

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. Fisicoquímica 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