 71.42% | 5.86% | 2.615 | 2.615 | 0.000 | 2.608 | 0.000 | 2.601 | 0.000 | 2.586 | 0.000 |
| 38 | 400 | 68.02% | 3.40% | 1.516 | 1.516 | 0.000 | 1.511 | 0.000 | 1.507 | 0.000 | 1.499 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 68.02% | 30.363 | 28.132 | 2.232 | 25.829 | 4.451 | 23.540 | 6.659 | 18.997 | 11.039 |
| Total | | | | 44.636 | 42.404 | 2.232 | 40.063 | 4.451 | 37.735 | 6.659 | 33.116 | 11.039 |

Tabla B. 5: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 43.79 | | | 5% | | 10% Caolinita | | 15% Caolinita | | 25% Caolinita | |
|-----|------------|-----------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | Relave g | Caolinita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 94.22% | 5.78% | 2.582 | 2.582 | 0.000 | 2.575 | 0.000 | 2.568 | 0.000 | 2.554 | 0.000 |
| 75 | 200 | 88.17% | 6.04% | 2.698 | 2.698 | 0.000 | 2.690 | 0.000 | 2.683 | 0.000 | 2.669 | 0.000 |
| 53 | 270 | 84.42% | 3.75% | 1.675 | 1.675 | 0.000 | 1.671 | 0.000 | 1.666 | 0.000 | 1.657 | 0.000 |
| 45 | 325 | 80.40% | 4.02% | 1.793 | 1.793 | 0.000 | 1.788 | 0.000 | 1.783 | 0.000 | 1.774 | 0.000 |
| 38 | 400 | 78.07% | 2.33% | 1.039 | 1.039 | 0.000 | 1.036 | 0.000 | 1.034 | 0.000 | 1.028 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 78.07% | 34.849 | 32.617 | 2.232 | 30.303 | 4.451 | 28.001 | 6.659 | 23.435 | 11.039 |
| | | | Total | 44.636 | 42.404 | 2.232 | 40.063 | 4.451 | 37.735 | 6.659 | 33.116 | 11.039 |

B.2 Caolinita $\phi=30\%$

Tabla B. 6: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 86.43 | | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
|-----|------------|-----------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 87.95% | 12.05% | 6.455 | 6.455 | 0.000 | 6.437 | 0.000 | 6.420 | 0.000 | 6.385 | 0.000 |
| 75 | 200 | 75.36% | 12.59% | 6.744 | 6.744 | 0.000 | 6.726 | 0.000 | 6.708 | 0.000 | 6.671 | 0.000 |
| 53 | 270 | 67.54% | 7.82% | 4.188 | 4.188 | 0.000 | 4.176 | 0.000 | 4.165 | 0.000 | 4.143 | 0.000 |
| 45 | 325 | 59.17% | 8.37% | 4.482 | 4.482 | 0.000 | 4.470 | 0.000 | 4.458 | 0.000 | 4.434 | 0.000 |
| 38 | 400 | 54.32% | 4.85% | 2.598 | 2.598 | 0.000 | 2.591 | 0.000 | 2.584 | 0.000 | 2.570 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 54.32% | 29.096 | 26.418 | 2.678 | 23.675 | 5.342 | 20.947 | 7.991 | 15.536 | 13.246 |
| | | | Total | 53.563 | 50.885 | 2.678 | 48.076 | 5.342 | 45.282 | 7.991 | 39.739 | 13.246 |

Tabla B. 7: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | P80 | | 73.99 | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
|-----|------------|---------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| | Malla ASTM | Fu IR | fi | Sólidos | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita |
| | | | | | g | g | g | g | g | g | g | g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 90.36% | 9.64% | 5.164 | 5.164 | 0.000 | 5.150 | 0.000 | 5.136 | 0.000 | 5.108 | 0.000 |
| 75 | 200 | 80.29% | 10.07% | 5.395 | 5.395 | 0.000 | 5.381 | 0.000 | 5.366 | 0.000 | 5.337 | 0.000 |
| 53 | 270 | 74.03% | 6.25% | 3.350 | 3.350 | 0.000 | 3.341 | 0.000 | 3.332 | 0.000 | 3.314 | 0.000 |
| 45 | 325 | 67.34% | 6.69% | 3.586 | 3.586 | 0.000 | 3.576 | 0.000 | 3.566 | 0.000 | 3.547 | 0.000 |
| 38 | 400 | 63.46% | 3.88% | 2.078 | 2.078 | 0.000 | 2.073 | 0.000 | 2.067 | 0.000 | 2.056 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 63.46% | 33.989 | 31.311 | 2.678 | 28.555 | 5.342 | 25.814 | 7.991 | 20.377 | 13.246 |
| | | | Total | 53.563 | 50.885 | 2.678 | 48.076 | 5.342 | 45.282 | 7.991 | 39.739 | 13.246 |

Tabla B. 8: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | P80 | | 63.94 | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
|-----|------------|---------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|
| | Malla ASTM | Fu IR | fi | Sólidos | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita | Relave | Caolinita |
| | | | | | g | g | g | g | g | g | g | g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 91.56% | 8.44% | 4.518 | 4.518 | 0.000 | 4.506 | 0.000 | 4.494 | 0.000 | 4.470 | 0.000 |
| 75 | 200 | 82.75% | 8.81% | 4.721 | 4.721 | 0.000 | 4.708 | 0.000 | 4.695 | 0.000 | 4.670 | 0.000 |
| 53 | 270 | 77.28% | 5.47% | 2.931 | 2.931 | 0.000 | 2.923 | 0.000 | 2.915 | 0.000 | 2.900 | 0.000 |
| 45 | 325 | 71.42% | 5.86% | 3.138 | 3.138 | 0.000 | 3.129 | 0.000 | 3.121 | 0.000 | 3.104 | 0.000 |
| 38 | 400 | 68.02% | 3.40% | 1.819 | 1.819 | 0.000 | 1.814 | 0.000 | 1.809 | 0.000 | 1.799 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 68.02% | 36.436 | 33.758 | 2.678 | 30.995 | 5.342 | 28.248 | 7.991 | 22.797 | 13.246 |
| | | | Total | 53.563 | 50.885 | 2.678 | 48.076 | 5.342 | 45.282 | 7.991 | 39.739 | 13.246 |

Tabla B. 9: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 43.79 | | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
|-----|------------|-----------|--------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 94.22% | 5.78% | 3.098 | 3.098 | 0.000 | 3.090 | 0.000 | 3.082 | 0.000 | 3.065 | 0.000 |
| 75 | 200 | 88.17% | 6.04% | 3.237 | 3.237 | 0.000 | 3.228 | 0.000 | 3.220 | 0.000 | 3.202 | 0.000 |
| 53 | 270 | 84.42% | 3.75% | 2.010 | 2.010 | 0.000 | 2.005 | 0.000 | 1.999 | 0.000 | 1.988 | 0.000 |
| 45 | 325 | 80.40% | 4.02% | 2.152 | 2.152 | 0.000 | 2.146 | 0.000 | 2.140 | 0.000 | 2.128 | 0.000 |
| 38 | 400 | 78.07% | 2.33% | 1.247 | 1.247 | 0.000 | 1.244 | 0.000 | 1.240 | 0.000 | 1.234 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 78.07% | 41.819 | 39.141 | 2.678 | 36.363 | 5.342 | 33.601 | 7.991 | 28.122 | 13.246 |
| | | | Total | 53.563 | 50.885 | 2.678 | 48.076 | 5.342 | 45.282 | 7.991 | 39.732 | 13.246 |

B.3. Caolinita $\phi=40\%$

Tabla B. 10: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 86.43 | | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
|-----|------------|-----------|--------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 87.95% | 12.05% | 6.455 | 8.992 | 0.000 | 8.967 | 0.000 | 8.943 | 0.000 | 8.895 | 0.000 |
| 75 | 200 | 75.36% | 12.59% | 6.744 | 9.395 | 0.000 | 9.369 | 0.000 | 9.344 | 0.000 | 9.294 | 0.000 |
| 53 | 270 | 67.54% | 7.82% | 4.188 | 5.834 | 0.000 | 5.818 | 0.000 | 5.802 | 0.000 | 5.771 | 0.000 |
| 45 | 325 | 59.17% | 8.37% | 4.482 | 6.244 | 0.000 | 6.227 | 0.000 | 6.210 | 0.000 | 6.177 | 0.000 |
| 38 | 400 | 54.32% | 4.85% | 2.598 | 3.619 | 0.000 | 3.609 | 0.000 | 3.600 | 0.000 | 3.580 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 54.32% | 29.096 | 36.801 | 3.731 | 32.980 | 7.441 | 29.180 | 11.132 | 21.642 | 18.453 |
| | | | Total | 53.563 | 70.884 | 3.731 | 66.971 | 7.441 | 63.079 | 11.132 | 55.358 | 18.453 |

Tabla B. 11: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 73.99 | | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
|-----|------------|-----------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 90.36% | 9.64% | 5.164 | 7.193 | 0.000 | 7.174 | 0.000 | 7.154 | 0.000 | 7.116 | 0.000 |
| 75 | 200 | 80.29% | 10.07% | 5.395 | 7.516 | 0.000 | 7.495 | 0.000 | 7.475 | 0.000 | 7.435 | 0.000 |
| 53 | 270 | 74.03% | 6.25% | 3.350 | 4.667 | 0.000 | 4.654 | 0.000 | 4.642 | 0.000 | 4.617 | 0.000 |
| 45 | 325 | 67.34% | 6.69% | 3.586 | 4.995 | 0.000 | 4.982 | 0.000 | 4.968 | 0.000 | 4.941 | 0.000 |
| 38 | 400 | 63.46% | 3.88% | 2.078 | 2.895 | 0.000 | 2.887 | 0.000 | 2.880 | 0.000 | 2.864 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 63.46% | 33.989 | 43.617 | 3.731 | 39.778 | 7.441 | 35.960 | 11.132 | 28.385 | 18.453 |
| | | | Total | 53.563 | 70.884 | 3.731 | 66.971 | 7.441 | 63.079 | 11.132 | 55.358 | 18.453 |

Tabla B. 12: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 63.94 | | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
|-----|------------|-----------|--------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 91.56% | 8.44% | 4.518 | 6.294 | 0.000 | 6.277 | 0.000 | 6.260 | 0.000 | 6.226 | 0.000 |
| 75 | 200 | 82.75% | 8.81% | 4.721 | 6.576 | 0.000 | 6.559 | 0.000 | 6.541 | 0.000 | 6.505 | 0.000 |
| 53 | 270 | 77.28% | 5.47% | 2.931 | 4.084 | 0.000 | 4.072 | 0.000 | 4.061 | 0.000 | 4.039 | 0.000 |
| 45 | 325 | 71.42% | 5.86% | 3.138 | 4.371 | 0.000 | 4.359 | 0.000 | 4.347 | 0.000 | 4.324 | 0.000 |
| 38 | 400 | 68.02% | 3.40% | 1.819 | 2.533 | 0.000 | 2.527 | 0.000 | 2.520 | 0.000 | 2.506 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 68.02% | 36.436 | 47.026 | 3.731 | 43.177 | 7.441 | 39.350 | 11.132 | 31.757 | 18.453 |
| | | | | 53.563 | 70.884 | 3.731 | 66.971 | 7.441 | 63.079 | 11.132 | 55.358 | 18.453 |

Tabla B. 13: Dosificaciones de relave y caolinita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 43.79 | | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
|-----|------------|-----------|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g | Relave g | Caolinita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 94.22% | 5.78% | 3.098 | 4.316 | 0.000 | 4.304 | 0.000 | 4.293 | 0.000 | 4.270 | 0.000 |
| 75 | 200 | 88.17% | 6.04% | 3.237 | 4.510 | 0.000 | 4.497 | 0.000 | 4.485 | 0.000 | 4.461 | 0.000 |
| 53 | 270 | 84.42% | 3.75% | 2.010 | 2.800 | 0.000 | 2.793 | 0.000 | 2.785 | 0.000 | 2.770 | 0.000 |
| 45 | 325 | 80.40% | 4.02% | 2.152 | 2.997 | 0.000 | 2.989 | 0.000 | 2.981 | 0.000 | 2.965 | 0.000 |
| 38 | 400 | 78.07% | 2.33% | 1.247 | 1.737 | 0.000 | 1.732 | 0.000 | 1.728 | 0.000 | 1.718 | 0.000 |
| <38 | -400 | | 78.07% | 41.819 | 54.524 | 3.731 | 50.655 | 7.441 | 46.808 | 11.132 | 39.174 | 18.453 |
| | | | Total | 53.563 | 70.884 | 3.731 | 66.971 | 7.441 | 63.079 | 11.132 | 55.358 | 18.453 |

B.4. Montmorillonita $\phi=25\%$

Tabla B. 14: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| u m | Malla ASTM | P80 86.43 | | | Mont natural 2.661 | | Mont natural 5.343 | | Mont natural 8.047 | | Mont natural 13.520 | |
|--------|---------------|-----------|--------------|---------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos g | Relave g | Montmorillonita g | Relave g | Montmorillonita g | Relave g | Montmorillonita g | Relave g | Montmorillonita g |
| 150 | 100 | 100.0% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 87.95% | 12.05% | 5.658 | 5.581 | 0.077 | 5.525 | 0.155 | 5.470 | 0.233 | 5.357 | 0.392 |
| 75 | 200 | 75.36% | 12.59% | 5.911 | 5.689 | 0.222 | 5.489 | 0.446 | 5.287 | 0.672 | 4.879 | 1.129 |
| 53 | 270 | 67.54% | 7.82% | 3.671 | 3.434 | 0.237 | 3.209 | 0.476 | 2.983 | 0.717 | 2.526 | 1.204 |
| 45 | 325 | 59.17% | 8.37% | 3.929 | 3.563 | 0.366 | 3.210 | 0.735 | 2.854 | 1.107 | 2.133 | 1.860 |
| 38 | 400 | 54.32% | 4.85% | 2.277 | 2.043 | 0.234 | 1.815 | 0.471 | 1.586 | 0.709 | 1.123 | 1.191 |
| <38 | -400 | | 54.32% | 25.503 | 24.292 | 1.211 | 23.174 | 2.431 | 22.047 | 3.661 | 19.765 | 6.151 |
| | | | Total | 46.948 | 44.601 | 2.347 | 42.423 | 4.714 | 40.227 | 7.099 | 35.783 | 11.928 |

Tabla B. 15: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| u m | Malla ASTM | P80 73.99 | | | Mont natural | 2.661 | Mont natural | 5.343 | Mont natural | 8.047 | Mont natural | 13.520 |
|--------------|---------------|-----------|--------|---------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
| | | | | | Relave | Montmorillo nita | Relave | Montmorillo nita | Relave | Montmorillo nita | Relave | Montmorillo nita |
| | | | | g | g | g | g | g | g | g | g | |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 90.36% | 9.64% | 4.526 | 4.449 | 0.077 | 4.389 | 0.155 | 4.329 | 0.233 | 4.207 | 0.392 |
| 75 | 200 | 80.29% | 10.07% | 4.729 | 4.507 | 0.222 | 4.302 | 0.446 | 4.095 | 0.672 | 3.677 | 1.129 |
| 53 | 270 | 74.03% | 6.25% | 2.936 | 2.699 | 0.237 | 2.472 | 0.476 | 2.243 | 0.717 | 1.780 | 1.204 |
| 45 | 325 | 67.34% | 6.69% | 3.143 | 2.777 | 0.366 | 2.421 | 0.735 | 2.062 | 1.107 | 1.334 | 1.860 |
| 38 | 400 | 63.46% | 3.88% | 1.822 | 1.587 | 0.234 | 1.358 | 0.471 | 1.127 | 0.709 | 0.660 | 1.191 |
| <38 | -400 | | 63.46% | 29.792 | 28.581 | 1.211 | 27.480 | 2.431 | 26.371 | 3.661 | 24.124 | 6.151 |
| Total | | | | 46.948 | 44.601 | 2.347 | 42.423 | 4.714 | 40.227 | 7.099 | 35.783 | 11.928 |

Tabla B. 16: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| u m | Malla ASTM | P80 63.94 | | | Mont natural | 2.661 | Mont natural | 5.343 | Mont natural | 8.047 | Mont natural | 13.520 |
|--------------|---------------|-----------|--------|---------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
| | | | | | Relave | Montmorillo nita | Relave | Montmorillo nita | Relave | Montmorillo nita | Relave | Montmorillo nita |
| | | | | g | g | g | g | g | g | g | g | |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 91.56% | 8.44% | 3.960 | 3.883 | 0.077 | 3.821 | 0.155 | 3.759 | 0.233 | 3.632 | 0.392 |
| 75 | 200 | 82.75% | 8.81% | 4.138 | 3.916 | 0.222 | 3.708 | 0.446 | 3.499 | 0.672 | 3.076 | 1.129 |
| 53 | 270 | 77.28% | 5.47% | 2.569 | 2.332 | 0.237 | 2.104 | 0.476 | 1.873 | 0.717 | 1.407 | 1.204 |
| 45 | 325 | 71.42% | 5.86% | 2.750 | 2.384 | 0.366 | 2.026 | 0.735 | 1.666 | 1.107 | 0.935 | 1.860 |
| 38 | 400 | 68.02% | 3.40% | 1.594 | 1.360 | 0.234 | 1.130 | 0.471 | 0.898 | 0.709 | 0.428 | 1.191 |
| <38 | -400 | | 68.02% | 31.937 | 30.726 | 1.211 | 29.634 | 2.431 | 28.532 | 3.661 | 26.303 | 6.151 |
| Total | | | | 46.948 | 44.601 | 2.347 | 42.423 | 4.714 | 40.227 | 7.099 | 35.783 | 11.928 |

Tabla B. 17: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=25\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 43.79 | | | Mont natural 2.661 | | Mont natural 5.343 | | Mont natural 8.047 | | Mont natural 13.520 | |
|-----|---------------|-----------|--------------|---------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | Relave g | Montmorillonita g | Relave g | Montmorillonita g | Relave g | Montmorillonita g | Relave g | Montmorillonita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 94.22% | 5.78% | 2.716 | 2.639 | 0.077 | 2.572 | 0.155 | 2.504 | 0.233 | 2.368 | 0.392 |
| 75 | 200 | 88.17% | 6.04% | 2.837 | 2.615 | 0.222 | 2.403 | 0.446 | 2.189 | 0.672 | 1.755 | 1.129 |
| 53 | 270 | 84.42% | 3.75% | 1.762 | 1.525 | 0.237 | 1.293 | 0.476 | 1.059 | 0.717 | 0.586 | 1.204 |
| 45 | 325 | 80.40% | 4.02% | 1.886 | 1.520 | 0.366 | 1.158 | 0.735 | 0.794 | 1.107 | 0.057 | 1.860 |
| 38 | 400 | 78.07% | 2.33% | 1.093 | 0.859 | 0.234 | 0.627 | 0.471 | 0.393 | 0.709 | -0.081 | 1.191 |
| <38 | -400 | | 78.07% | 36.655 | 35.444 | 1.211 | 34.370 | 2.431 | 33.288 | 3.661 | 31.098 | 6.151 |
| | | | Total | 46.948 | 44.601 | 2.347 | 42.423 | 4.714 | 40.227 | 7.099 | 35.783 | 11.928 |

B.5. Montmorillonita $\phi=30\%$

Tabla B. 18: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 86.43 | | | Mont natural 3.649 | | Mont natural 7.327 | | Mont natural 11.035 | | Mont natural 18.541 | |
|-----|---------------|-----------|--------------|---------------|--------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos g | Relave g | Montmorillonita g | Relave g | Montmorillonita g | Relave g | Montmorillonita g | Relave g | Montmorillonita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 87.95% | 12.05% | 5.658 | 7.653 | 0.106 | 7.578 | 0.213 | 7.501 | 0.320 | 7.347 | 0.538 |
| 75 | 200 | 75.36% | 12.59% | 5.911 | 7.802 | 0.305 | 7.528 | 0.612 | 7.251 | 0.921 | 6.691 | 1.548 |
| 53 | 270 | 67.54% | 7.82% | 3.671 | 4.709 | 0.325 | 4.401 | 0.653 | 4.091 | 0.983 | 3.464 | 1.652 |
| 45 | 325 | 59.17% | 8.37% | 3.929 | 4.886 | 0.502 | 4.402 | 1.008 | 3.914 | 1.518 | 2.925 | 2.550 |
| 38 | 400 | 54.32% | 4.85% | 2.277 | 2.801 | 0.322 | 2.490 | 0.646 | 2.176 | 0.973 | 1.540 | 1.634 |
| <38 | -400 | | 54.32% | 25.503 | 33.315 | 1.660 | 31.782 | 3.334 | 30.236 | 5.021 | 27.107 | 8.436 |
| | | | Total | 46.948 | 61.167 | 3.219 | 58.180 | 6.464 | 55.169 | 9.736 | 49.073 | 16.358 |

Tabla B. 19: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 73.99 | | | Mont nat 3.649 | | Mont nat 7.327 | | Mont nat 11.035 | | Mont nat 18.541 | |
|--------------|------------|-----------|--------|---------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
| | | | | | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita |
| | | | | g | g | g | g | g | g | g | g | |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 90.36% | 9.64% | 4.526 | 6.101 | 0.106 | 6.020 | 0.213 | 5.937 | 0.320 | 5.770 | 0.538 |
| 75 | 200 | 80.29% | 10.07% | 4.729 | 6.181 | 0.305 | 5.900 | 0.612 | 5.616 | 0.921 | 5.043 | 1.548 |
| 53 | 270 | 74.03% | 6.25% | 2.936 | 3.702 | 0.325 | 3.391 | 0.653 | 3.077 | 0.983 | 2.441 | 1.652 |
| 45 | 325 | 67.34% | 6.69% | 3.143 | 3.809 | 0.502 | 3.320 | 1.008 | 2.827 | 1.518 | 1.830 | 2.550 |
| 38 | 400 | 63.46% | 3.88% | 1.822 | 2.177 | 0.322 | 1.863 | 0.646 | 1.546 | 0.973 | 0.905 | 1.634 |
| <38 | -400 | | 63.46% | 29.792 | 39.197 | 1.660 | 37.687 | 3.334 | 36.165 | 5.021 | 33.084 | 8.436 |
| Total | | | | 46.948 | 61.167 | 64.386 | 58.180 | 64.644 | 55.169 | 64.905 | 49.073 | 65.431 |

Tabla B. 20: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 63.94 | | | Mont natural 3.649 | | Mont natural 7.327 | | Mont natural 11.035 | | Mont natural 18.541 | |
|-----|------------|-----------|--------|---------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
| | | | | | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita |
| | | | | g | g | g | g | g | g | g | g | |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 91.56% | 8.44% | 3.960 | 5.326 | 0.106 | 5.241 | 0.213 | 5.155 | 0.320 | 4.982 | 0.538 |
| 75 | 200 | 82.75% | 8.81% | 4.138 | 5.370 | 0.305 | 5.086 | 0.612 | 4.799 | 0.921 | 4.219 | 1.548 |
| 53 | 270 | 77.28% | 5.47% | 2.569 | 3.199 | 0.325 | 2.885 | 0.653 | 2.569 | 0.983 | 1.929 | 1.652 |
| 45 | 325 | 71.42% | 5.86% | 2.750 | 3.270 | 0.502 | 2.779 | 1.008 | 2.284 | 1.518 | 1.283 | 2.550 |
| 38 | 400 | 68.02% | 3.40% | 1.594 | 1.865 | 0.322 | 1.549 | 0.646 | 1.231 | 0.973 | 0.588 | 1.634 |
| <38 | -400 | | 68.02% | 31.937 | 42.138 | 1.660 | 40.640 | 3.334 | 39.130 | 5.021 | 36.073 | 8.436 |
| | | | | 46.948 | 61.167 | 3.219 | 58.180 | 6.464 | 55.169 | 9.736 | 49.073 | 16.358 |

Tabla B. 21: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=30\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 43.79 | | | Mont natural 3.649 | | Mont natural 7.327 | | Mont natural 11.035 | | Mont natural 18.541 | |
|--------------|------------|-----------|--------|---------------|--------------------|-----------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
| | | | | | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita |
| | | | | g | g | g | g | g | g | g | g | |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 94.22% | 5.78% | 2.716 | 3.619 | 0.106 | 3.527 | 0.213 | 3.434 | 0.320 | 3.247 | 0.538 |
| 75 | 200 | 88.17% | 6.04% | 2.837 | 3.587 | 0.305 | 3.295 | 0.612 | 3.001 | 0.921 | 2.407 | 1.548 |
| 53 | 270 | 84.42% | 3.75% | 1.762 | 2.091 | 0.325 | 1.773 | 0.653 | 1.453 | 0.983 | 0.804 | 1.652 |
| 45 | 325 | 80.40% | 4.02% | 1.886 | 2.084 | 0.502 | 1.589 | 1.008 | 1.089 | 1.518 | 0.078 | 2.550 |
| 38 | 400 | 78.07% | 2.33% | 1.093 | 1.177 | 0.322 | 0.859 | 0.646 | 0.539 | 0.973 | -0.111 | 1.634 |
| <38 | -400 | | 78.07% | 36.655 | 48.609 | 1.660 | 47.137 | 3.334 | 45.653 | 5.021 | 42.649 | 8.436 |
| Total | | | | 46.948 | 61.167 | 3.219 | 58.180 | 6.464 | 55.169 | 9.736 | 49.073 | 16.358 |

B.6. Montmorillonita $\phi=40\%$

Tabla B. 22: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica a para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 86.43 | | | Mont Natural 5.170 | | Mont Natural 10.380 | | Mont Natural 15.633 | | Mont Natural 26.267 | |
|--------------|------------|-----------|--------|---------------|--------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
| | | | | | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita | Relave | Montmorillonita |
| | | | | g | g | g | g | g | g | g | g | |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 87.95% | 12.05% | 10.992 | 10.842 | 0.150 | 10.735 | 0.301 | 10.627 | 0.453 | 10.409 | 0.762 |
| 75 | 200 | 75.36% | 12.59% | 11.485 | 11.053 | 0.432 | 10.664 | 0.867 | 10.272 | 1.305 | 9.478 | 2.193 |
| 53 | 270 | 67.54% | 7.82% | 7.131 | 6.671 | 0.460 | 6.235 | 0.925 | 5.796 | 1.392 | 4.907 | 2.340 |
| 45 | 325 | 59.17% | 8.37% | 7.633 | 6.922 | 0.711 | 6.236 | 1.428 | 5.544 | 2.150 | 4.144 | 3.613 |
| 38 | 400 | 54.32% | 4.85% | 4.424 | 3.969 | 0.456 | 3.527 | 0.915 | 3.082 | 1.378 | 2.181 | 2.315 |
| <38 | -400 | | 54.32% | 49.548 | 47.196 | 2.352 | 45.024 | 4.723 | 42.834 | 7.113 | 38.401 | 11.951 |
| Total | | | | 91.214 | 86.653 | 4.561 | 82.422 | 9.158 | 78.156 | 13.792 | 69.521 | 23.174 |

Tabla B. 23: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica c para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 73.99 | | | Mont Natural | 5.170 | Mont Natural | 10.380 | Mont Natural | 15.633 | Mont Natural | 26.267 |
|-----|------------|-----------|--------------|---------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
| | | | | | Relave g | Montmorillonita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 90.36% | 9.64% | 8.794 | 8.644 | 0.150 | 8.528 | 0.301 | 8.411 | 0.453 | 8.174 | 0.762 |
| 75 | 200 | 80.29% | 10.07% | 9.188 | 8.756 | 0.432 | 8.358 | 0.867 | 7.957 | 1.305 | 7.144 | 2.193 |
| 53 | 270 | 74.03% | 6.25% | 5.705 | 5.245 | 0.460 | 4.803 | 0.925 | 4.359 | 1.392 | 3.458 | 2.340 |
| 45 | 325 | 67.34% | 6.69% | 6.106 | 5.395 | 0.711 | 4.703 | 1.428 | 4.005 | 2.150 | 2.593 | 3.613 |
| 38 | 400 | 63.46% | 3.88% | 3.539 | 3.084 | 0.456 | 2.639 | 0.915 | 2.190 | 1.378 | 1.282 | 2.315 |
| <38 | -400 | | 63.46% | 57.882 | 55.529 | 2.352 | 53.390 | 4.723 | 51.234 | 7.113 | 46.869 | 11.951 |
| | | | Total | 91.214 | 86.653 | 91.214 | 82.422 | 91.580 | 78.156 | 91.948 | 69.521 | 92.694 |

Tabla B. 24: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica d para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| um | Malla ASTM | P80 63.94 | | | Mont Natural | 5.170 | Mont Natural | 10.380 | Mont Natural | 15.633 | Mont Natural | 26.267 |
|-----|------------|-----------|--------|---------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-------------------|
| | | Fu IR | fi | Sólidos | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | |
| | | | | | Relave g | Montmorillonita g |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 106 | 140 | 91.56% | 8.44% | 7.694 | 7.545 | 0.150 | 7.424 | 0.301 | 7.303 | 0.453 | 7.057 | 0.762 |
| 75 | 200 | 82.75% | 8.81% | 8.039 | 7.608 | 0.432 | 7.205 | 0.867 | 6.799 | 1.305 | 5.977 | 2.193 |
| 53 | 270 | 77.28% | 5.47% | 4.992 | 4.531 | 0.460 | 4.087 | 0.925 | 3.640 | 1.392 | 2.733 | 2.340 |
| 45 | 325 | 71.42% | 5.86% | 5.343 | 4.632 | 0.711 | 3.937 | 1.428 | 3.236 | 2.150 | 1.817 | 3.613 |
| 38 | 400 | 68.02% | 3.40% | 3.097 | 2.641 | 0.456 | 2.195 | 0.915 | 1.744 | 1.378 | 0.832 | 2.315 |
| <38 | -400 | | 68.02% | 62.048 | 59.696 | 2.352 | 57.574 | 4.723 | 55.434 | 7.113 | 51.104 | 11.951 |
| | | | | 91.214 | 86.653 | 4.561 | 82.422 | 9.158 | 78.156 | 13.792 | 69.521 | 23.174 |

Tabla B. 25: Dosificaciones de relave y montmorillonita por rango granulométrico para $\phi=40\%$, clasificación granulométrica e para contenidos en peso de arcilla en fase sólida de 5%, 10%, 15% y 25% respectivamente.

| | | | | | Mont Natur al | 5.170 | Mont Natur al | 10.380 | Mont Natur al | 15.633 | Mont Natur al | 26.267 | |
|-----|---------------|---------|--------|--------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------|
| | | | | | 5% | | 10% | | 15% | | 25% | | |
| | | | | | Relav e | Montmoril lonita | Relave | Montmo rillonita | Relave | Montmo rillonita | Relave | Montmo rillonita | |
| um | Malla ASTM | Fu IR | fi | Sólidos | g | g | g | g | g | g | g | g | |
| 150 | 100 | 100.00% | 0.00% | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | |
| 106 | 140 | 94.22% | 5.78% | 5.276 | 5.126 | 0.150 | 4.996 | 0.301 | 4.865 | 0.453 | 4.600 | 0.762 | |
| 75 | 200 | 88.17% | 6.04% | 5.513 | 5.081 | 0.432 | 4.668 | 0.867 | 4.252 | 1.305 | 3.409 | 2.193 | |
| 53 | 270 | 84.42% | 3.75% | 3.423 | 2.963 | 0.460 | 2.512 | 0.925 | 2.058 | 1.392 | 1.139 | 2.340 | |
| 45 | 325 | 80.40% | 4.02% | 3.664 | 2.953 | 0.711 | 2.251 | 1.428 | 1.543 | 2.150 | 0.110 | 3.613 | |
| 38 | 400 | 78.07% | 2.33% | 2.124 | 1.668 | 0.456 | 1.217 | 0.915 | 0.763 | 1.378 | -0.157 | 2.315 | |
| <38 | -400 | | 78.07% | 71.215 | 68.86 2 | 2.352 | 66.777 | 4.723 | 64.675 | 7.113 | 60.419 | 11.951 | |
| | | | | Total | 91.214 | 86.65 3 | 4.561 | 82.422 | 9.158 | 78.156 | 13.792 | 69.521 | 23.174 |

Anexo C

Diffractograma del relave

Relave

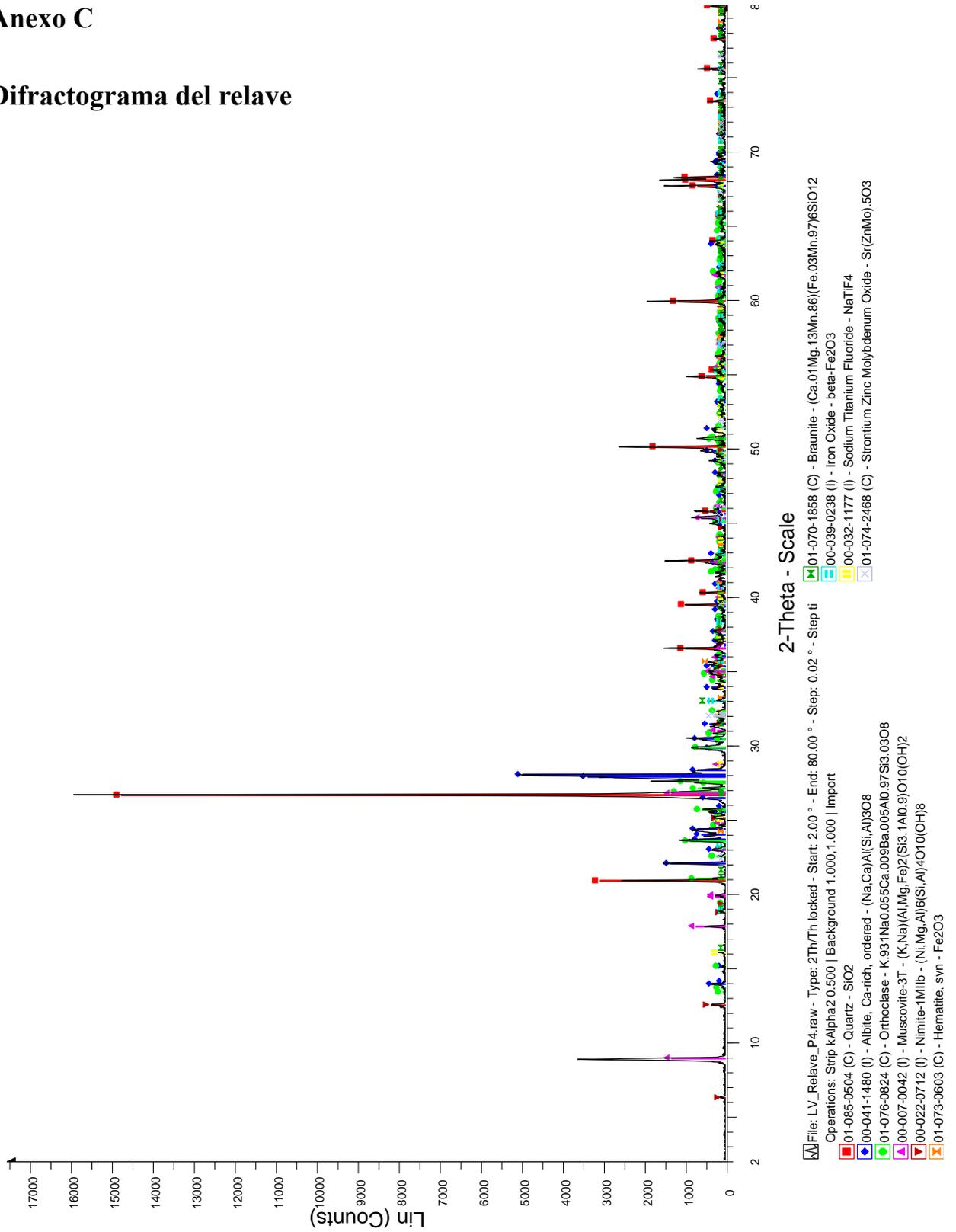


Figura C. 1: Diffractograma del relave

Anexo D

Distribución granulométrica del relave

Tabla D. 1: Resultados de análisis granulométrico por difracción láser del relave.

| Tamaño (µm) | Fi, vol% | Fu, vol% | Tamaño (µm) | Fi, vol% | Fu, vol% | Tamaño (µm) | Fi, vol% | Fu, vol% |
|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| 0.020 | 0 | | 1.002 | 0.42 | 2.33 | 44.774 | 3.01 | 52.28 |
| 0.022 | 0 | 0 | 1.125 | 0.42 | 2.75 | 50.238 | 3.12 | 55.29 |
| 0.025 | 0 | 0 | 1.262 | 0.44 | 3.17 | 56.368 | 3.26 | 58.41 |
| 0.028 | 0 | 0 | 1.416 | 0.46 | 3.61 | 63.246 | 3.41 | 61.67 |
| 0.032 | 0 | 0 | 1.589 | 0.49 | 4.07 | 70.963 | 3.56 | 65.08 |
| 0.036 | 0 | 0 | 1.783 | 0.53 | 4.56 | 79.621 | 3.69 | 68.64 |
| 0.040 | 0 | 0 | 2.000 | 0.57 | 5.09 | 89.337 | 3.78 | 72.33 |
| 0.045 | 0 | 0 | 2.244 | 0.63 | 5.66 | 100.237 | 3.78 | 76.11 |
| 0.050 | 0 | 0 | 2.518 | 0.68 | 6.29 | 112.468 | 3.68 | 79.89 |
| 0.056 | 0 | 0 | 2.825 | 0.75 | 6.97 | 126.191 | 3.47 | 83.57 |
| 0.063 | 0 | 0 | 3.170 | 0.82 | 7.72 | 141.589 | 3.13 | 87.04 |
| 0.071 | 0 | 0 | 3.557 | 0.89 | 8.54 | 158.866 | 2.71 | 90.17 |
| 0.080 | 0 | 0 | 3.991 | 0.97 | 9.43 | 178.250 | 2.23 | 92.88 |
| 0.089 | 0 | 0 | 4.477 | 1.06 | 10.4 | 200.000 | 1.72 | 95.11 |
| 0.100 | 0 | 0 | 5.024 | 1.16 | 11.46 | 224.404 | 1.25 | 96.83 |
| 0.112 | 0 | 0 | 5.637 | 1.26 | 12.62 | 251.785 | 0.81 | 98.08 |
| 0.126 | 0 | 0 | 6.325 | 1.37 | 13.88 | 282.508 | 0.45 | 98.89 |
| 0.142 | 0 | 0 | 7.096 | 1.48 | 15.25 | 316.979 | 0.25 | 99.34 |
| 0.159 | 0 | 0 | 7.962 | 1.61 | 16.73 | 355.656 | 0.18 | 99.59 |
| 0.178 | 0 | 0 | 8.934 | 1.73 | 18.34 | 399.052 | 0.14 | 99.77 |
| 0.200 | 0 | 0 | 10.024 | 1.86 | 20.07 | 447.744 | 0.12 | 99.91 |
| 0.224 | 0 | 0 | 11.247 | 1.99 | 21.93 | 502.377 | 0.01 | 100 |
| 0.252 | 0 | 0 | 12.619 | 2.12 | 23.92 | 563.677 | 0 | 100 |
| 0.283 | 0 | 0 | 14.159 | 2.24 | 26.04 | 632.456 | 0 | 100 |
| 0.317 | 0 | 0 | 15.887 | 2.35 | 28.28 | 709.627 | 0 | 100 |
| 0.356 | 0 | 0 | 17.825 | 2.46 | 30.63 | 796.214 | 0 | 100 |
| 0.399 | 0.07 | 0 | 20.000 | 2.55 | 33.09 | 893.367 | 0 | 100 |
| 0.448 | 0.17 | 0.07 | 22.440 | 2.63 | 35.64 | 1002.374 | 0 | 100 |
| 0.502 | 0.25 | 0.24 | 25.179 | 2.69 | 38.27 | 1124.683 | 0 | 100 |
| 0.564 | 0.3 | 0.49 | 28.251 | 2.75 | 40.96 | 1261.915 | 0 | 100 |
| 0.632 | 0.35 | 0.79 | 31.698 | 2.8 | 43.71 | 1415.892 | 0 | 100 |
| 0.710 | 0.38 | 1.14 | 35.566 | 2.85 | 46.51 | 1588.656 | 0 | 100 |
| 0.796 | 0.4 | 1.52 | 39.905 | 2.92 | 49.36 | 1782.502 | 0 | 100 |
| 0.893 | 0.41 | 1.92 | | | | | | |

Anexo E

Difractograma de la caolinita

Caolinita

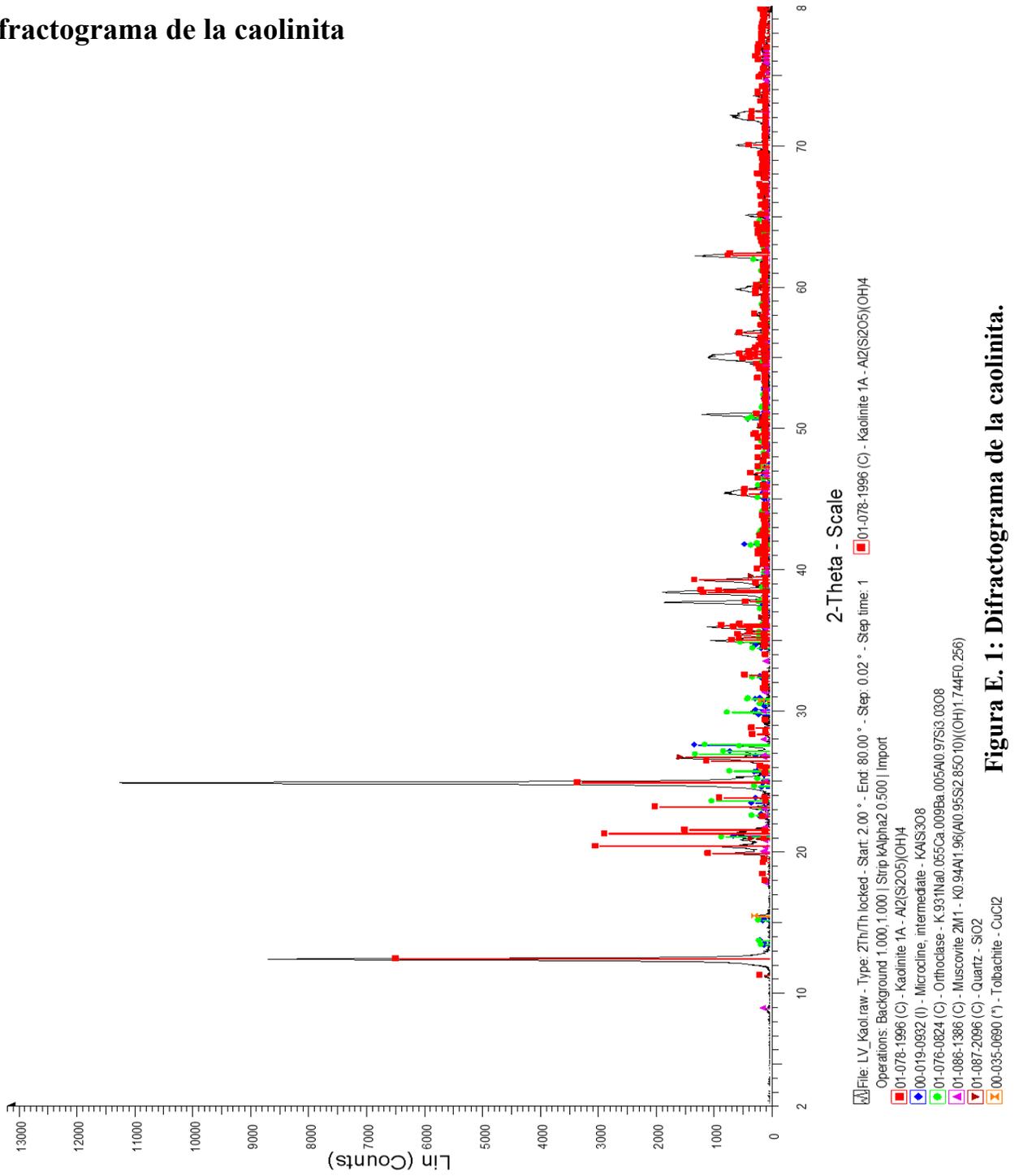


Figura E. 1: Difractograma de la caolinita.

Anexo F

Difractograma de la montmorillonita

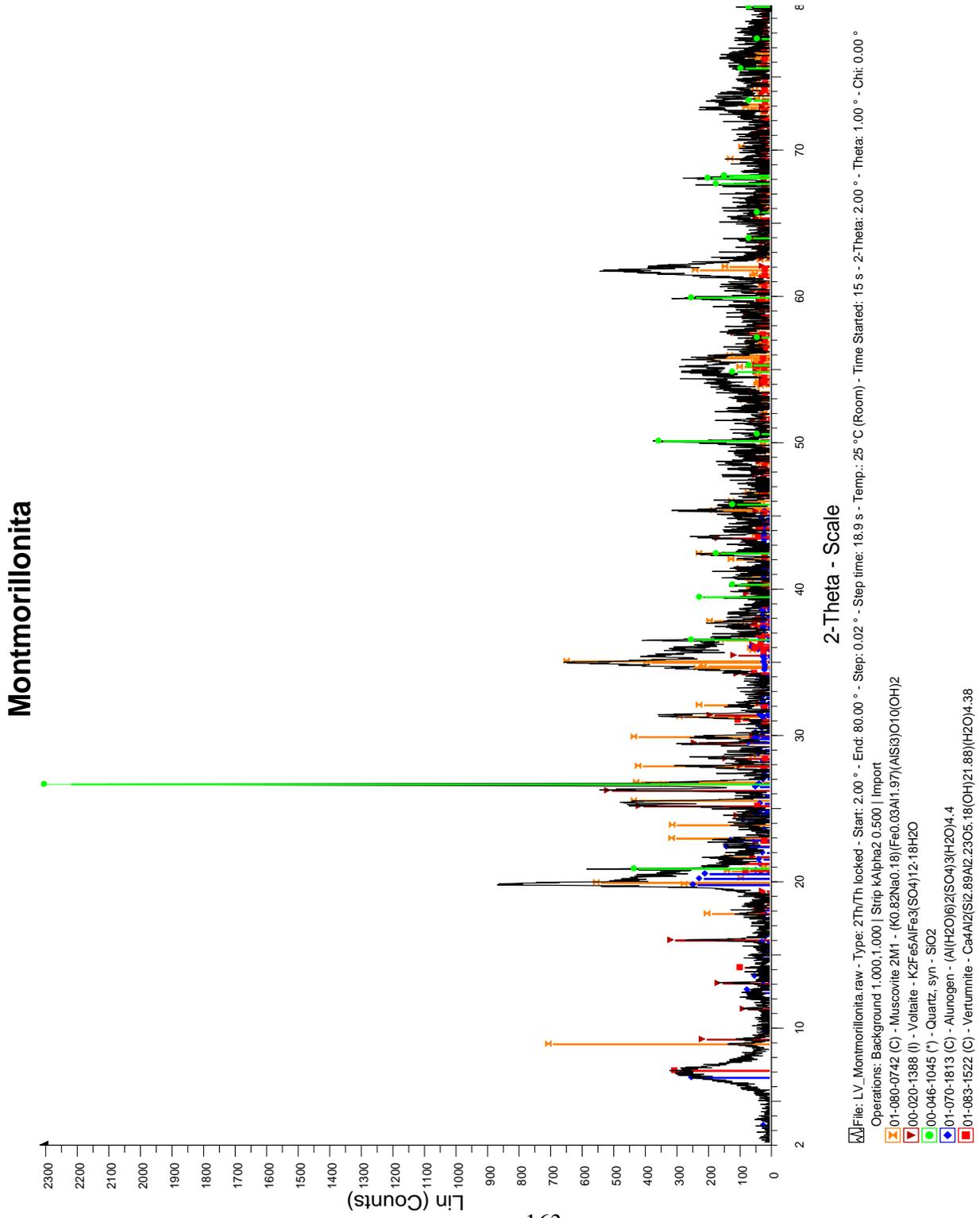


Figura F. 1: Difractograma de la montmorillonita.

Anexo G

Distribución granulométrica caolinita

Tabla G. 1: Resultados de análisis granulométrico por difracción láser de la caolinita.

| Tamaño (μm) | Fi, vol% | Fu, vol% | Tamaño (μm) | Fi, vol% | Fu, vol% | Tamaño (μm) | Fi, vol% | Fu, vol% |
|--|---------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|
| 0.020 | 0 | | 1.002 | 0.55 | 3.23 | 44.774 | 0.23 | 99.62 |
| 0.022 | 0 | 0 | 1.125 | 0.58 | 3.78 | 50.238 | 0.1 | 99.85 |
| 0.025 | 0 | 0 | 1.262 | 0.65 | 4.36 | 56.368 | 0.04 | 99.95 |
| 0.028 | 0 | 0 | 1.416 | 0.77 | 5.01 | 63.246 | 0 | 99.99 |
| 0.032 | 0 | 0 | 1.589 | 0.96 | 5.78 | 70.963 | 0 | 99.99 |
| 0.036 | 0 | 0 | 1.783 | 1.21 | 6.74 | 79.621 | 0 | 99.99 |
| 0.040 | 0 | 0 | 2.000 | 1.52 | 7.95 | 89.337 | 0 | 99.99 |
| 0.045 | 0 | 0 | 2.244 | 1.89 | 9.47 | 100.237 | 0 | 99.99 |
| 0.050 | 0 | 0 | 2.518 | 2.31 | 11.36 | 112.468 | 0 | 99.99 |
| 0.056 | 0 | 0 | 2.825 | 2.77 | 13.67 | 126.191 | 0 | 99.99 |
| 0.063 | 0 | 0 | 3.170 | 3.25 | 16.44 | 141.589 | 0 | 99.99 |
| 0.071 | 0 | 0 | 3.557 | 3.74 | 19.69 | 158.866 | 0 | 99.99 |
| 0.080 | 0 | 0 | 3.991 | 4.21 | 23.43 | 178.250 | 0 | 99.99 |
| 0.089 | 0 | 0 | 4.477 | 4.65 | 27.64 | 200.000 | 0 | 99.99 |
| 0.100 | 0 | 0 | 5.024 | 5.04 | 32.29 | 224.404 | 0 | 99.99 |
| 0.112 | 0 | 0 | 5.637 | 5.35 | 37.33 | 251.785 | 0 | 99.99 |
| 0.126 | 0 | 0 | 6.325 | 5.56 | 42.68 | 282.508 | 0 | 99.99 |
| 0.142 | 0 | 0 | 7.096 | 5.67 | 48.24 | 316.979 | 0 | 99.99 |
| 0.159 | 0 | 0 | 7.962 | 5.66 | 53.91 | 355.656 | 0 | 99.99 |
| 0.178 | 0 | 0 | 8.934 | 5.54 | 59.57 | 399.052 | 0 | 99.99 |
| 0.200 | 0 | 0 | 10.024 | 5.3 | 65.11 | 447.744 | 0 | 99.99 |
| 0.224 | 0 | 0 | 11.247 | 4.96 | 70.41 | 502.377 | 0 | 99.99 |
| 0.252 | 0 | 0 | 12.619 | 4.54 | 75.37 | 563.677 | 0 | 99.99 |
| 0.283 | 0 | 0 | 14.159 | 4.05 | 79.91 | 632.456 | 0 | 99.99 |
| 0.317 | 0 | 0 | 15.887 | 3.54 | 83.96 | 709.627 | 0 | 99.99 |
| 0.356 | 0.02 | 0 | 17.825 | 3.01 | 87.5 | 796.214 | 0 | 99.99 |
| 0.399 | 0.09 | 0.02 | 20.000 | 2.5 | 90.51 | 893.367 | 0 | 99.99 |
| 0.448 | 0.25 | 0.11 | 22.440 | 2.01 | 93.01 | 1002.374 | 0 | 99.99 |
| 0.502 | 0.34 | 0.36 | 25.179 | 1.58 | 95.02 | 1124.683 | 0 | 99.99 |
| 0.564 | 0.43 | 0.7 | 28.251 | 1.19 | 96.6 | 1261.915 | 0 | 99.99 |
| 0.632 | 0.49 | 1.13 | 31.698 | 0.86 | 97.79 | 1415.892 | 0 | 99.99 |
| 0.710 | 0.53 | 1.62 | 35.566 | 0.59 | 98.65 | 1588.656 | 0 | 99.99 |
| 0.796 | 0.54 | 2.15 | 39.905 | 0.38 | 99.24 | 1782.502 | 0 | 99.99 |
| 0.893 | 0.54 | 2.69 | | | | | | |

Anexo H

Distribución granulométrica montmorillonita

Tabla H. 1: Resultados de análisis granulométrico por difracción láser de la caolinita.

| Tamaño (μm) | Fi, vol% | Fu, vol% | Tamaño (μm) | Fi, vol% | Fu, vol% | Tamaño (μm) | Fi, vol% | Fu, vol% |
|--|---------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|
| 0.020 | 0 | | 1.002 | 0.26 | 1.73 | 44.774 | 6.67 | 61.23 |
| 0.022 | 0 | 0 | 1.125 | 0.25 | 1.99 | 50.238 | 6.33 | 67.9 |
| 0.025 | 0 | 0 | 1.262 | 0.25 | 2.24 | 56.368 | 5.81 | 74.23 |
| 0.028 | 0 | 0 | 1.416 | 0.25 | 2.49 | 63.246 | 5.11 | 80.04 |
| 0.032 | 0 | 0 | 1.589 | 0.27 | 2.74 | 70.963 | 4.33 | 85.15 |
| 0.036 | 0 | 0 | 1.783 | 0.28 | 3.01 | 79.621 | 3.51 | 89.48 |
| 0.040 | 0 | 0 | 2.000 | 0.3 | 3.29 | 89.337 | 2.7 | 92.99 |
| 0.045 | 0 | 0 | 2.244 | 0.33 | 3.59 | 100.237 | 1.98 | 95.69 |
| 0.050 | 0 | 0 | 2.518 | 0.35 | 3.92 | 112.468 | 1.37 | 97.67 |
| 0.056 | 0 | 0 | 2.825 | 0.37 | 4.27 | 126.191 | 0.79 | 99.04 |
| 0.063 | 0 | 0 | 3.170 | 0.4 | 4.64 | 141.589 | 0.16 | 99.83 |
| 0.071 | 0 | 0 | 3.557 | 0.43 | 5.04 | 158.866 | 0 | 99.99 |
| 0.080 | 0 | 0 | 3.991 | 0.45 | 5.47 | 178.250 | 0 | 99.99 |
| 0.089 | 0 | 0 | 4.477 | 0.48 | 5.92 | 200.000 | 0 | 99.99 |
| 0.100 | 0 | 0 | 5.024 | 0.52 | 6.4 | 224.404 | 0 | 99.99 |
| 0.112 | 0 | 0 | 5.637 | 0.55 | 6.92 | 251.785 | 0 | 99.99 |
| 0.126 | 0 | 0 | 6.325 | 0.6 | 7.47 | 282.508 | 0 | 99.99 |
| 0.142 | 0 | 0 | 7.096 | 0.66 | 8.07 | 316.979 | 0 | 99.99 |
| 0.159 | 0 | 0 | 7.962 | 0.74 | 8.73 | 355.656 | 0 | 99.99 |
| 0.178 | 0 | 0 | 8.934 | 0.87 | 9.47 | 399.052 | 0 | 99.99 |
| 0.200 | 0 | 0 | 10.024 | 1.04 | 10.34 | 447.744 | 0 | 99.99 |
| 0.224 | 0 | 0 | 11.247 | 1.29 | 11.38 | 502.377 | 0 | 99.99 |
| 0.252 | 0 | 0 | 12.619 | 1.62 | 12.67 | 563.677 | 0 | 99.99 |
| 0.283 | 0 | 0 | 14.159 | 2.04 | 14.29 | 632.456 | 0 | 99.99 |
| 0.317 | 0 | 0 | 15.887 | 2.56 | 16.33 | 709.627 | 0 | 99.99 |
| 0.356 | 0 | 0 | 17.825 | 3.16 | 18.89 | 796.214 | 0 | 99.99 |
| 0.399 | 0.09 | 0 | 20.000 | 3.83 | 22.05 | 893.367 | 0 | 99.99 |
| 0.448 | 0.15 | 0.09 | 22.440 | 4.53 | 25.88 | 1002.374 | 0 | 99.99 |
| 0.502 | 0.2 | 0.24 | 25.179 | 5.21 | 30.41 | 1124.683 | 0 | 99.99 |
| 0.564 | 0.23 | 0.44 | 28.251 | 5.84 | 35.62 | 1261.915 | 0 | 99.99 |
| 0.632 | 0.26 | 0.67 | 31.698 | 6.33 | 41.46 | 1415.892 | 0 | 99.99 |
| 0.710 | 0.27 | 0.93 | 35.566 | 6.66 | 47.79 | 1588.656 | 0 | 99.99 |
| 0.796 | 0.27 | 1.2 | 39.905 | 6.78 | 54.45 | 1782.502 | 0 | 99.99 |
| 0.893 | 0.26 | 1.47 | | | | | | |

Anexo I

Detalle de ajustes de reometrías a modelo de Bingham

Tabla I. 1: Detalle de ajustes de reometrías a modelo de Bingham, parte I.

| Id | ϕ | Arcilla | d80 | Arcillas en fase sólida, wt% | Tasa de corte mínima, 1/s | Tasa de corte máxima, 1/s | Límite de fluencia de Bingham, Pa | Viscosidad de Bingham, Pa·s |
|-----------|--------------------------|-----------------|------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|------------------------------------|
| 1 | 25% | Montmorillonita | 86.43 | 5% | 120 | 240 | 1.08 | 0.0055 |
| 2 | 25% | Montmorillonita | 86.43 | 10% | 120 | 240 | 1.62 | 0.0066 |
| 3 | 25% | Montmorillonita | 86.43 | 15% | 120 | 240 | 1.58 | 0.0079 |
| 4 | 25% | Montmorillonita | 86.43 | 25% | 120 | 240 | 2.38 | 0.0105 |
| 5 | 25% | Montmorillonita | 73.99 | 5% | 100 | 250 | 1.51 | 0.0081 |
| 6 | 25% | Montmorillonita | 73.99 | 10% | 100 | 250 | 1.79 | 0.0091 |
| 7 | 25% | Montmorillonita | 73.99 | 15% | 100 | 250 | 1.95 | 0.0099 |
| 8 | 25% | Montmorillonita | 73.99 | 25% | 100 | 250 | 2.93 | 0.0133 |
| 9 | 25% | Montmorillonita | 63.94 | 5% | 120 | 250 | 1.90 | 0.0087 |
| 10 | 25% | Montmorillonita | 63.94 | 10% | 120 | 250 | 2.12 | 0.0095 |
| 11 | 25% | Montmorillonita | 63.94 | 15% | 120 | 250 | 2.47 | 0.0096 |
| 12 | 25% | Montmorillonita | 63.94 | 25% | 120 | 250 | 2.89 | 0.0131 |
| 13 | 25% | Montmorillonita | 43.79 | 5% | 120 | 250 | 2.64 | 0.0100 |
| 14 | 25% | Montmorillonita | 43.79 | 10% | 120 | 250 | 2.78 | 0.0116 |
| 15 | 25% | Montmorillonita | 43.79 | 25% | 120 | 250 | 2.92 | 0.0118 |
| 16 | 30% | Montmorillonita | 86.43 | 5% | 100 | 260 | 2.91 | 0.0122 |
| 17 | 30% | Montmorillonita | 86.43 | 10% | 100 | 260 | 3.32 | 0.0131 |
| 18 | 30% | Montmorillonita | 86.43 | 15% | 100 | 260 | 6.09 | 0.0170 |
| 19 | 30% | Montmorillonita | 86.43 | 25% | 100 | 260 | 9.23 | 0.0288 |
| 20 | 30% | Montmorillonita | 73.99 | 5% | 100 | 270 | 3.30 | 0.0132 |
| 21 | 30% | Montmorillonita | 73.99 | 10% | 100 | 270 | 4.82 | 0.0152 |
| 22 | 30% | Montmorillonita | 73.99 | 15% | 100 | 270 | 8.74 | 0.0200 |
| 23 | 30% | Montmorillonita | 73.99 | 25% | 100 | 270 | 15.02 | 0.0426 |
| 24 | 30% | Montmorillonita | 63.94 | 5% | 100 | 280 | 3.22 | 0.0143 |
| 25 | 30% | Montmorillonita | 63.94 | 10% | 100 | 280 | 6.07 | 0.0177 |
| 26 | 30% | Montmorillonita | 63.94 | 15% | 100 | 280 | 6.15 | 0.0217 |
| 27 | 30% | Montmorillonita | 63.94 | 25% | 100 | 280 | 13.68 | 0.0437 |
| 28 | 30% | Montmorillonita | 43.79 | 5% | 100 | 280 | 6.76 | 0.0193 |
| 29 | 30% | Montmorillonita | 43.79 | 10% | 100 | 280 | 11.23 | 0.0233 |
| 30 | 30% | Montmorillonita | 43.79 | 15% | 100 | 280 | 12.57 | 0.0291 |
| 31 | 30% | Montmorillonita | 43.79 | 25% | 100 | 280 | 18.93 | 0.0507 |
| 32 | 40% | Montmorillonita | 86.43 | 5% | 100 | 280 | 14.50 | 0.0548 |

Tabla I. 2: Detalle de ajustes de reometrías a modelo de Bingham, parte II.

| Id | ϕ | Arcilla | d80 | Arcillas en fase sólida, wt% | Tasa de corte mínima, 1/s | Tasa de corte máxima, 1/s | Límite de fluencia de Bingham, Pa | Viscosidad de Bingham, Pa·s |
|-----------|--------------------------|-----------------|------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|------------------------------------|
| 33 | 40% | Montmorillonita | 86.43 | 10% | 100 | 280 | 21.24 | 0.0725 |
| 34 | 40% | Montmorillonita | 86.43 | 15% | 100 | 280 | 54.88 | 0.1159 |
| 35 | 40% | Montmorillonita | 86.43 | 25% | 100 | 280 | 107.78 | 0.1568 |
| 36 | 40% | Montmorillonita | 73.99 | 5% | 100 | 280 | 22.53 | 0.0740 |
| 37 | 40% | Montmorillonita | 73.99 | 10% | 100 | 280 | 58.75 | 0.1363 |
| 38 | 40% | Montmorillonita | 73.99 | 15% | 100 | 280 | 68.73 | 0.1767 |
| 39 | 40% | Montmorillonita | 73.99 | 25% | 100 | 280 | 175.85 | 0.2608 |
| 40 | 40% | Montmorillonita | 63.94 | 5% | 100 | 280 | 23.30 | 0.0774 |
| 41 | 40% | Montmorillonita | 63.94 | 10% | 100 | 280 | 37.57 | 0.1255 |
| 42 | 40% | Montmorillonita | 63.94 | 15% | 100 | 280 | 61.76 | 0.2000 |
| 43 | 40% | Montmorillonita | 63.94 | 25% | 100 | 280 | 294.05 | 0.3184 |
| 44 | 40% | Montmorillonita | 43.79 | 5% | 160 | 280 | 44.83 | 0.0969 |
| 45 | 40% | Montmorillonita | 43.79 | 10% | 160 | 280 | 138.85 | 0.1574 |
| 46 | 25% | Caolinita | 86.43 | 5% | 120 | 240 | 0.71 | 0.0062 |
| 47 | 25% | Caolinita | 86.43 | 10% | 120 | 240 | 0.89 | 0.0063 |
| 48 | 25% | Caolinita | 86.43 | 15% | 120 | 240 | 1.41 | 0.0074 |
| 49 | 25% | Caolinita | 86.43 | 25% | 120 | 240 | 2.85 | 0.0094 |
| 50 | 25% | Caolinita | 73.99 | 5% | 120 | 240 | 0.76 | 0.0059 |
| 51 | 25% | Caolinita | 73.99 | 10% | 120 | 240 | 1.02 | 0.0063 |
| 52 | 25% | Caolinita | 73.99 | 15% | 120 | 240 | 1.66 | 0.0075 |
| 53 | 25% | Caolinita | 73.99 | 25% | 120 | 240 | 2.98 | 0.0096 |
| 54 | 25% | Caolinita | 63.94 | 5% | 120 | 240 | 0.95 | 0.0064 |
| 55 | 25% | Caolinita | 63.94 | 10% | 120 | 240 | 1.29 | 0.0074 |
| 56 | 25% | Caolinita | 63.94 | 15% | 120 | 240 | 1.90 | 0.0077 |
| 57 | 25% | Caolinita | 63.94 | 25% | 120 | 240 | 3.44 | 0.0103 |
| 58 | 25% | Caolinita | 43.79 | 5% | 120 | 240 | 1.14 | 0.0076 |
| 59 | 25% | Caolinita | 43.79 | 10% | 120 | 240 | 1.57 | 0.0082 |
| 60 | 25% | Caolinita | 43.79 | 15% | 120 | 240 | 2.02 | 0.0086 |
| 61 | 25% | Caolinita | 43.79 | 25% | 120 | 240 | 4.09 | 0.0113 |
| 62 | 30% | Caolinita | 86.43 | 5% | 120 | 260 | 1.84 | 0.0112 |
| 63 | 30% | Caolinita | 86.43 | 10% | 120 | 260 | 2.85 | 0.0114 |
| 64 | 30% | Caolinita | 86.43 | 15% | 120 | 260 | 3.98 | 0.0139 |

Tabla I. 3: Detalle de ajustes de reometrías a modelo de Bingham, parte III.

| Id | ϕ | Arcilla | d80 | Arcillas en fase sólida, wt% | Tasa de corte mínima, 1/s | Tasa de corte máxima, 1/s | Límite de fluencia de Bingham, Pa | Viscosidad de Bingham, Pa·s |
|-----------|--------------------------|----------------|------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|------------------------------------|
| 65 | 30% | Caolinita | 86.43 | 25% | 120 | 260 | 8.17 | 0.0177 |
| 66 | 30% | Caolinita | 73.99 | 5% | 120 | 280 | 2.63 | 0.0119 |
| 67 | 30% | Caolinita | 73.99 | 10% | 120 | 280 | 4.39 | 0.0134 |
| 68 | 30% | Caolinita | 73.99 | 15% | 120 | 280 | 5.52 | 0.0153 |
| 69 | 30% | Caolinita | 73.99 | 25% | 120 | 280 | 10.68 | 0.0202 |
| 70 | 30% | Caolinita | 63.94 | 5% | 120 | 280 | 3.25 | 0.0125 |
| 71 | 30% | Caolinita | 63.94 | 10% | 120 | 280 | 4.55 | 0.0137 |
| 72 | 30% | Caolinita | 63.94 | 15% | 120 | 280 | 6.51 | 0.0170 |
| 73 | 30% | Caolinita | 63.94 | 25% | 120 | 280 | 11.08 | 0.0222 |
| 74 | 30% | Caolinita | 43.79 | 5% | 120 | 280 | 4.49 | 0.0156 |
| 75 | 30% | Caolinita | 43.79 | 10% | 120 | 280 | 6.74 | 0.0182 |
| 76 | 30% | Caolinita | 43.79 | 15% | 120 | 280 | 9.00 | 0.0191 |
| 77 | 30% | Caolinita | 43.79 | 25% | 120 | 280 | 16.43 | 0.0264 |
| 78 | 40% | Caolinita | 86.43 | 5% | 140 | 280 | 18.74 | 0.0552 |
| 79 | 40% | Caolinita | 86.43 | 10% | 140 | 280 | 27.98 | 0.0569 |
| 80 | 40% | Caolinita | 86.43 | 15% | 140 | 280 | 36.92 | 0.0707 |
| 81 | 40% | Caolinita | 86.43 | 25% | 140 | 280 | 68.69 | 0.1239 |
| 82 | 40% | Caolinita | 73.99 | 5% | 180 | 280 | 31.21 | 0.0666 |
| 83 | 40% | Caolinita | 73.99 | 10% | 180 | 280 | 46.03 | 0.0768 |
| 84 | 40% | Caolinita | 73.99 | 15% | 180 | 280 | 58.90 | 0.0953 |
| 85 | 40% | Caolinita | 73.99 | 25% | 180 | 280 | 100.78 | 0.1555 |
| 86 | 40% | Caolinita | 63.94 | 5% | 180 | 280 | 48.23 | 0.0945 |
| 87 | 40% | Caolinita | 63.94 | 10% | 180 | 280 | 67.87 | 0.1124 |
| 88 | 40% | Caolinita | 63.94 | 15% | 180 | 280 | 86.84 | 0.1501 |
| 89 | 40% | Caolinita | 63.94 | 25% | 180 | 280 | 149.36 | 0.1941 |
| 90 | 40% | Caolinita | 43.79 | 5% | 140 | 280 | 86.71 | 0.1724 |
| 91 | 40% | Caolinita | 43.79 | 10% | 140 | 280 | 121.80 | 0.1936 |
| 92 | 40% | Caolinita | 43.79 | 15% | 140 | 280 | 134.15 | 0.1964 |
| 93 | 40% | Caolinita | 43.79 | 25% | 200 | 280 | 262.11 | 0.3435 |
| 94 | 25% | Línea Base | 86.43 | 0% | 60 | 180 | 0.52 | 0.0073 |
| 95 | 25% | Línea Base | 73.99 | 0% | 60 | 180 | 0.54 | 0.0084 |
| 96 | 25% | Línea Base | 63.94 | 0% | 60 | 180 | 0.69 | 0.0084 |
| 97 | 25% | Línea Base | 43.79 | 0% | 60 | 180 | 0.88 | 0.0091 |
| 98 | 30% | Línea Base | 86.43 | 0% | 60 | 180 | 1.27 | 0.0102 |
| 99 | 30% | Línea Base | 73.99 | 0% | 60 | 180 | 1.45 | 0.0123 |
| 100 | 30% | Línea Base | 63.94 | 0% | 60 | 180 | 1.93 | 0.0134 |

Tabla I. 4: Detalle de ajustes de reometrías a modelo de Bingham, parte IV.

| Id | ϕ | Arcilla | d80 | Arcillas en fase sólida, wt% | Tasa de corte mínima, 1/s | Tasa de corte máxima, 1/s | Límite de fluencia de Bingham, Pa | Viscosidad de Bingham, Pa·s |
|------------|--------------------------|----------------|------------|-------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--|------------------------------------|
| 101 | 30% | Línea Base | 43.79 | 0% | 60 | 180 | 2.88 | 0.0139 |
| 102 | 40% | Línea Base | 86.43 | 0% | 60 | 260 | 9.64 | 0.0462 |
| 103 | 40% | Línea Base | 73.99 | 0% | 60 | 260 | 15.95 | 0.0546 |
| 104 | 40% | Línea Base | 63.94 | 0% | 60 | 260 | 19.11 | 0.0610 |
| 105 | 40% | Línea Base | 43.79 | 0% | 60 | 260 | 34.83 | 0.0964 |

Anexo J

Mediciones de prueba en validación cruzada

J.1 Primera iteración

Tabla J. 1: Mediciones de prueba en primera iteración de validación cruzada.

| Id | ϕ | Arcilla | d80 | Arcillas en fase sólida, wt% | Tasa de corte | | τ_B , Pa | η_B , Pa·s | Log τ_B | Log η_B | Log τ_{VC} | Log η_{VC} |
|-----|--------|---------|-------|------------------------------|---------------|-------------|---------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | | | | | mínima, 1/s | máxima, 1/s | | | | | | |
| 16 | 30% | 2 | 86.43 | 5% | 100 | 260 | 2.91 | 0.0122 | 0.464 | -1.913 | 0.427 | -1.861 |
| 26 | 30% | 2 | 63.94 | 15% | 100 | 280 | 6.15 | 0.0217 | 0.789 | -1.665 | 0.899 | -1.630 |
| 37 | 40% | 2 | 73.99 | 10% | 100 | 280 | 58.75 | 0.1363 | 1.769 | -0.866 | 1.712 | -0.964 |
| 46 | 25% | 1 | 86.43 | 5% | 120 | 240 | 0.71 | 0.0062 | -0.150 | -2.206 | -0.189 | -2.299 |
| 52 | 25% | 1 | 73.99 | 15% | 120 | 240 | 1.66 | 0.0075 | 0.221 | -2.127 | 0.192 | -2.116 |
| 58 | 25% | 1 | 43.79 | 5% | 120 | 240 | 1.14 | 0.0076 | 0.056 | -2.118 | 0.198 | -2.092 |
| 76 | 30% | 1 | 43.79 | 15% | 120 | 280 | 9.00 | 0.0191 | 0.954 | -1.718 | 0.985 | -1.582 |
| 77 | 30% | 1 | 43.79 | 25% | 120 | 280 | 16.43 | 0.0264 | 1.216 | -1.579 | 1.253 | -1.460 |
| 82 | 40% | 1 | 73.99 | 5% | 180 | 280 | 31.21 | 0.0666 | 1.494 | -1.176 | 1.481 | -1.075 |
| 83 | 40% | 1 | 73.99 | 10% | 180 | 280 | 46.03 | 0.0768 | 1.663 | -1.115 | 1.615 | -1.014 |
| 87 | 40% | 1 | 63.94 | 10% | 180 | 280 | 67.87 | 0.1124 | 1.832 | -0.949 | 1.707 | -0.965 |
| 91 | 40% | 1 | 43.79 | 10% | 140 | 280 | 121.80 | 0.1936 | 2.086 | -0.713 | 1.889 | -0.867 |
| 96 | 25% | 0 | 63.94 | 0% | 60 | 180 | 0.69 | 0.0084 | -0.162 | -2.076 | -0.216 | -2.300 |
| 100 | 30% | 0 | 63.94 | 0% | 60 | 180 | 1.93 | 0.0134 | 0.286 | -1.872 | 0.303 | -1.912 |
| 104 | 40% | 0 | 63.94 | 0% | 60 | 260 | 19.11 | 0.0610 | 1.281 | -1.214 | 1.341 | -1.137 |

J.2 Segunda iteración

Tabla J. 2: Mediciones de prueba en segunda iteración de validación cruzada.

| Id | ϕ | Arcilla | d80 | Arcillas en fase sólida, wt% | Tasa de corte | | τ_B , Pa | η_B , Pa·s | Log τ_B | Log η_B | Log τ_{VC} | Log η_{VC} |
|-----|--------|---------|-------|------------------------------|---------------|-------------|---------------|-----------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | | | | | mínima, 1/s | máxima, 1/s | | | | | | |
| 4 | 25% | 2 | 86.43 | 25% | 120 | 240 | 2.38 | 0.0105 | 0.376 | -1.979 | 0.439 | -2.012 |
| 6 | 25% | 2 | 73.99 | 10% | 100 | 250 | 1.79 | 0.0091 | 0.252 | -2.040 | 0.152 | -2.129 |
| 8 | 25% | 2 | 73.99 | 25% | 100 | 250 | 2.93 | 0.0133 | 0.467 | -1.877 | 0.551 | -1.945 |
| 15 | 25% | 2 | 43.79 | 25% | 120 | 250 | 2.92 | 0.0118 | 0.465 | -1.928 | 0.823 | -1.781 |
| 29 | 30% | 2 | 43.79 | 10% | 100 | 280 | 11.23 | 0.0233 | 1.050 | -1.633 | 0.930 | -1.589 |
| 37 | 40% | 2 | 73.99 | 10% | 100 | 280 | 58.75 | 0.1363 | 1.769 | -0.866 | 1.672 | -1.000 |
| 43 | 40% | 2 | 63.94 | 25% | 100 | 280 | 294.05 | 0.3184 | 2.468 | -0.497 | 2.162 | -0.761 |
| 58 | 25% | 1 | 43.79 | 5% | 120 | 240 | 1.14 | 0.0076 | 0.056 | -2.118 | 0.209 | -2.063 |
| 71 | 30% | 1 | 63.94 | 10% | 120 | 280 | 4.55 | 0.0137 | 0.658 | -1.865 | 0.668 | -1.734 |
| 79 | 40% | 1 | 86.43 | 10% | 140 | 280 | 27.98 | 0.0569 | 1.447 | -1.245 | 1.478 | -1.103 |
| 85 | 40% | 1 | 73.99 | 25% | 180 | 280 | 100.78 | 0.1555 | 2.003 | -0.808 | 1.990 | -0.851 |
| 86 | 40% | 1 | 63.94 | 5% | 180 | 280 | 48.23 | 0.0945 | 1.683 | -1.025 | 1.548 | -1.043 |
| 90 | 40% | 1 | 43.79 | 5% | 140 | 280 | 86.71 | 0.1724 | 1.938 | -0.763 | 1.729 | -0.934 |
| 99 | 30% | 0 | 73.99 | 0% | 60 | 180 | 1.45 | 0.0123 | 0.162 | -1.909 | 0.229 | -1.947 |
| 103 | 40% | 0 | 73.99 | 0% | 60 | 260 | 15.95 | 0.0546 | 1.203 | -1.263 | 1.243 | -1.194 |

J.3 Tercera iteración

Tabla J. 3: Mediciones de prueba en tercera iteración de validación cruzada.

| Id | ϕ | Arcilla | d80 | Arcillas en fase sólida, wt% | Tasa de corte | | τ_B, Pa | $\eta_B, Pa \cdot s$ | Log τ_B | Log η_B | Log τ_{VC} | Log η_{VC} |
|------------|--------|---------|-------|------------------------------|---------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | | | | | mínima, 1/s | máxima, 1/s | | | | | | |
| 1 | 25% | 2 | 86.43 | 5% | 120 | 240 | 1.08 | 0.0055 | 0.035 | -2.263 | -0.102 | -2.277 |
| 3 | 25% | 2 | 86.43 | 15% | 120 | 240 | 1.58 | 0.0079 | 0.198 | -2.105 | 0.167 | -2.142 |
| 14 | 25% | 2 | 43.79 | 10% | 120 | 250 | 2.78 | 0.0116 | 0.444 | -1.937 | 0.421 | -1.970 |
| 24 | 30% | 2 | 63.94 | 5% | 100 | 280 | 3.22 | 0.0143 | 0.508 | -1.846 | 0.613 | -1.771 |
| 32 | 40% | 2 | 86.43 | 5% | 100 | 280 | 14.50 | 0.0548 | 1.161 | -1.261 | 1.429 | -1.138 |
| 40 | 40% | 2 | 63.94 | 5% | 100 | 280 | 23.30 | 0.0774 | 1.367 | -1.111 | 1.634 | -1.011 |
| 53 | 25% | 1 | 73.99 | 25% | 120 | 240 | 2.98 | 0.0096 | 0.475 | -2.017 | 0.469 | -1.970 |
| 56 | 25% | 1 | 63.94 | 15% | 120 | 240 | 1.90 | 0.0077 | 0.279 | -2.114 | 0.291 | -2.049 |
| 63 | 30% | 1 | 86.43 | 10% | 120 | 260 | 2.85 | 0.0114 | 0.454 | -1.943 | 0.462 | -1.863 |
| 70 | 30% | 1 | 63.94 | 5% | 120 | 280 | 3.25 | 0.0125 | 0.512 | -1.902 | 0.532 | -1.805 |
| 74 | 30% | 1 | 43.79 | 5% | 120 | 280 | 4.49 | 0.0156 | 0.652 | -1.806 | 0.716 | -1.691 |
| 84 | 40% | 1 | 73.99 | 15% | 180 | 280 | 58.90 | 0.0953 | 1.770 | -1.021 | 1.731 | -0.966 |
| 94 | 25% | 0 | 86.43 | 0% | 60 | 180 | 0.52 | 0.0073 | -0.287 | -2.137 | -0.398 | -2.412 |
| 95 | 25% | 0 | 73.99 | 0% | 60 | 180 | 0.54 | 0.0084 | -0.268 | -2.077 | -0.285 | -2.342 |
| 103 | 40% | 0 | 73.99 | 0% | 60 | 260 | 15.95 | 0.0546 | 1.203 | -1.263 | 1.246 | -1.203 |

J.4 Cuarta iteración

Tabla J. 4: Mediciones de prueba en cuarta iteración de validación cruzada.

| Id | ϕ | Arcilla | d80 | Arcillas en fase sólida, wt% | Tasa de corte | | τ_B , Pa | η_B , Pa·s | $\text{Log } \tau_B$ | $\text{Log } \eta_B$ | $\text{Log } \tau_{VC}$ | $\text{Log } \eta_{VC}$ |
|-----|--------|---------|-------|------------------------------|---------------|-------------|---------------|-----------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|
| | | | | | mínima, 1/s | máxima, 1/s | | | | | | |
| 5 | 25% | 2 | 73.99 | 5% | 100 | 250 | 1.51 | 0.0081 | 0.178 | -2.093 | 0.002 | -2.210 |
| 10 | 25% | 2 | 63.94 | 10% | 120 | 250 | 2.12 | 0.0095 | 0.327 | -2.020 | 0.243 | -2.085 |
| 13 | 25% | 2 | 43.79 | 5% | 120 | 250 | 2.64 | 0.0100 | 0.422 | -2.002 | 0.298 | -2.042 |
| 24 | 30% | 2 | 63.94 | 5% | 100 | 280 | 3.22 | 0.0143 | 0.508 | -1.846 | 0.613 | -1.767 |
| 37 | 40% | 2 | 73.99 | 10% | 100 | 280 | 58.75 | 0.1363 | 1.769 | -0.866 | 1.682 | -0.979 |
| 41 | 40% | 2 | 63.94 | 10% | 100 | 280 | 37.57 | 0.1255 | 1.575 | -0.901 | 1.780 | -0.923 |
| 50 | 25% | 1 | 73.99 | 5% | 120 | 240 | 0.76 | 0.0059 | -0.118 | -2.227 | -0.083 | -2.259 |
| 54 | 25% | 1 | 63.94 | 5% | 120 | 240 | 0.95 | 0.0064 | -0.024 | -2.195 | 0.015 | -2.203 |
| 62 | 30% | 1 | 86.43 | 5% | 120 | 260 | 1.84 | 0.0112 | 0.265 | -1.950 | 0.307 | -1.940 |
| 69 | 30% | 1 | 73.99 | 25% | 120 | 280 | 10.68 | 0.0202 | 1.029 | -1.694 | 0.998 | -1.594 |
| 75 | 30% | 1 | 43.79 | 10% | 120 | 280 | 6.74 | 0.0182 | 0.828 | -1.739 | 0.867 | -1.634 |
| 83 | 40% | 1 | 73.99 | 10% | 180 | 280 | 46.03 | 0.0768 | 1.663 | -1.115 | 1.596 | -1.027 |
| 91 | 40% | 1 | 43.79 | 10% | 140 | 280 | 121.80 | 0.1936 | 2.086 | -0.713 | 1.892 | -0.859 |
| 94 | 25% | 0 | 86.43 | 0% | 60 | 180 | 0.52 | 0.0073 | -0.287 | -2.137 | -0.433 | -2.445 |
| 104 | 40% | 0 | 63.94 | 0% | 60 | 260 | 19.11 | 0.0610 | 1.281 | -1.214 | 1.324 | -1.158 |

J.5 Quinta iteración

Tabla J. 5: Mediciones de prueba en quinta iteración de validación cruzada.

| Id | ϕ | Arcilla | d80 | Arcillas en fase sólida, wt% | Tasa de corte | | τ_B, Pa | $\eta_B, Pa \cdot s$ | Log τ_B | Log η_B | Log τ_{VC} | Log η_{VC} |
|----|--------|---------|-------|------------------------------|---------------|-------------|--------------|----------------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|
| | | | | | mínima, 1/s | máxima, 1/s | | | | | | |
| 1 | 25% | 2 | 86.43 | 5% | 120 | 240 | 1.08 | 0.0055 | 0.035 | -2.263 | -0.103 | -2.259 |
| 6 | 25% | 2 | 73.99 | 10% | 100 | 250 | 1.79 | 0.0091 | 0.252 | -2.040 | 0.144 | -2.132 |
| 13 | 25% | 2 | 43.79 | 5% | 120 | 250 | 2.64 | 0.0100 | 0.422 | -2.002 | 0.272 | -2.048 |
| 18 | 30% | 2 | 86.43 | 15% | 100 | 260 | 6.09 | 0.0170 | 0.784 | -1.771 | 0.682 | -1.748 |
| 20 | 30% | 2 | 73.99 | 5% | 100 | 270 | 3.30 | 0.0132 | 0.518 | -1.878 | 0.517 | -1.818 |
| 36 | 40% | 2 | 73.99 | 5% | 100 | 280 | 22.53 | 0.0740 | 1.353 | -1.131 | 1.538 | -1.058 |
| 41 | 40% | 2 | 63.94 | 10% | 100 | 280 | 37.57 | 0.1255 | 1.575 | -0.901 | 1.764 | -0.942 |
| 43 | 40% | 2 | 63.94 | 25% | 100 | 280 | 294.05 | 0.3184 | 2.468 | -0.497 | 2.175 | -0.746 |
| 48 | 25% | 1 | 86.43 | 15% | 120 | 240 | 1.41 | 0.0074 | 0.148 | -2.129 | 0.092 | -2.171 |
| 53 | 25% | 1 | 73.99 | 25% | 120 | 240 | 2.98 | 0.0096 | 0.475 | -2.017 | 0.475 | -1.978 |
| 54 | 25% | 1 | 63.94 | 5% | 120 | 240 | 0.95 | 0.0064 | -0.024 | -2.195 | 0.016 | -2.190 |
| 69 | 30% | 1 | 73.99 | 25% | 120 | 280 | 10.68 | 0.0202 | 1.029 | -1.694 | 0.986 | -1.598 |
| 78 | 40% | 1 | 86.43 | 5% | 140 | 280 | 18.74 | 0.0552 | 1.273 | -1.258 | 1.349 | -1.162 |
| 83 | 40% | 1 | 73.99 | 10% | 180 | 280 | 46.03 | 0.0768 | 1.663 | -1.115 | 1.596 | -1.035 |
| 94 | 25% | 0 | 86.43 | 0% | 60 | 180 | 0.52 | 0.0073 | -0.287 | -2.137 | -0.399 | -2.410 |

Anexo I

Trabajos presentados en congresos y revistas.

I.1 Achievements from Application of the HyLogger3 to the Mining Industry in Chile.

(APCOM 2015 Proceedings, Fairbanks, AK.)

Victor Montenegro¹, Nicolás Urrutia², Leandro Voisin² and Angus McFarlane³

¹: CSIRO Chile, Santiago, Chile

²: Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Santiago, Chile

³: CSIRO Earth Science and Engineering, Kensington, WA, Australia.

Abstract

A HyLogger-3 has been brought to Chile by the CSIRO Chile Center of Excellence in Mining and Mineral Processing, in collaboration with the Advanced Mining Technology Center (AMTC) of the University of Chile, supported by the Chilean government and industry partners. The use of the HyLogger-3 in Chile opens new alternatives for the mining industry, providing a real opportunity for the local companies to increase their productivities in the future, one of the key objectives of the mining industry today.

Chilean mining companies are facing a crucial challenge, where energy costs are at very high point due to environmental issues and mineral grades that are constantly decreasing as a result of reserve depletion. In order to make mining activity more profitable, more accurate resource estimation, mine planning and geometallurgy becomes necessary. Hyperspectral Logging technology is a non-destructive and fast analytical technique which dramatically increases both the knowledge and the efficiency of geologist's interpretation of geology and mineralogy from drill core. The main objective of this work is to use hyperspectral analysis of core to predict geotechnical and metallurgical properties of ore systems, supporting exploration, mining and mineral processing strategies.

This paper presents the current progress of hyperspectral research following the establishment of an advanced ore characterization laboratory in Chile and preliminary results from Chilean ore for enhancing geological and geometallurgical understanding using hyperspectral data.

I.2 Rheological study of tailings based on hyperspectral characterization using HyLogger3

(Pending)

Urrutia, Nicolas¹; Voisin, Leandro¹; Montenegro, Victor²; Laukamp, Carsten³

²CSIRO Chile, Santiago, Chile

¹Advanced Mining Technology Center, University of Chile, Santiago, Chile

³CSIRO Earth Science and Engineering, Kensington, WA.

Abstract

Tailings transport and disposal is crucial in mining industry due to long-term risks and problems associated with its pumping. The objective of this work is to quantify the effect of solids content by volume, clays (phyllosilicates) content in solid phase and particle size, in the viscosity and yield stress of phyllosilicate-rich tailings. Also, the use of advanced mineral characterization techniques (QXRD, hyperspectral analysis on HyLogger3 and laser diffraction particle size measurements) is assessed as supporting tool for predictive control of tailings rheology. A total of 108 pulps were made by mixing Chilean copper mine tailings with kaolinite and montmorillonite, changing variables as solids content by volume (ϕ), solids particle size (d_{80}), clays content in solid phase ($\text{wt}\%_{\text{clays}}$) and type of clay used in order to obtain flow curves. Two approaches of linear regression were adjusted to predict viscosity and yield stress, where the best is the one that predicts logarithm of η and τ , with a R^2 coefficient equal to 0.975 for predicted $\text{Log}(\tau)$ and 0.960 for predicted $\text{Log}(\eta)$. These models for τ and η were then evaluated using clay abundance values obtained from scanning briquettes with the same composition as the solid phase of the experiments, where kaolinite content was underestimated and montmorillonite overestimated, resulting in a general overestimation of η and τ , with high estimation error for higher values. This work results show that proposed tailings rheology determining variables (solids content by volume, clays (phyllosilicates) content in solid phase, particle size and clay type) are useful to estimate with great precision the viscosity and yield stress of these suspensions, making possible the implementation of predictive control systems of tailings rheology, based on advanced mineral characterization techniques.