



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

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA EN LA REOLOGÍA DE
PULPAS BASADO EN TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN AVANZADA**

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

JAVIER NICOLÁS MERRILL CIFUENTES

PROFESOR GUÍA:

LEANDRO VOISIN ARAVENA

PROFESOR CO-GUÍA:

CHRISTIAN IHLE BASCUÑÁN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

VICTOR MONTENEGRO GONZALEZ

ANGUS MCFARLANE

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO

DE: Ingeniero Civil de Minas y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Metalurgia Extractiva.

POR: Javier Nicolás Merrill Cifuentes

FECHA: 18/01/2016

PROFESOR GUIA: Leandro Voisin Aravena

ESTUDIO DEL EFECTO DE LA COMPOSICIÓN MINERALÓGICA EN LA REOLOGÍA DE PULPAS BASADO EN TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN AVANZADA

Las pulpas son ampliamente utilizadas en el procesamiento de minerales ya que permiten el transporte de la roca de granulometría fina además posibilitando la extracción del valioso, es por esto que se hace interesante estudiar sus propiedades reológicas como la viscosidad y esfuerzo de corte de fluencia. Las variables reológicas más empleadas en el procesamiento de minerales son la viscosidad y el esfuerzo de fluencia, las cuales muchas veces actúan como características limitantes de algunos procesos, acotando la capacidad de tratamiento de los equipos, además de aumentar el gasto energético en bombeo y el consumo de agua, entre otros.

El trabajo experimental de este estudio conlleva la ejecución de pruebas reológicas a escala de laboratorio y la caracterización híper-espectral de pulpas considerando variables controladas como: la composición, concentración de sólidos y el pH; siempre midiendo otras variables incidentes como la granulometría, temperatura, etc. Los minerales utilizados en dichas pulpas son conocidos por su incidencia en las propiedades de interés (viscosidad y esfuerzo de fluencia) además de ser constituyentes de gangas de alta abundancia en la industria minera chilena, con el fin de identificar posibles interacciones no intuitivas o cualquier otro fenómeno reológico cuya comprensión pueda significar un beneficio para las labores de concentración.

Por otra parte, el análisis híper-espectral se presenta como una tecnología con las cualidades necesarias para la caracterización mineralógica con fines de control y predicción para la reología de pulpas. El desarrollo de esta tesis se enmarca en el desarrollo del proyecto INNOVA CSIRO – CHILE 10CEII-9007, el cual proveyó como herramienta de caracterización híper-espectral el HyLogger-3.

Luego del trabajo realizado, se encontraron varios efectos sinérgicos entre minerales en la reología de las pulpas, con potencial beneficio para los procesos industriales. También fue posible la detección y cuantificación de los minerales utilizados en este estudio, demostrando una alta precisión, permitiendo así el desarrollo de un modelo de predicción de la viscosidad y el esfuerzo de fluencia para las pulpas sintéticas analizadas.

Se propone el estudio del mecanismo físico-químico de los efectos sinérgicos encontrados, además de la expansión de los modelos para otros pH y la comparación de la reología para pulpas con los mismos minerales con distintas procedencias.

STUDY OF THE EFFECT OF THE MINERALOGICAL COMPOSITION UPON PULP RHEOLOGY BASED ON ADVANCED CHARACTERIZATION TECHNIQUES

Pulps are widely used in minerals processing, since they enable the transportation of fine granulometry rock, as well as allowing for the extraction of the ore, this is why it becomes interesting to study their rheological properties such as viscosity and yield stress, which on many occasions act as limiting characteristics for some processes, delimiting the treatment capacity of the equipment, as well as increasing the energy consumption in pumping and water consumption, among others.

The experimental work of this study implies the execution of rheological testing at a laboratory scale and the hyper-spectral characterization of pulps, taking into account controlled variables such as: composition, solids concentration and pH; always measuring variables that affect such as granulometry, temperature, etc. Minerals used in said pulps are known by their incidence upon the properties of interest (viscosity and yield stress) as well as forming part of highly abundant gangue minerals in the Chilean mining industry, with the purpose of identifying possible non intuitive interactions or any other rheological phenomenon whose understanding may mean a benefit towards the labor of concentration.

On the other hand, hyper-spectral analysis appears as a technology with the necessary qualities towards mineralogical characterization for control and forecasting purposes concerning pulp rheology. The development of this thesis is framed within the development of the INNOVA CSIRO – CHILE 10CEII-9007 project, which provided HyLogger-3 as hyper-spectral characterization tool.

After the work carried out, several synergistic effects were found between minerals in pulp rheology, with a potential benefit for industrial processes. Also, the detection and quantification of the minerals used in this study through the HyLogger-3 hyper-spectral technology, evidencing high accuracy, thus enabling the development of a forecasting model for the viscosity and shear effort of the synthetic pulps analyzed.

The study of the physical-chemical mechanism of the synergistic effects found is proposed, as well as the expansion of the models for other pH levels, and the comparison of rheology for pulps with the same minerals from different origins.

AGRADECIMIENTOS

El hecho de encontrarme en esta situación hoy no es mérito únicamente mío, mi esfuerzo y dedicación son un par de factores dentro de un sistema multi-variable inconmensurable que es la vida de un ser humano, por lo que en esta ocasión haré mención de aquello que de una manera u otra significó que llegara este día.

Quiero agradecer a mi familia, a mi abuelo George, que sin nunca habernos visto, vimos lo mismo por la misma lupa. A mi abuelo Nino y abuela Rut, quienes despertaron mi interés científico antes de aprender a hablar en esa casa llena de cachureos de laboratorio. Para mis padres necesitaría hacer otra tesis completa solo para agradecerles, pero fundamentalmente por inculcarme el pensamiento crítico y la determinación con que hay que hacer las cosas. A mis hermanos que aunque no me eligieron me hacen sentir su cariño genuino, y en general a todos mis familiares porque he sentido su preocupación durante estos años.

Quiero agradecer a mis amigos de la universidad por todos esos trabajos que hicimos y sobre todo esos momentos de distensión que tuvimos o impusimos para no dejarle a la facultad apoderarse de nuestras vidas.

Quiero agradecer a mis amigos del barrio, del colegio y de la vida por siempre recordarme lo que es verdaderamente importante en este mundo con el que tanto disidimos en prioridades. Quiero mencionar especialmente a Tomás F. por una amistad formante como persona y científico, y a Bárbara K. por la paciencia titánica con que me soportó los meses de redacción de esta tesis y porque siempre tuvo el gesto amable que necesité.

Agradecimientos especiales a la gente del proyecto, a mis profesores Leandro Voisin, Christian Ihle y Víctor Montenegro, por todo lo que han implicado en mi desarrollo profesional, pero más importante aún, por disipar mis prejuicios de lo que trabajar como ingeniero sería, que reconozco que algún día me aterró.

Finalmente quiero hacer agradecimientos especiales a Nicolás U. con quien vivimos este proceso a la par, prácticamente desde el año 2008 hasta el 2016, porque aún seguiría haciendo reometrías si no fuera por su ayuda, por su amistad espontánea y por lo cumplidor en el ámbito laboral.

Agradezco sinceramente las oportunidades que tuve, sin olvidar que busco un mundo en donde no se dependa de la suerte para tenerlas.

TABLA DE CONTENIDO

Estudio del Efecto de la Composición Mineralógica en la Reología de Pulpas Basado en Técnicas de Caracterización Avanzada	i
Study of the Effect of the Mineralogical Composition upon Pulp Rheology Based on Advanced Characterization Techniques	ii
Agradecimientos.....	iii
Tabla de Contenido	iv
Índice de Figuras.....	xii
Índice de Ecuaciones	xv
Índice de Tablas	xvii
1. Introducción	1
2. Objetivos.....	3
2.1 Objetivo Principal	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. Estado del Arte	4
3.1 Marco Teórico	4
3.1.1 Pulpa Mineral.....	4
3.1.2 Reología	5
3.1.2.1 Tasa de deformación	5
3.1.2.2 Esfuerzo.....	6
3.1.2.3 Viscosidad.....	6
3.1.2.4 Reograma (Curva de Flujo).....	6
3.1.2.5 Fluidos newtonianos	7
3.1.2.6 Fluidos no-newtonianos	7
3.1.2.7 Esfuerzo de fluencia (esfuerzo de corte de fluencia)	7
3.1.3 Modelos Reológicos	8
3.1.3.1 Modelo de Bingham	8
3.1.3.2 Modelo de Herschel-Bulkley.....	9
3.1.3.3 Modelo de Casson	10
3.1.3.4 Modelos temporales.....	11
3.1.4 Teoría DLVO.....	14
3.1.4.1 Fuerza de Van Der Waals.....	14
3.1.4.2 Doble capa eléctrica (edl).....	16
3.1.4.3 Energía libre neta.....	17

3.1.4.4	Análisis de sensibilidad	19
3.1.5	Fuerzas No-DLVO	22
3.1.5.1	Fuerza de hidratación	22
3.1.5.2	Interacción hidrofóbica	22
3.1.5.3	Efecto estérico	22
3.1.6	Potencial Zeta.....	24
3.1.7	Variables Incidentes en la Reología	26
3.1.7.1	Contenido de sólidos.....	26
3.1.7.2	Granulometría	26
3.1.7.3	Efecto de la temperatura	27
3.1.7.4	Efecto del ph	30
3.1.8	Dispersantes.....	35
3.2	Caracterización Híper-Espectral	41
3.2.1	Espectroscopía de Reflectancia	41
3.2.2	Tecnologías Híper-Espectrales.....	42
3.2.2.1	CoreScan HCI-3.....	43
3.2.2.2	GEOTEK MSCL	44
3.2.2.3	PIMA SP.....	45
3.2.2.4	SisuRock.....	46
3.2.2.5	TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Analyzer	47
3.2.2.6	SpecTIR	48
3.2.2.7	Hyperion Imaging Spectrometer.....	50
3.2.2.8	AVIRIS	51
3.2.2.9	HyLogger-3	52
3.2.3	Tablas Comparativas de Tecnologías	55
3.3	Problemas Asociados a Reología	58
3.3.1	Recuperación Afectada por Gelación	58
3.3.2	Reología Limitante de Capacidad de Tratamiento.....	60
3.3.2.1	Casos Estudiados	61
4.	Metodología Experimental	64
4.1	Consideraciones Generales	64
4.1.1	Caracterización Espectral de Minerales	64
4.1.2	Mediciones Reológicas.....	64
4.2	Estimación de Humedad	67

4.2.1	Materiales y Equipos	67
4.2.2	Procedimiento.....	67
4.2.3	Resultados.....	67
4.3	Estimación de Densidad.....	68
4.3.1	Materiales y Equipos	68
4.3.2	Procedimiento.....	68
4.3.3	Resultados.....	69
4.4	Reometrías.....	70
4.4.1	Materiales y Equipos	70
4.4.2	Preparación de Pulpas	70
4.4.3	Ajuste de pH	71
4.4.3.1	Preparación de soluciones de ajuste de pH.....	71
4.4.4	Medición del Reograma.....	72
4.4.5	Tipos de prueba reológica	72
4.4.6	Set de Pruebas	73
4.4.7	Nomenclatura de Pruebas	74
4.5	Ajuste de Modelo Reológico.....	75
4.6	Caracterización Híper-Espectral	77
4.6.1	Materiales y Equipos	77
4.6.2	Preparación de Muestras (Briquetas)	77
4.6.3	Análisis Híper-Espectral	78
4.7	Esquema Global.....	79
5.	Resultados y Discusión.....	80
5.1	Concentración de Sólidos	80
5.2	Caracterización General.....	81
5.2.1	Granulometría.....	81
5.2.2	Difracción de rayos X.....	82
5.2.2.1	Mica COMACSA (MC)	82
5.2.2.2	Cuarzo Impalpable (CI)	82
5.2.2.3	Caolín COMACSA (CC)	83
5.2.2.4	Bentonita Arica (BA).....	83
5.2.2.5	Bentonita COMACSA (BC).....	84
5.3	Reometrías.....	85
5.3.1	BA10.....	85

5.3.2	MC10	86
5.3.3	CC10	87
5.3.4	CI10	88
5.3.5	BC10	89
5.3.6	Error en Reometrías	90
5.3.7	Análisis Reológico	91
5.3.7.1	Control de viscosidad y esfuerzo de fluencia de la benonita	91
5.3.7.2	Razón Caolín / Mica blanca	95
5.3.7.3	Efecto temporal y del ph en la mica blanca	97
5.4	Caracterización Híper-Espectral	99
5.4.1	BA10	99
5.4.2	BC10	100
5.4.3	CC10	101
5.4.4	MC10	102
5.4.5	CI10	103
5.5	Desarrollo de Modelos de Detección y Cuantificación de minerales basado en caracterización híper-espectral	104
5.5.1	Escalares	104
5.5.2	Enmascarado	105
5.5.3	Caolín COMACSA (CC)	106
5.5.3.1	Detección	106
5.5.3.2	Cuantificación	107
5.5.4	Cuarzo Impalpable (CI)	109
5.5.4.1	Detección	109
5.5.4.2	Cuantificación	109
5.5.5	Bentonita COMACSA (BC)	111
5.5.5.1	Detección	111
5.5.5.2	Cuantificación	112
5.5.6	Bentonita Arica (BA)	114
5.5.6.1	Detección	114
5.5.6.2	Cuantificación	115
5.5.7	Mica COMACSA (MC)	116
5.5.7.1	Detección	116
5.5.7.2	Cuantificación	117

5.5.8	Normalización	119
5.5.9	Evaluación de los Modelos	119
6.	Modelo Integral	120
6.1	Ternarios Mica (MC) – Caolín (CC) – Cuarzo (CI)	120
6.1.1	Modelos Propuestos	121
6.1.2	Evaluación de Modelos.....	122
6.2	Aplicabilidad en la industria.....	126
7.	Conclusiones	128
8.	Bibliografía.....	130
	Anexo	134
1.	Composición de las Pulpas a Cv 30%	134
2.	Composición de las Pulpas a Cv 15% (A)	135
3.	Composición de las Pulpas a Cv 15% (B)	136
4.	XRD bentonita COMACSA (BC)	137
5.	XRD bentonita Arica (BA)	138
6.	XRD caolín COMACSA (CC)	139
7.	XRD mica COMACSA (MC).....	140
8.	XRD cuarzo impalpable (CI)	141
9.	Resultado de ajuste de Bingham Reometrías cv 30%.....	142
10.	Resultado de ajuste de Bingham Reometrías cv 15% (a)	143
11.	Resultado de ajuste de Bingham Reometrías cv 15% (B).....	144
12.	Diagramas ternarios de Viscosidad y Esfuerzo de Fluencia.....	145
12.1	Viscosidad para BA BC CC, Cv 15%, pH 7	145
12.2	Esfuerzo de fluencia para BA BC CC, Cv 15%, pH 7	146
12.3	Viscosidad para BA BC CI, Cv 15%, pH 7	147
12.4	Esfuerzo de fluencia para BA BC CI, Cv 15%, pH 7	148
12.5	Viscosidad para BA BC MC, Cv 15%, pH 7	149
12.6	Esfuerzo de fluencia para BA BC MC, Cv15%, pH 7	150
12.7	Viscosidad para BA CC CI, Cv 30%, pH 7	151
12.8	Esfuerzo de fluencia para BA CC CI, Cv 30%, pH 7	152
12.9	Viscosidad para BA MC CC, Cv 30%, pH 7	153
12.10	Esfuerzo de fluencia para BA MC CC, Cv 30%, pH 7.....	154
12.11	Viscosidad para BA MC CI, Cv 30%, pH 7.....	155
12.12	Esfuerzo de fluencia para BA MC CI, Cv 30%, pH 7	156

12.13	Viscosidad para BC CC CI, Cv 15%, pH 7	157
12.14	Esfuerzo de fluencia para BC CC CI, Cv 15%, pH 7	158
12.15	Viscosidad para BC MC CC, Cv 15%, pH 7	159
12.16	Esfuerzo de fluencia para BC MC CC, Cv 15%, pH 7	160
12.17	Viscosidad para BC MC CI, Cv 15%, pH 7	161
12.18	Esfuerzo de fluencia para BC MC CI, Cv 15%, pH 7	162
12.19	Viscosidad para MC CC CI, Cv 30%, pH 7	163
12.20	Esfuerzo de fluencia para MC CC CI, Cv 30%, pH 7	164
13.	Granulometrías	165
13.1	Fracción bajo tamaño BC3 BA7	165
13.2	Fracción bajo tamaño BC7 BA30	165
13.3	Fracción bajo tamaño BC3 CC7	166
13.4	Fracción bajo tamaño BC7 CC3	166
13.5	Fracción bajo tamaño BC3 MC7	167
13.6	Fracción bajo tamaño BC7 MC3	167
13.7	Fracción bajo tamaño BC3 CI7	168
13.8	Fracción bajo tamaño BC7 CI3	168
13.9	Fracción bajo tamaño BA3 CC7	169
13.10	Fracción bajo tamaño BA7 CC3	169
13.11	Fracción bajo tamaño BA3 MC7	170
13.12	Fracción bajo tamaño BA7 MC3	170
13.13	Fracción bajo tamaño BA3 CI7	171
13.14	Fracción bajo tamaño BA7 CI3	171
13.15	Fracción bajo tamaño CC3 MC7	172
13.16	Fracción bajo tamaño CC7 MC3	172
13.17	Fracción bajo tamaño CC3 CI7	173
13.18	Fracción bajo tamaño CC7 CI3	173
13.19	Fracción bajo tamaño MC3 CI7	174
13.20	Fracción bajo tamaño MC7 CI3	174
13.21	Fracción bajo tamaño BC6 BA2 CC2	175
13.22	Fracción bajo tamaño BC2 BA6 CC2	175
13.23	Fracción bajo tamaño BC3 BA3 CC3	176
13.24	Fracción bajo tamaño BC2 BA2 CC6	176
13.25	Fracción bajo tamaño BC6 BA2 MC2	177

13.26	Fracción bajo tamaño BC2 BA6 MC2	177
13.27	Fracción bajo tamaño BC3 BA3 MC3	178
13.28	Fracción bajo tamaño BC2 BA2 MC6	178
13.29	Fracción bajo tamaño BC6 BA2 CI2	179
13.30	Fracción bajo tamaño BC2 BA6 CI2	179
13.31	Fracción bajo tamaño BC3 BA3 CI3	180
13.32	Fracción bajo tamaño BC2 BA2 CI6	180
13.33	Fracción bajo tamaño BC6 CC2 MC2	181
13.34	Fracción bajo tamaño BC2 CC6 MC2	181
13.35	Fracción bajo tamaño BC3 CC3 MC3	182
13.36	Fracción bajo tamaño BC2 CC2 MC6	182
13.37	Fracción bajo tamaño BC6 CC2 CI2	183
13.38	Fracción bajo tamaño BC2 CC6 CI2	183
13.39	Fracción bajo tamaño BC3 CC3 CI3	184
13.40	Fracción bajo tamaño BC2 CC2 CI6	184
13.41	Fracción bajo tamaño BC6 MC2 CI2	185
13.42	Fracción bajo tamaño BC2 MC6 CI2	185
13.43	Fracción bajo tamaño BC3 MC3 CI3	186
13.44	Fracción bajo tamaño BC2 MC2 CI6	186
13.45	Fracción bajo tamaño BA6 CC2 MC2	187
13.46	Fracción bajo tamaño BA2 CC6 MC2	187
13.47	Fracción bajo tamaño BA3 CC3 MC3	188
13.48	Fracción bajo tamaño BA2 CC2 MC6	188
13.49	Fracción bajo tamaño BA6 CC2 CI2	189
13.50	Fracción bajo tamaño BA2 CC6 CI2	189
13.51	Fracción bajo tamaño BA3 CC3 CI3	190
13.52	Fracción bajo tamaño BA2 CC2 CI6	190
13.53	Fracción bajo tamaño BA6 MC2 CI2	191
13.54	Fracción bajo tamaño BA2 MC6 CI2	191
13.55	Fracción bajo tamaño BA3 MC3 CI3	192
13.56	Fracción bajo tamaño BA2 MC2 CI6	192
13.57	Fracción bajo tamaño CC6 MC2 CI2	193
13.58	Fracción bajo tamaño CC2 MC6 CI2	193
13.59	Fracción bajo tamaño CC3 MC3 CI3	194

13.60	Fracción bajo tamaño CC2 MC2 Cl6	194
14.	Parámetros Escalares	195
14.1	Ajustes Polinomiales (tipo PFIT)	195
14.2	Escalares desde un perfil espectral (Tipo PROFILE)	196
14.3	Escalares a partir de operaciones matemáticas (Tipo ARITH).....	196
15.	Datos Reómetro	197

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Descarga de pulpa mineral.	4
Figura 2: Esquema de dos placas paralelas.	5
Figura 3: Reograma de distintos tipos de fluidos.....	6
Figura 4: Modelo de Bingham.	8
Figura 5: Modelo de Herschel-Bulkley.....	9
Figura 6: Modelo de Casson.	10
Figura 7: Comportamiento tixotrópico y reopéctico.	11
Figura 8: Esquema de interacción de van der Waals.	15
Figura 9: Esquema de la doble capa eléctrica.....	16
Figura 10: Teoría DLVO: Fuerza neta.	17
Figura 11: Fuerza neta.	18
Figura 12: Análisis de sensibilidad de la energía libre neta: constante de Hamaker.	19
Figura 13: Análisis de sensibilidad de la energía libre neta: potencial de superficie.	20
Figura 14: Análisis de sensibilidad de la energía libre neta: concentración de electrolitos.	21
Figura 15: Efecto estérico: Tri-tert-butil-amina.	23
Figura 16: Potencial zeta.....	24
Figura 17: Estabilidad de una suspensión en base al potencial zeta.	25
Figura 18: Diagrama reológico de granulometría vs. concentración de sólidos.	27
Figura 19: Esfuerzo de fluencia vs. temperatura con distintas concentraciones de sólidos.	28
Figura 20: Reograma a distintas temperaturas.	29
Figura 21: Número de Pécelet vs. viscosidad.	30
Figura 22: Efecto del pH en una pulpa de viscosidad dependiente del tiempo.	31
Figura 23: Efecto del pH en el reograma de una pulpa.	32
Figura 24: Esfuerzo de fluencia y viscosidad vs. pH.	33
Figura 25: Comparación del potencial zeta con esfuerzo de fluencia. Ej. 1.	34
Figura 26: Comparación del potencial zeta con esfuerzo de fluencia. Ej. 2.	34
Figura 27: Estabilización estérica y electroestática.	35
Figura 28: Modificación del potencial zeta mediante ácido poli-acrílico en una pulpa de caliza.	36
Figura 29: Esquema del efecto estérico en dos partículas suspendidas.....	36
Figura 30: Configuración de adsorción de polímeros.	37
Figura 31: Efecto de dispersante (Dispex N40) en viscosidad y esfuerzo de fluencia. ...	38
Figura 32: Efecto de dosis de dispersante y pH en el esfuerzo de fluencia.	39
Figura 33: Efecto del peso molecular y dosis de un dispersante polimérico en el esfuerzo de fluencia.....	39
Figura 34: Combinaciones de van der Waals, EDL y efecto estérico.....	40
Figura 35: Espectros característicos.	42
Figura 36: CoreScan HCI-3.....	43
Figura 37: Esquema tridimensional del MSCL.	44
Figura 38: PIMA SP.....	45

Figura 39: SisuROCK.....	46
Figura 40: Escaneo de alta resolución (izquierda) y escaneo de alta velocidad (derecha).	46
Figura 41: TerraSpec 4	47
Figura 42: AisaEAGLE.....	48
Figura 43: Estudio realizado con el AisaEAGLE en el lago Pawnee, Nebraska.....	48
Figura 44: AisaHAWK.....	49
Figura 45: AisaOWL.....	49
Figura 46: Hyperion Imaging Spectrometer.....	50
Figura 47: Mapeo Satelital.....	50
Figura 48: AVIRIS.....	51
Figura 49: Hylogger instalado en el AMTC de la Universidad de Chile.....	53
Figura 50: TSG Software.....	54
Figura 51: Viscosidad vs. tasa de deformación para 100% clorita	59
Figura 52: Viscosidad vs. tasa de deformación para una razón clorita/fluorita de 10:1..	59
Figura 53: Comportamiento de la viscosidad en el tiempo bajo distintas condiciones. ..	61
Figura 54: Efecto del SPA en el potencial zeta y viscosidad de la pulpa.	63
Figura 55: Eficiencia de molienda vs. concentración de sólidos con y sin dispersante. .	63
Figura 56: Problema de sedimentación. Arreglo experimental 1.....	65
Figura 57: Problema de sedimentación. Arreglo experimental 2.....	65
Figura 58: Diferencias en medición de esfuerzo de fluencia por deslizamiento.	66
Figura 59: Secado en Estufa.....	67
Figura 60: Campana de Vacío.....	69
Figura 61: Preparación de Pulpas.....	71
Figura 62: Reometría en proceso.....	72
Figura 63: Agitador WiseCube.....	72
Figura 64: Set de Pruebas Reológicas para la Creación de Diagramas Ternarios.	73
Figura 65: Ajuste de modelo de Bingham.....	75
Figura 66: Comparación de esfuerzo de fluencia en modelo de Bingham.....	75
Figura 67: Comparación de viscosidad plástica en modelo de Bingham.....	76
Figura 68: Briquetas en bandeja de análisis.....	77
Figura 69: Tratamiento en software TSG.....	78
Figura 70: Esquema global del trabajo de investigación.....	79
Figura 71: Prueba Preliminar con Bentonita COMACSA, Cv20%.....	80
Figura 72: Análisis granulométrico, fracción retenida.....	81
Figura 73: Reometría BA10.....	85
Figura 74: Reometría MC10.....	86
Figura 75: Remoetría CC10.....	87
Figura 76: Reometría CI10.....	88
Figura 77: Ternario de viscosidad para BA, BC y CI a Cv 15% y pH 7.....	91
Figura 78: Ternario de esfuerzo de fluencia para BA, BC y CI a Cv 15% y pH 7.....	92
Figura 79: Ternario de viscosidad para Ba, BC y CC a Cv 15% y pH 7.....	93
Figura 80: Ternario de esfuerzo de fluencia para BA, BC y CC a Cv 15% y pH 7.....	94
Figura 81: Ternario de viscosidad para MC, CC y CI a Cv 30% y pH 7.....	95
Figura 82: Ternario de esfuerzo de fluencia para MC, CC y CI a CV 30% y pH 7.....	96

Figura 83: Reogramas mica blanca (MC) Cv 30%.	97
Figura 84: Reometría de 24 horas de mica blanca (MC) a tasa de deformación constante 250 s^{-1} .	98
Figura 85: Caracterización híper-espectral BA10.	99
Figura 86: Caracterización híper-espectral BC10.	100
Figura 87: Caracterización híper-espectral CC10.	101
Figura 88: Caracterización híper-espectral MC10.	102
Figura 89: Caracterización híper-espectral CI10.	103
Figura 90: PFIT 2200 y abundancia de caolín COMACSA (CC).	106
Figura 91: PFIT 1380 y abundancia de caolín COMACSA (CC).	107
Figura 92: Modelo de cuantificación de caolín COMACSA (CC).	108
Figura 93: PFIT 8540 y abundancia de cuarzo (CI).	109
Figura 94: Modelo de cuantificación de cuarzo (CI).	110
Figura 95: Escalares 1910 d y 1910 w y abundancia de bentonita COMACSA (BC).	111
Figura 96: Modelo de cuantificación de bentonita COMACSA (BC).	113
Figura 97: Escalares 1910 d y 1910 w y abundancia de bentonita Arica (BA).	114
Figura 98: Modelo de cuantificación de bentonita Arica (BA).	115
Figura 99: PFIT 9613 y abundancia de mica COMACSA (MC).	116
Figura 100: Área de absorción relativa entre 2300 y 2500 nanómetros vs. abundancia de mica COMACSA (MC) y abundancia de caolín COMACSA (CC).	117
Figura 101: MCscalar2 vs. abundancia de mica COMACSA (MC) y abundancia de caolín COMACSA (CC).	118
Figura 102: Modelo de cuantificación de mica COMACSA (MC).	118
Figura 103: Comparación de modelos para el Esfuerzo de Fluencia.	122
Figura 104: Comparación de modelos para la Viscosidad.	123
Figura 105: Ternario de esfuerzo de fluencia para MC, CC y CI, con los valores medidos, del modelo lineal y del modelo no lineal.	124
Figura 106: Ternario de viscosidad para MC, CC y CI con los valores medidos, del modelo lineal y del modelo no lineal.	125
Figura 107: Esquema de aplicabilidad del modelo desarrollado.	127

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Tasa de deformación en dos placas paralelas.	5
Ecuación 2: Tasa de deformación, definición general.	5
Ecuación 3: Fluidos Newtonianos.	7
Ecuación 4: Modelo de Bingham.	8
Ecuación 5: Modelo de Herschel-Bulkley.	9
Ecuación 6: Modelo de Casson.	10
Ecuación 7: Modelo de Weltman.	11
Ecuación 8: Modelo de Hahn.	11
Ecuación 9: Modelo de Figoni y Shoemaker.	12
Ecuación 10: Modelo de Tiu y Boger.	12
Ecuación 11: Modelo de Leider y Bird.	13
Ecuación 12: Modelo de Bekkour.	13
Ecuación 13: Energía libre, van der Waals, geometría plana.	15
Ecuación 14: Energía libre, van der Waals, dos esferas.	15
Ecuación 15: Energía libre de la doble capa eléctrica.	16
Ecuación 16: Longitud de Debye.	16
Ecuación 17: Energía libre neta.	19
Ecuación 18: Contenido de sólidos en peso y volumen.	26
Ecuación 19: Modelo de esfuerzo de fluencia según temperatura.	28
Ecuación 20: Número de Péclet.	29
Ecuación 21: Humedad en base húmeda.	67
Ecuación 22: Densidad del Mineral.	68
Ecuación 23: Densidad del Agua.	68
Ecuación 24: Conversión de torque a esfuerzo de corte en reómetro RheolabQC.	90
Ecuación 25: Detección caolín COMACSA (CC).	106
Ecuación 26: Modelo de abundancia de caolín COMACSA (CC).	107
Ecuación 27: Detección cuarzo (CI).	109
Ecuación 28: Modelo de cuantificación de cuarzo (CI).	110
Ecuación 29: Detección bentonita COMACSA (BC).	111
Ecuación 30: Coeficiente de posición.	112
Ecuación 31: Modelos ajustados para grupos de abundancia de bentonita COMACSA (BC).	112
Ecuación 32: Modelo de cuantificación de bentonita COMACSA (BC).	112
Ecuación 33: Detección bentonita Arica (BA).	114
Ecuación 34: Modelos ajustados para grupos de abundancia de bentonita Arica (BA).	115
Ecuación 35: Modelo de cuantificación de bentonita Arica (BA).	115
Ecuación 36: Detección mica COMACSA (MC).	116
Ecuación 37: Modelo de cuantificación de mica COMACSA (MC).	117
Ecuación 38: Normalización de las abundancias.	119
Ecuación 39: MAPE: Promedio del error porcentual absoluto.	119
Ecuación 40: MAD: Promedio de la desviación absoluta.	119

Ecuación 41: Modelo lineal para el esfuerzo de fluencia del ternario MC – CC – CI....	121
Ecuación 42: Modelo lineal para la viscosidad del ternario MC – CC – CI.....	121
Ecuación 43: Modelo no lineal para el esfuerzo de fluencia del ternario MC – CC – CI.	121
Ecuación 44: Modelo no lineal para la viscosidad del ternario MC – CC – CI.....	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación entre las dos fuerzas de la teoría DLVO.	14
Tabla 2: Descripción de pruebas reológicas a distinto pH.....	31
Tabla 3: Minerales y rangos espectrales de detección.....	52
Tabla 4: Tabla comparativa de equipos portables de análisis híper-espectral.	55
Tabla 5: Tabla comparativa de equipos fijos de análisis híper-espectral.	56
Tabla 6: Tabla comparativa de equipos de mapeo híper-espectral.....	57
Tabla 7: Medición de viscosidad vs. tiempo con y sin dispersante.....	61
Tabla 8: Humedad en base Húmeda.....	67
Tabla 9: Densidad de los Minerales.	69
Tabla 10: Set de Pruebas Reológicas para la Creación de Diagramas Ternarios.....	73
Tabla 11: Recuento de Pruebas de Reometría.	74
Tabla 12: Resultados de la caracterización general de los materiales.....	81
Tabla 13: Resultado qXRD mica COMACSA (MC).	82
Tabla 14: Resultado qXRD cuarzo (CI).	82
Tabla 15: Resultado qXRD caolín COMACSA (CC).....	83
Tabla 16: Resultado qXRD bentonita Arica (BA).....	83
Tabla 17: Resultado qXRD bentonita COMACSA (BC).....	84
Tabla 18: Error del modelo de Bingham en el rango ajustado.....	90
Tabla 19: Enmascarado y cantidad de datos.	105
Tabla 20: Evaluación de los modelos de abundancia.	119
Tabla 21: Datos para regresiones y resultados.	121
Tabla 22: MAD y MAPE para modelos de viscosidad y esfuerzo de fluencia.....	123

1. INTRODUCCIÓN

Las pulpas minerales son fases heterogéneas presentes en prácticamente toda planta metalúrgica. Consisten básicamente en una mezcla de roca triturada con agua y se les puede encontrar en el procesamiento de casi todos los minerales, excepto aquellos donde el valioso es separado por *sorting* en granulometrías gruesas, como es el caso de las piedras preciosas. En particular en la minería del cobre se generan luego del chancado, al ser mezclado el mineral con agua para alimentar los molinos. Luego de la molienda la pulpa es clasificada según el tamaño de las partículas mediante el uso de hidrociclones, y una vez adquirida la granulometría deseada se alimenta la misma a flotación. Los productos de flotación son nuevamente dos pulpas de distintas características: un concentrado (rico en minerales valiosos) y un relave (rico en minerales de ganga). Luego el relave es enviado a fases de separación sólido/líquido donde se intenta recuperar la mayor cantidad de agua posible de la pulpa mediante sedimentación, y el concentrado es enviado a una etapa de filtrado que busca el mismo objetivo.

La reología es el estudio de la deformación y el flujo de la materia, y dado que las pulpas minerales son transportadas mediante bombeo, gradientes de presión o gravitacionalmente a través de canales y/o tuberías, es necesario conocer las propiedades reológicas de éstas y en lo ideal ser capaces de modelarlas y predecirlas, y en el mejor caso controlarlas.

Las propiedades estudiadas son la viscosidad y el esfuerzo de corte de fluencia y las principales variables que inciden en ellas son la concentración de sólidos, granulometría, temperatura, pH, concentración y tipo de reactivos y mineralogía.

Por otra parte, para representar los fenómenos reológicos de las pulpas minerales resulta fundamental comprender las interacciones entre las partículas de roca en el medio acuoso y las fuerzas que las dominan. Los fenómenos reológicos son manifestaciones macroscópicas de la interacción microscópica que ocurre entre las partículas y entre estas con el fluido por lo que además es necesario profundizar en la físico-química de superficies y sus variables determinantes.

Para fines de esta investigación se decidió utilizar la temperatura ambiental principalmente debido a que la mayoría de los procesos se llevan a cabo en un rango en torno a la temperatura ambiente dentro del cual no existe un impacto suficientemente significativo en la reología. El pH de los experimentos se decidió fijar en torno a 7, ya que como se verá más adelante, el pH tiene gran incidencia en las propiedades reológicas por lo que se debe fijar para poder comparar las reometrías, y la granulometría al ser muy

final no pudo ser controlada sin embargo fue medida para tenerla en consideración a la hora de analizar los resultados.

El principal enfoque de esta investigación es sentar las bases para construir modelos geo-metalúrgicos predictivos del comportamiento reológico de las pulpas minerales a partir de la caracterización mineralógica utilizando análisis hiper-espectral, que permitan tomar acciones afines para evitar escenarios que pudiesen resultar perjudiciales para el funcionamiento de la operación, como detenciones de planta o fallas de equipos de bombeo y transporte.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de esta investigación es contribuir al desarrollo de sistemas de apoyo a la operación de concentración de especies de valor a través de una comprensión del impacto de la mezcla de minerales en la reología de una pulpa, enfocándose en algunos de los grupos minerales de ganga más comunes y abundantes de la minería chilena como son el cuarzo y las micas blancas, y otros conocidos por su alto impacto en la viscosidad y esfuerzo de fluencia, como son la bentonita y el caolín, utilizando como principal herramienta de caracterización el análisis hiper-espectral.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar reológicamente un conjunto de pulpas sintéticas de mineralogía controlada.
- Generar diagramas ternarios de viscosidad y esfuerzo de fluencia.
- Identificar mineralogías que causen ascensos abruptos en la viscosidad y/o esfuerzo de fluencia.
- Evaluar la factibilidad del uso de la caracterización hiper-espectral para el desarrollo de sistemas de control reológico.
- Caracterizar hiper-espectralmente las pulpas medidas.
- Identificar las componentes minerales que inciden en el modelo predictivo de comportamiento reológico de pulpas.
- Identificar y estudiar otros comportamientos reológicos sobresalientes que pudiesen significar un beneficio para la industria.

3. ESTADO DEL ARTE

3.1 MARCO TEÓRICO

Antes de comenzar con la definición del estado del arte es importante clarificar algunos conceptos que se utilizarán recurrentemente a lo largo de este informe, sobre todo en el lenguaje técnico minero y aquel relacionado con la reología.

3.1.1 PULPA MINERAL

Es una mezcla de agua y roca triturada de un tamaño suficientemente fino para mantenerse en suspensión mientras es transportada por canaletas o tuberías por bombeo o gravitacionalmente. Se encuentran en casi todos los procesos industriales metalúrgicos a partir de la etapa de molienda. Su principal característica es simplificar la tarea del manejo del mineral molido a granulometrías finas.



FIGURA 1: DESCARGA DE PULPA MINERAL.

FUENTE: [HTTP://WWW.MEP.NET.AU/TEACHINGRESEARCH/MEP_TEACHINGRESEARCH_12.HTML](http://www.mep.net.au/teachingresearch/MEP_TEACHINGRESEARCH_12.html)

3.1.2 REOLOGÍA

Es el estudio de la deformación y el flujo de la materia, principalmente establece la relación entre la tasa de deformación y el esfuerzo de corte.

3.1.2.1 TASA DE DEFORMACIÓN

Es la velocidad con que cambia la forma de la materia cuando es sometida a un esfuerzo de corte, definiéndose en el caso de dos placas paralelas como:

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta L}{t} \cdot \frac{1}{h}$$

ECUACIÓN 1: TASA DE DEFORMACIÓN EN DOS PLACAS PARALELAS.

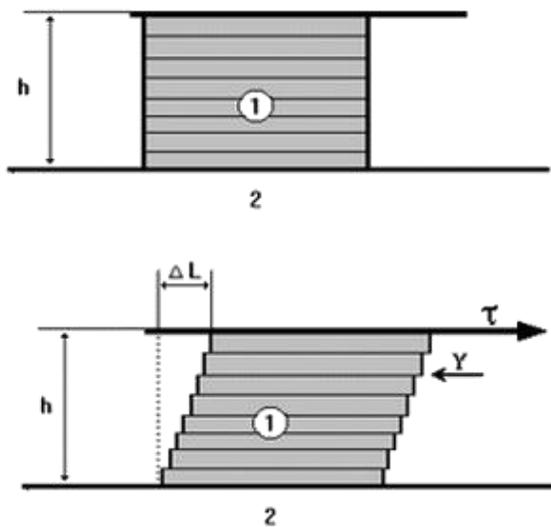


FIGURA 2: ESQUEMA DE DOS PLACAS PARALELAS.

FUENTE: [HTTP://WWW.FREEDOM.INF.BR/ARTIGOS_TECNICOS/hc56/img_1.gif](http://www.freedom.inf.br/artigos_tecnicos/hc56/img_1.gif)

En el caso general la tasa de deformación se define como:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy}$$

ECUACIÓN 2: TASA DE DEFORMACIÓN, DEFINICIÓN GENERAL.

Donde v_x es paralelo al flujo e y es perpendicular.

3.1.2.2 ESFUERZO

En la mecánica de sólidos continuos, el esfuerzo se define como la cantidad física que representa las fuerzas internas entre partículas vecinas en un material continuo.

Esfuerzo de corte

Es la componente del esfuerzo que es co-planar a una sección transversal de un material continuo.

3.1.2.3 VISCOSIDAD

Es la oposición que manifiesta un fluido a deformaciones graduales producidas por un esfuerzo de corte.

3.1.2.4 REOGRAMA (CURVA DE FLUJO)

Es una representación gráfica del esfuerzo de corte vs. la tasa de deformación para un fluido determinado. La forma de esta curva permite clasificar el comportamiento del fluido. En un reograma la pendiente de la curva es la viscosidad del fluido.

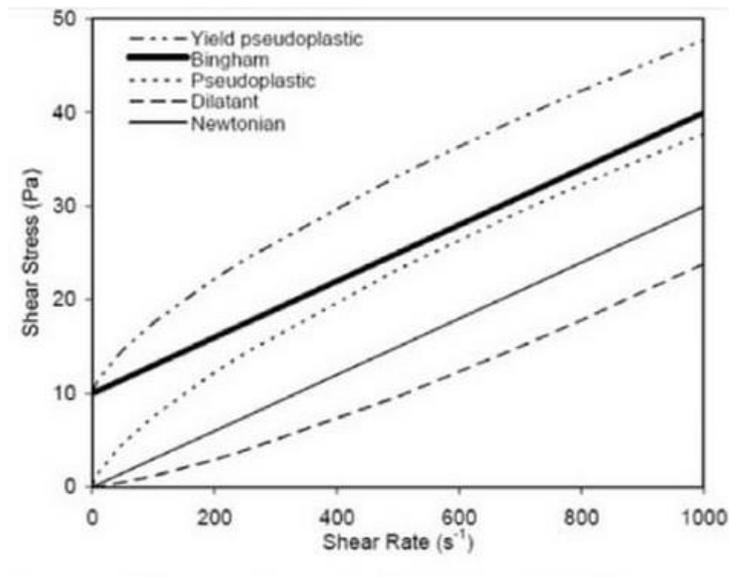


FIGURA 3: REOGRAMA DE DISTINTOS TIPOS DE FLUIDOS.

(CRAWFORD, SITTERT, & WALT, 2012)

3.1.2.5 FLUIDOS NEWTONIANOS

Son aquellos cuya viscosidad es constante para cualquier tasa de deformación y momento, y su esfuerzo de fluencia es cero, es decir:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$$

ECUACIÓN 3: FLUIDOS NEWTONIANOS.

3.1.2.6 FLUIDOS NO-NEWTONIANOS

Son aquellos que muestran comportamientos distintos al anteriormente descrito, dentro de los cuales podemos encontrar:

- Pseudoplásticos: viscosidad disminuye con el aumento de la tasa de deformación.
- Dilatantes: viscosidad aumenta con el aumento de la tasa de deformación.
- Plásticos de Bingham: requieren de un esfuerzo mínimo mayor a cero para comenzar a fluir, una vez superado ese umbral exhiben un comportamiento lineal del esfuerzo vs. la tasa de deformación.
- Tixotrópicos: la viscosidad disminuye en el tiempo para una tasa de deformación constante.
- Reopéticos (Anti-tixotrópicos): la viscosidad aumenta en el tiempo para una tasa de deformación constante.
- Otros fluidos cuyos comportamientos son distintos a los antes descritos.

3.1.2.7 ESFUERZO DE FLUENCIA (ESFUERZO DE CORTE DE FLUENCIA)

Es el esfuerzo de corte mínimo requerido para que una sustancia comience a comportarse como un líquido y fluya, propiedad que es distinta de cero para los plásticos de Bingham y otros fluidos No-Newtonianos.

3.1.3 MODELOS REOLÓGICOS

El modelamiento de la reología de las pulpas no es una tarea sencilla debido a los comportamientos complejos que muchas veces estas exhiben; viscosidades dependientes de la tasa de deformación y del tiempo. A continuación se mostrarán las propiedades principales de los modelos más utilizados en la reología de pulpas minerales, los modelos de Bingham, de Herschel-Bulkley y de Casson.

3.1.3.1 MODELO DE BINGHAM

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}$$

ECUACIÓN 4: MODELO DE BINGHAM.

τ_0 = esfuerzo de fluencia (Pa)
 η_p = viscosidad plástica (Pa·s)
 τ = esfuerzo de corte (Pa)
 $\dot{\gamma}$ = tasa de deformación (s⁻¹)

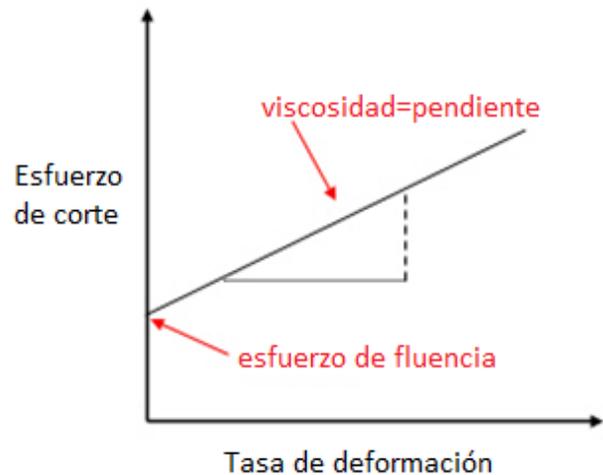


FIGURA 4: MODELO DE BINGHAM.

En la práctica, un plástico de Bingham se comporta como un sólido hasta superado cierto esfuerzo de fluencia, a partir del cual comienza a fluir y la viscosidad es lineal respecto de la tasa de deformación, como en un fluido newtoniano.

3.1.3.2 MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY

$$\tau = \tau_0 + k(\dot{\gamma})^n$$

ECUACIÓN 5: MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY.

τ_0 =esfuerzo de fluencia (Pa)
 n =índice de comportamiento
 τ =esfuerzo de corte (Pa)
 $\dot{\gamma}$ =tasa de deformación (s^{-1})
 k =índice de consistencia

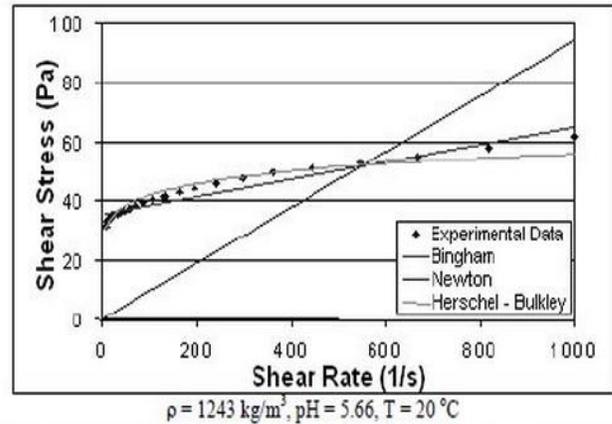


Figure 20. Rheological behavior of water+kaolinitic clay mixture with $C_v = 15\%$.

FIGURA 5: MODELO DE HERSCHEL-BULKLEY.

(Maciel, Kiryu, & Ferreira, 2009)

Este modelo tiene se caracteriza por requerir de un esfuerzo de fluencia, y una vez superado comienza un comportamiento de fluido pseudoplástico o dilatante según el índice de comportamiento. Este modelo es utilizado también en la industria de los alimentos y no considera dependencias temporales (Mokhtari & East, 2011).

3.1.3.3 MODELO DE CASSON

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

ECUACIÓN 6: MODELO DE CASSON.

τ_c =esfuerzo de fluencia (Pa)

η_c =viscosidad (Pa·s)

τ =esfuerzo de corte (Pa)

$\dot{\gamma}$ =tasa de deformación (s^{-1})

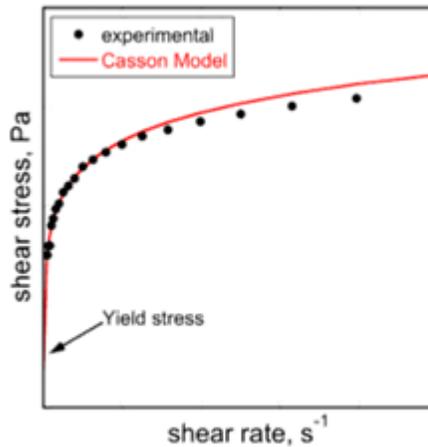


FIGURA 6: MODELO DE CASSON.

La principal característica de este modelo es que presenta un ascenso abrupto del esfuerzo de corte y luego del esfuerzo de fluencia, luego disminuyendo la viscosidad conforme la tasa de deformación aumenta. También considera un comportamiento pseudoplástico. Este modelo es utilizado en la *hemo-reología*, que es el estudio reológico de la sangre (Mokhtari & East, 2011).

3.1.3.4 MODELOS TEMPORALES

Además de los modelos mencionados, fueron revisados otros modelos con el fin de conocer soluciones propuestas por otros científicos al comportamiento dependiente del tiempo, que se ha reportado en pulpas de algunas mineralogías.

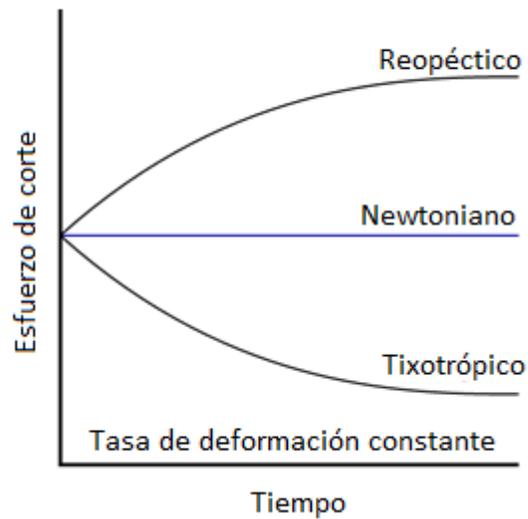


FIGURA 7: COMPORTAMIENTO TIXOTRÓPICO Y REOPÉCTICO.

Modelo de Weltman

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

ECUACIÓN 7: MODELO DE WELTMAN.

Con A y B constantes y t el tiempo transcurrido para una tasa de deformación constante dada (Mokhtari & East, 2011).

Modelo de Hahn

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

ECUACIÓN 8: MODELO DE HAHN.

Con P y a constantes, τ_e el esfuerzo de corte de equilibrio (estacionario), y t el tiempo transcurrido para una tasa de deformación constante dada (Mokhtari & East, 2011).

Modelo de Figoni y Shoemaker

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

ECUACIÓN 9: MODELO DE FIGONI Y SHOEMAKER.

Con k constante, τ_{max} esfuerzo de corte máximo, τ_e el esfuerzo de corte de equilibrio y t el tiempo transcurrido para una tasa de deformación constante dada (Mokhtari & East, 2011).

Ahora, los modelos mencionados son capaces de ajustarse al comportamiento viscoso cambiante en el tiempo, sin embargo solo sirven para tasas de deformación constante.

Modelo de Tiu y Boger

Este modelo incluye explícitamente el efecto de la tasa de deformación y del tiempo:

$$\tau = f(\lambda, \dot{\gamma}) = \lambda(\tau(\cdot))$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = -k_1(\lambda - \lambda_e)^2$$

ECUACIÓN 10: MODELO DE TIU Y BOGER.

Dónde λ es llamado parámetro estructural, y va desde 1 a un valor λ_e de equilibrio. Además $\tau(\cdot)$ puede ser cualquier modelo reológico (Ej.: Casson, Herschel-Bulkley).

Este modelo es más complejo y propone añadir un parámetro de *decaimiento de estructuras*, el cual pretende simular las propiedades estructurales que le dan al fluido su carácter dependiente del tiempo tales como el alineamiento o formación de estructuras de las partículas y/o moléculas con la dirección de flujo (Mcfarlane & Bremmell, 2005; Nosrati, Addai-Mensah, & Skinner, 2011)

Modelo de Leider y Bird

Leider & Bird (1974) proponen un modelo para fluidos no-newtonianos de comportamiento dependiente del tiempo definido por el parámetro λ , el cual es llamado constante temporal, cuyo efecto decae de forma exponencial.

$$\tau_{yx}(t) = \tau_{yx} \left(1 - (b\dot{\gamma}t - 1) \exp\left(-\frac{t}{a n \lambda}\right) \right)$$
$$\tau_{yx}(t) = K\dot{\gamma}^n \left(1 - (b\dot{\gamma}t - 1) \exp\left(-\frac{t}{a n \lambda}\right) \right)$$

ECUACIÓN 11: MODELO DE LEIDER Y BIRD.

En la Ecuación 11 a , b y n son parámetros ajustables. Este modelo no considera un esfuerzo de fluencia, es decir, para cualquier esfuerzo mayor a cero existe una tasa de deformación mayor a cero.

Modelo de Bekkour

Bekkour *et al.* (2005) toma el modelo propuesto por Leider & Bird (1974) con la diferencia que reemplaza la función para el esfuerzo de corte por la relación de Herschel- Bulkley, donde $\tau_{yx} = K\dot{\gamma}^n + \tau_0$.

$$\tau_{yx} = (K\dot{\gamma}^n + \tau_0) \left(1 - (b\dot{\gamma}t - 1) \exp\left(-\frac{t}{a n \lambda}\right) \right)$$

ECUACIÓN 12: MODELO DE BEKKOUR.

Este modelo incluye los efectos no-newtonianos de cambio de viscosidad según esfuerzo de fluencia, además de las dependencias temporales y el esfuerzo de fluencia.

3.1.4 TEORÍA DLVO

Esta teoría recibe su nombre de las iniciales de los 4 científicos que la elaboraron: Derjaguin, Landau (Rusos), Verwey y Overbeek (Alemanes). Esta teoría fue desarrollada en 1940 y ha demostrado ser esencial en la comprensión de la estabilidad de materiales coloidales y suspensiones, como las pulpas minerales (Ghosh, n.d.).

Propone que existe una barrera generada por la fuerza de repulsión que previene a las partículas de acercarse y adherirse unas a otras, pero que si dos partículas colisionan con suficiente energía para superar la barrera, una fuerza de atracción las unirá de manera irreversible en la mayoría de los casos (Ghosh, n.d.).

Fuerzas de la teoría DLVO:

Fuerza de Atracción	Fuerza de Repulsión
<ul style="list-style-type: none">• Fuerza de van der Waals.	<ul style="list-style-type: none">• Doble capa electrostática.
<ul style="list-style-type: none">• Dominante a separaciones muy pequeñas entre superficies.	<ul style="list-style-type: none">• Dominante a distancias mayores.
<ul style="list-style-type: none">• Prácticamente insensible a la concentración de electrolitos.	<ul style="list-style-type: none">• Altamente sensible a la concentración de electrolitos.

TABLA 1: COMPARACIÓN ENTRE LAS DOS FUERZAS DE LA TEORÍA DLVO.

3.1.4.1 FUERZA DE VAN DER WAALS

El origen de esta fuerza se encuentra en las interacciones dipolo-dipolo, dipolo-dipolo inducido y dipolo inducido-dipolo inducido, donde producto del acercamiento de dos moléculas o átomos, las nubes de electrones se distorsionan generando cargas locales que terminan por crear fuerzas de atracción (Figura 8).

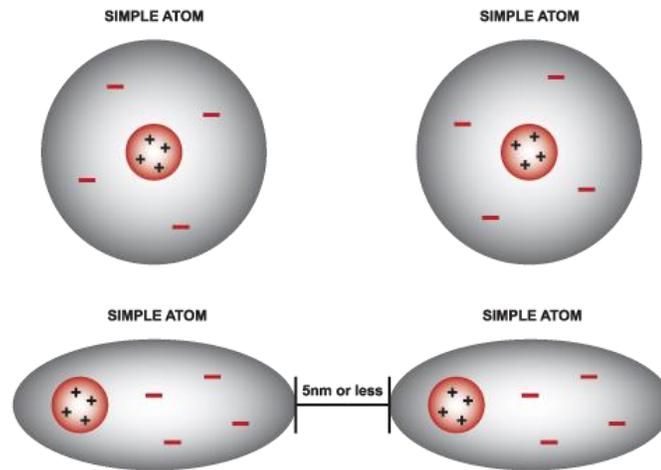


FIGURA 8: ESQUEMA DE INTERACCIÓN DE VAN DER WAALS.

FUENTE: [HTTP://CDN.ZMESCIENCE.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2013/07/VAN-DER-WAALS-FORCE.PNG](http://cdn.zmescience.com/wp-content/uploads/2013/07/van-der-waals-force.png)

La energía libre producto de la fuerza de van der Waals entre dos superficies planas se calcula con la siguiente expresión:

$$\phi_{vdw} = -\frac{A_H}{12\pi\delta^2} \left[\frac{J}{m^2} \right]$$

ECUACIÓN 13: ENERGÍA LIBRE, VAN DER WAALS, GEOMETRÍA PLANA.

Donde la constante de Hamaker $A_H = \pi^2 C \rho_1 \rho_2 [J]$, $\rho_i \left[\frac{1}{m^3} \right]$ es la densidad numérica de la superficie i y $\delta [m]$ es la distancia entre las superficies. Esta expresión nace de realizar la integral de superficie para dos superficies asumiendo una fuerza de atracción de la forma $-C/r^n$ donde $n = 6$ para van der Waals.

Ahora, si queremos escribir la ecuación para dos esferas de radio R_1 y R_2 respectivamente, la expresión queda:

$$\phi_{vdw} = -\frac{A_H}{6\delta} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} [J]$$

ECUACIÓN 14: ENERGÍA LIBRE, VAN DER WAALS, DOS ESFERAS.

3.1.4.2 DOBLE CAPA ELÉCTRICA (EDL)

La *doble capa eléctrica* es la estructura que se forma en la superficie de un objeto cuando es puesto en contacto con un fluido. La primera capa (capa de Stern) comprende los iones adsorbidos directamente a la superficie del objeto (cuya carga puede ser positiva o negativa) mientras la segunda capa (capa difusa) son los iones atraídos por la primera capa que la apantallan eléctricamente.

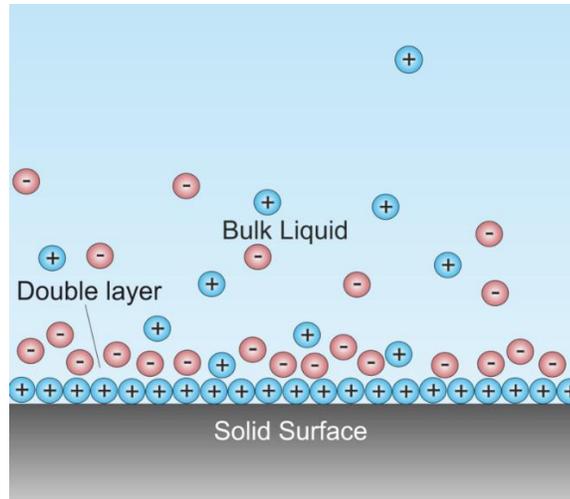


FIGURA 9: ESQUEMA DE LA DOBLE CAPA ELÉCTRICA.

FUENTE: [HTTP://UPLOAD.WIKIMEDIA.ORG/WIKIPEDIA/COMMONS/THUMB/9/95/DOUBLE_LAYER.PNG/800PX-DOUBLE_LAYER.PNG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/95/DOUBLE_LAYER.PNG/800px-DOUBLE_LAYER.PNG)

La expresión matemática para la energía libre de la EDL es:

$$\phi_{EDL} = (64k_B T \rho_{\infty} \kappa^{-1}) \tanh^2 \left(\frac{ze\psi_0}{4k_B T} \right) \exp(-\kappa\delta) \left[\frac{J}{m^2} \right]$$

ECUACIÓN 15: ENERGÍA LIBRE DE LA DOBLE CAPA ELÉCTRICA.

Siendo $\tanh \left(\frac{ze\psi_0}{4k_B T} \right)$ el potencial de superficie reducido, $\psi_0 [J]$ el potencial de superficie, $k_B \left[\frac{J}{K} \right]$ la constante de Boltzmann, $\delta [m]$ la distancia entre superficies y $T [K]$ la temperatura. Además tenemos la longitud de Debye ($\kappa [m]$) que se calcula con la siguiente expresión:

$$\kappa = \left(\sum_i \frac{\rho_{\infty,i} e^2 z_i^2}{\epsilon_r \epsilon_0 k_B T} \right)^{\frac{1}{2}}$$

ECUACIÓN 16: LONGITUD DE DEBYE.

Donde ϵ_r y ϵ_0 son la permisividad relativa y del vacío respectivamente, $\rho_{\infty,i}$ es la concentración del ion i en el seno de la solución y z_i es el estado de oxidación del ion i .

3.1.4.3 ENERGÍA LIBRE NETA

Finalmente, es la combinación de ambas fuerzas, según la teoría DLVO, la que determina el comportamiento de las partículas sólidas en una suspensión.

La fuerza neta es finalmente la suma de ambas fuerzas:

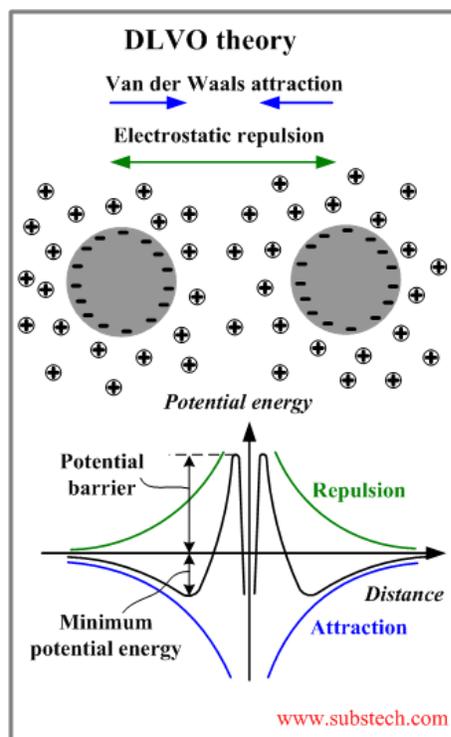


FIGURA 10: TEORÍA DLVO: FUERZA NETA.

FUENTE: [HTTP://WWW.SUBSTECH.COM](http://www.substech.com)

Ahora, la forma de estas curvas dependerá de las propiedades de cada sistema:

- Propiedades fisicoquímicas de superficie de las fases sólidas (mineralogía).
- Concentración de electrolitos en el medio acuoso (reactivos, mineralogía, pH).

En la Figura 11 se presenta una forma típica de la curva de potencial identificando una serie de elementos de interés. El equilibrio termodinámico se encuentra en el mínimo primario, sin embargo para llegar a él es necesario sobrepasar la barrera de energía de manera que las partículas tenderán a sentarse en el mínimo secundario donde se genera una adhesión reversible, la cual es, en algunos casos, responsable del esfuerzo de corte de fluencia.

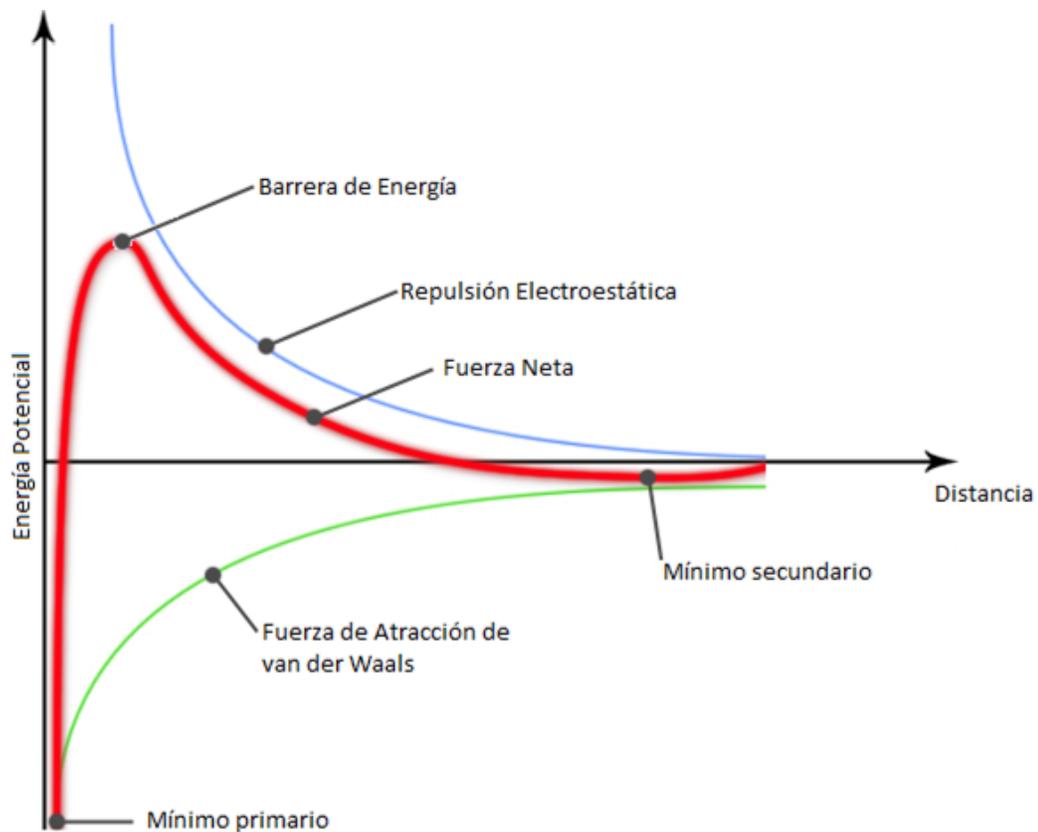


FIGURA 11: FUERZA NETA.

FUENTE: [HTTP://WWW.SIDEBLOW.COM/A6/DLVO.JPG](http://www.sideblow.com/A6/DLVO.JPG)

La energía libre neta queda definida por la siguiente ecuación:

$$\phi_{neta} = \phi_{EDL} + \phi_{vdW}$$

$$\phi_{neta} = (64k_B T \rho_{\infty} \kappa^{-1}) \tanh^2 \left(\frac{ze\psi_0}{4k_B T} \right) \exp(-\kappa\delta) - \frac{A_H}{12\pi\delta^2} \left[\frac{J}{m^2} \right]$$

ECUACIÓN 17: ENERGÍA LIBRE NETA.

3.1.4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En esta sección se graficará la energía libre para ciertos parámetros dados, de manera de observar cómo afectan los distintos parámetros de la ecuación a la barrera de potencial para el caso más sencillo, atracción de Van der Waals y repulsión de la EDL.

Constante de Hamaker

$$\rho_{\infty} = 10 \left[\frac{mol}{m^3} \right]$$

$$\psi_0 = 100 [mV]$$

$$\kappa^{-1} = 3 [nm]$$

$$A_H = 1 \times 10^{-20}, \quad 5 \times 10^{-20}, \quad 1 \times 10^{-19} [J]$$

$$T = 298 [K]$$

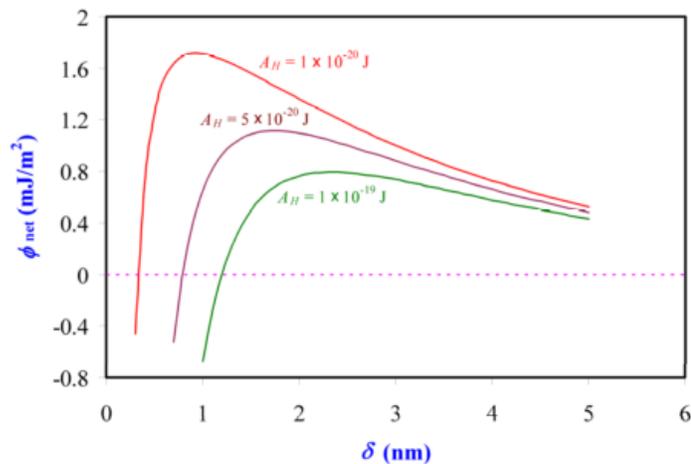


FIGURA 12: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA ENERGÍA LIBRE NETA: CONSTANTE DE HAMAKER.

(GHOSH, N.D.)

Al aumentar la constante de Hamaker se observa que decrece la barrera de potencial, esta constante depende de las propiedades de las superficies, es decir **depende de la mineralogía**.

Potencial de superficie

$$\rho_{\infty} = 10 \left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\psi_0 = 50, \quad 100, \quad 200 \text{ [mV]}$$

$$\kappa^{-1} = 3 \text{ [nm]}$$

$$A_H = 1 \times 10^{-20} \text{ [J]}$$

$$T = 298 \text{ [K]}$$

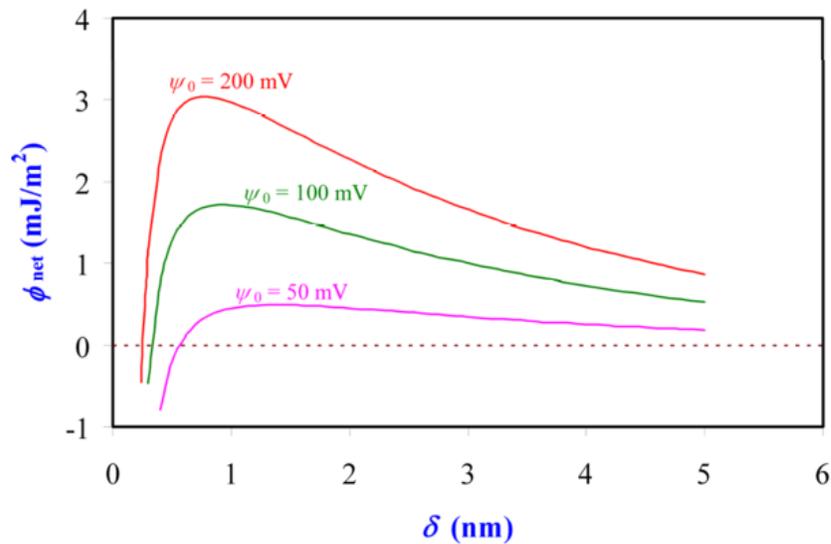


FIGURA 13: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA ENERGÍA LIBRE NETA: POTENCIAL DE SUPERFICIE.

(GHOSH, N.D.)

Al aumentar el potencial de superficie aumenta la barrera debido a una mayor atracción de iones a la doble capa eléctrica, estabilizando la suspensión.

Concentración de electrolitos

$$\rho_{\infty} = 1, \quad 10, \quad 100, \quad 500 \left[\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\psi_0 = 100 [\text{mV}]$$

$$\kappa^{-1} = 3 [\text{nm}]$$

$$A_H = 5 \times 10^{-20} [\text{J}]$$

$$T = 298 [\text{K}]$$

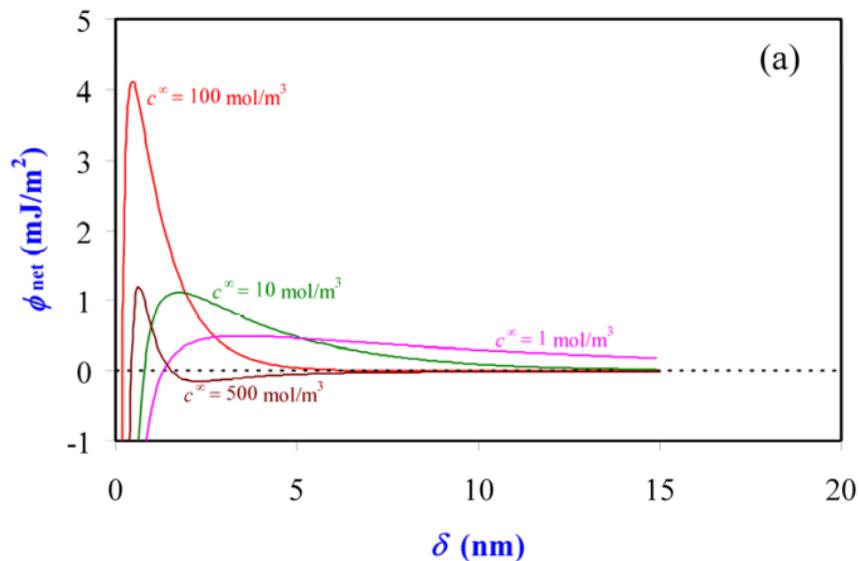


FIGURA 14: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA ENERGÍA LIBRE NETA: CONCENTRACIÓN DE ELECTROLITOS.

(GHOSH, N.D.)

En este caso el efecto es menos intuitivo dado que la concentración de electrolitos también afecta la longitud de Debye. Podemos apreciar que en la medida que aumentamos la concentración aumenta la barrera de potencial debido a un fortalecimiento de la EDL, sin embargo para concentraciones extremas ($500 \text{ mol}/\text{m}^3$ en este caso) la barrera disminuyó y además se generó un mínimo secundario.

Algunos reactivos que pretenden modificar las propiedades reológicas de una pulpa (“dispersión” en términos más generales) modifican la repulsión de la doble capa eléctrica para aumentar o disminuir la agregación de partículas.

3.1.5 FUERZAS NO-DLVO

Ahora, si bien la teoría DLVO ha sido corroborada por diversos experimentos, hay veces en que se ven grandes desviaciones del comportamiento predicho por esta, y es aquí donde se proponen modelos de otras fuerzas llamadas no-DLVO para explicar dichas desviaciones. A continuación mencionaremos las dos más comunes.

3.1.5.1 FUERZA DE HIDRATACIÓN

Es una fuerza de repulsión que se observó cuando se esperaba que la fuerza de van der Waals dominara sin embargo no ocurría ningún tipo de coagulación. Se propuso que esta fuerza aparece cuando cationes hidratados adsorbidos por una superficie se resisten a ser removidos por la aproximación de otra superficie.

Se ha visto este tipo de fuerza incluso en superficies hidrofóbicas debido a un fenómeno llamado *hidratación secundaria* donde la superficie hidrofóbica adsorbe iones hidratados (Ghosh, n.d.).

3.1.5.2 INTERACCIÓN HIDROFÓBICA

Es una fuerza de atracción que se aprecia, por ejemplo, en los hidrocarburos donde la atracción entre estos es mucho más fuerte que lo predicho por el modelo de fuerza de atracción de van der Waals. Si bien aún se debate el origen de esta fuerza, lo más aceptado es que se debe al arreglo que hacen las moléculas de agua en torno a las superficies hidrofóbicas (Ghosh, n.d.).

3.1.5.3 EFECTO ESTÉRICO

Encuentra su origen en el hecho de que cada átomo ocupa un espacio determinado y hay un costo energético asociado a traslapar las nubes de electrones, es decir, es una fuerza de repulsión, a veces se combina con la repulsión electroestática generando el efecto electro-estérico.

Un ejemplo conocido de este efecto es la molécula de tri-tert-butil-amina, la cual tiene un átomo de nitrógeno en su centro con un par libre de electrones sin embargo la cinética de reacción de esta molécula para cualquier caso es extremadamente lenta debido únicamente al efecto estérico.

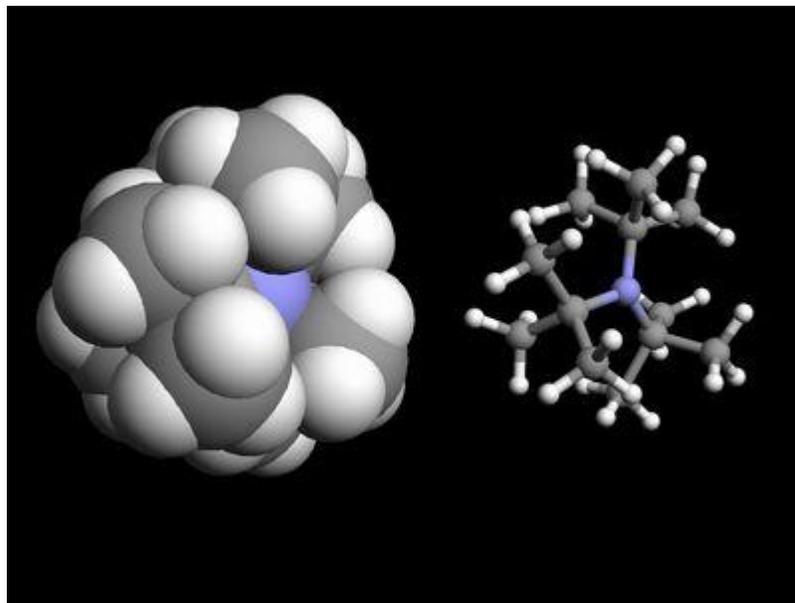


FIGURA 15: EFECTO ESTÉRICO: TRI-TERT-BUTIL-AMINA.

FUENTE: [HTTP://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/STERIC_EFFECTS#MEDIAVIEWER/FILE:TRITERBUTILAMIN.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/Steric_effects#mediaviewer/File:Triterbutilamin.JPG)

En la Figura 15 el átomo azul del centro representa el átomo de nitrógeno, el cual no puede reaccionar a pesar de tener un par libre de electrones debido al efecto estérico ocasionado por los átomos de la molécula que lo rodean.

Este es el efecto mediante el cual algunos reactivos disminuyen la viscosidad y esfuerzo de fluencia (dispersantes), evitando la formación la adherencia entre partículas al no permitir una cercanía suficiente para que la fuerza de van der Waals predomine.

3.1.6 POTENCIAL ZETA

El potencial zeta (ζ) es el potencial eléctrico del plano externo (plano de deslizamiento) de la doble capa eléctrica en relación a un punto en el seno del fluido, lejos de la superficie del objeto.

Es causado por la carga eléctrica neta en la región del plano de deslizamiento de la doble capa eléctrica y es normalmente utilizado para cuantificar la magnitud de la carga de un objeto (partícula), pero es importante recordar que no es igual al potencial de Stern ni al potencial de superficie y se usa porque es más fácil de medir que los otros.

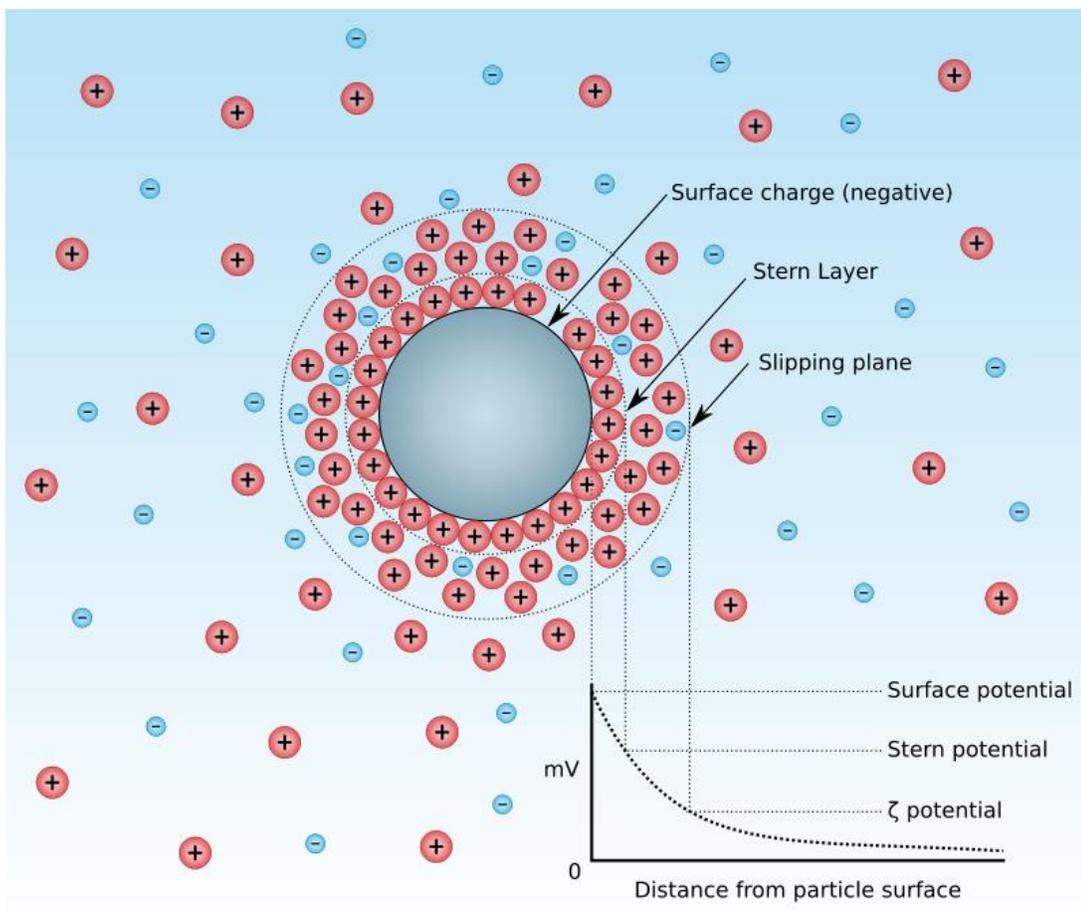


FIGURA 16: POTENCIAL ZETA.

FUENTE:

[HTTP://UPLOAD.WIKIMEDIA.ORG/WIKIPEDIA/COMMONS/THUMB/0/05/DIAGRAM_OF_ZETA_POTENTIAL_AND_SLIPPING_PLANEV2.SVG/800PX-DIAGRAM_OF_ZETA_POTENTIAL_AND_SLIPPING_PLANEV2.SVG.PNG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/05/Diagram_of_zeta_potential_and_slipping_planeV2.svg/800px-Diagram_of_zeta_potential_and_slipping_planeV2.svg.png)

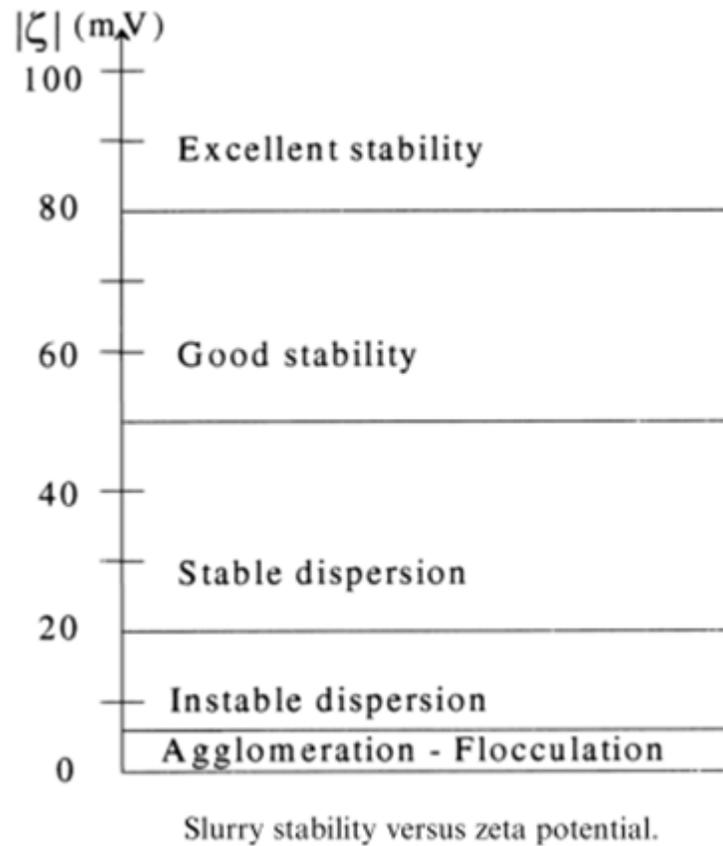


FIGURA 17: ESTABILIDAD DE UNA SUSPENSIÓN EN BASE AL POTENCIAL ZETA.
 (VALLAR, HOUIVET, EL FALLAH, KERVADEC, & HAUSSONNE, 1999)

Debido a la repulsión electrostática, algunos autores (Vallar *et al.*, 1999) proponen que el grado de estabilidad de una suspensión sin formar agregados ni adhesión de partículas depende del rango de potencial zeta (Figura 17).

3.1.7 VARIABLES INCIDENTES EN LA REOLOGÍA

3.1.7.1 CONTENIDO DE SÓLIDOS

Probablemente la primera variable a mencionar sea la concentración de sólidos en la pulpa. Este parámetro se mide en porcentaje en masa (o peso) o en porcentaje en volumen:

$$C_p = \frac{G_s}{G_T} [\%] \quad , \quad C_v = \frac{Q_s}{Q_T} [\%]$$

ECUACIÓN 18: CONTENIDO DE SÓLIDOS EN PESO Y VOLUMEN.

Con G_s y Q_s el flujo másico y volumétrico de sólidos respectivamente, y G_T y Q_T el flujo másico y volumétrico total de pulpa. Cuando hablamos de reología es más común la utilización del valor volumétrico ya que los fenómenos de interacción entre partículas están ligados a fenómenos espaciales como la probabilidad de colisión, entre otros.

3.1.7.2 GRANULOMETRÍA

La segunda variable que encontramos es la distribución de tamaños en que se encuentran los sólidos, ya que naturalmente no será lo mismo una pulpa con granos de roca muy gruesos, que sedimentan rápidamente, que granos finos capaces de mantenerse en suspensión con mayor facilidad sin embargo con mayor superficie de roce.

Una aproximación básica a la interacción de estas dos variables (concentración de sólidos y granulometría) fue realizada por diversos autores (He, Wang, & Forssberg, 2004), creando el diagrama de la Figura 18 que explica el comportamiento reológico.

En el diagrama es posible identificar que la viscosidad aumenta con la disminución de tamaño y con el aumento de concentración de sólidos (notar que el tamaño aumenta hacia la izquierda). También se ve que con un aumento de tamaño y de la concentración de sólidos pasamos de un fluido dilatante a uno pseudoplástico. Por último, cabe destacar que el esfuerzo de fluencia aumenta con la cantidad de sólidos y disminuye con el tamaño.

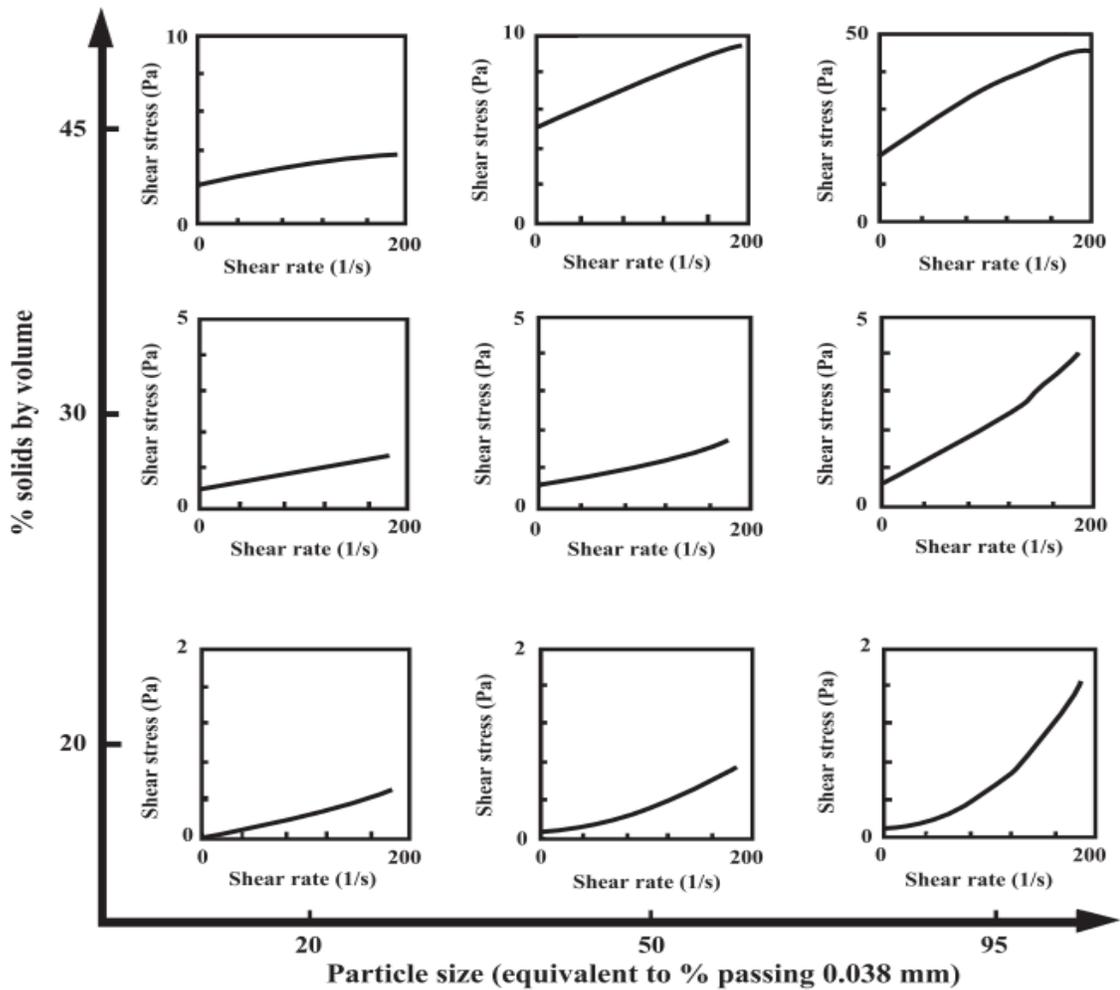


FIGURA 18: DIAGRAMA REOLÓGICO DE GRANULOMETRÍA VS. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS.

(HE ET AL., 2004)

3.1.7.3 EFECTO DE LA TEMPERATURA

La temperatura tiene una incidencia considerable tanto en la viscosidad como en el esfuerzo de fluencia, sin embargo el comportamiento no es intuitivo, para ambas propiedades ocurren fenómenos que debiesen ser conocidos a la hora de diseñar un proceso.

Yang *et al.* (2001) analizaron el cambio en las propiedades reológicas según la temperatura en una pulpa de dióxido de titanio. En la Figura 19 se muestran las mediciones del esfuerzo de corte de fluencia a distintas temperaturas para una pulpa de 28,2% y 23,8% de concentración de sólidos en volumen, y un tamaño promedio de partículas de 237 nm.

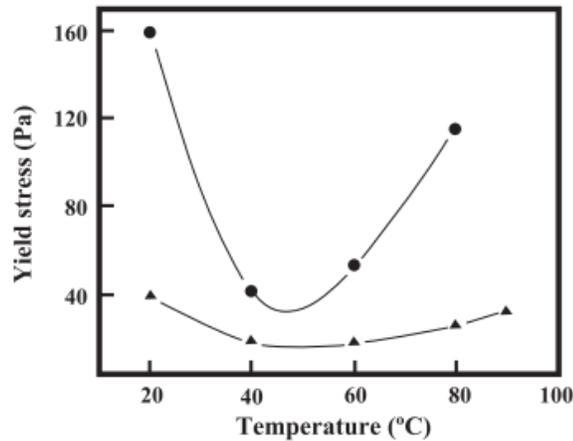


Fig. 20. Yield stress at various temperatures. Solid volume fraction: ●, $\varphi=0.282$; ▲, $\varphi=0.238$ [76].

FIGURA 19: ESFUERZO DE FLUENCIA VS. TEMPERATURA CON DISTINTAS CONCENTRACIONES DE SÓLIDOS.

(YANG ET AL., 2001)

Los autores proponen que la relación entre el esfuerzo de fluencia y la temperatura es de la forma:

$$\sigma_y = CT \exp\left(\frac{\Delta E}{RT}\right)$$

ECUACIÓN 19: MODELO DE ESFUERZO DE FLUENCIA SEGÚN TEMPERATURA.

(YANG ET AL., 2001)

Con $\Delta E = E_\infty - E_S$ la energía de activación, C una constante, R la constante de los gases y T la temperatura. Mencionan que si la energía de activación es negativa el esfuerzo de fluencia siempre crecerá con la temperatura, en cambio en el caso contrario dependerá del rango de la temperatura.

Ahora, en el caso de la viscosidad Yang *et al.* (2001) encontraron una anomalía en el comportamiento viscoso sobre los 50°C, si bien la pulpa disminuye su viscosidad con el aumento de la temperatura, su comportamiento pseudoplástico se mantiene constante hasta alcanzar temperaturas de 50°C, sobre esta temperatura se observa una pequeña zona de aumento de la viscosidad para un aumento en la tasa de deformación de 7 a 10 s⁻¹ aproximadamente.

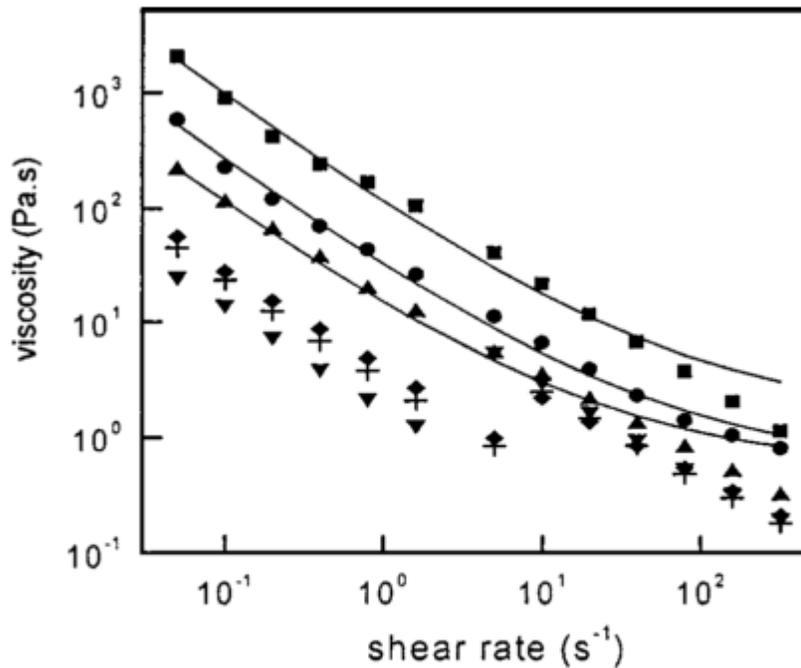


FIG. 8. Relationship between shear viscosity and shear rate at different temperatures: ■, 20°C; ●, 30°C; ▲, 40°C; ◆, 50°C; +, 60°C; ▼, 70°C; the solid lines are fits to Eq. [7].

FIGURA 20: REOGRAMA A DISTINTAS TEMPERATURAS.

(YANG ET AL., 2001)

Los autores explican que frecuentemente se utiliza el balance entre las fuerzas hidrodinámicas y las contribuciones por el movimiento Browniano (Barnes & Hutton, 1989) para explicar el comportamiento dilatante de algunos fluidos, y la razón entre ambas es llamado el número de Péclet, entonces para predecir la respuesta reológica (pseudoplástica o dilatante) del sistema se utiliza este número adimensional:

$$Pe = \frac{\eta \dot{\gamma} a^3}{kT}$$

ECUACIÓN 20: NÚMERO DE PÉCLET.

Donde η es la viscosidad de la pulpa, $\dot{\gamma}$ es la tasa de deformación, a es la difusividad térmica, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura. En la Figura 21 se grafica el número de Péclet y la viscosidad, y se puede apreciar que predice el comportamiento de manera bastante precisa, donde se observa la transición del comportamiento para $10 < Pe < 100$ para el rango estudiado.

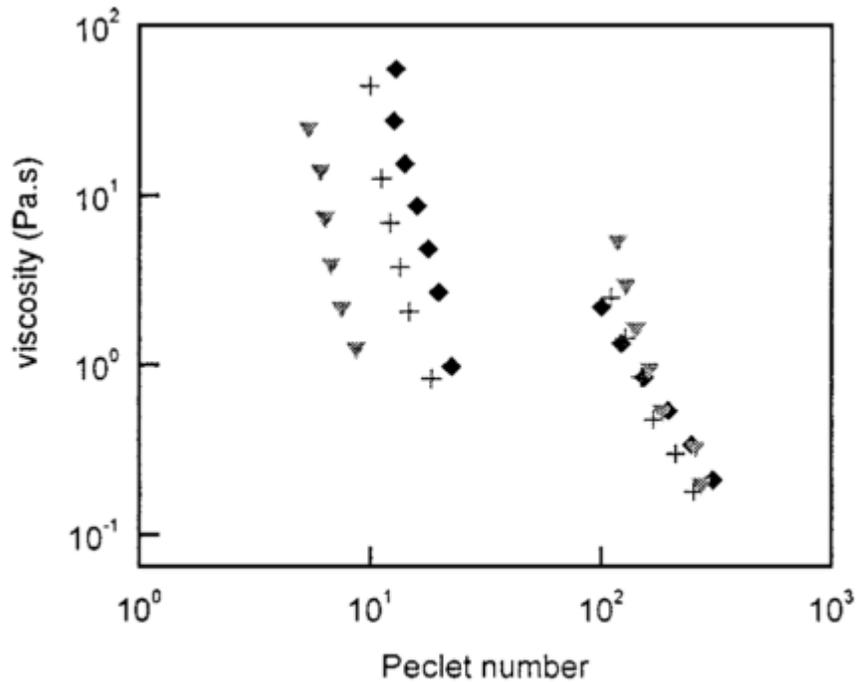


FIG. 9. Shear viscosity vs Peclet number at various temperatures: ◆, 50°C; +, 60°C; ▼, 70°C.

FIGURA 21: NÚMERO DE PÉCLET VS. VISCOSIDAD.

(YANG ET AL., 2001)

3.1.7.4 EFECTO DEL PH

Además de las variables físicas como la temperatura, concentración de sólidos y granulometría, la reología también depende de variables químicas que dominarán la interacción partícula-partícula y líquido-partícula a niveles microscópicos que finalmente se traducirán en los efectos macroscópicos de viscosidad y esfuerzo de corte de fluencia.

De manera contra intuitiva, las variables químicas como el pH pueden ser muy determinantes en el comportamiento reológico de una pulpa, como veremos a continuación en dos estudios (He *et al.*, 2004; Klein & Hallbom, 2002). La manera en que afecta el pH es compleja debido a que dependerá de las propiedades de superficie de las partículas, es decir depende de la composición (mineralogía), superficie específica (forma y granulometría), potencial de superficie, etc.

Efecto en la viscosidad

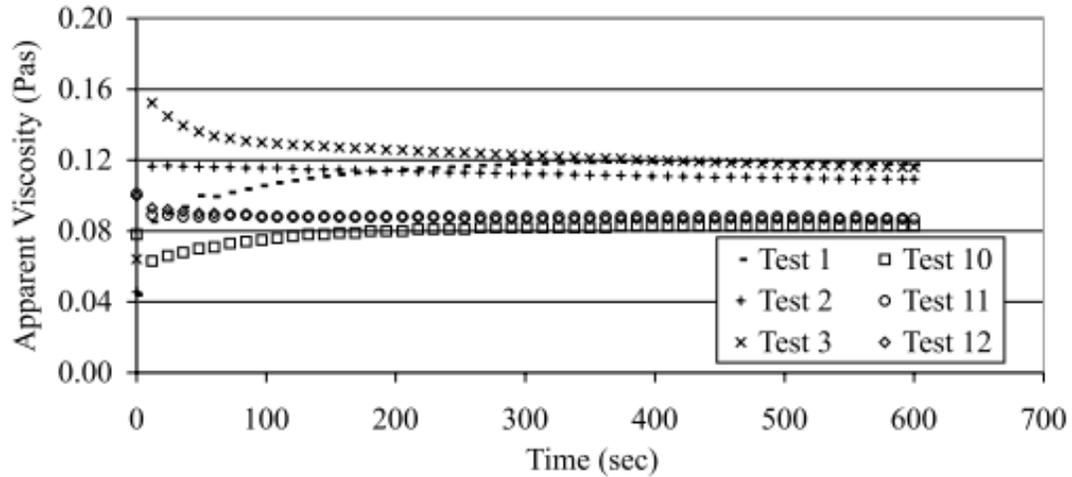


Fig. 4. Apparent viscosity versus time at natural pH 6.5 and 3.0.

FIGURA 22: EFECTO DEL PH EN UNA PULPA DE VISCOSIDAD DEPENDIENTE DEL TIEMPO.

(KLEIN & HALLBOM, 2002)

En la Figura 22 se muestran los resultados obtenidos para una medición de viscosidad en función del tiempo para 6 condiciones distintas, debido a la naturaleza dependiente del tiempo de esta pulpa de lateritas es que antes de realizar la medición la muestra se somete a una *pre-agitación* para luego comenzar a medir la viscosidad a una tasa de deformación constante de 200 s^{-1} .

Test	Pre-tasa de deformación (s^{-1})	pH
1	50	6,5
2	200	6,5
3	400	6,5
10	50	3
11	200	3
12	400	3

TABLA 2: DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS REOLÓGICAS A DISTINTO PH.

Se observa que el comportamiento temporal es prácticamente idéntico sin embargo el valor absoluto de la viscosidad disminuyó para todas las curvas por igual. Al generar el reograma veremos que el comportamiento no es tan sencillo de predecir.

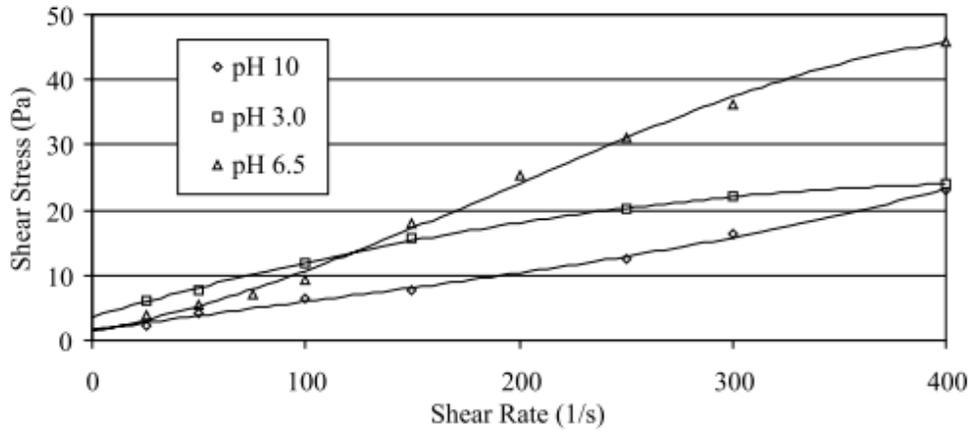


Fig. 7. Equilibrium shear stress versus shear rate at varying pH.

FIGURA 23: EFECTO DEL PH EN EL REOGRAMA DE UNA PULPA.

(KLEIN & HALLBOM, 2002)

Dado el comportamiento dependiente del tiempo, este reograma grafica los esfuerzos de corte de equilibrio (estacionario) para cada tasa de deformación medida.

Podemos apreciar que tanto aumentar el pH de 6,5 a 10 como disminuirlo a 3 tienen el efecto de disminuir la viscosidad, sin embargo a pH 10 observamos un comportamiento dilatante, mientras a pH 3 observamos un comportamiento pseudoplástico. Este efecto es complejo de explicar pero el aumento de la viscosidad a pH medio se debe principalmente a su cercanía al punto isoeléctrico (IEP) donde las fuerzas de van der Waals predominan llevando a las partículas a adherirse entre ellas (He *et al.*, 2004; Klein & Hallbom, 2002).

Efecto en el esfuerzo de corte de fluencia

El efecto del pH en el esfuerzo de fluencia es relativamente sencillo de comprender debido a que se explica desde la teoría DLVO. Múltiples autores (Boger, 2000; He *et al.*, 2004; Huynh, Jenkins, & Ralston, 2000; Klein & Hallbom, 2002; Madigan, Leong, & Ong, 2009; Rand & Melton, 1977; Tan, Skinner, & Addai-Mensah, 2012; Yang *et al.*, 2001) concluyen que los máximos esfuerzos de fluencia se encuentran en el punto isoeléctrico (IEP) debido a la desaparición de las fuerzas repulsivas de la doble capa eléctrica y por lo tanto dominancia de las fuerzas atractivas de van der Waals, generando agregados de partículas.

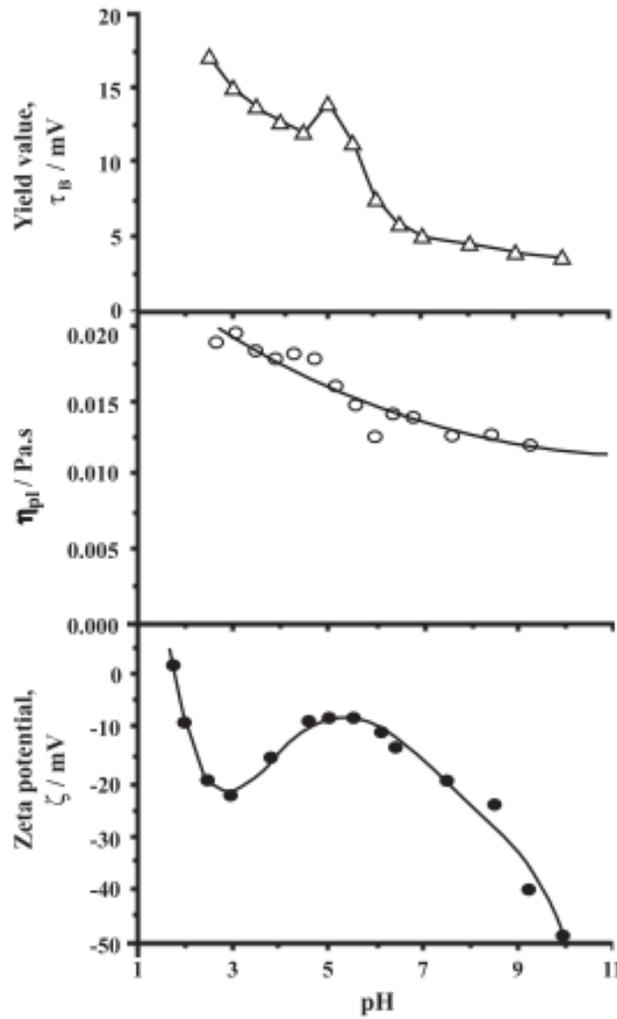


Fig. 9. The influence of pH on the rheological behaviour and zeta potential of ultrafine galena particles: (a) extrapolated yield values for slurries of 45.5% solid content; (b) viscosity for slurries of 45.5% solids content; (c) zeta potentials [68].

FIGURA 24: ESFUERZO DE FLUENCIA Y VISCOSIDAD VS. PH.

(HE ET AL., 2004)

Probablemente la Figura 24 sea el ejemplo más claro, se aprecia que el punto isoeléctrico se encuentra aproximadamente a pH 2, y luego decrece con una anomalía a pH 5 donde el potencial zeta vuelve a acercarse a 0 mV, esto coincide plenamente con el comportamiento del esfuerzo de fluencia, donde se aprecian los máximos en los mismos valores de pH.

En la Figura 25 y Figura 26 se exponen otros ejemplos de esfuerzo de fluencia máximo en el punto isoeléctrico.

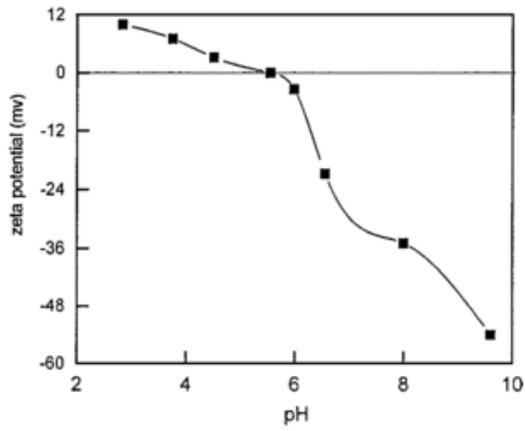


FIG. 12. Zeta potential at different pH values.

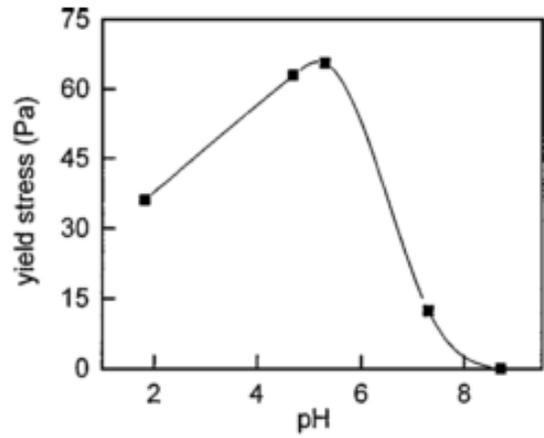


FIG. 14. Effect of pH on yield stress.

FIGURA 25: COMPARACIÓN DEL POTENCIAL ZETA CON ESFUERZO DE FLUENCIA. EJ. 1.

(YANG ET AL., 2001)

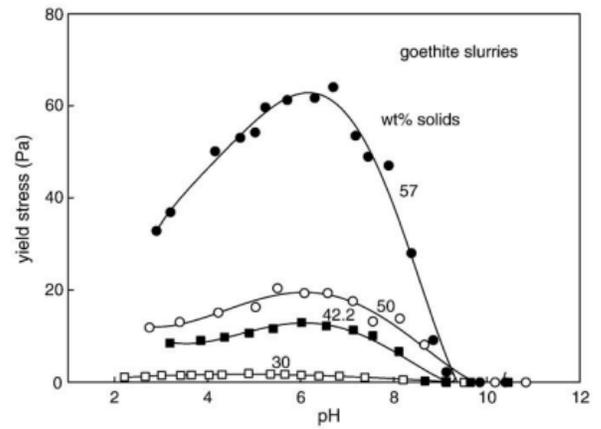
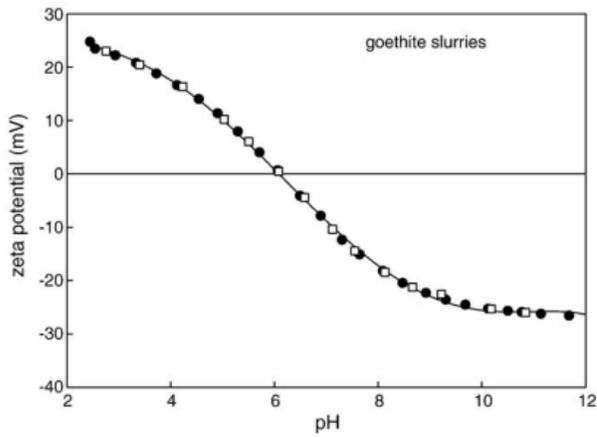


FIGURA 26: COMPARACIÓN DEL POTENCIAL ZETA CON ESFUERZO DE FLUENCIA. EJ. 2.

(MADIGAN ET AL., 2009)

3.1.8 DISPERSANTES

Los dispersantes son reactivos que se adicionan a la pulpa con el fin de aumentar la fuerza de repulsión que existe entre las partículas de manera de evitar su adherencia o la formación de agregados, y así disminuir el esfuerzo de fluencia y viscosidad. Si bien se puede modificar la reología a través del pH muchos procesos exigen un rango de pH fijo en el cual podrían presentarse condiciones reológicas desfavorables.

Un dispersante debe cumplir una serie de características básicas (He *et al.*, 2004):

- Debe tener una adsorción suficientemente alta al mineral como para afectar la reología.
- Debe tener un comportamiento robusto ante variaciones del pH, tasa de deformación, calidad del agua, cambios de concentraciones, etc. En la minería es sabido que la alimentación a planta varía constantemente.
- Debe tener un impacto ambiental nulo o manejable.
- No debe afectar los procesos aguas abajo.
- Deben ser económicamente viables.

Estos reactivos actúan de diversas maneras, las dos principales son aumentando la repulsión de la doble capa eléctrica o agregando el efecto estérico.

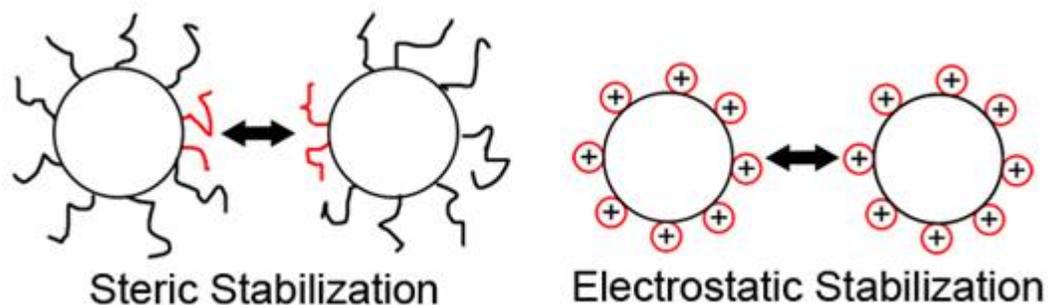


FIGURA 27: ESTABILIZACIÓN ESTÉRICA Y ELECTROESTÁTICA.

FUENTE: [HTTP://UPLOAD.WIKIMEDIA.ORG/WIKIPEDIA/COMMONS/F/F7/ELECTRO-STERIC_STABILIZATION.JPG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f7/Electro-steric_stabilization.jpg)

El mecanismo de disminución de la viscosidad y esfuerzo de fluencia por aumento de la repulsión de la EDL consiste en introducir iones de alta carga, que al adsorberse a las partículas en suspensión aumentan la barrera de potencial, como se ve en la Figura 28, evitando la adherencia, mientras el mecanismo del efecto estérico consiste en la incorporación de moléculas poliméricas con cadenas largas que al adsorberse rodean las

partículas impidiendo el acercamiento entre ellas evitando así que domine la fuerza de atracción de Van der Waals, ambos mecanismos están representados en la Figura 27 y Figura 29.

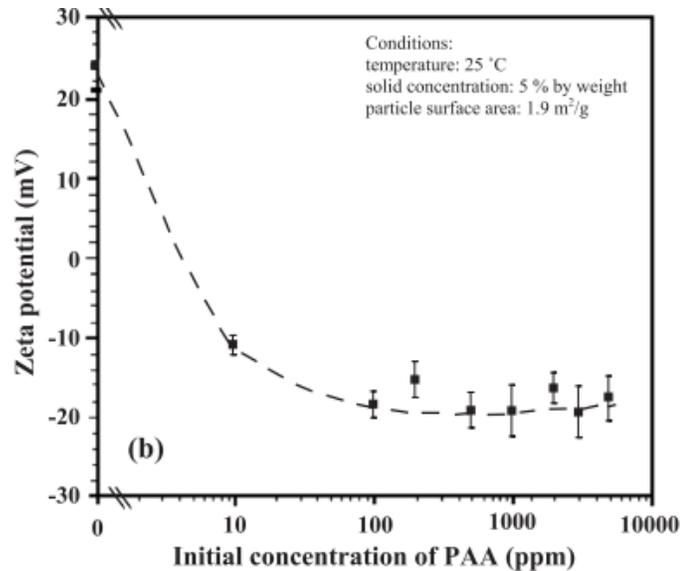


FIGURA 28: MODIFICACIÓN DEL POTENCIAL ZETA MEDIANTE ÁCIDO POLI-ACRÍLICO EN UNA PULPA DE CALIZA.

(HE ET AL., 2004)

El mecanismo estérico se genera por utilizar moléculas poliméricas largas que se adsorben al mineral, y presenta una serie de ventajas respecto del mecanismo electroestático (Marenduzzo, Finan, & Cook, 2006):

- Es relativamente insensible a la presencia de electrolitos.
- Mantiene su eficacia en medios acuosos y no-acuosos (otros solventes).
- Es igualmente eficaz a distintos contenidos de sólidos.

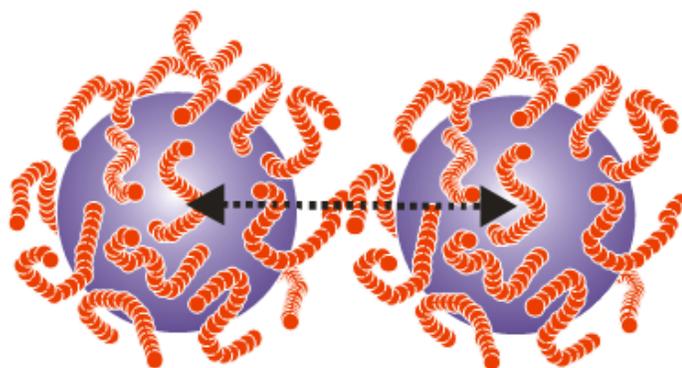


FIGURA 29: ESQUEMA DEL EFECTO ESTÉRICO EN DOS PARTÍCULAS SUSPENDIDAS.

FUENTE: [HTTP://SOFT-MATTER.SEAS.HARVARD.EDU/IMAGES/C/CE/STERICINTERACTION.PNG](http://soft-matter.seas.harvard.edu/images/c/ce/stericinteraction.png)

Otra ventaja del uso de polímeros es la posibilidad de generar selectividad en los dispersantes, como se muestra en la Figura 30, ya que generalmente estos se componen de una cabeza con un grupo afín por la superficie donde queremos que se adsorba, y una cola encargada de generar el efecto estérico. Además existen diversas configuraciones de polímeros para lograr el objetivo deseado.

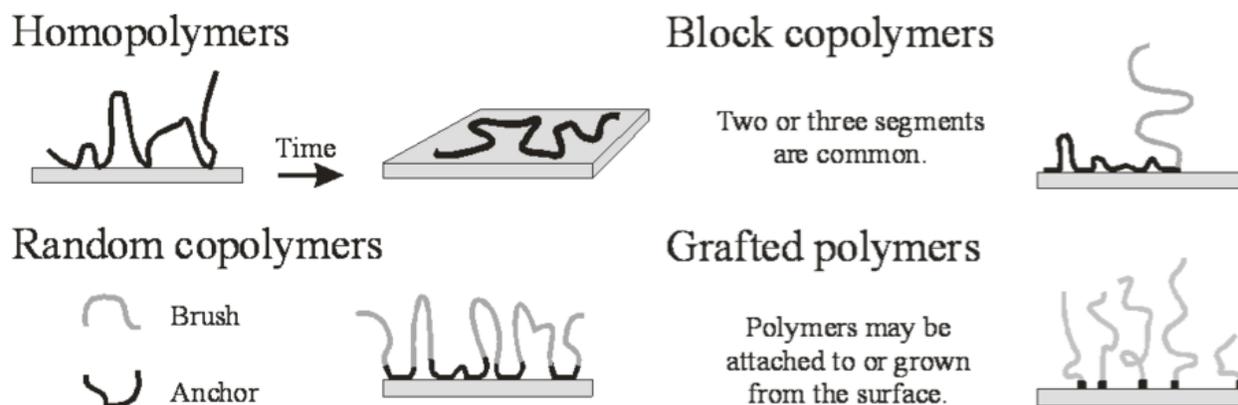


FIGURA 30: CONFIGURACIÓN DE ADSORCIÓN DE POLÍMEROS.

FUENTE: [HTTP://SOFT-MATTER.SEAS.HARVARD.EDU/IMAGES/THUMB/3/33/CONFIGURATIONSOFA DSORBEDPOLYMERS.PNG/469PX-CONFIGURATIONSOFA DSORBEDPOLYMERS.PNG](http://soft-matter.seas.harvard.edu/images/thumb/3/33/ConfigurationsOfAdsorbedPolymers.png/469px-ConfigurationsOfAdsorbedPolymers.png)

Respecto de las dosis y su efecto se encuentran varios estudios (Farrokhpay, 2009; Fengqiu, Xiaoxian, Yufeng, & Jingkun, 2000; Greenwood & Kendall, 1999; He *et al.*, 2004; Madigan *et al.*, 2009) que se enfocan en este tema.

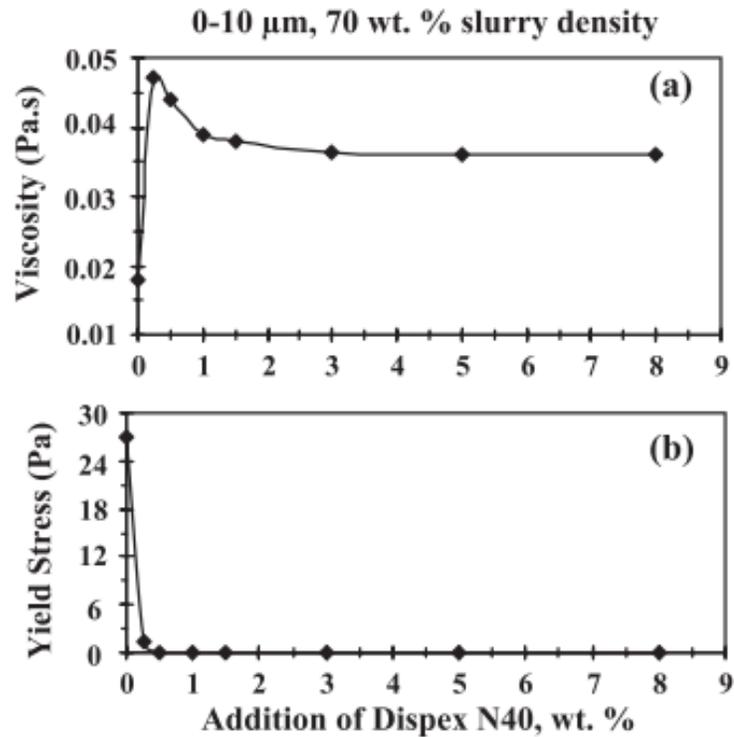


FIGURA 31: EFECTO DE DISPERSANTE (DISPEX N40) EN VISCOSIDAD Y ESFUERZO DE FLUENCIA.

(HE *ET AL.*, 2004)

En la Figura 31 se aprecia que no siempre una mayor dosis conllevará a una disminución en el valor de las propiedades reológicas, existirá generalmente una dosis óptima donde el comportamiento ya no cambia, o incluso empeora.

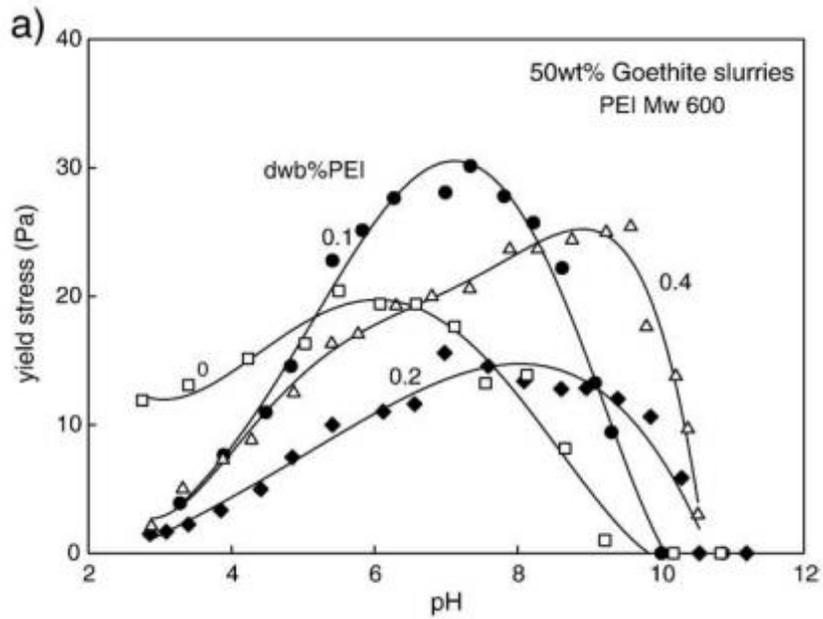


FIGURA 32: EFECTO DE DOSIS DE DISPERSANTE Y PH EN EL ESFUERZO DE FLUENCIA.

(MADIGAN ET AL., 2009)

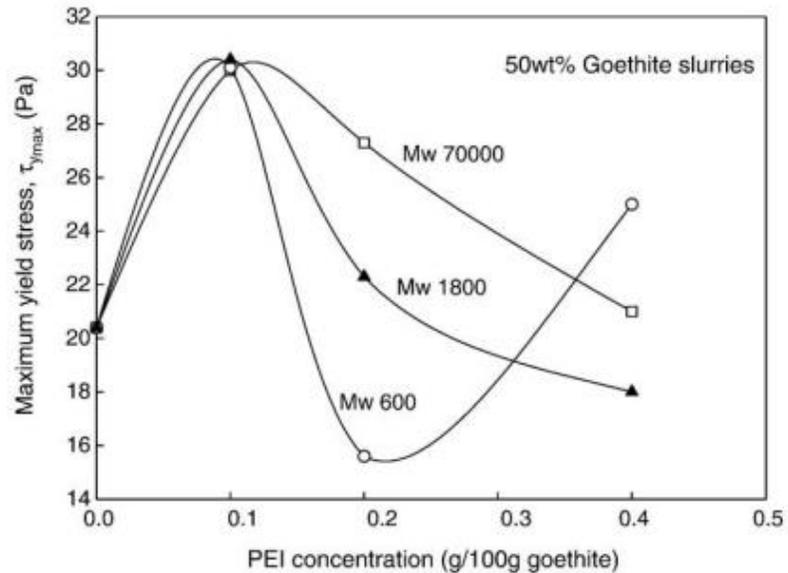


FIGURA 33: EFECTO DEL PESO MOLECULAR Y DOSIS DE UN DISPERSANTE POLIMÉRICO EN EL ESFUERZO DE FLUENCIA.

(MADIGAN ET AL., 2009).

En la Figura 32 podemos observar que el uso de un dispersante polimérico también altera el pH asociado al máximo esfuerzo de fluencia, característica que se debiera tener en consideración ya que muchas veces el pH es fijo para ciertos procesos. En la Figura 33 se observa que existen dosis desfavorables para el comportamiento reológico, y que no

necesariamente una cadena más larga (mayor peso molecular) significará una mejora en las propiedades reológicas.

Finalmente, la Figura 34 muestra la curva de potencial para la combinación de las distintas fuerzas:

- a) Fuerza de van der Waals
- b) Efecto estérico
- c) Repulsión de la doble capa eléctrica
- d) Efecto combinado a) y b)
- e) Efecto combinado a) y c)
- f) Efecto combinado de a) b) y c).

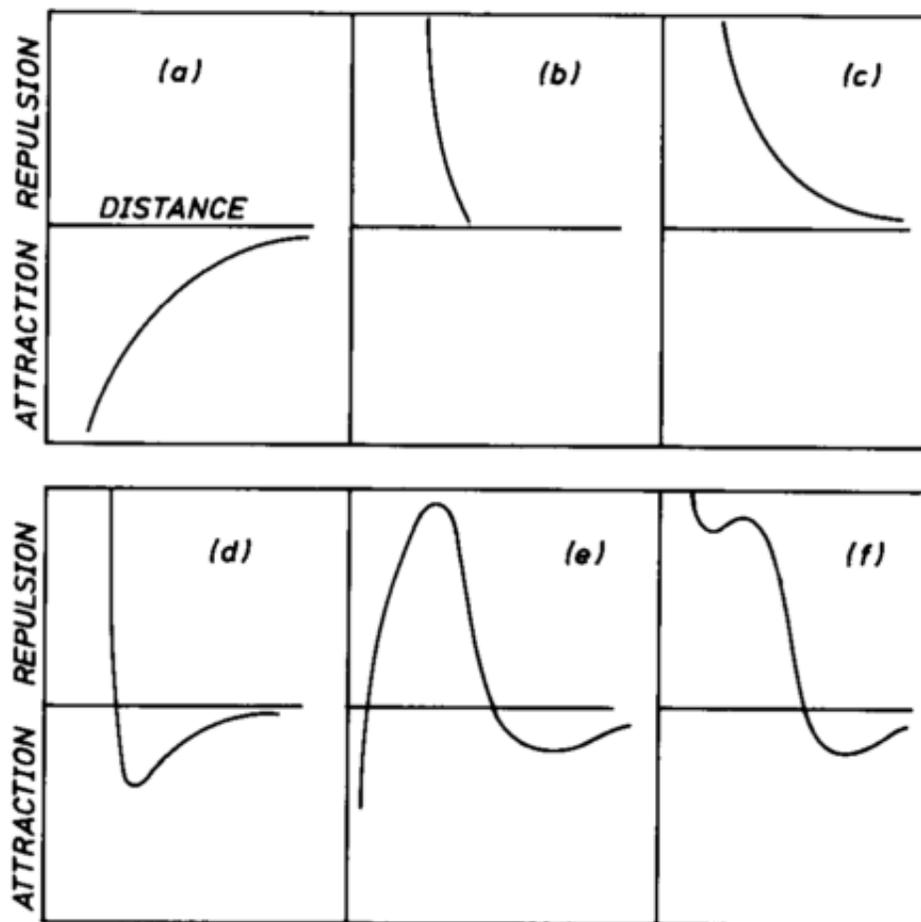


FIGURA 34: COMBINACIONES DE VAN DER WAALS, EDL Y EFECTO ESTÉRICO.

(BARNES & HUTTON, 1989)

3.2 CARACTERIZACIÓN HÍPER-ESPECTRAL

La espectroscopía es un método de caracterización para la identificación de compuestos químicos (en este caso minerales) utilizando la aplicación de energía electromagnética sobre una muestra, la cual según su composición absorberá, reflejará o emitirá energía con distinta intensidad según la longitud de onda. El rango del espectro medido definirá el tipo de espectrometría que se realiza (ultravioleta, visible, infrarroja, etc.), el cual se selecciona según el tipo de muestra que se desea caracterizar. La diferencia entre la tecnología espectral y la híper-espectral, es que esta última divide el espectro electromagnético en bandas, permitiendo así que un sensor obtenga un espectro en un muestreo sin necesidad de hacer un barrido entre longitudes de onda, además incorporando la espacialidad de los espectros.

La identificación de los compuestos se logra mediante el análisis de los “patrones espectrales”, estos son formas características a longitudes de onda específicas que son propios de cada compuesto químico o mineral, los cuales absorben, reflejan o transmiten la radiación electromagnética producto de procesos eléctricos y vibratoriales debido a la rotación y estiramiento de los enlaces moleculares de los átomos constituyentes de la muestra (Ostrooumov, 2007).

La absorción, reflexión y transmisión de energía está controlada por las propiedades químicas y físicas, composición y distribución de átomos en la estructura cristalina del mineral (o compuesto) estudiado, de manera que el espectro medido se hace único y reconocible, permitiendo la caracterización.

3.2.1 ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA

Se habla de espectroscopía de reflectancia cuando la técnica de análisis mide el espectro reflejado por una muestra irradiada con una fuente cuyas características son conocidas.

Una medición espectral de reflectancia corresponde a la curva en dos dimensiones de la reflectancia vs. longitud de onda. La reflectancia es la razón entre la potencia de la radiación electromagnética incidente y la reflejada, normalmente expresada en porcentaje. La longitud de onda se expresa en unidades de longitud adecuadas para el rango en que se trabaja (nanómetros, micrómetros, etc.).

En la Figura 35 se observan distintos espectros característicos de algunos minerales. Se pueden apreciar los diferentes peaks y valles de cada uno, los cuales sirven para identificar la composición de una muestra analizada.

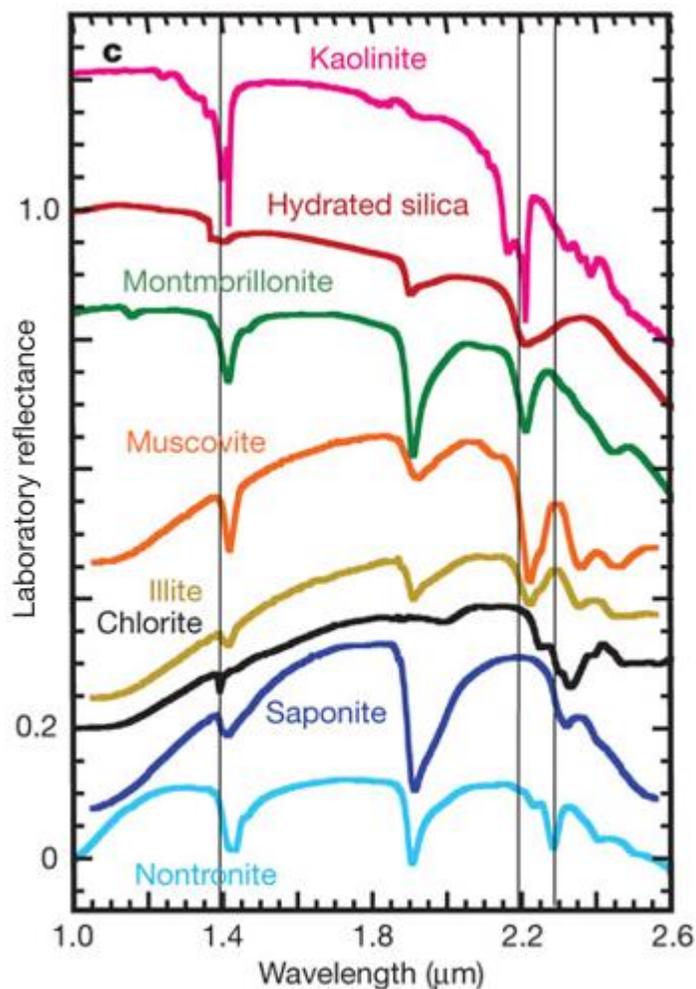


FIGURA 35: ESPECTROS CARACTERÍSTICOS.

(MUSTARD ET AL., 2008)

3.2.2 TECNOLOGÍAS HÍPER-ESPECTRALES

Hoy en día el mercado ofrece diversas tecnologías de análisis hiper-espectral, desde equipos para el análisis de sondajes de diamantina, chips de aire-reverso, hasta equipos con fines de prospección y exploración montables en aviones o helicópteros, diseñados para barrer grandes áreas, y no solo son utilizados por la minería, sino que también por las industrias agrícola y espacial por ejemplo, para la estimación de calidad de suelos para plantaciones o la composición del territorio de marte (Goetz, 2009).

En esta sección se repasarán de manera concisa las principales tecnologías de análisis hiper-espectral.

3.2.2.1 CORESCAN HCI-3

El Hyperspectral Core Imager III (HCI-3) diseñado por la compañía CoreScan, permite identificar los minerales presentes en un testigo de roca mediante espectroscopía de reflectancia en los rangos VNIR y SWIR (450 nm – 2500 nm), con una resolución espectral de 4 nm. Este equipo puede operar con una resolución de muestreo desde 5 mm hasta 0,5 mm por pixel. Con mínima resolución es capaz de analizar hasta 1000 metros por día (CoreScan Pty Ltd., 2014).



FIGURA 36: CORESCAN HCI-3.

FUENTE: [HTTP://WWW.DMT.DE/UPLOADS/PICS/DMT_CORESCAN3_PRAXIS.JPG](http://www.dmt.de/uploads/pics/dmt_corescan3_praxis.jpg)

3.2.2.2 GEOTEK MSCL

Creado por la compañía inglesa GEOTEK, el Multi Sensor Core Logger (MSCL) permitirá distintos tipos de análisis según los sensores que desee el cliente incorporar en el sistema. Los sensores son provistos por ASD Inc. Es capaz de analizar un metro cada seis minutos en máxima resolución y cada tres en la mínima. Permite la incorporación de herramientas adicionales a la caracterización espectral como fluorescencia de rayos X (XRF) a través de un sensor portátil Olympus.

Además permite analizar la susceptibilidad magnética y espectroscopía gamma para la detección de especies radioactivas. Su uso es acotado en la gran minería debido principalmente a la velocidad del análisis (Geotek, 2014).



FIGURA 37: ESQUEMA TRIDIMENSIONAL DEL MSCL.

FUENTE: [HTTP://WWW.GEOTEK.CO.UK/SITES/DEFAULT/FILES/IMAGES/MSCL%20AND%20MEL.PREVIEW.PNG](http://www.geotek.co.uk/sites/default/files/images/mscl%20and%20mel.preview.png)

3.2.2.3 PIMA SP

El Portable Infrared Mineral Analyzer Spectrometer es un equipo portátil diseñado para realizar espectrometría de reflectancia en un rango desde los 1300 nm a 2500 nm (SWIR). No solo se utiliza en el ámbito minero, sino que también es ampliamente usado en el análisis de suelos entre otros. Este equipo posee una resolución espectral de 7 nm. Se trata de una tecnología antigua por lo que su rango espectral es pequeño.



FIGURA 38: PIMA SP.

FUENTE: [HTTP://SPECTRAL-INTERNATIONAL.COM/IMAGE/48633777_SCALED_275x225.JPG](http://SPECTRAL-INTERNATIONAL.COM/IMAGE/48633777_SCALED_275x225.JPG)

La toma de muestra con este equipo toma entre 10 segundos y 5 minutos según requerimientos del usuario y puede verse en el mini-computador que se ve en la Figura 38 o luego conectar el equipo a un computador de escritorio (Terraplus, 2013).

3.2.2.4 SISUROCK

El SisuRock Hyperspectral Core Imaging Station está específicamente diseñado para el análisis de testigos de sondajes de diamantina. Este equipo trabaja en los rangos VNIR-SWIR y TIR, además de tomar imágenes RGB de alta resolución. Los datos son compatibles con ENVI (Specim, 2014).

En el modo de alta velocidad/baja resolución, es capaz de escanear una bandeja en 15 segundos.

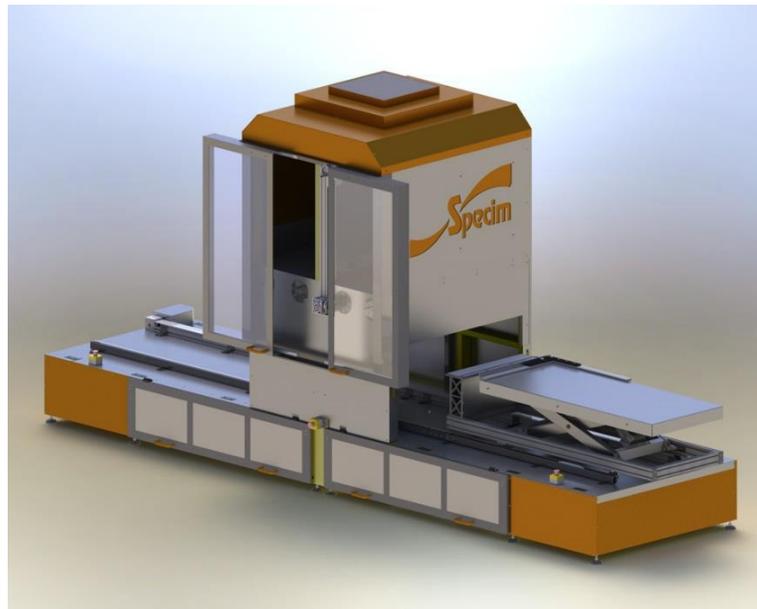


FIGURA 39: SisuROCK.

FUENTE: [HTTP://WWW.AMIGOOPTIMA.COM/IMAGES/PRODUCTS/1-SISUROCK4.JPG](http://www.amigooptima.com/images/products/1-sisurock4.jpg).

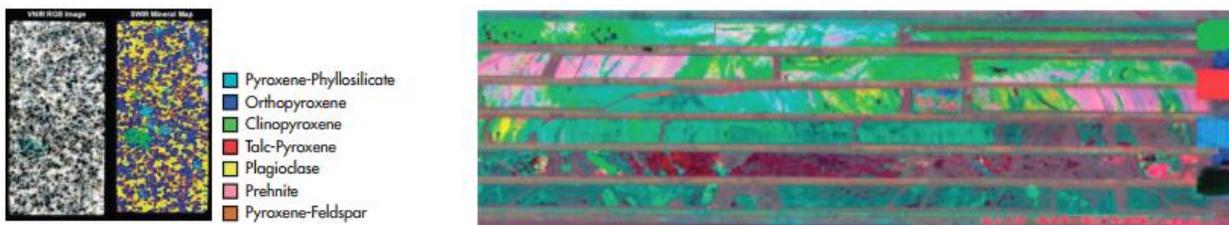


FIGURA 40: ESCANEO DE ALTA RESOLUCIÓN (IZQUIERDA) Y ESCANEO DE ALTA VELOCIDAD (DERECHA).

3.2.2.5 TERRASPEC 4 HI-RES MINERAL ANALYZER

Esta es otra tecnología portable diseñada principalmente para la exploración geológica. Trabaja en el rango VNIR-SWIR (350 – 2500 nm) con una resolución espectral de 3 a 6 nm. Los datos registrados por este equipo pueden ser analizados por el software TSG (The Spectral Geologist) (ASD, 2013).



FIGURA 41: TERRASPEC 4

FUENTE: [HTTP://WWW.ASDI.COM/GETATTACHMENT/E273C7A7-FDC8-44CB-972C-81F6F679B4BF](http://www.asdi.com/getattachment/E273C7A7-FDC8-44CB-972C-81F6F679B4BF).

3.2.2.6 SPECTIR

A continuación se muestran algunas tecnologías para vuelos de mapeo diseñadas por la compañía SpectIR.

AisaEAGLE

Este equipo se utiliza en vuelos de mapeo en el rango VNIR (400-970 nm) con una resolución espectral de 3,3 nm. Se utiliza comúnmente en manejo de cultivos, áreas forestales, investigaciones medioambientales, depósitos de agua, etc.(SpecTIR, 2012a).



FIGURA 42: AisaEAGLE.

FUENTE: [HTTP://LOT-QD.COM/FILEADMIN/MEDIAPOOL/PRODUCTS/HYPERSPECTRAL/SPECIM-AISA-EAGLE.JPG](http://lot-qd.com/fileadmin/MediaPool/Products/Hyperspectral/SpecIM-AISA-EAGLE.JPG)

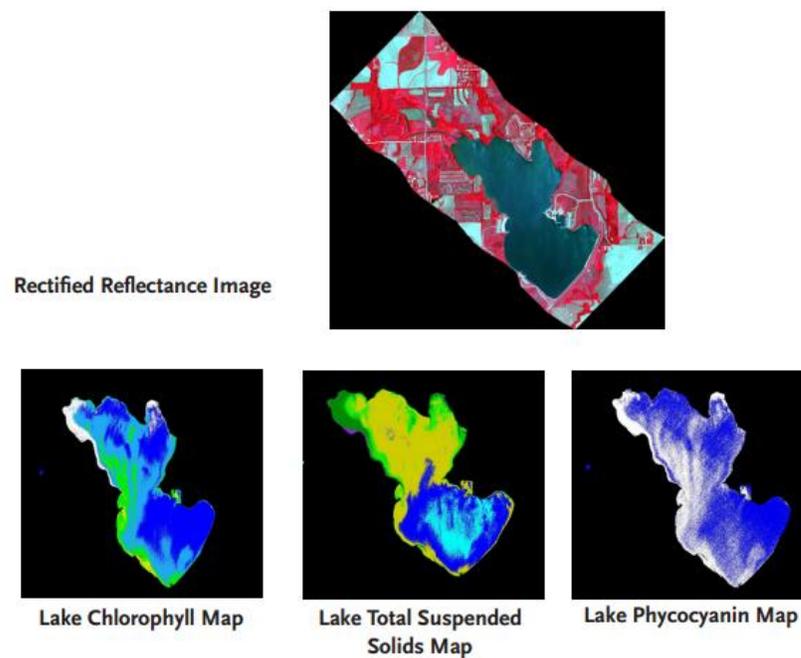


FIGURA 43: ESTUDIO REALIZADO CON EL AISA EAGLE EN EL LAGO PAWNEE, NEBRASKA.

AisaHAWK

Similar al equipo anterior con la diferencia que trabaja en el rango SWIR (970 – 2500 nm) con una resolución espectral de 10 nm. A veces se combina con el AisaEAGLE para barrer el rango VNIR-SWIR completo (SpecTIR, 2012b)

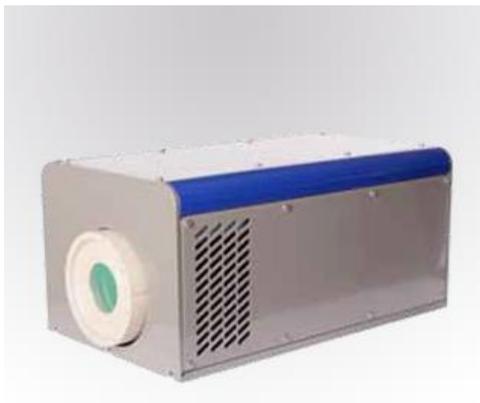


FIGURA 44: AISAHAWK.

FUENTE: [HTTP://WWW.GILDENPHOTONICS.COM/RESOURCES/INTERNAL/FILE_VIEWS/151/5_AISAHAWK-320.JPG](http://www.gildenphotonics.com/resources/internal/file_views/151/5_AISAHAWK-320.JPG)

AisaOWL

Finalmente, el AisaOWL trabaja en el rango termal (TIR), es decir desde los 7700 hasta los 12000 nm, con una resolución espectral de 100 nm (SpecTIR, 2012c)



FIGURA 45: AISAOWL.

FUENTE: [HTTP://WWW.GILDENPHOTONICS.COM/RESOURCES/INTERNAL/FILE_VIEWS/153/4_AISAOWL-320.JPG](http://www.gildenphotonics.com/resources/internal/file_views/153/4_AISAOWL-320.JPG)

3.2.2.7 HYPERION IMAGING SPECTROMETER

Es un equipo diseñado para el mapeo geológico de gran escala, similar a los anteriormente mencionados de SpecTIR con la diferencia que esta tecnología se enfoca al uso en satélites y fue incluido en la Earth Observing-1 Mission (EO-1) de la NASA.

El rango espectral de medición se encuentra entre los 400 y 2500 nm (VNIR-SWIR) con una proyección del pixel sobre la tierra que va desde los 15 a los 60 m, y además de recolectar la información hiper-espectral va tomando imágenes de los sectores analizados (Pearlman, Carman, & Segal, 2001).



FIGURA 46: HYPERION IMAGING SPECTROMETER.

FUENTE: [HTTP://WWW.UGPTI.ORG/SMARTSE/RESEARCH/CITATIONS/DOWNLOADS/PEARLMAN-EO-1_HYPERION_OVERVIEW-2001.PDF](http://www.ugpti.org/SMARTSE/RESEARCH/CITATIONS/DOWNLOADS/PEARLMAN-EO-1_HYPERION_OVERVIEW-2001.PDF)

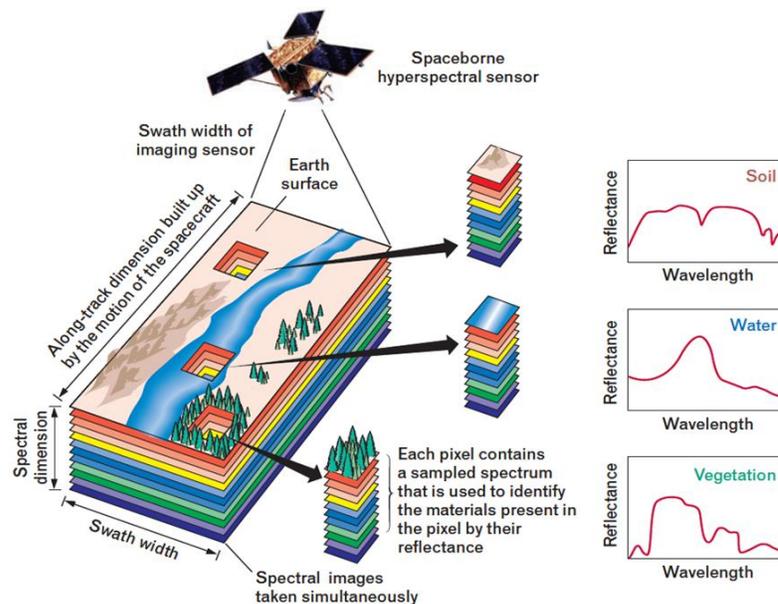


FIGURA 47: MAPEO SATELITAL.

FUENTE: [HTTP://WWW.MARKELOWITZ.COM/IMAGING-SPECTROSCOPY-CONCEPT.PNG](http://www.markelowitz.com/IMAGING-SPECTROSCOPY-CONCEPT.PNG)

3.2.2.8 AVIRIS

El AVIRIS (Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer) fue desarrollado para vuelos de mapeo espectral, con un rango de detección desde los 380 a 2500 nm de longitud de onda. La resolución espectral de este equipo se encuentra alrededor de los 10 nm.

La altura de vuelo definirá el área que barre, por ejemplo a 20 km de altura cada pixel abarca un área en superficie de 20 metros de diámetro generando un barrido de 11 km de ancho.

Los espectros medidos por estos equipos satelitales (Hyperion y AVIRIS) dependen de la radiación del sol como fuente luminosa, por lo que el ángulo de incidencia de esta y la atmósfera del planeta deberán considerarse en una calibración previa a cualquier mapeo a realizar.

Hoy en día el AVIRIS se utiliza en estudios atmosféricos, ecológicos, geológicos, hídricos, entre otros (NASA, 2013)

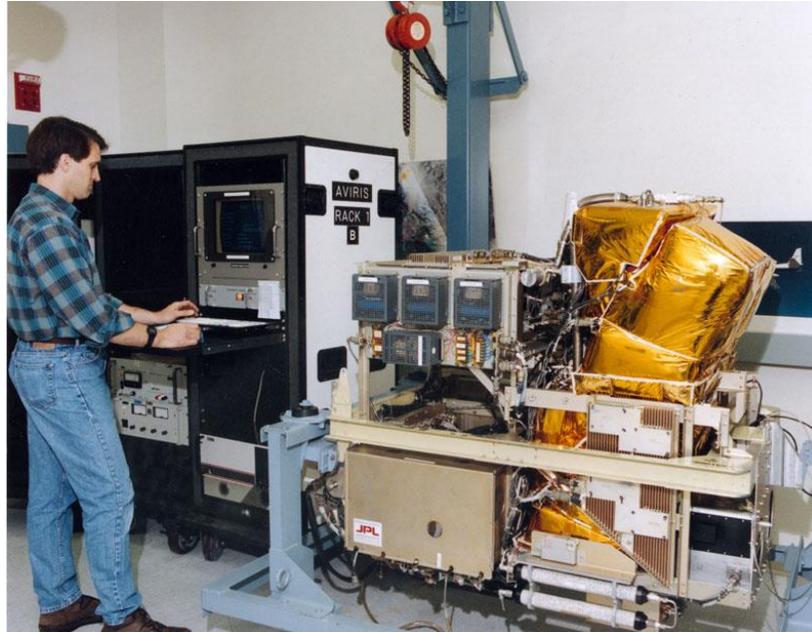


FIGURA 48: AVIRIS.

[HTTPS://AIRBORNE SCIENCE.NASA.GOV/SITES/DEFAULT/FILES/IMAGES/AVIRIS.JPG](https://airbornescience.nasa.gov/sites/default/files/images/aviris.jpg)

3.2.2.9 HYLOGGER-3

Debido a que esta fue la tecnología utilizada en el desarrollo de este trabajo de investigación, se expondrá con mayor detalle.

Desarrollado por CSIRO en Australia, el HyLogger-3 funciona con testigos de sondajes y chips de roca. Esta tecnología integra sistemas de hardware y software semi-automatizados para la recolección de mediciones hiper-espectrales de manera masiva y además captura una imagen a color de alta resolución de las muestras analizadas.

La preparación de las muestras es mínima, ya que solo se requiere que estén libres de polvo y secas, y las muestras pueden ser analizadas en sus bandejas originales, y luego a través de un software se pueden limpiar las mediciones de los tacos de madera o bordes de bandeja u otros materiales que sin ser roca o el material de interés fueron medidos.

Otro aspecto de esta tecnología es que trabaja en los rangos completos de VNIR-SWIR (400 - 2500 nm) y TIR (5000 – 14000 nm), proporcionando la detección de una gran cantidad de minerales:

VNIR (350 – 1000 nm)	Óxidos de Hierro	Hematita, goethita
SWIR (1000 – 2500 nm)	Al(OH)	Paragonita, muscovita, phengita, illita, pirofilita, kaolinita, halloysita, dikita, gibbsita y variedades de esmectita
	Sulfatos	Alunita, jarosita y yeso
	Fe(OH)	Saponita y nontronita
	Mg(OH)	Cloritas (Mg/Fe), biotita, phlogopita, anitogrita, tremolita, actinolita, talco, hornblenda y brucita
	Carbonatos	Calcita, dolomita, magnesita, ankerita, siderita
TIR (5000 – 14000 nm)	Cuarzo	Sílice
	Feldespatos	Plagioclasas (e.g. albita) y Feldespatos de potasio (e.g. ortoclasa)
	Olivinos	Fayalita, fosterita
	Granates	Almadina y spessantina
	Piroxenos	Clinopiroxenos y ortopiroxenos
	Carbonatos	Calcita, dolomita, magnesita, ankerita, siderita

TABLA 3: MINERALES Y RANGOS ESPECTRALES DE DETECCIÓN.

(QUIGLEY & CONNOR, 2014)

Todos los datos espectrales generados con el HyLogger-3 pueden ser analizados mediante el uso del software TSG (The Spectral Geologist), el cual permite un extenso manejo de la información, desde el enmascarado de mediciones erróneas o de materiales indeseables hasta una fina manipulación de la data espectral con fines específicos.



FIGURA 49: HYLOGGER INSTALADO EN EL AMTC DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE.

The Spectral Geologist (TSG Software)

Es un software sofisticado e interactivo para el análisis y visualización de los datos generados por el HyLogger3, es fundamental para la generación del producto del análisis de sondajes u otros materiales. Está diseñado específicamente para el análisis de rocas con fines mineros o geológicos y permite la interacción con otras fuentes de información como difracción de rayos X (XRD), fluorescencia de rayos X (XRF), y cualquier otra data relacionada con las muestras analizadas de manera de hacer conversar distintas técnicas de caracterización y lograr un producto integral y que contenga información relevante y sustanciosa (Whitbourn *et al.*, 2011).

Este software además contempla un algoritmo llamado TSA (The Spectral Assistant) (Berman, Bischof, & Lagerstrom, 2011) el cuál se encarga de recomendar un mineral o una mezcla de minerales presentes en cada pixel medido de manera automática, es posible modificar parámetros del algoritmo por el usuario, refinando los resultados y asegurando la calidad de la caracterización.

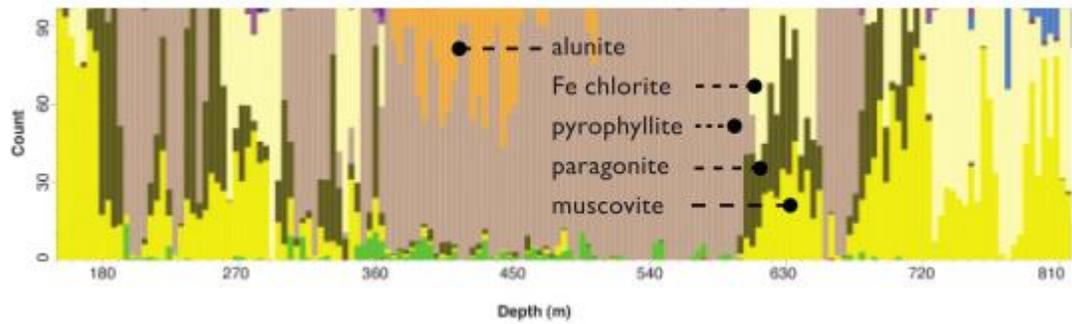
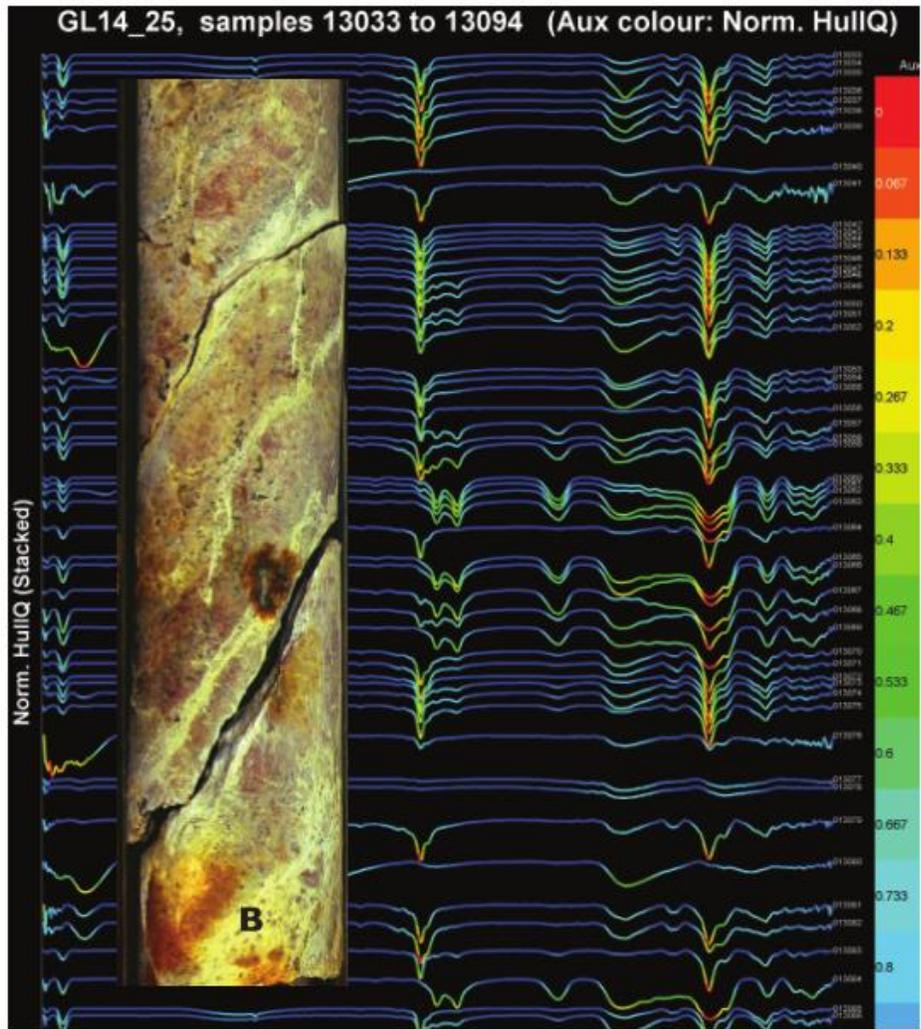


FIGURA 50: TSG SOFTWARE.
(HUNTINGTON & MUNDAY, 2004)

3.2.3 TABLAS COMPARATIVAS DE TECNOLOGÍAS

Tipo		Equipos portables	
Compañía		No Especificado	ASD
Tecnología		<i>Portable Infrared Mineral Analyzer Spectrometer</i>	<i>TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Spectrometer</i>
Rangos espectrales	VNIR, nm	N/A	350 - 2500
	SWIR, nm	1300 - 2500	
	TIR, nm	N/A	N/A
Resolución espectral (min, max)		7 nm	3 nm @700 nm, 6 nm @1400/2100 nm
Intervalo muestreo espectral		2 nm	
Intevalo muestreo espacial		N/A	
Velocidad escaneo	Min	10 s/muestra (todo lo visible por ventanilla)	0,1 s/muestra
	Max	5 min	
Tipo de muestras analizables		Sondajes, testigos, material particulado, suelos, etc.	Sondajes, material particulado, suelos, etc.
Preparación previa		No especificada	Remoción de polvo excesivo u otras impurezas superficiales
Registro de imágenes		N/A	N/A
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
Otras características		Tecnología antigua, predecesor del TerraSpec de ASD. Incorpora minicomputador para visualización de resultados.	

TABLA 4: TABLA COMPARATIVA DE EQUIPOS PORTABLES DE ANÁLISIS HÍPER-ESPECTRAL.

Tipo		Equipos fijos			
Compañía		CSIRO	CoreScan	GEOTEK	
Tecnología		<i>HyLogger 3</i>	<i>Hyperspectral Core Imager III (HCI-3)</i>	<i>Multi Sensor Core Logger (MSCL-5)</i>	<i>SisuROCK</i>
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				8000 - 12000
	TIR, nm	6000 - 14500	N/A		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 (TIR)
Intervalo muestreo espectral		4 nm			0,2 - 2 mm (SWIR) 0,09 - 0,64 mm (VNIR) 1,7 mm (TIR)
Intevalo muestreo espacial		4 mm mínimo, escanea circunferencias de 8 mm de diámetro.	0,5 - 5 mm		
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.), no es de uso exclusivo en el ámbito geológico/minero. Existen alternativas de sistemas de carga de bandejas.	No requiere enfriamiento externo.

TABLA 5: TABLA COMPARATIVA DE EQUIPOS FIJOS DE ANÁLISIS HÍPER-ESPECTRAL.

Tipo		Equipos de mapeo				
Compañía		SpecTIR			NASA	
Tecnología		<i>AisaEAGLE</i>	<i>AisaHAWK</i>	<i>AisaOWL</i>	Hyperion Imaging Spectromter	AVIRIS
Rangos espectrales	VNIR, nm	400 - 970	N/A	N/A	400-2500	380-2500
	SWIR, nm	N/A	970 - 2500	N/A		
	TIR, nm	N/A	N/A	7700 - 12000	N/A	N/A
Resolución espectral (min, max)		3,3 nm	12 nm	100 nm	N/A	10 nm
Intervalo muestreo espectral		1,15 - 9,2 nm	6,3 nm	48 nm	10 nm	10 nm
Intevalo muestreo espacial		N/A	N/A	N/A	15 a 60 m (en la tierra)	Según altura de vuelo, 4 - 20 km altura, 2 - 11 km ancho de barrido
Velocidad escaneo	Min	N/A	N/A	N/A	N/A	Velocidad vuelo, 130 - 730 km/h
	Max	N/A	N/A	N/A	N/A	
Tipo de muestras analizables		Vuelos de Mapeo	Vuelos de Mapeo	Vuelos de Mapeo	Mapeo satelital	Vuelos de Mapeo
Preparación previa		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Registro de imágenes					Sí, especificaciones ausentes	
Permite uso de software externo		RSCube	RSCube	RSCube	N/A	N/A
Otras características					El equipo se encuentra montado en un satélite, todo enmarcado en el programa de la NASA Earth Observing -1 Mission (EO-1). Requiere dos calibraciones (una antes de salir y otra en la órbita)	

TABLA 6: TABLA COMPARATIVA DE EQUIPOS DE MAPEO HÍPER-ESPECTRAL.

Este estudio se enmarcó en el desarrollo del proyecto INNOVA CSIRO – CHILE 10CEII-9007, el cual disponía del Hylogger-3 para los análisis de caracterización. Además este equipo gracias a poseer sensores en los 3 rangos (VNIR, SWIR y TIR) permite la identificación de un mayor cantidad de minerales, entre ellos arcillas y gangas, por lo que es la herramienta adecuada para este estudio.

3.3 PROBLEMAS ASOCIADOS A REOLOGÍA

Al realizar la revisión bibliográfica se puso especial énfasis en identificar problemas de la industria que tuvieran su origen en características reológicas de las pulpas minerales tratadas, a continuación se exponen los problemas revisados.

3.3.1 RECUPERACIÓN AFECTADA POR GELACIÓN

Muchos de los problemas que causan los minerales arcillosos son conocidos, como las bajas recuperaciones en flotación, la mala calidad de los concentrados generados, entre otros. Sin embargo existe un problema que es menos visible debido a que ocurre dentro de los reactores y/o pilas de lixiviación que es la *gelación*, es decir, la formación de geles de alta viscosidad los cuales entorpecen la difusión del agente lixivante disminuyendo dramáticamente la cinética y por ende la recuperación y además generan problemas en los sistemas de bombeo debido a su viscosidad y alto esfuerzo de fluencia.

Afortunadamente para la ocurrencia de este fenómeno son necesarias una gran serie de factores ya que los geles se forman en condiciones bastante particulares de pH, mineralogía y cantidades estequiométricas de iones en solución, por lo que no son muy comunes, sin embargo cuando aparecen son un gran problema y que muchas veces se tarda en detectar.

Tan *et al.* (2013) estudiaron un mineral rico en arcillas de clorita con fluorita como mineral accesorio, encontrándose que para una proporción clorita/fluorita de 10:1, las propiedades reológicas cambiaban drásticamente detectándose la formación de geles viscosos en ese punto.

En la Figura 51 y Figura 52 podemos notar el aumento de viscosidad al introducir fluorita en la mezcla, por ejemplo para una tasa de deformación de 100 1/s tenemos 0,3 Pa·s en el caso de clorita pura y de 6 Pa·s en la mezcla de 10:1 clorita/fluorita transcurridos 30 minutos de lixiviación. Ambas pulpas contenían un 57% de concentración de sólidos en peso. Además se aprecia un aumento de la viscosidad en la medida que transcurre tiempo de lixiviación.

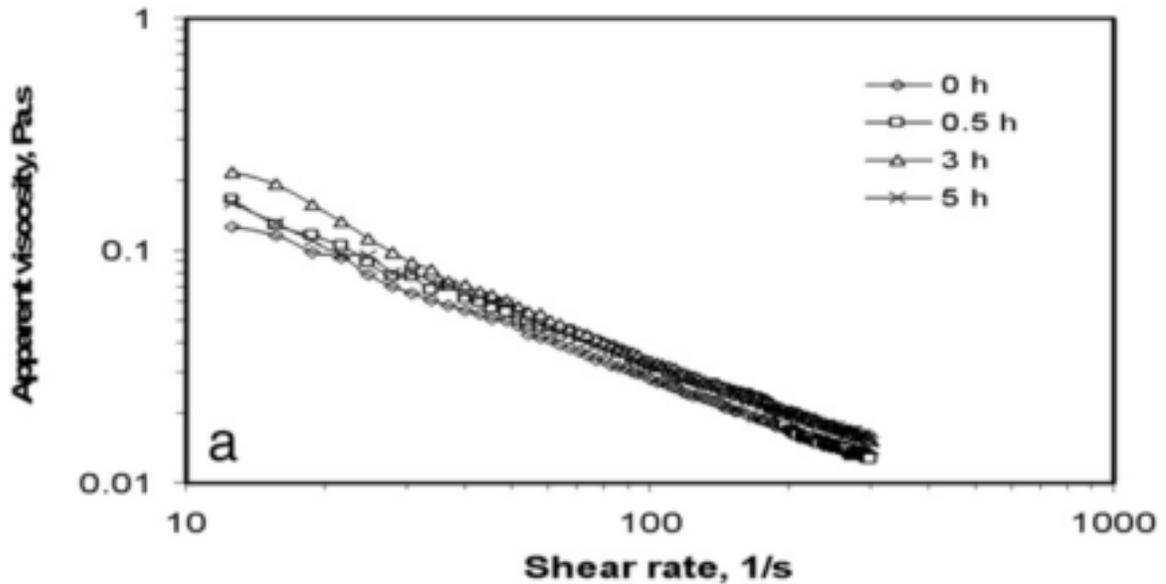


FIGURA 51: VISCOSIDAD VS. TASA DE DEFORMACIÓN PARA 100% CLORITA
(TAN ET AL., 2013)

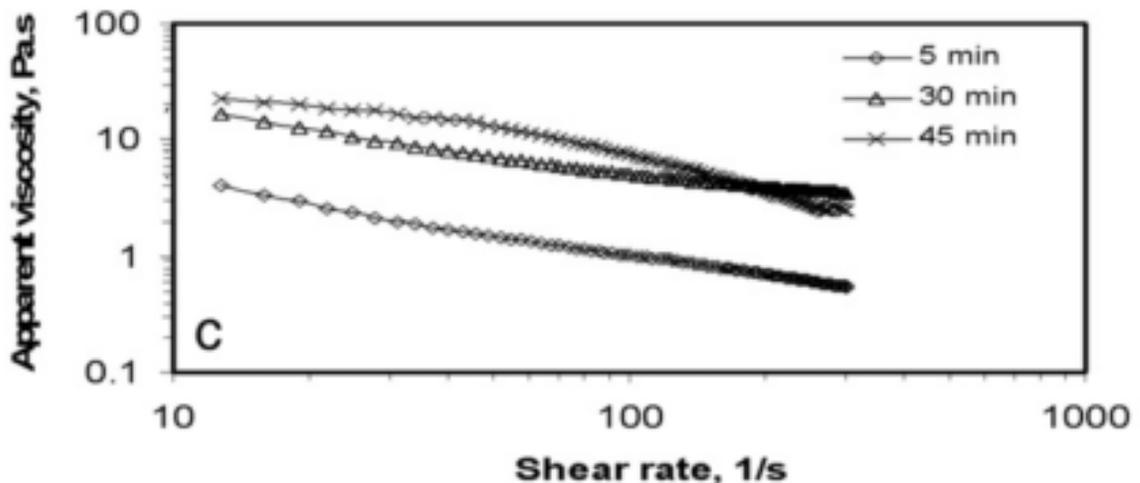


FIGURA 52: VISCOSIDAD VS. TASA DE DEFORMACIÓN PARA UNA RAZÓN CLORITA/FLUORITA DE 10:1
(TAN ET AL., 2013)

Además, se reporta un crecimiento del esfuerzo de fluencia muy violento junto con el crecimiento de la viscosidad. Luego de 3 horas de lixiviación, la pulpa de clorita pura mostró un esfuerzo de fluencia de 45 Pa, mientras las proporciones 20:1 y 5:1 de clorita/fluorita luego de 1 hr y 1,5 hrs de lixiviación respectivamente mostraron unos esfuerzos de 140 y 65 Pa. Pero a la razón crítica de 10:1, luego de 45 min de lixiviación se midieron 201 Pa para el esfuerzo de fluencia y finalmente, luego de 55 min simplemente no se pudo medir con el equipo disponible.

Tener conocimiento a priori de situaciones como esta sería ventajoso al poder anteponerse a ascensos abruptos de viscosidad, por ejemplo, mezclando minerales de distintos sectores de la mina de manera de evitar la razón clorita/fluorita crítica que da origen a este problema, evitándose la caída de la recuperación y los problemas de bombeo asociados.

3.3.2 REOLOGÍA LIMITANTE DE CAPACIDAD DE TRATAMIENTO

Uno de los primeros problemas que se encuentran al revisar bibliografía al respecto es que las altas viscosidades y esfuerzos de fluencia son una gran barrera para la alimentación de algunos equipos, cuya operación y eficiencia se ve severamente afectada con el incremento de algunas de estas dos propiedades mencionadas, obligando a aumentar la cantidad de agua en la mezcla hasta adquirir las propiedades deseadas, por su puesto aumentando su consumo.

Por otra parte, no todos los minerales se comportan de la misma manera, existen casos en que para la misma concentración de sólidos con dos minerales distintos se observan comportamientos reológicos absolutamente distintos. Actualmente existen pocos modelos predictivos para estos fenómenos ocasionando problemas graves como dimensionamientos inadecuados de sistemas de bombeo y transporte e incluso de equipos, sobre todo al subestimar efectos como la reopexia o las pulpas de comportamiento no-newtoniano dilatante.

En esta sección analizaremos casos en que se probó el uso de reactivos químicos (dispersantes) para disminuir los esfuerzos de fluencia o viscosidades de distintas pulpas de manera de hacer un acercamiento a las ventajas y posibilidades del estudio del uso de estos químicos.

3.3.2.1 CASOS ESTUDIADOS

Caso de lixiviación ácida presurizada

Un claro ejemplo de esta problemática podemos encontrarla en el siguiente trabajo (Klein & Hallbom, 2002), en que se realizó una caracterización reológica de una pulpa mineral de lateritas de níquel debido a problemas en el manejo de este material, en particular en un proceso de lixiviación ácida presurizada, debido a su altísima viscosidad y reopexia. Se evaluaron las opciones de modificar el pH y agregar reactivos con el fin de modificar este comportamiento problemático.

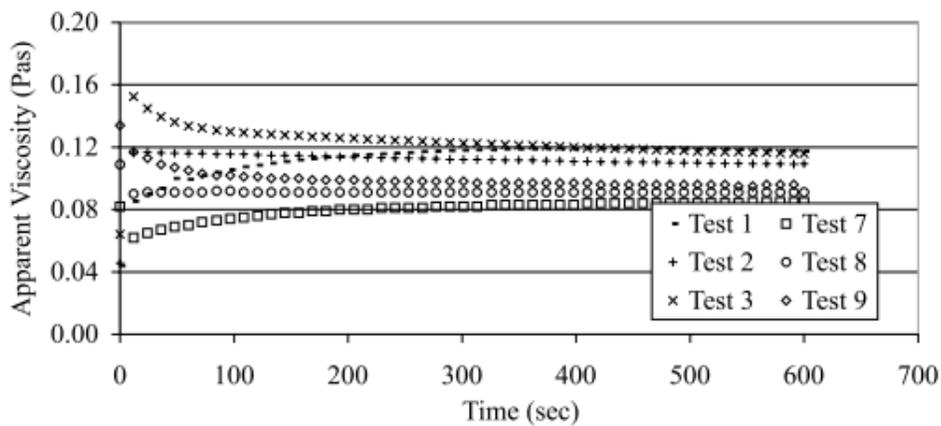


Fig. 3. Apparent viscosity versus time with and without dispersant.

FIGURA 53: COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD EN EL TIEMPO BAJO DISTINTAS CONDICIONES.
(KLEIN & HALLBOM, 2002)

En la Figura 53 se observa el comportamiento temporal de las lateritas de níquel bajo distintas condiciones:

TEST	PRE-TASA DE DEFORMACIÓN (S-1)	TASA DE DEFORMACIÓN (S-1)	CONDICIÓN
1	50	200	Natural
2	200		Natural
3	400		Natural
7	50		C/dispersante
8	200		C/dispersante
9	400		C/dispersante

TABLA 7: MEDICIÓN DE VISCOSIDAD VS. TIEMPO CON Y SIN DISPERSANTE.
(KLEIN & HALLBOM, 2002)

Se observa que el comportamiento temporal en general se mantiene constante, sin embargo efectivamente notamos una disminución en las viscosidades. El dispersante utilizado en este caso fue *hexametáfosfato* en una dosis de 1000 ppm.

El controlar la viscosidad y esfuerzo de fluencia permitiría un aumento en la concentración de sólidos en la pulpa, aumentando la capacidad de tratamiento por unidad de volumen del reactor, además de disminuir los costos energéticos de bombeo. Otro efecto positivo es una disminución del consumo de ácido ya que la dosificación recomendada se mantiene constante y relativa al flujo de líquidos y disminuiría la cantidad de agua en la pulpa (Klein & Hallbom, 2002). Se puede ver que una modificación de las propiedades reológicas de la pulpa puede traer una gran cantidad de beneficios.

Caso de capacidad de tratamiento en molienda

La molienda es un proceso en el cual se alimenta una pulpa mineral a un tambor giratorio normalmente de acero, el cual contiene bolas de acero en su interior, que durante el movimiento se golpean unas a otras aplastando de manera azarosa las partículas que se ubiquen en los puntos de contacto. Una viscosidad muy alta podría ocasionar incluso la adherencia de las bolas a las paredes del tambor ocasionando una molienda muy ineficiente.

Bernhardt *et al.* (1999) realizaron pruebas de molienda ultra-fina de caliza, en las cuales se hicieron mediciones de viscosidad y potencial zeta utilizando diferentes dosis de poliacrilato de sodio (SPA) como agente dispersante.

En la Figura 54 se observa el aumento del potencial zeta junto al aumento de la dosis de dispersante, lo cual lleva a un aumento de la repulsión de la EDL finalmente traduciéndose en una disminución importante de la viscosidad, para dos concentraciones de sólidos (60% y 50%). Se puede apreciar que a partir de una dosis 0,5% el comportamiento reológico se mantiene constante.

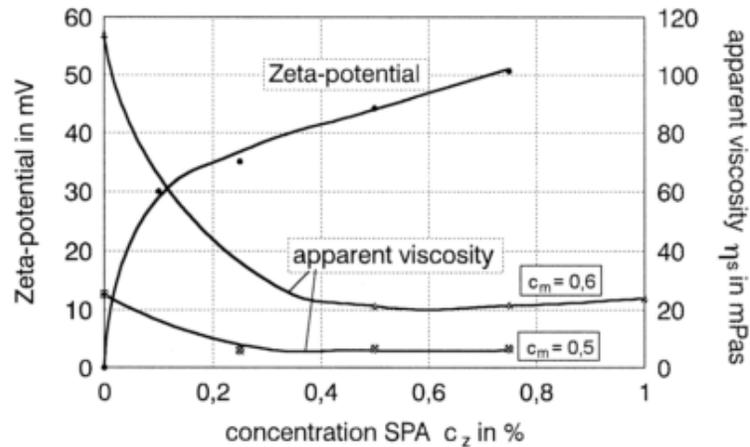


Fig. 4. Addition of SPA to the feed suspension.

FIGURA 54: EFECTO DEL SPA EN EL POTENCIAL ZETA Y VISCOSIDAD DE LA PULPA.

(BERNHARDT *ET AL.*, 1999)

Finalmente, se utilizó para comparar un índice de superficie fresca creada por unidad de energía usada (m^2/kJ), y alimentando pulpas con distintas concentraciones de sólidos, unas sin reactivos y otras con 0,5% de SPA se realizaron una serie de experimentos para comparar si había cambios en la eficiencia de molienda.

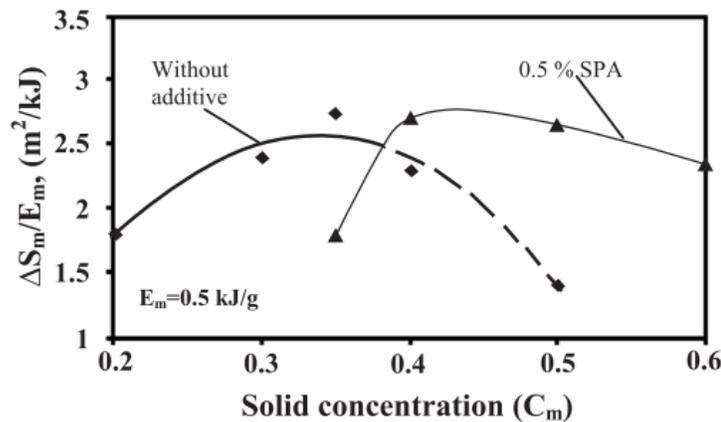


FIGURA 55: EFICIENCIA DE MOLIENDA VS. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS CON Y SIN DISPERSANTE.

(BERNHARDT *ET AL.*, 1999)

En la Figura 55 se observan los resultados obtenidos. Los autores concluyen que bajo el escenario con dispersante, la concentración óptima de sólidos aumentaba, significando un aumento en la capacidad de tratamiento y por ende un aumento en la eficiencia por unidad de volumen de reactor. Además atribuyen las bajas eficiencias a menores concentraciones de sólidos al hecho de que al disminuir la viscosidad las partículas en las zonas de estrés (puntos de colisión o abrasión) escapan con mayor facilidad.

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1 CONSIDERACIONES GENERALES

4.1.1 CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE MINERALES

Las propuestas experimentales expuestas a continuación se basan principalmente en el estudio de la incidencia mineralógica en propiedades reológicas de pulpas. Para la caracterización mineralógica de muestras se utilizó el equipo HyLogger 3, descrito en la página 52.

Las ventajas del uso de esta tecnología son la expedita adquisición de datos producto de una preparación de muestra muy sencilla donde además el análisis no es destructivo.

La reología, como se vio durante la revisión bibliográfica, se ve fundamentalmente dominada por los minerales más abundantes y sobre todo las arcillas. Esta tecnología de caracterización se encuentra capacitada para la detección de la gran mayoría de los minerales de ganga más comunes, que normalmente conforman más del 95% del total de los minerales de una muestra (a excepción de un concentrado), y además es capaz de reconocer las arcillas.

4.1.2 MEDICIONES REOLÓGICAS

Sedimentación

Normalmente la medición de las propiedades reológicas de una pulpa mineral presentan algunas complicaciones debido a su naturaleza heterogénea sólido/líquido, por lo que se ha realizado un trabajo de investigación en torno a técnicas frecuentemente utilizadas para estos fines.

Uno de los principales problemas es la sedimentación de las partículas, la cual ocurre principalmente cuando se pretende medir el esfuerzo de corte a bajas tasas de deformación, generando un gradiente de la concentración de sólidos a lo largo de la altura del vaso o recipiente donde se contiene la pulpa en medición.

Para evitar el efecto de la sedimentación se han utilizado (He *et al.*, 2004) los arreglos ilustrados en la Figura 56 y Figura 57.

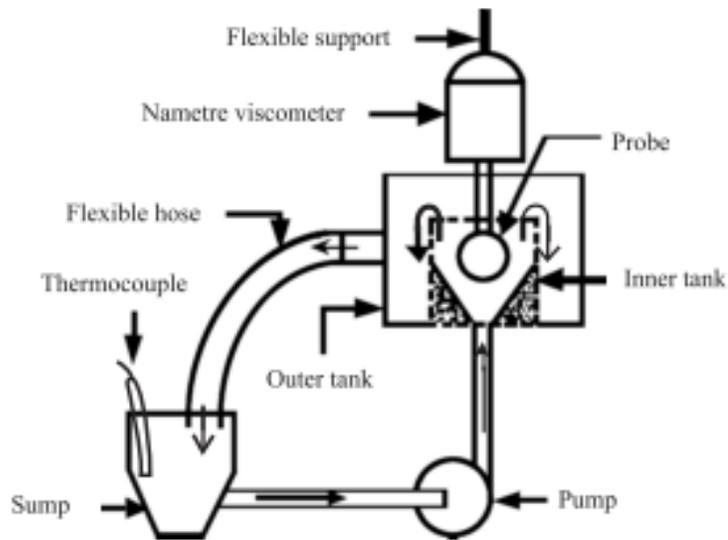


FIGURA 56: PROBLEMA DE SEDIMENTACIÓN. ARREGLO EXPERIMENTAL 1.

(HE ET AL., 2004)

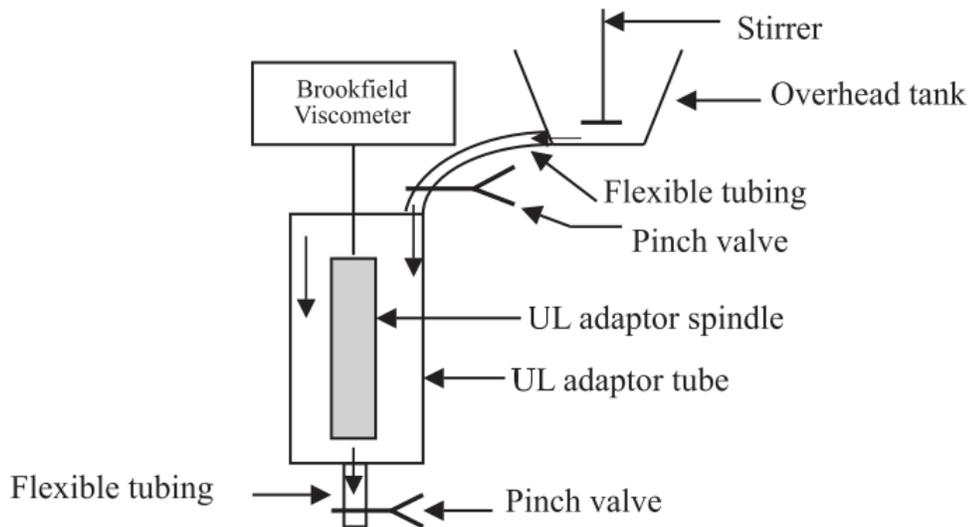


FIGURA 57: PROBLEMA DE SEDIMENTACIÓN. ARREGLO EXPERIMENTAL 2.

(HE ET AL., 2004)

Este efecto cobra importancia para granulometrías gruesas, ya que son las partículas grandes las que tienen a sedimentar primero, en el caso de los materiales usados en este estudio se encuentran casi en su totalidad bajo la malla #400 haciendo que los tiempos de sedimentación sean suficientemente extensos como para hacer las mediciones sin problema, de manera que se utilizó agitación exclusivamente para mantener varias pulpas suspendidas mientras se realizaban mediciones sucesivas.

Deslizamiento

Otro fenómeno perjudicial para las mediciones reológicas, es el deslizamiento entre las paredes del contenedor de la muestra y la pulpa, o entre el spindle (la parte del reómetro en contacto con la pulpa) y el líquido, que a veces ocurre para pulpas muy viscosas. Este fenómeno puede ocasionar lecturas distorsionadas del esfuerzo de fluencia (Kwak, James, & Klein, 2005) como se observa en la Figura 58.

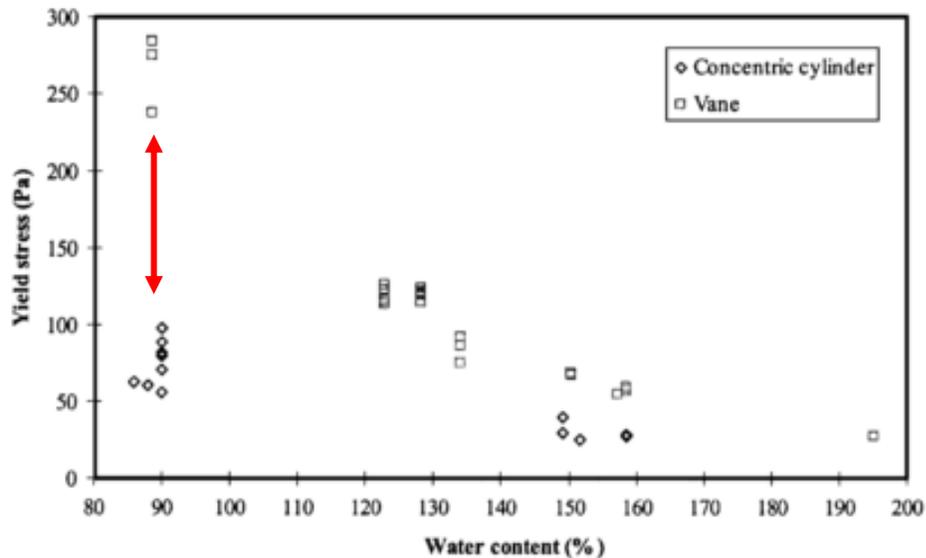


FIGURA 58: DIFERENCIAS EN MEDICIÓN DE ESFUERZO DE FLUENCIA POR DESLIZAMIENTO.

(KWAK ET AL., 2005)

Como se observa en la Figura 58, la flecha roja indica la diferencia en las mediciones realizadas con dos geometrías de spindle distintas, *vane* (paletas) y un cilindro concéntrico. El problema es evitable utilizando una geometría adecuada (Kwak *et al.*, 2005). Se concluye que los spindle de paleta evitan el deslizamiento. Por otra Nguyen *et al.* (2006) concluyen que existe una baja reproducibilidad de los experimentos en reología entre laboratorios y entre personal, debido a la falta de control de la historia de deformación de los fluidos con reología de dependencia temporal.

Lamentablemente no fue posible conseguir en un tiempo razonable un spindle de paletas, por lo que el esfuerzo de fluencia no será considerado desde la medición propiamente tal, sino que será resultado del modelo ajustado considerando un tramo confiable de las reometrías realizadas.

4.2 ESTIMACIÓN DE HUMEDAD

4.2.1 MATERIALES Y EQUIPOS

- Minerales:
 - Bentonita de Arica (BA)
 - Bentonita COMACSA (BC)
 - Mica molida fina COMACSA (MC)
 - Caolín COMACSA (CC)
 - Cuarzo Impalpable (CI)
- Vasos precipitados
- Estufa
- Balanza (ADAM PGL 203)



FIGURA 59: SECADO EN ESTUFA.

4.2.2 PROCEDIMIENTO

1. Se pesan los vasos precipitados etiquetados a utilizar y se registra su peso (m_1).
2. Se deposita una cantidad de mineral distinto en cada vaso precipitado y se vuelve a pesar (m_2).
3. Se ponen los vasos en la estufa a 110°C por 24 horas como muestra la Figura 59.
4. Se vuelven a pesar los frascos con el mineral ahora seco (m_3).

La humedad -en base húmeda- (h) se obtiene de la siguiente ecuación:

$$h = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1}$$

ECUACIÓN 21: HUMEDAD EN BASE HÚMEDA.

4.2.3 RESULTADOS

Mineral	m1, g	m2, g	m3, g	Humedad base húmeda
BC	43,518	54,188	53,1	10,20%
MC	43,906	50,325	50,256	1,07%
CC	43,108	51,925	51,847	0,88%
CI	43,943	55	54,794	1,86%
BA	43,519	54,239	53,361	8,19%

TABLA 8: HUMEDAD EN BASE HÚMEDA

Las humedades bajo el 2% no fueron consideradas para el resto de los cálculos ya que podrían ser producto de errores de medición.

4.3 ESTIMACIÓN DE DENSIDAD

4.3.1 MATERIALES Y EQUIPOS

- Minerales:
 - Bentonita de Arica (BA)
 - Bentonita COMACSA (BC)
 - Mica molida fina COMACSA (MC)
 - Caolín COMACSA (CC)
 - Cuarzo Impalpable (CI)
- Matraz aforado (100 ml)
- Campana de vacío
- Bomba de Vacío
- Balanza (ADAM PGL 203)

4.3.2 PROCEDIMIENTO

1. Se pesan los 5 matraces aforados y se registra su peso (p_1)
2. Se pone una pequeña cantidad de mineral distinto en cada uno de los matraces y se vuelven a pesar (p_2).
3. Se vierte agua hasta cubrir el mineral en cada uno de los matraces.
4. Se ponen los 5 matraces en una campana de vacío (Figura 60) y se acciona la bomba.
5. Luego de unos 15 minutos desde que no se ve ninguna burbuja salir se sacan los matraces de la campana y se rellena con agua de la manera más exacta posible hasta la marca del matraz aforado.
6. Se pesan los 5 matraces y se vuelve a registrar su peso (p_3).
7. Además se pesan los matraces solo con agua hasta la marca, de manera de tener la densidad del agua utilizada (p_4).

La densidad se calcula como sigue:

$$\rho_{\text{mineral}} = \frac{(p_2 - p_1)(1 - h)}{100 - \frac{(p_3 - p_1) - (p_2 - p_1)(1 - h)}{\rho_{\text{agua}}}}$$

ECUACIÓN 22: DENSIDAD DEL MINERAL.

Donde:

$$\rho_{\text{agua}} = \frac{p_4}{100}$$

ECUACIÓN 23: DENSIDAD DEL AGUA.



FIGURA 60: CAMPANA DE VACÍO.

4.3.3 RESULTADOS

Mineral	p1, g	p2, g	H, g	p3, g	p4, g	ρ_{agua}	Densidad Mineral, g/ml
MC	60,463	68,700	0%	165,362	160,134	0,997	2,728
CC	60,936	69,966	0%	166,082	160,596	0,997	2,539
BC	60,713	70,933	10,2%	166,062	160,413	0,997	2,593
BA	60,833	72,256	8,2%	167,244	160,575	0,997	2,739
CI	60,459	77,427	0%	170,717	160,185	0,997	2,630

TABLA 9: DENSIDAD DE LOS MINERALES.

4.4 REOMETRÍAS

4.4.1 MATERIALES Y EQUIPOS

- Minerales:
 - Bentonita de Arica (BA)
 - Bentonita Comacsa (BC)
 - Mica molida fina Comacsa (MC)
 - Caolín Comacsa (CC)
 - Cuarzo Impalpable (CI)
- Ácido sulfúrico
- Hidróxido de sodio
- Agua destilada y desmineralizada
- pHímetro (San-Xin SX711)
- Reómetro (Anton Paar QC con copa y spindle CC39 con software Rheoplus)
- Agitador (WiseCube WIS-20)
- Matraces
- Pissetas
- Pipetas
- Vasos precipitados
- Balanza (ADAM PGL 203)
- Probeta
- Espátulas
- Hojas de papel

4.4.2 PREPARACIÓN DE PULPAS

1. Se pesan los distintos minerales según las cantidades expuestas en el Anexo del 1 al 3 y se disponen sobre hojas de papel etiquetadas que ayudarán luego a verter el contenido, como se ve en la Figura 61.
2. Se mide la cantidad de agua requerida para cada prueba en una probeta y luego es vertida en el matraz etiquetado correspondiente.
3. Se vierte el contenido sólido de cada hoja en el matraz correspondiente y es agitado manualmente hasta mojar todo el mineral.
4. Los matraces con ahora las pulpas son colocados dentro del equipo de agitación (Figura 63), el cual es capaz de contener hasta 20 matraces.

4.4.3 AJUSTE DE PH

El pH se decidió ajustar a 7 con el principal motivo de hacer comparables las reometrías, por otra parte también se escogió este valor por ser el más cercano a los valores naturales de las distintas pulpas, de manera de agregar la menor cantidad de soluciones de ajuste a las suspensiones medidas.

1. Se retira del equipo de agitación el matraz con la pulpa que será analizada en el reómetro a continuación.
2. Se mide el pH inicial de dicha pulpa.
3. Según si el pH es mayor a 7 se añade ácido sulfúrico en una cantidad acorde al pH medido, y si es menor se añade la solución de hidróxido de sodio de la misma manera.
4. Se vuelve a medir el pH, si se encuentra en un rango de 7 ± 0.25 se procede inmediatamente con la reometría, de lo contrario se vuelve al paso 3.
5. Finalizado el ajuste se lava el pHímetro con agua destilada y desmineralizada.

4.4.3.1 PREPARACIÓN DE SOLUCIONES DE AJUSTE DE PH

Solución Ácida

1. Se añade 1 ml de H_2SO_4 (ácido sulfúrico) en un vaso precipitado.
2. Se agregan 24 ml de agua destilada y desmineralizada.
3. Se agita manualmente.

Solución Básica

1. Se añaden 8 gramos de hidróxido de sodio en un vaso precipitado.
2. Se agrega agua destilada y desmineralizada hasta los 25 ml.
3. Mediante agitación magnética se espera hasta que se disuelva todo el sólido.
4. Se obtiene una solución de concentración de 8 M.



FIGURA 61: PREPARACIÓN DE PULPAS.

4.4.4 MEDICIÓN DEL REOGRAMA

1. Se vierte la pulpa del matraz a la copa de acero del reómetro.
2. Se inserta la copa en el compartimiento de medición.
3. Se digita el código de la prueba junto con el pH medido y cualquier observación pertinente en el software Rheoplus.
4. Se inicia la medición y se espera a que finalice. (Figura 62).
5. Se retira la copa y el spindle y se lavan con agua destilada y desmineralizada
6. Se vuelve a poner el spindle en el reómetro, quedando listo para otra medición.



FIGURA 62: REOMETRÍA EN PROCESO.



FIGURA 63: AGITADOR WISECUBE.

4.4.5 TIPOS DE PRUEBA REOLÓGICA

Medición para la creación de diagramas ternarios

La medición reológica se realiza con una rampla lineal desde 1 a 300 s⁻¹ de tasa de deformación en 1 minuto, de manera de no dar tiempo para que el efecto buffer cambie significativamente el pH ajustado.

Mediciones de comportamiento temporal

Pre-agitación mediante impeller durante 24 horas seguida de una medición de rampla lineal 1 a 300 s⁻¹ de tasa de deformación en 1 minuto.

Medición del esfuerzo de corte durante 24 horas a una tasa de deformación constante de 250 s⁻¹.

4.4.6 SET DE PRUEBAS

Con el fin de la creación de diagramas ternarios de propiedades reológicas para la combinación de distintos minerales se decidió usar el siguiente set de composiciones (fracción volumétrica):

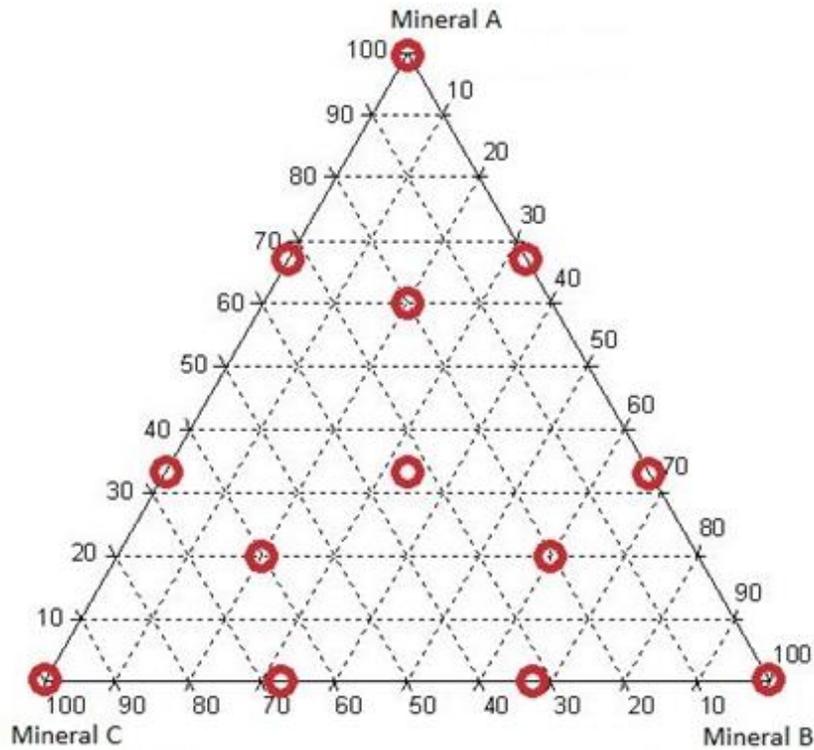


FIGURA 64: SET DE PRUEBAS REOLÓGICAS PARA LA CREACIÓN DE DIAGRAMAS TERNARIOS.

Mineral A (%)	Mineral B (%)	Mineral C (%)
100,00	-	-
67,67	-	33,33
33,33	-	67,67
-	-	100,00
60,00	20,00	20,00
20,00	20,00	60,00
67,67	33,33	-
33,33	33,33	33,33
-	33,33	67,67
33,33	67,67	-
20,00	60,00	20,00
-	67,67	33,33
-	100,00	-

TABLA 10: SET DE PRUEBAS REOLÓGICAS PARA LA CREACIÓN DE DIAGRAMAS TERNARIOS.

Los ejes del ternario representan la fracción volumétrica del total de sólido de ese mineral en específico, además cómo se verá más adelante (ver página 80) algunos ternarios son a un Cv de 30% y otros a 15%. El recuento final es el siguiente:

Minerales	5
Ternarios esfuerzo de fluencia	10
Ternarios de viscosidad	10
Reometrías	81

TABLA 11: RECUENTO DE PRUEBAS DE REOMETRÍA.

4.4.7 NOMENCLATURA DE PRUEBAS

Para fines prácticos se utilizó un código para etiquetar y referirse a la composición de las pruebas, el cual será utilizado a lo largo de este informe, el código contiene la información de la composición de las pulpas de la siguiente manera: se escribe la abreviación del mineral seguido de un número que va del 0 al 10 indicando la fracción aproximada de ese mineral, por ejemplo:

BA10 = 100% Bentonita de Arica

MC7 CI3 = 67,67% Mica COMACSA y 33,33% Cuarzo Impalpable

BA6 BC2 CC2 = 60% Bentonita de Arica, 20% Bentonita COMACSA y 20% Caolín COMACSA.

4.5 AJUSTE DE MODELO REOLÓGICO

Observando el comportamiento reológico medido en las pruebas, se escogerá un modelo pertinente, es importante mencionar que dicho modelo debe ser el mismo para todas las pulpas debido al análisis posterior. Los modelos candidatos se exponen en la sección 3.1.3 de este informe. Además, el modelo debe tener un buen ajuste en el rango de la tasa de deformación en que la medición se considera confiable (ver página 64).

A modo de ejemplo, Kwak *et al.*, (2005) ajustaron un modelo de Bingham (Ecuación 4) y luego se compararon sus parámetros para relaves a distintas concentraciones de sólidos, como muestra en la Figura 65, Figura 66 y Figura 67. Como se puede apreciar, el modelo de Bingham tiene un buen ajuste sobre una tasa de deformación de 150 s^{-1} :

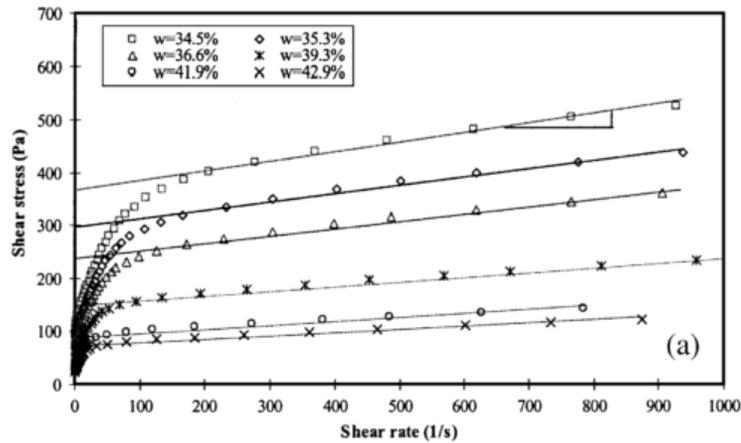


FIGURA 65: AJUSTE DE MODELO DE BINGHAM.

(KWAK *ET AL.*, 2005)

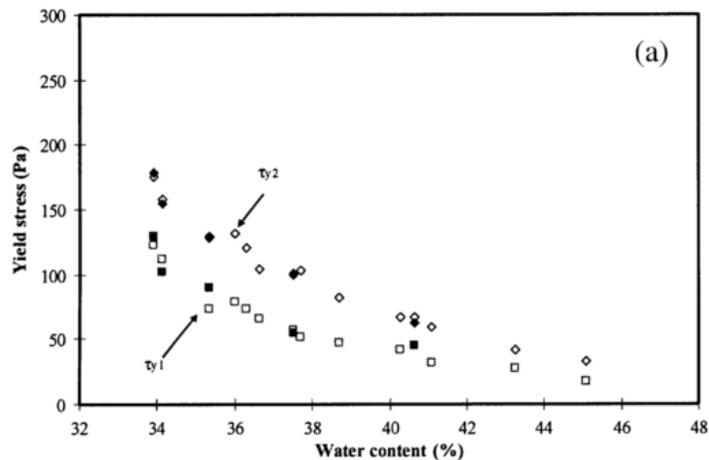


FIGURA 66: COMPARACIÓN DE ESFUERZO DE FLUENCIA EN MODELO DE BINGHAM.

(KWAK *ET AL.*, 2005)

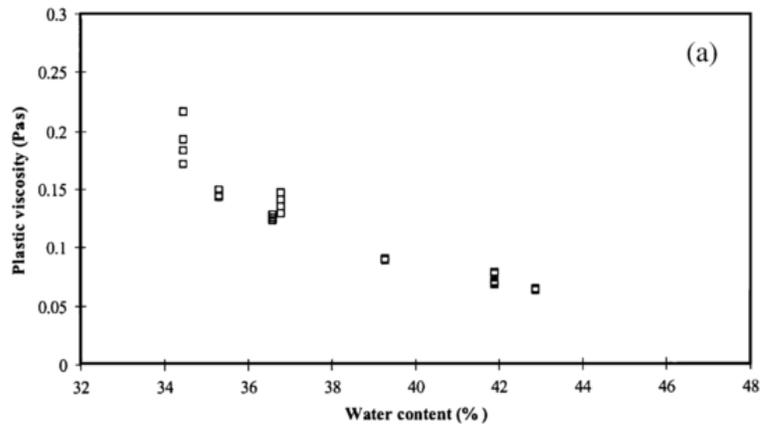


FIGURA 67: COMPARACIÓN DE VISCOSIDAD PLÁSTICA EN MODELO DE BINGHAM.

(KWAK *ET AL.*, 2005)

Como se verá más adelante, el modelo escogido fue el modelo de Bingham debido principalmente a su simplicidad y a su buen ajuste para altas tasas de deformación.

El ajuste de los modelos reológicos se realizó mediante el software Rheoplus, del mismo fabricante del reómetro (Anton Paar). A través de este software se definen los parámetros de cada experimento, como tasa de deformación, duración, etc. Además este software permite el análisis posterior de las reometrías, como el ajuste de modelos u otro tratamiento de los datos.

Finalmente se probó un ajuste matemático lineal y otro no lineal para los diagramas ternarios de viscosidad y esfuerzo de fluencia para una terna de minerales como ejemplo, de manera de obtener un modelo matemático completo desde la caracterización espectral a estimación de propiedades reológicas.

4.6 CARACTERIZACIÓN HÍPER-ESPECTRAL

Además del estudio reológico, dentro de los objetivos de este estudio se encuentra la evaluación de las técnicas de caracterización híper-espectral como herramienta para el control de la reología a través de la mineralogía.

Con este fin es que se procederá a realizar la caracterización híper-espectral de todas las pulpas analizadas.

4.6.1 MATERIALES Y EQUIPOS

- Minerales:
 - Bentonita de Arica (BA)
 - Bentonita Comacsa (BC)
 - Mica molida fina Comacsa (MC)
 - Caolín Comacsa (CC)
 - Cuarzo Impalpable (CI)
- Balanza (ADAM PGL 203)
- Hojas de papel
- Cilindros de acero (para hacer briquetas)
- Prensa hidráulica
- HyLogger-3 y TSG Software (ver página 52)



FIGURA 68: BRIQUETAS EN BANDEJA DE ANÁLISIS.

4.6.2 PREPARACIÓN DE MUESTRAS (BRIQUETAS)

1. Se pesan los minerales en las cantidades indicadas en el Anexo del 1 al 3 y se disponen en hojas de papel etiquetadas que ayudaran a verter el contenido.
2. Se vierte el contenido sólido de las hojas en el cilindro de acero y se coloca el cilindro ensamblado en la prensa hidráulica.
3. Se aumenta la presión sobre el cilindro hasta alcanzar 4 toneladas de presión y se mantiene por 15 segundos.
4. Se retira la briqueta y se limpian los cilindros de acero para continuar con la siguiente briqueta.

4.6.3 ANÁLISIS HÍPER-ESPECTRAL

1. Se disponen las brichetas y sus respectivos códigos en la mesa robótica del HyLogger-3, de acuerdo al *template*¹ predefinido.
2. Se inicia el escaneo hiper-espectral y se almacenan los datos duros para el análisis posterior.
3. Se ingresan los datos al software especializado, TSG, donde se hace el tratamiento pertinente de los datos (Figura 69).

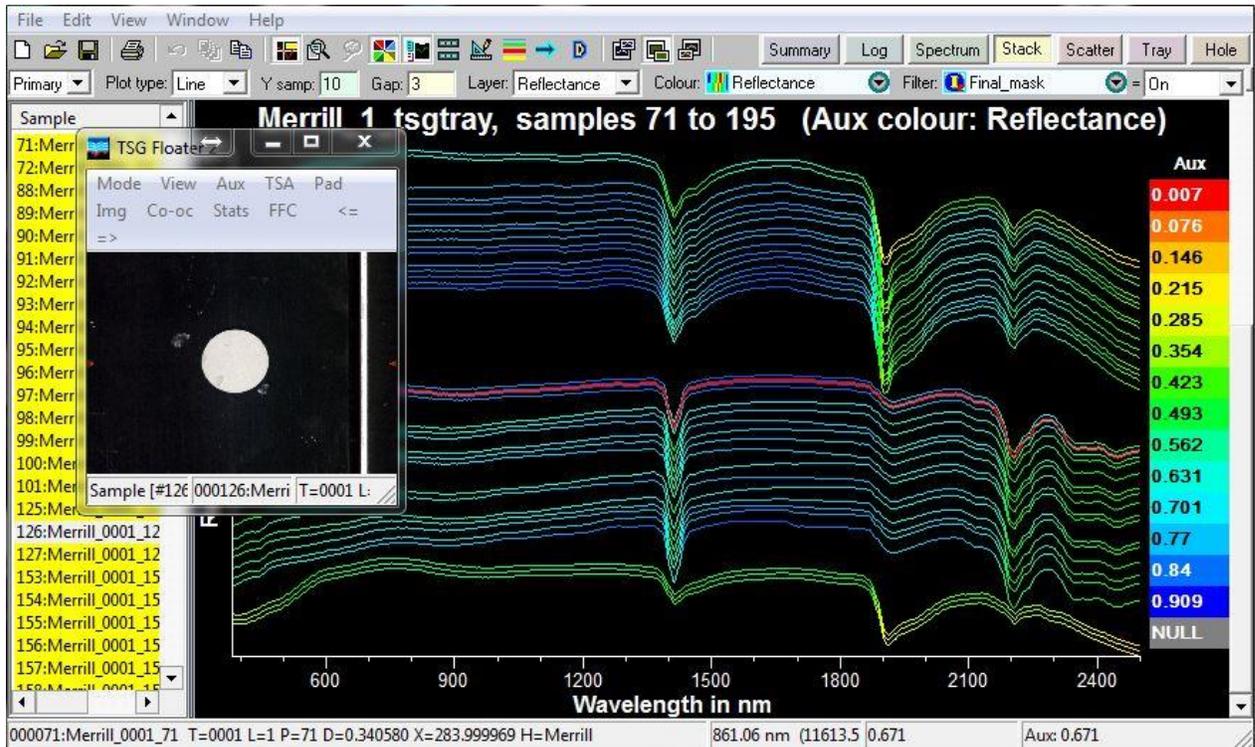


FIGURA 69: TRATAMIENTO EN SOFTWARE TSG.

¹ Template: en el contexto del HyLogger-3, el *template* corresponde a las especificaciones del tipo de bandeja o contenedor de las muestras, definiendo la ruta de análisis de los sensores sobre la mesa robótica.

4.7 ESQUEMA GLOBAL

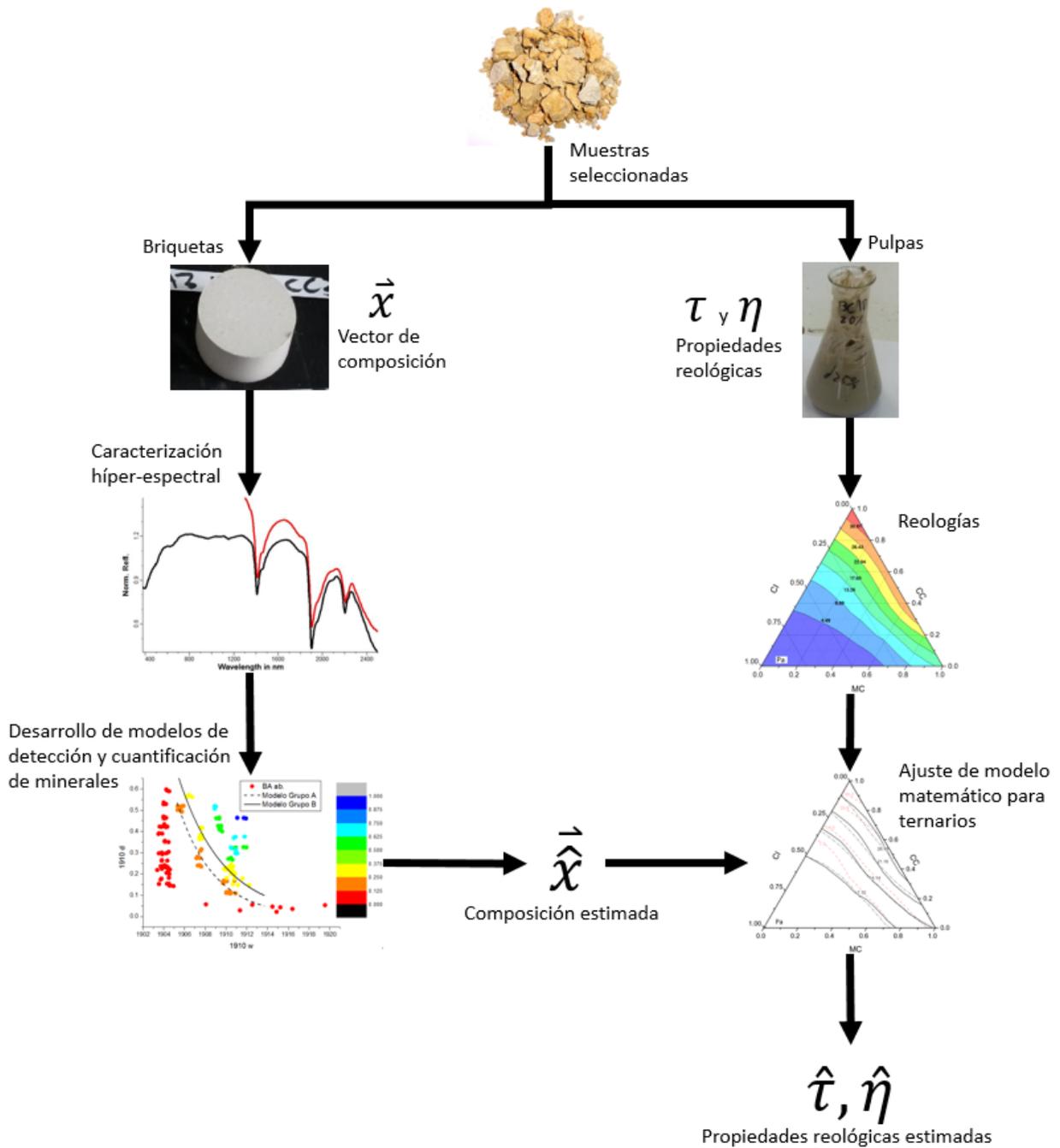


FIGURA 70: ESQUEMA GLOBAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.

En la Figura 70 se muestra el esquema general del trabajo de investigación, identificándose las etapas principales para el desarrollo del modelo de control y predicción de las propiedades reológicas. Más adelante se discutirá sobre su aplicabilidad en la industria.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS

Antes de las mediciones reológicas se realizaron una serie de pruebas preliminares para definir la concentración de sólidos en volumen con la cual se trabajaría, cuidando que la viscosidad y esfuerzo de fluencia de las distintas pulpas quedara dentro del rango óptimo de medición del equipo (Anton Paar Rheolab QC), sin embargo se observó que las pulpas que contenían bentonita COMACSA presentaban un comportamiento reológico extremadamente viscoso y de alto esfuerzo de fluencia, que por una parte quedaba fuera del rango de medición del equipo y además no era posible de verter en la copa. En la Figura 71 se puede ver la espátula cubierta de pulpa compuesta únicamente de esta bentonita a una concentración de sólidos en volumen de 20%.

Finalmente luego de las pruebas preliminares se concluyó que la concentración de sólidos ideal para las mediciones sería de 30%, sin embargo para todas las pruebas que contuvieran bentonita COMACSA se definió en 15% e incluso con esa concentración algunas pulpas no pudieron ser medidas, sin embargo bajar aún más de esa concentración implicaría quedar bajo el rango óptimo de medición una cantidad mayor de pruebas.



FIGURA 71: PRUEBA PRELIMINAR CON BENTONITA COMACSA, Cv20%.

5.2 CARACTERIZACIÓN GENERAL

5.2.1 GRANULOMETRÍA

Para comprender los fenómenos reológicos es importante tener en consideración la granulometría (ver página 26). Para esto se enviaron muestras de los 5 minerales a análisis granulométrico. Debido al fino tamaño de los materiales utilizados, no se pudo medir la granulometría por tamizado, si no que debió utilizarse un equipo de medición por difracción de láser, el MasterSizer2000. En la Figura 72 se presentan los resultados para los 5 minerales, la granulometría para todas las demás reometrías se encuentran en el Anexo 13.

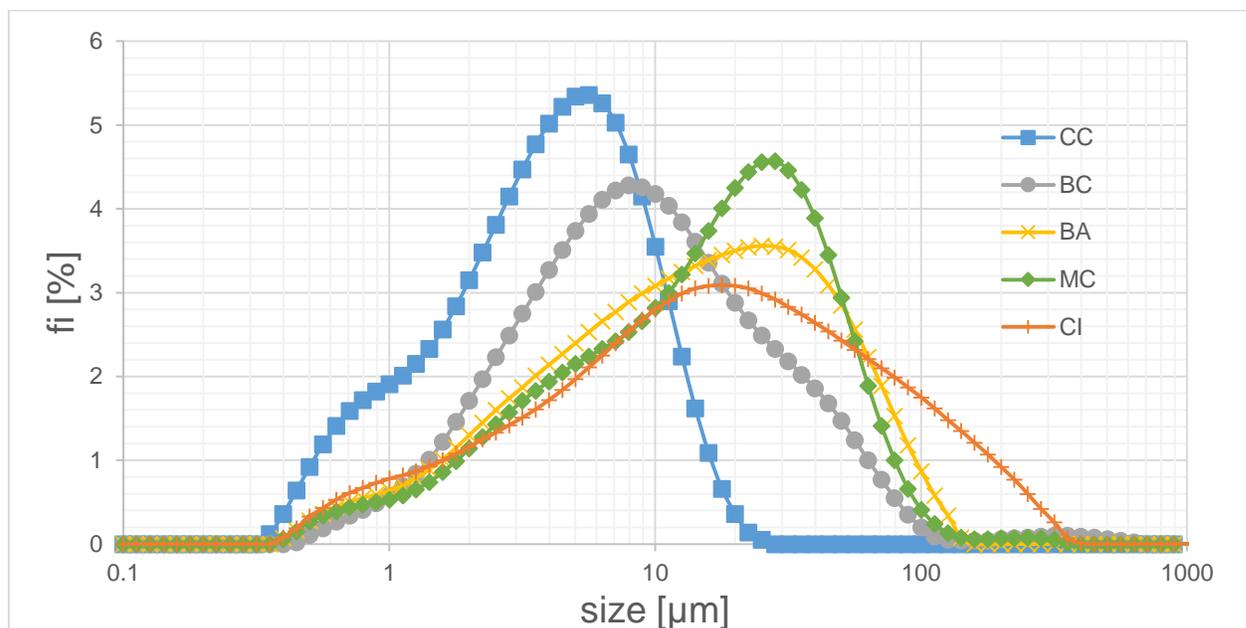


FIGURA 72: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO, FRACCIÓN RETENIDA.

La siguiente tabla resume la caracterización general realizada para los materiales utilizados:

Mineral	Humedad	Densidad, g/ml	d80 (µm)	d50 (µm)
BC	10.20%	2.593	24.348	9.226
MC	1.07%	2.728	38.859	17.566
CC	0.88%	2.539	8.248	4.243
CI	1.86%	2.630	62.386	18.064
BA	8.19%	2.739	40.662	14.990

TABLA 12: RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LOS MATERIALES.

5.2.2 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Para conocer con exactitud la mineralogía de los cinco materiales utilizados, una muestra de cada uno fue enviada a un análisis de XRD cuantitativo. Las siguientes tablas muestran el análisis enviado por el laboratorio. Los gráficos se pueden encontrar en el Anexo del 4 al 8.

5.2.2.1 MICA COMACSA (MC)

Mica COMACSA (MC)		
Compound Name	Formula	%
Muscovite-2M1, V-Ba-rich	$(K,Ba,Na)_{0.75}(Al,Mg,Cr,V)_2(Si,Al,V)_4O_{10}(OH,O)_2$	23.45
Muscovite-2M1	$KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH,F)_2$	76.55

TABLA 13: RESULTADO qXRD MICA COMACSA (MC).

Corroborado por el análisis híper-espectral, la muestra de mica COMACSA corresponde a muscovita.

5.2.2.2 CUARZO IMPALPABLE (CI)

Cuarzo (CI)		
Compound Name	Formula	%
Quartz	SiO ₂	100

TABLA 14: RESULTADO qXRD CUARZO (CI).

El análisis híper-espectral en el rango termal (TIR) muestra un claro espectro de cuarzo, sin embargo el algoritmo automático TSA también asocia otros minerales posiblemente debido a una medición poco óptima debido a la naturaleza pulverizada de la muestra.

5.2.2.3 CAOLÍN COMACSA (CC)

Caolín COMACSA (CC)		
Compound Name	Formula	%
Dickite 2M1	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	35.770
Quartz low	SiO ₂	14.300
Kaolinite 1A	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	33.844
Alunite	K(Al ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂)	5.657
Muscovite-2M1, V-Ba-rich	(K,Ba,Na) _{0.75} (Al,Mg,Cr,V) ₂ (Si,Al,V) ₄ O ₁₀ (OH,O) ₂	1.124
Pyrophyllite-2M	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	3.847
Calcite	Ca(CO ₃)	0.697
Anhydrite	Ca(SO ₄)	1.496
Anatase	TiO ₂	0.511
Amorphous	-----	2.755

TABLA 15: RESULTADO QXRD CAOLÍN COMACSA (CC).

Este análisis tiene una muy buena relación con el análisis hiper-espectral, el cual también detectó la presencia de dickita y caolinita, siendo estos los principales componentes de la muestra.

5.2.2.4 BENTONITA ARICA (BA)

Bentonita Arica (BA)		
Compound Name	Formula	%
Anhydrite	Ca(SO ₄)	5.296
Quartz, syn	SiO ₂	10.522
Andesine	Na _{0.499} Ca _{0.491} (Al _{1.488} Si _{2.506} O ₈)	22.484
Orthoclase	K _{0.886} Na _{0.099} Ca _{0.009} Ba _{0.012} Al _{1.005} Si _{2.995} O ₈	8.232
Muscovite 2M1	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	20.093
Kaolinite 1A	Al ₂ (Si ₂ O ₅)(OH) ₄	11.254
Amorphous	-----	22.119

TABLA 16: RESULTADO QXRD BENTONITA ARICA (BA).

El principal componente de una bentonita es la montmorillonita, sin embargo no fue detectada por el análisis de difracción de rayos X, pero su presencia se pudo corroborar con el análisis hiper-espectral. Probablemente la interpretación automatizada utilizada por el laboratorio pasó por alto el mineral confundiéndolo y dando origen a la fracción etiquetada como “amorfo”.

5.2.2.5 BENTONITA COMACSA (BC)

Bentonita COMACSA (BC)		
Compound Name	Formula	%
Cristobalite, syn	SiO ₂	12.456
Quartz low	SiO ₂	1.934
Anorthite, Na-rich, disordered	(Ca,Na)(Si,Al) ₄ O ₈	31.761
Muscovite 2M1	KAl ₃ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₂	2.089
Amorphous	-----	51.760

TABLA 17: RESULTADO QXRD BENTONITA COMACSA (BC).

Al igual que el caso anterior, el qXRD no detectó la montmorillonita, que nuevamente fue corroborada por el análisis híper-espectral. Nuevamente aparece la fracción amorfa donde probablemente se encuentre la arcilla en cuestión.

5.3 Reometrías

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las mediciones de las pulpas de un solo componente, junto a cada reometría se encuentra el modelo de Bingham (ver página 8: 3.1.3.1 Modelo de Bingham) ajustado utilizando las mediciones entre tasas de deformación de 100 y 200 1/s, escogido como el rango confiable de medición dado su comportamiento homogéneo.

NOTA: todos los experimentos se encontraron entre 20 y 22°C

5.3.1 BA10

- Cv=30%
- pH=7,00
- Modelo de Bingham

$$\tau = 146,74 + 0,29611 \dot{\gamma}$$

- Esfuerzo de fluencia = 146,74 Pa
- Viscosidad= 0,29611 Pa·s

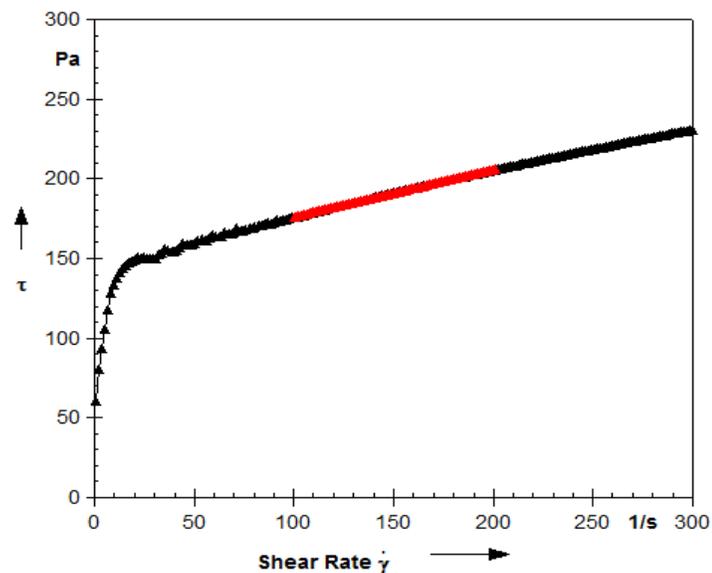


FIGURA 73: REOMETRÍA BA10.

NEGRO: MEDICIÓN.
ROJO: AJUSTE BINGHAM.

De los minerales medidos, es la bentonita la que alcanza los valores más elevados de esfuerzo de fluencia y viscosidad.

5.3.2 MC10

- Cv=30%
- pH=7,24
- Modelo de Bingham

$$\tau = 14,39 + 0,052551 \dot{\gamma}$$

- Esfuerzo de fluencia = 14,39 Pa
- Viscosidad= 0,052551 Pa·s

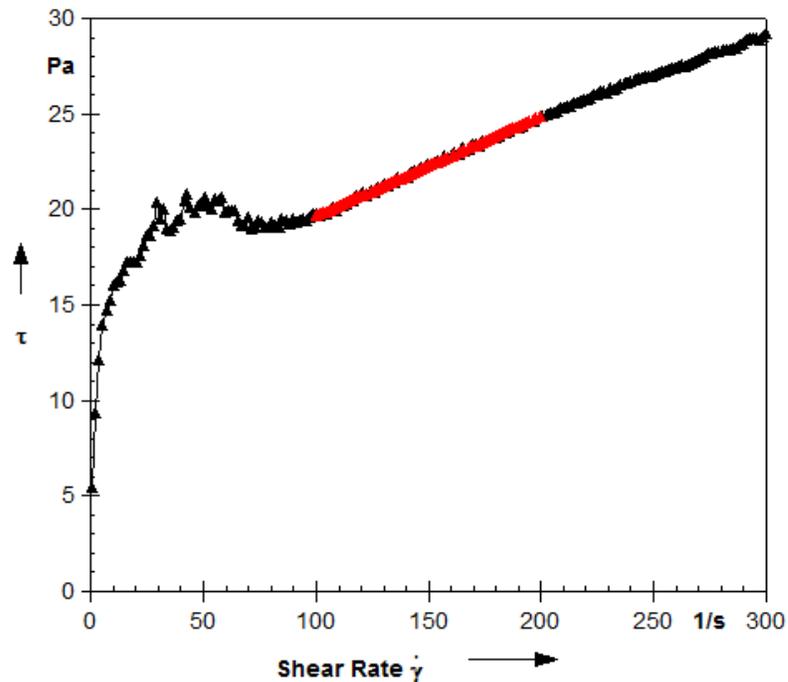


FIGURA 74: REOMETRÍA MC10.

NEGRO: MEDICIÓN.
ROJO: AJUSTE BINGHAM.

Se aprecia un comportamiento anormal bajo los 10 1/s de tasa de deformación, posiblemente debido a efectos temporales como la tixotropía, los cuales serán estudiados más adelante. Se cree principalmente que se debe a estructuras pre-existentes entre las partículas que tiende a formar este mineral las cuales decaen en el tiempo con la deformación, resultando en una anomalía en la medición.

5.3.3 CC10

- Cv=30%
- pH=6,98
- Modelo de Bingham

$$\tau = 35,126 + 0,057533 \dot{\gamma}$$

- Esfuerzo de fluencia = 35,126 Pa
- Viscosidad= 0,057533 Pa·s

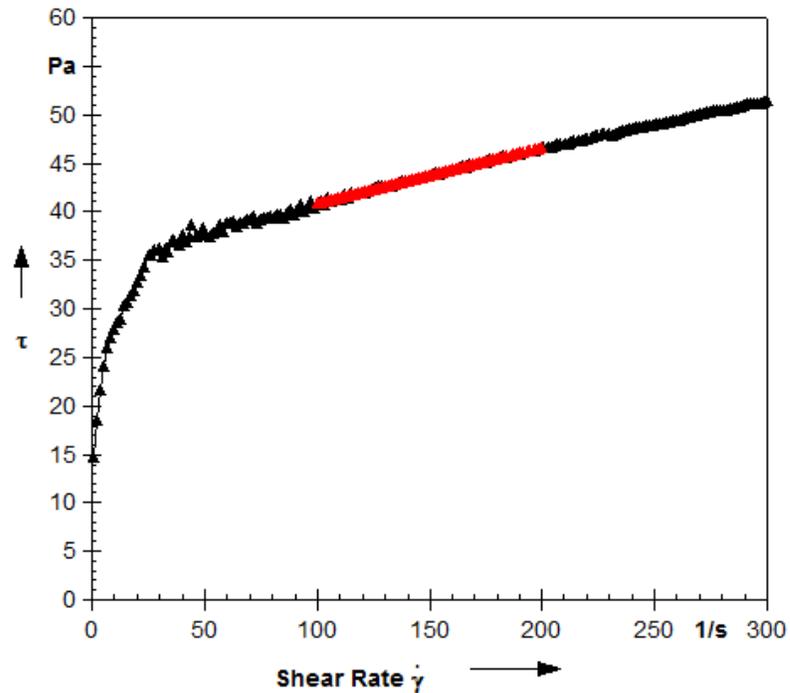


FIGURA 75: REMOETRÍA CC10.

NEGRO: MEDICIÓN.
ROJO: AJUSTE BINGHAM.

Una reometría bastante normal, no se aprecian dependencias temporales, solo se ve el comportamiento clásico de las pulpas de una caída abrupta desde una altísima viscosidad en el rango bajo de tasa de deformación. Este rango podría quedar bien descrito por un modelo de Herschel-Bulkley (ver página 9), sin embargo este modelo no se ajusta bien sobre los 100 1/s y recordamos que las mediciones a baja tasa de deformación no son confiables debido al deslizamiento mencionado en la página 64.

5.3.4 CI10

- Cv=30%
- pH=7,08
- Modelo de Bingham

$$\tau = 0,16014 + 0,006199 \dot{\gamma}$$

- Esfuerzo de fluencia = 0,16014 Pa
- Viscosidad= 0,006199 Pa·s

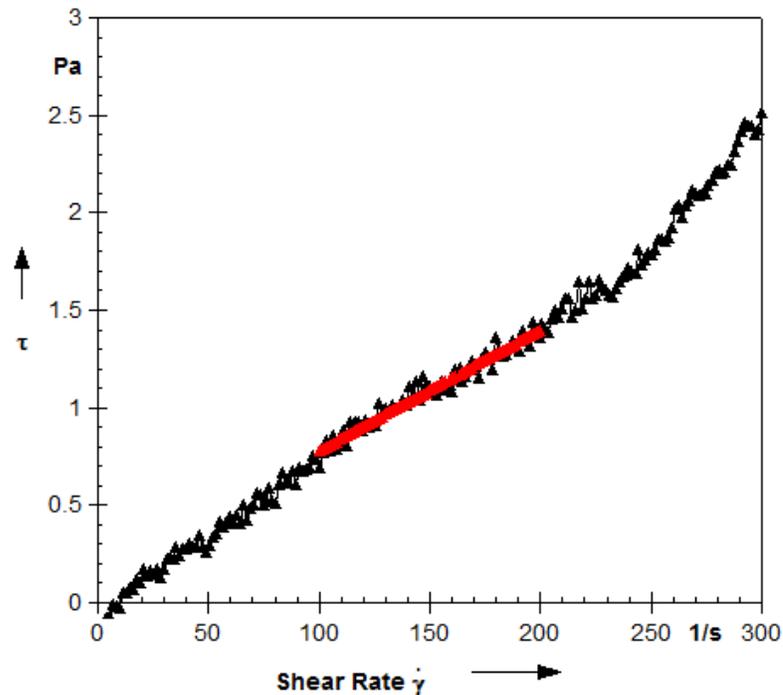


FIGURA 76: REOMETRÍA CI10.

NEGRO: MEDICIÓN.
ROJO: AJUSTE BINGHAM.

En esta reometría podemos apreciar mucho ruido en la medición e incluso algunos valores bajo cero (erróneos) al inicio. Esto se debe a que el cuarzo impalpable genera una pulpa de muy baja viscosidad y esfuerzo de fluencia de manera que queda al límite la capacidad sensible del equipo utilizado, sin embargo entre 100 y 200 s^{-1} de tasa de deformación se observa una tendencia relativamente clara como para hacer el ajuste del modelo.

5.3.5 BC10

- Cv=15%
- pH= -
- Modelo de Bingham

—

- Esfuerzo de fluencia = - Pa
- Viscosidad= - Pa·s

Esta prueba no fue posible de realizar debido al fenómeno descrito en la página 80.

Para efectos de los gráficos se tuvo que asignar un valor a esta prueba. El valor asignado correspondió al mayor valor registrado en todas las pruebas realizadas multiplicado por 1.1 de manera de mantener una escala razonable y así facilitar el análisis de los diagramas ternarios. La prueba con los máximos valores corresponde a la de composición 66.67% BC y 33.33% MC, de valores 400.63 mPa·s de viscosidad y 266.94 Pa de esfuerzo de fluencia a un Cv 15% y pH 7. Los valores calculados para el punto faltante quedaron:

- Esfuerzo de fluencia = 293.63 Pa
- Viscosidad= 440.693 Pa·s

5.3.6 ERROR EN REOMETRÍAS

Al realizar la reometría, el equipo mide el torque sobre el spindle y lo transforma en un esfuerzo de corte según la Ecuación 24, la cual considera parámetros geométricos y un valor empírico C_L que toma valores de 1,1 para líquidos newtonianos a 1,2 para fluidos dilatantes y hasta 1,28 para pseudoplásticos a bajas tasas de deformación. Como se puede apreciar, la selección de este valor es arbitraria e induce un sesgo en la estimación del esfuerzo de corte.

$$\tau_{rep} = \frac{1 + \delta^2}{2000 \cdot \delta^2} \cdot \frac{M}{2\pi L \cdot r_i^2 \cdot C_L}$$

ECUACIÓN 24: CONVERSIÓN DE TORQUE A ESFUERZO DE CORTE EN REÓMETRO RHEOLABQC.

Donde τ_{rep} es el esfuerzo de corte, δ es la diferencia entre el radio del spindle y el radio de la copa, M es el torque, r_i el radio del spindle, y L el largo de la sección cilíndrica del spindle. Más detalles pueden ser encontrados en el Anexo 15.

Ahora, considerando como dato real las mediciones de esfuerzo de corte del reómetro, y comparando con los datos ajustados por el modelo de Bingham, se estimó el error (MAPE, ver página 119) desde el menor valor del rango seleccionado para el ajuste hacia arriba (ya que se quiere modelar para altas tasas de deformación, razón por la cual se escogió el Bingham) para el peor caso y un buen caso como ejemplos, seleccionándose las reometrías CI10 a Cv 30% (ver página 88) y CC10 a Cv30% (ver página 87) respectivamente.

Reometría	MAPE
CI10 Cv30%	6.115%
CC10 Cv30%	0.645%

TABLA 18: ERROR DEL MODELO DE BINGHAM EN EL RANGO AJUSTADO.

Como se observa en la Tabla 18, el error en un mal caso sigue siendo bastante bajo, principalmente debido a que el ruido de la medición es bastante consistente a pesar de la falta de precisión. Al escoger un modelo de Bingham el valor del esfuerzo de fluencia real será sistemáticamente menor al del modelo debido al comportamiento de una pulpa, sin embargo, como se menciona arriba, se escogió un Bingham debido a sus simplicidad y buen ajuste a altas tasas de deformación (ver página 75).

5.3.7 ANÁLISIS REOLÓGICO

Luego de los ajustes del modelo de Bingham para todas las reometrías realizadas, se procedió con la creación de diagramas ternarios con los parámetros (viscosidad y esfuerzo de fluencia), de manera de encontrar comportamientos contra-intuitivos o efectos sinérgicos entre minerales.

En este capítulo se expondrán y discutirán los efectos sinérgicos que se manifestaron y los respectivos diagramas ternarios, los demás diagramas se pueden encontrar en el Anexo 12.

5.3.7.1 CONTROL DE VISCOSIDAD Y ESFUERZO DE FLUENCIA DE LA BENONITA

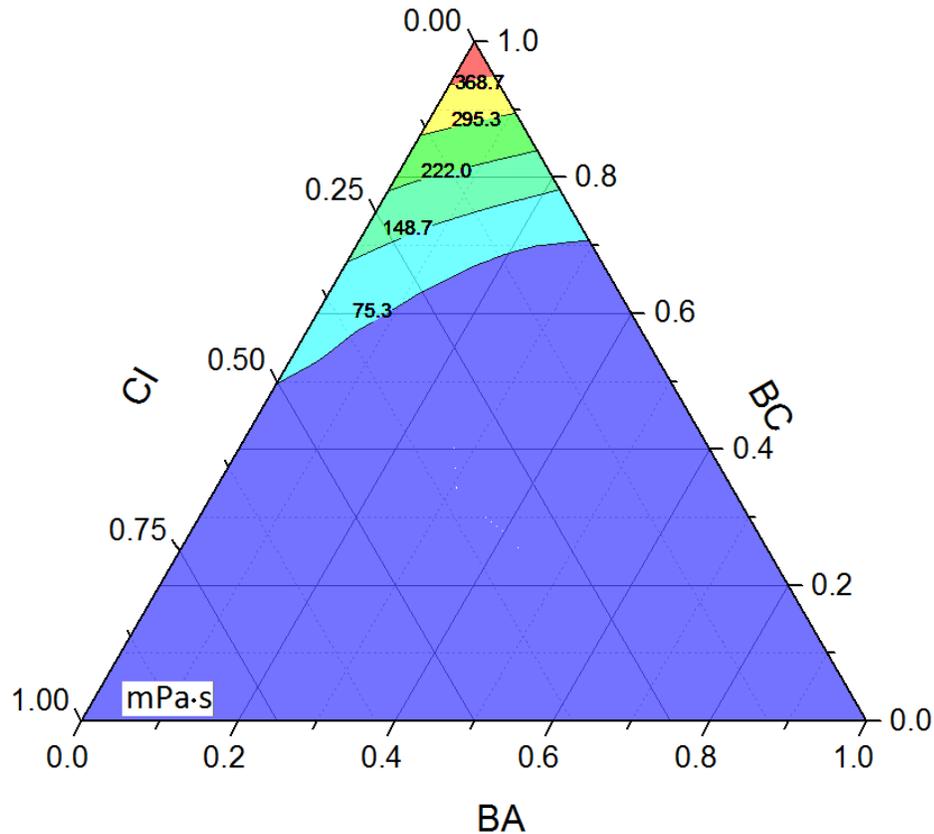


FIGURA 77: TERNARIO DE VISCOSIDAD PARA BA, BC Y CI A Cv 15% Y PH 7.

Como se vio anteriormente, la bentonita COMACSA (BC) manifestaba altísimas viscosidades y esfuerzos de fluencia, incluso en bajas concentraciones y proporciones, a tal nivel que fue necesario hacer una batería de pruebas a distinto Cv para poder medir sus propiedades reológicas.

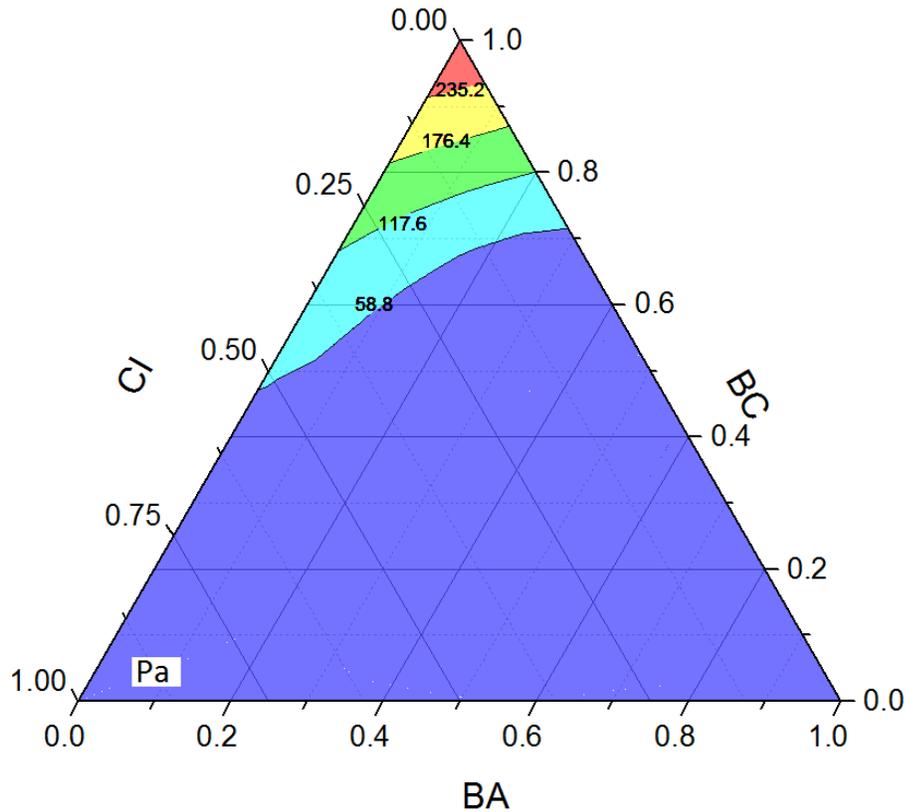


FIGURA 78: TERNARIO DE ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BA, BC Y CI A Cv 15% Y PH 7.

No obstante, durante el transcurso de esta investigación se vio como al combinarse con ciertos minerales su viscosidad y esfuerzo de fluencia podían ser controlados a niveles muy inferiores de manera de sugerir el primer efecto sinérgico que revisaremos.

Si bien lo esperable es que sea el cuarzo el mineral que controle la viscosidad de la bentonita COMACSA, debido a que tiene la menor viscosidad, fue la bentonita Arica (BA) el mineral que ejerció mayor control (ver Figura 77 y Figura 78), pese a añadir más montmorillonita a la pulpa, alguna impureza contenida en esta bentonita ejerció un mecanismo de control, siendo los candidatos para dicha interacción los siguientes minerales:

- Ortoclasa
- Anhidrita
- Andesina

Por otra parte se observa en la Figura 79 que el caolín (CC) también controla la viscosidad de manera similar, menos acentuada, pero no el esfuerzo de fluencia (Figura 80). En el

caolín también se encontró anhidrita, reforzando la idea de que quizás es este mineral el que ejerce el control, sin embargo una mayor investigación debe ser llevada a cabo para determinar con precisión el mecanismo mediante el cual se controla la reología de la bentonita.

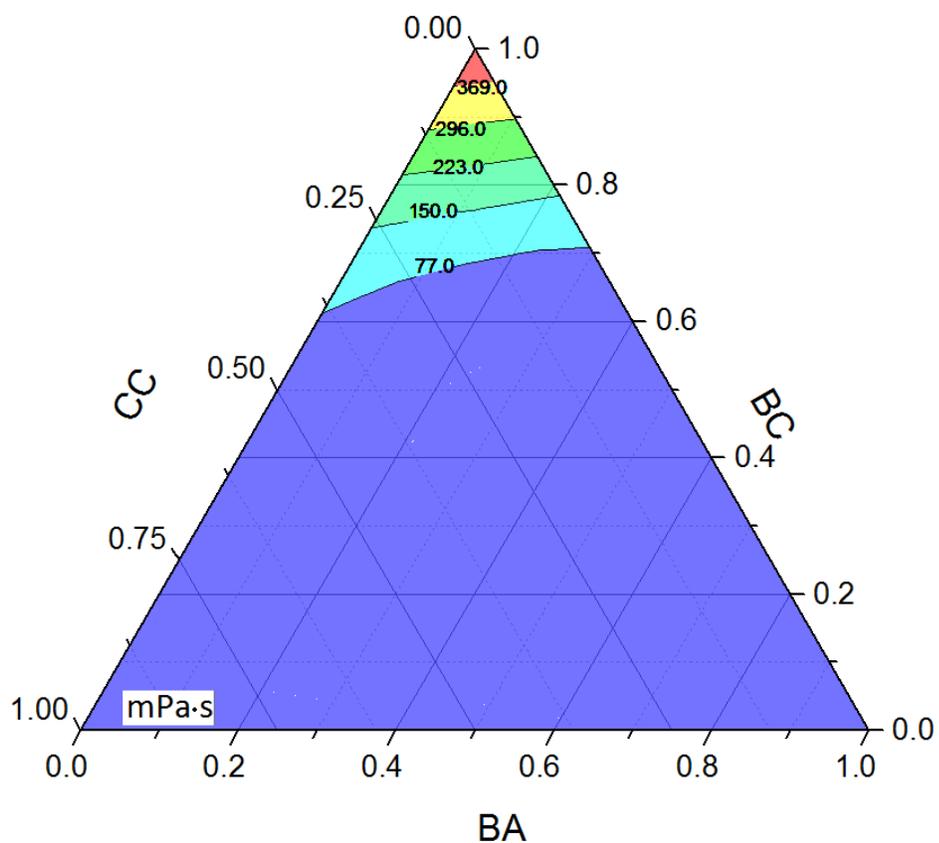


FIGURA 79: TERNARIO DE VISCOSIDAD PARA BA, BC Y CC A Cv 15% Y PH 7.

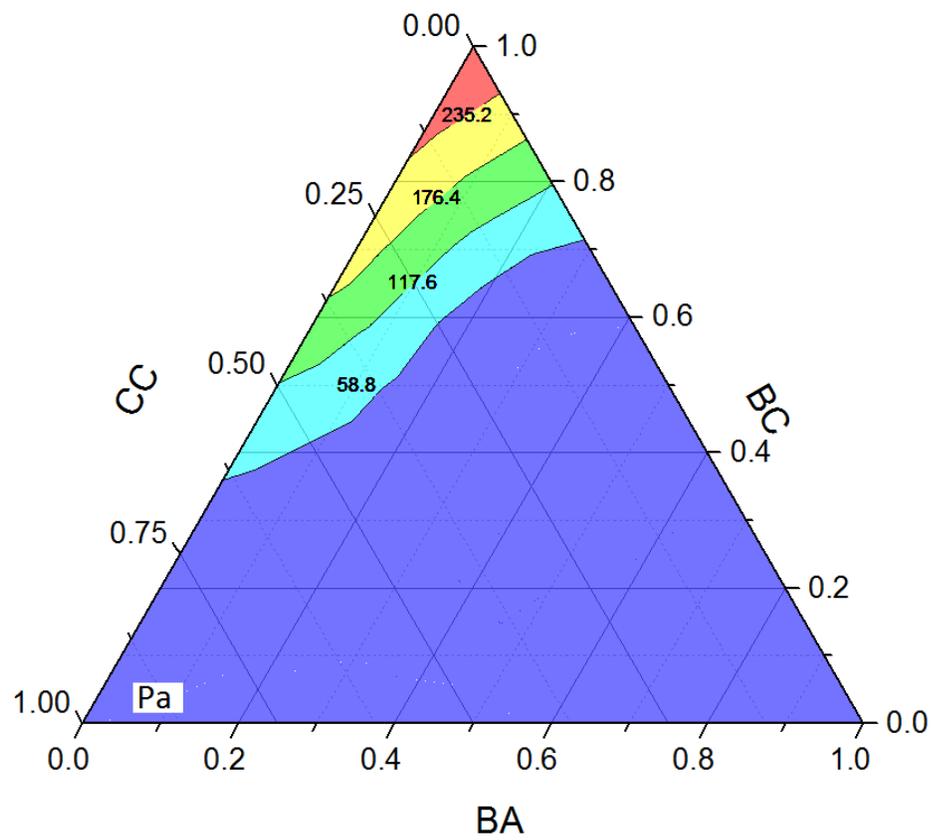


FIGURA 80: TERNARIO DE ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BA, BC Y CC A Cv 15% Y PH 7.

5.3.7.2 RAZÓN CAOLÍN / MICA BLANCA

Observando el comportamiento reológico de la mezcla entre caolín (CC) y mica (MC) nos damos cuenta que para una proporción de 2/3 respectivamente encontramos un mínimo de viscosidad. Esto se puede observar en las curvas de nivel de la Figura 81, donde se observa que la viscosidad de ambos minerales en estado puro es más alta que cuando están combinados.

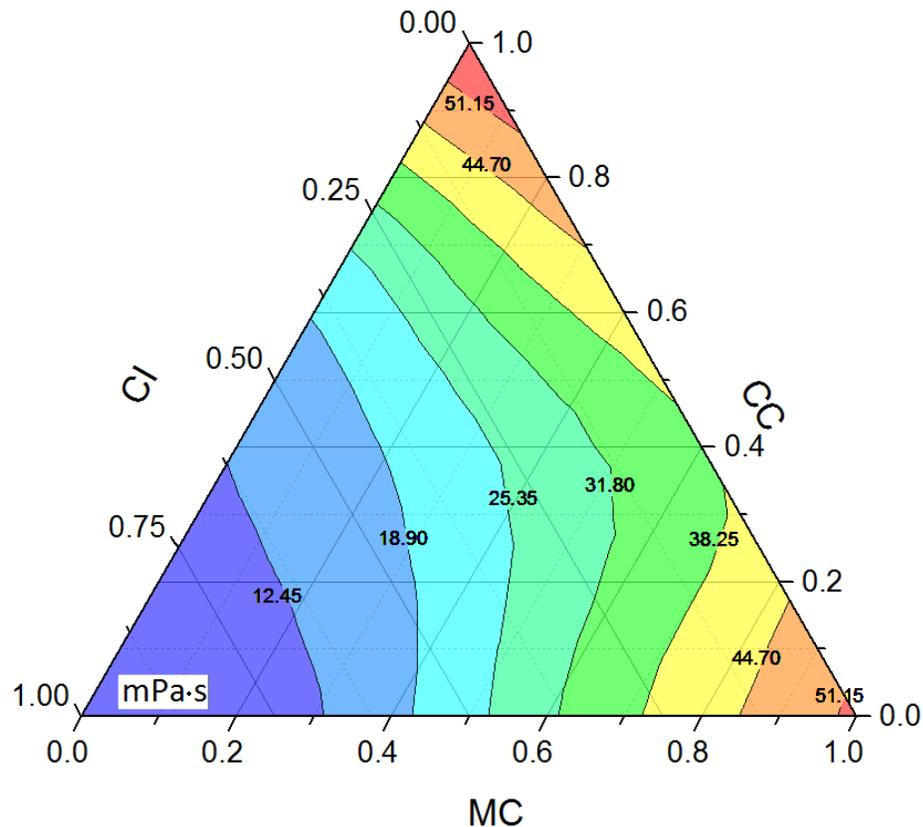


FIGURA 81: TERNARIO DE VISCOSIDAD PARA MC, CC Y CI A Cv 30% Y PH 7.

Otro efecto interesante observable es que este mínimo se mantiene en la misma posición en la medida que se añade cuarzo y que no aplica para el esfuerzo de fluencia, como se puede ver en la Figura 82.

El conocimiento de un fenómeno como este podría ser de utilidad en el caso de tener problemas reológicos en la planta metalúrgica, ya sea en bombeo, espesamiento, flotación, etc. Incluso podrían usarse minerales provenientes de la misma faena para el control de dichos problemas.

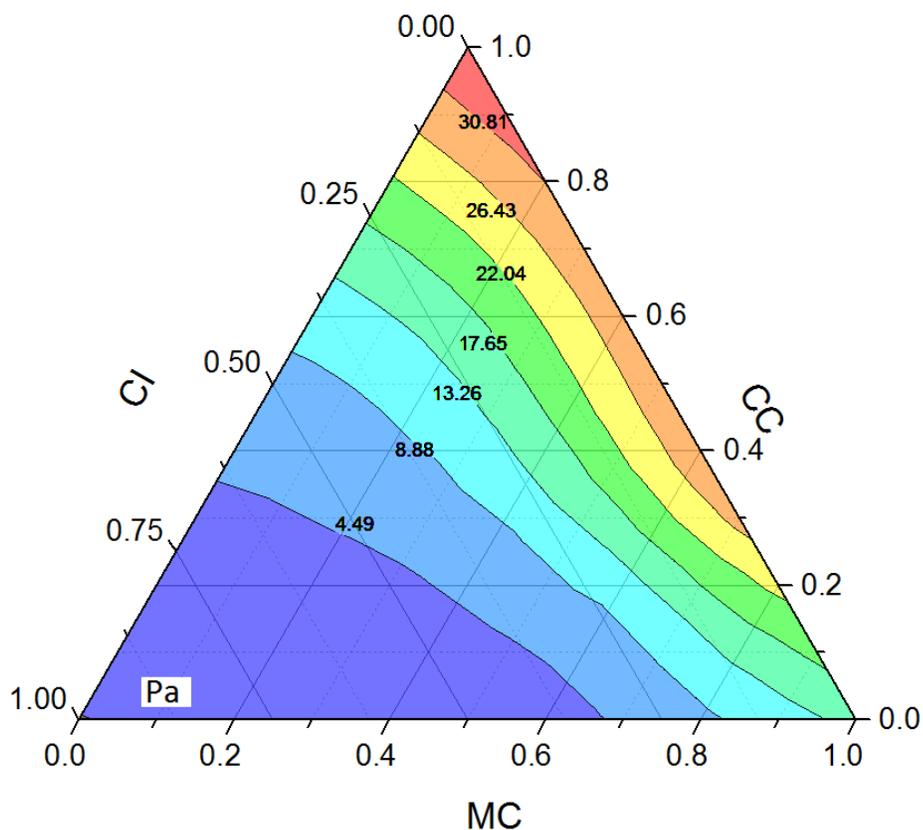


FIGURA 82: TERNARIO DE ESFUERZO DE FLUENCIA PARA MC, CC Y CI A CV 30% Y PH 7.

Finalmente se cree que la caolinita debido a sus propiedades de carga de superficie, es capaz de desestabilizar las estructuras que se forman entre las partículas de mica (Nosrati *et al.*, 2011), y que el cuarzo al poseer una estructura de cargas perfectamente balanceadas no tiene incidencia en dicho comportamiento.

Las reometrías realizadas en pulpas con caolín (CC) y mica (MC) no exhibían el comportamiento de dependencia temporal, observable en casi cualquier otra mezcla que contuviera la mica, soportando la idea mencionada en el párrafo anterior.

Otro efecto que se debe considerar al combinar minerales en medio acuoso (Goldberg, 2002), es la adsorción competitiva de iones reforzando o debilitando la capa eléctrica de manera de generar cambios en la reología.

5.3.7.3 EFECTO TEMPORAL Y DEL PH EN LA MICA BLANCA

Como se menciona en la página 86, la mica blanca (MC) presenta un reograma que da cuenta de una dependencia temporal tixotrópica (ver página 11), y no solo esa reometría, si no que una gran cantidad de mediciones de pulpas que contenían este mineral manifestaron ese comportamiento denotado por una pendiente negativa al comienzo del reograma, como se ve en las curvas amarilla y azul en la Figura 83.

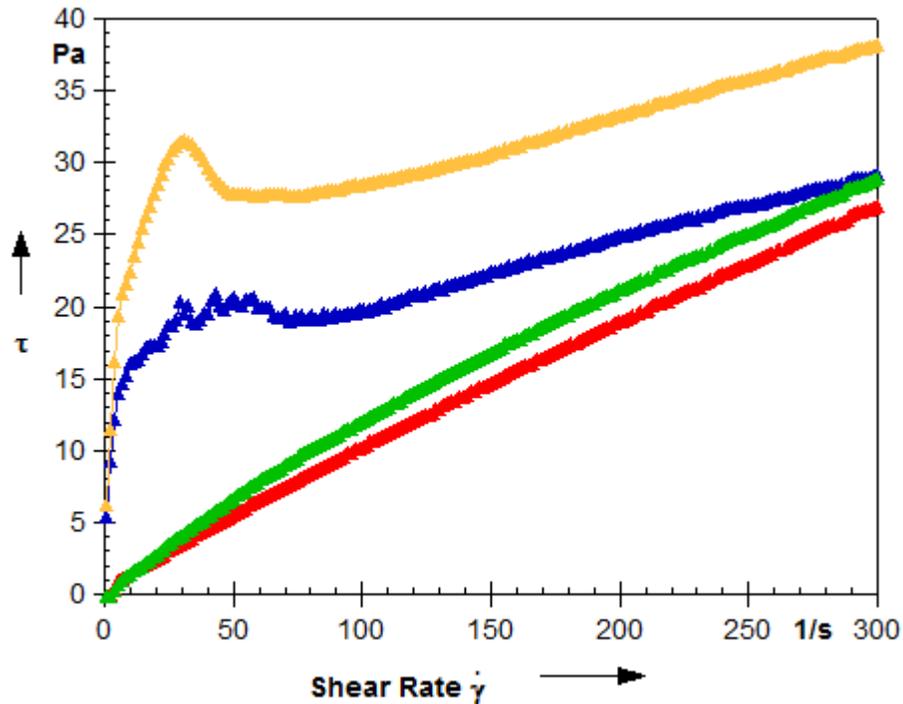


FIGURA 83: REOGRAMAS MICA BLANCA (MC) Cv 30%.

AZUL: SIN PRE-AGITACIÓN, PH 7.23.
ROJO: SIN PRE-AGITACIÓN, PH 9.89 (NATURAL).
VERDE: 24 H PRE-AGITACIÓN, PH 9.98 (NATURAL).
AMARILLO: 24 H PRE-AGITACIÓN PH 6.93.

Si bien el cambio más notorio que se observa es la altura de las curvas azul y amarilla, este puede perfectamente atribuirse a la diferencia de pH que existe entre las pruebas y no al impacto de la pre-agitación. En ambos casos, las curvas con el pH ajustado (azul y amarilla) presentan una pendiente negativa indicando tixotropía los primeros segundos de la medición.

Además, contrario a la tixotropía, a altas tasas de deformación se observa un aumento en la pendiente de las curvas de las pulpas pre-agitadas, indicando un aumento en la viscosidad llamado reopexia.

Se decidió realizar una prueba de 24 horas a 250 s^{-1} de tasa de deformación constante. El pH fue ajustado a 7 previo a la medición, comenzando a las 4 p.m. de un día. Los resultados se exponen la siguiente Figura:

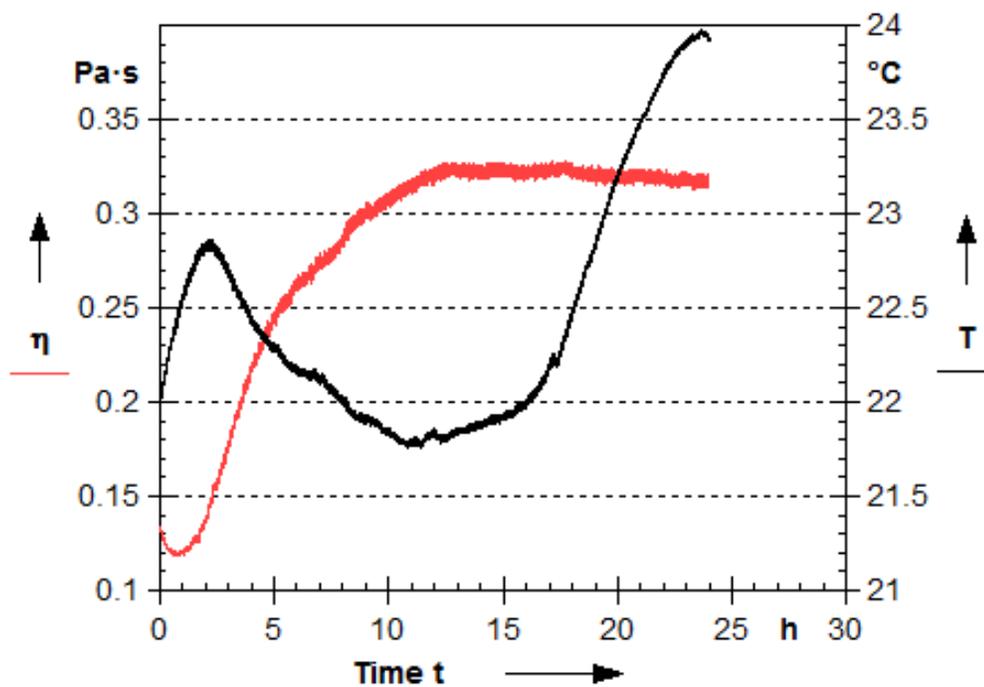


FIGURA 84: REOMETRÍA DE 24 HORAS DE MICA BLANCA (MC) A TASA DE DEFORMACIÓN CONSTANTE 250 s^{-1} .

ROJO: VISCOSIDAD.
NEGRO: TEMPERATURA.

Se observa una disminución de la viscosidad en la primera hora, atribuible al efecto buffer que existe sobre el pH, quizás ocasionando el ascenso en la temperatura al ser esta una reacción exotérmica. Luego se puede observar un ascenso en la viscosidad consistente a partir de la primera hora de prueba hasta las 13 horas transcurridas, donde se estabiliza a un valor de casi tres veces la viscosidad inicial. Desde las 17 horas se observa una leve pendiente negativa en la viscosidad que se condice con el aumento de la temperatura de la muestra debido a la salida del sol y oscilación térmica natural de un día.

Finalmente se concluye que por una parte existe un efecto reopéctico de largo plazo (15 horas aprox.) en la suspensión de mica blanca y que la disminución del pH aumenta el esfuerzo de fluencia fuertemente, además de aumentar la viscosidad en menor medida. También se concluye la presencia de una tixotropía de corta duración debido al decaimiento de estructuras formadas al ajustar el pH cercano a 7, probablemente al acercarse al punto isoeléctrico y fomentar la aparición de atracciones de la doble capa eléctrica entre partículas (ver página 16).

5.4 CARACTERIZACIÓN HÍPER-ESPECTRAL

5.4.1 BA10

- TSA:
 - VNIR
 - Goethita
 - SWIR
 - 77% Montmorillonita
 - 23% Caolinita PX
 - TIR
 - 40% Montmorillonita
 - 31% Albita

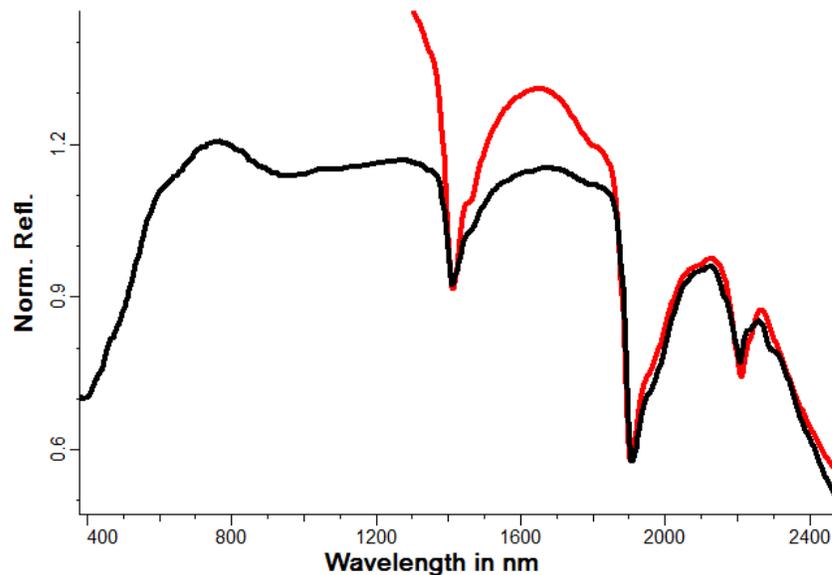


FIGURA 85: CARACTERIZACIÓN HÍPER-ESPECTRAL BA10.

NEGRO: MEDICIÓN SWIR.
ROJO: REFERENCIA MONTMORILLONITA.

5.4.2 BC10

- TSA:
 - VNIR
 - Resultado no confiable
 - SWIR
 - Montmorillonita
 - TIR
 - 52% Montmorillonita
 - 30% Pirofilita
 - 18% Microclina

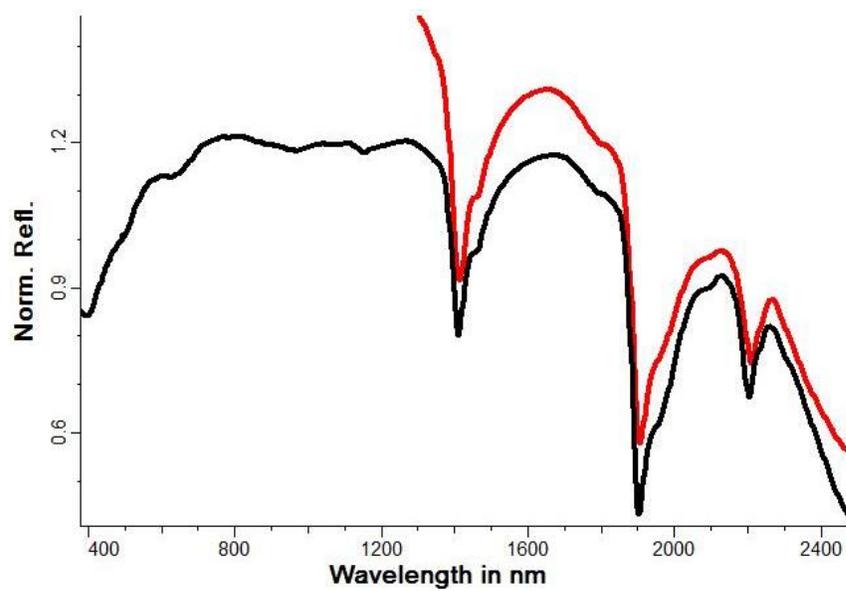


FIGURA 86: CARACTERIZACIÓN HÍPER-ESPECTRAL BC10.

NEGRO: MEDICIÓN SWIR.
ROJO: REFERENCIA MONTMORILLONITA.

5.4.3 CC10

- TSA:
 - VNIR
 - Resultado no confiable
 - SWIR
 - 60% Dickita
 - 40% Caolinita-WX
 - TIR
 - 69% Caolinita
 - 31% Pirofilita

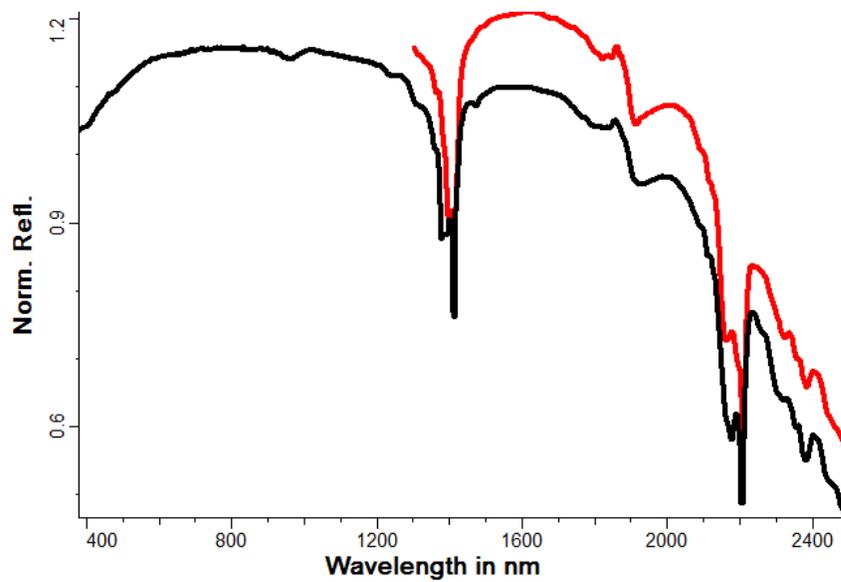


FIGURA 87: CARACTERIZACIÓN HÍPER-ESPECTRAL CC10.

NEGRO: MEDICIÓN SWIR.
ROJO: REFERENCIA CAOLINITA.

5.4.4 MC10

- TSA:
 - VNIR
 - Resultado no confiable
 - SWIR
 - Muscovita
 - TIR
 - 61% Muscovita
 - 39% Magnesita

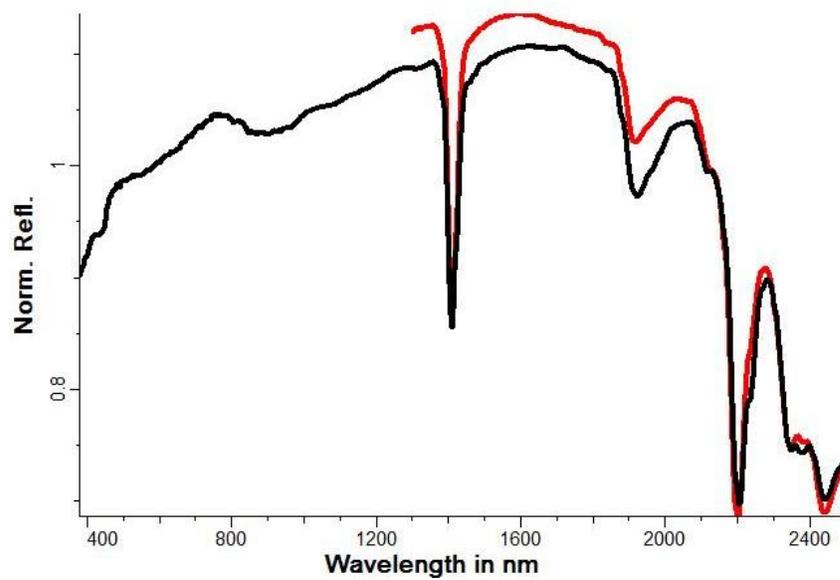


FIGURA 88: CARACTERIZACIÓN HÍPER-ESPECTRAL MC10.

NEGRO: MEDICIÓN SWIR.
ROJO: REFERENCIA MUSCOVITA.

5.4.5 CI10

- TSA:
 - VNIR
 - Goethita
 - SWIR
 - Aespectral
 - TIR
 - 59% Cuarzo
 - 23% Alunita-Na
 - 18% Diópsido

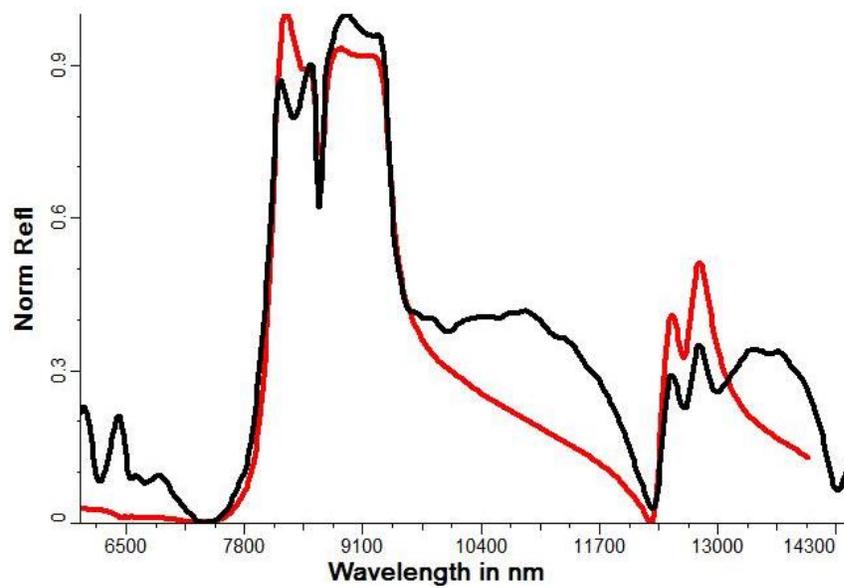


FIGURA 89: CARACTERIZACIÓN HÍPER-ESPECTRAL CI10.

NEGRO: MEDICIÓN TIR.
ROJO: REFERENCIA CUARZO.

5.5 DESARROLLO DE MODELOS DE DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE MINERALES BASADO EN CARACTERIZACIÓN HÍPER-ESPECTRAL

5.5.1 ESCALARES

Un escalár, en el contexto del análisis híper-espectral con el software TSG, es un valor obtenido a partir un espectro, por ejemplo la posición de un máximo local (peak), su altura, la pendiente o el área bajo un tramo específico, etc.

A través de los escalares es que se pueden determinar y cuantificar la presencia de minerales, sin embargo no siempre un escalár que sirve para determinar la presencia tiene una buena correlación con la abundancia. El reconocimiento de minerales se logra a través de establecer valores límite para uno o más escalares, pudiendo así manipular la holgura, privilegiando falsos positivos o falsos negativos según convenga.

A continuación se presentan los escalares utilizados en los modelos de detección y cuantificación de minerales, el detalle de dichos escalares se encuentran en el Anexo 14.

PFIT 1380 d y PFIT 1380 wvl

Ajuste polinomial de orden 8 en la banda de absorción en la longitud de onda 1380 nm (SWIR) de los cuales se extraen la profundidad y posición del mínimo respectivamente. El primero tiene una alta correlación con la abundancia de caolín COMACSA.

PFIT 2200 d y PFIT 2200 wvl

Ajuste polinomial de orden 4 en la banda de absorción en la longitud de onda 2200 nm (SWIR) de los cuales se extraen la profundidad y posición del mínimo respectivamente. El primer escalár se utilizó para la detección del caolín COMACSA debido a que su valor se incrementa considerablemente ante la presencia del mineral.

PFIT 8540 d y PFIT 8540 wvl

Ajuste polinomial de orden 5 para el peak de reflectancia en 8540 nm (TIR) de longitud de onda de los cuales se extraen la profundidad y posición del mínimo respectivamente. El primero se utilizó para la detección de cuarzo en las muestras.

PFIT 9613 d y PFIT 9613 wvl

Ajuste polinomial de orden 5 para el peak de reflectancia en 9613 nm (TIR) de longitud de onda de los cuales se extraen la profundidad y posición del mínimo respectivamente. En conjunto se utilizaron para la detección de mica COMACSA en las muestras.

1910 d y 1910 w

Profundidad y posición del mínimo de la banda de absorción en torno a los 1910 nm de longitud de onda respectivamente, a diferencia de los anteriores, este escalar no fue obtenido por ajuste polinomial si no que a través de un algoritmo incluido en el software de análisis. Estos escalares se utilizaron en la cuantificación y detección de bentonitas.

Área Abs. 2300-2500

Área de absorción relativa entre los 2300 y 2500 nm de longitud de onda. Tiene una alta correlación con la abundancia de mica COMACSA pero también con el caolín, por lo que un tratamiento extra del escalar fue necesario para la realización del modelo de abundancia de la mica.

5.5.2 ENMASCARADO

Del análisis hiper-espectral realizado se realizaron dos enmascaramientos (mask y Final_mask) de datos: el primero filtró toda medición que tuviera menos de 12 mm en el perfilómetro, de manera de eliminar aquellas que no estuvieran sobre una briqueta; y para el segundo se escogieron solamente 3 mediciones por briqueta que estuvieran alejadas de los bordes de las mismas ya que esto quita calidad a la señal medida.

Los modelos se realizaron utilizando el segundo enmascarado, así asegurando la calidad de los datos, sin embargo la cuantificación del error de los modelos se realizó para toda las muestras comprendidas dentro del primer enmascarado.

Enmascarado	Cantidad de mediciones
mask	447
Final_mask	195

TABLA 19: ENMASCARADO Y CANTIDAD DE DATOS.

5.5.3 CAOLÍN COMACSA (CC)

5.5.3.1 DETECCIÓN

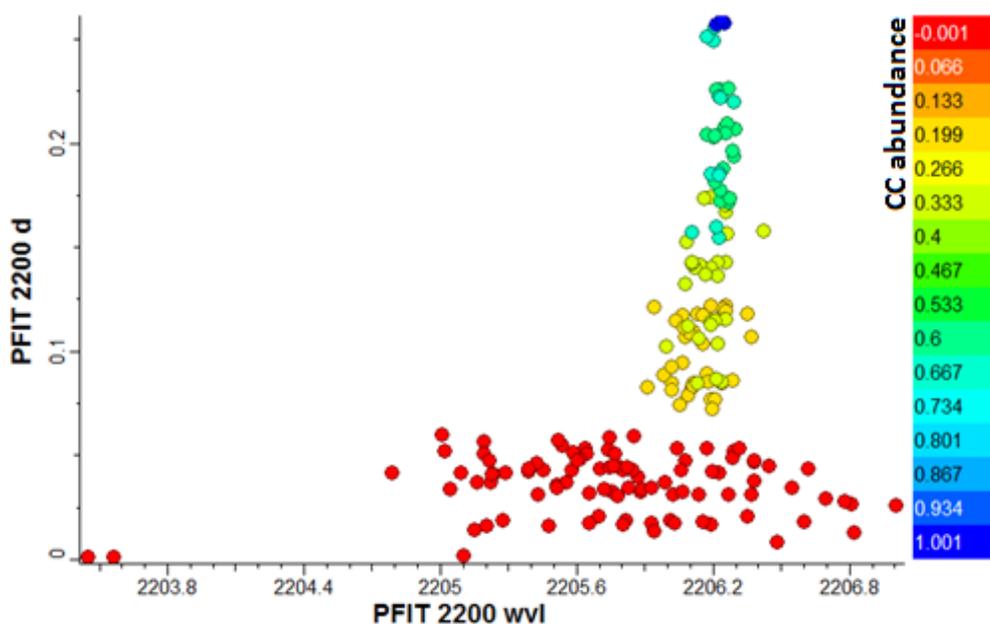


FIGURA 90: PFIT 2200 Y ABUNDANCIA DE CAOLÍN COMACSA (CC).

Como se puede ver en la Figura 90, las muestras que contienen caolín (CC) presentan un salto en el valor de PFIT 2200 d y gracias a eso se puede establecer un límite seguro para la detección de este mineral (Ecuación 25).

$$[PFIT\ 2200\ d] \geq 0.0704$$

ECUACIÓN 25: DETECCIÓN CAOLÍN COMACSA (CC).

La detección con estos parámetros arrojó 0 falsos positivos y 0 falsos negativos.

5.5.3.2 CUANTIFICACIÓN

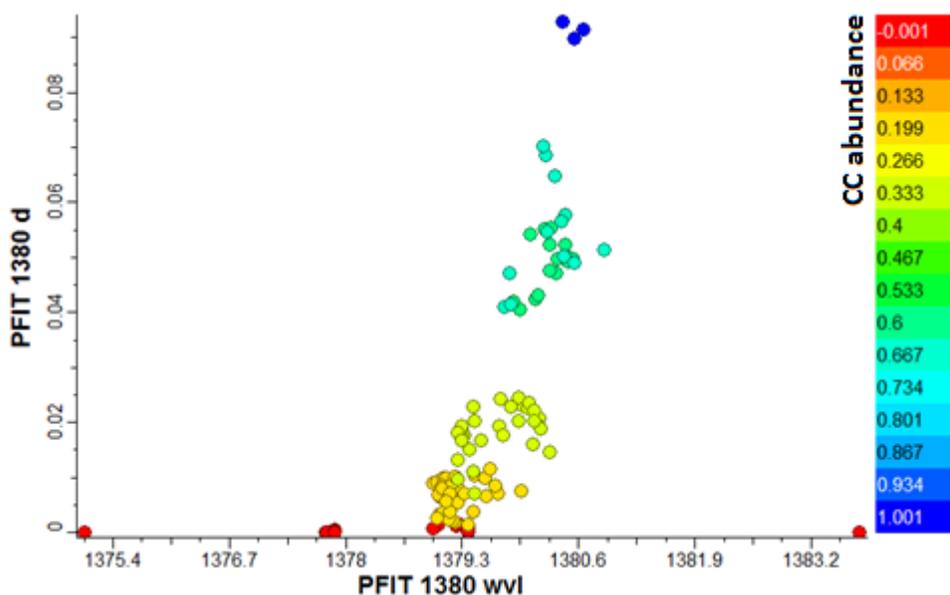


FIGURA 91: PFIT 1380 Y ABUNDANCIA DE CAOLÍN COMACSA (CC).

En la Figura 91 se aprecia una muy buena correlación de la abundancia y el eje vertical, sin embargo existen algunas muestras que se traslapan a bajas abundancias, es por esto que se decidieron utilizar distintos escalares para la cuantificación y la detección.

El modelo ajustado fue de tipo lineal con un R^2 de 0.9552 como se puede apreciar en la Figura 92, entregando el modelo de cuantificación descrito en la Ecuación 26.

$$CC\ ab. = 9.0482 [PFIT\ 1380\ d] + 0.147$$

ECUACIÓN 26: MODELO DE ABUNDANCIA DE CAOLÍN COMACSA (CC).

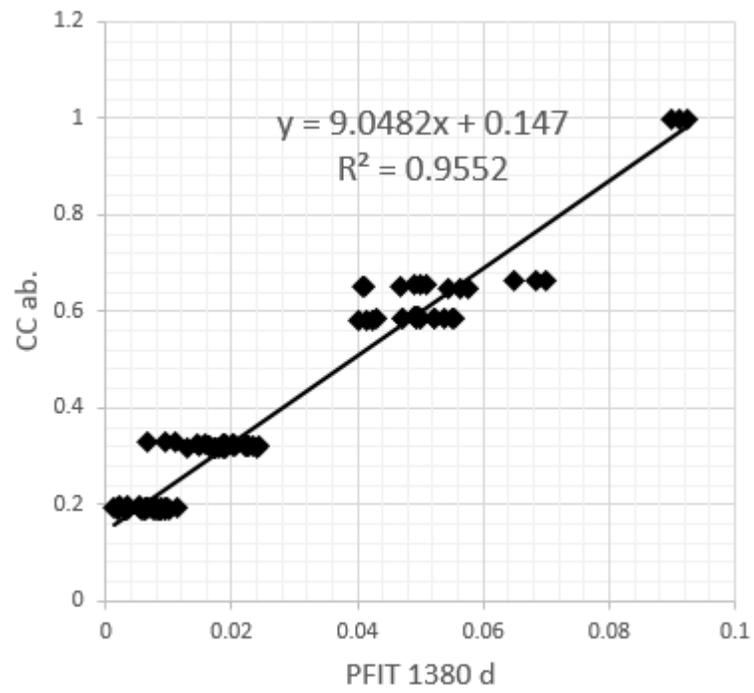


FIGURA 92: MODELO DE CUANTIFICACIÓN DE CAOLÍN COMACSA (CC).

5.5.4 CUARZO IMPALPABLE (CI)

5.5.4.1 DETECCIÓN

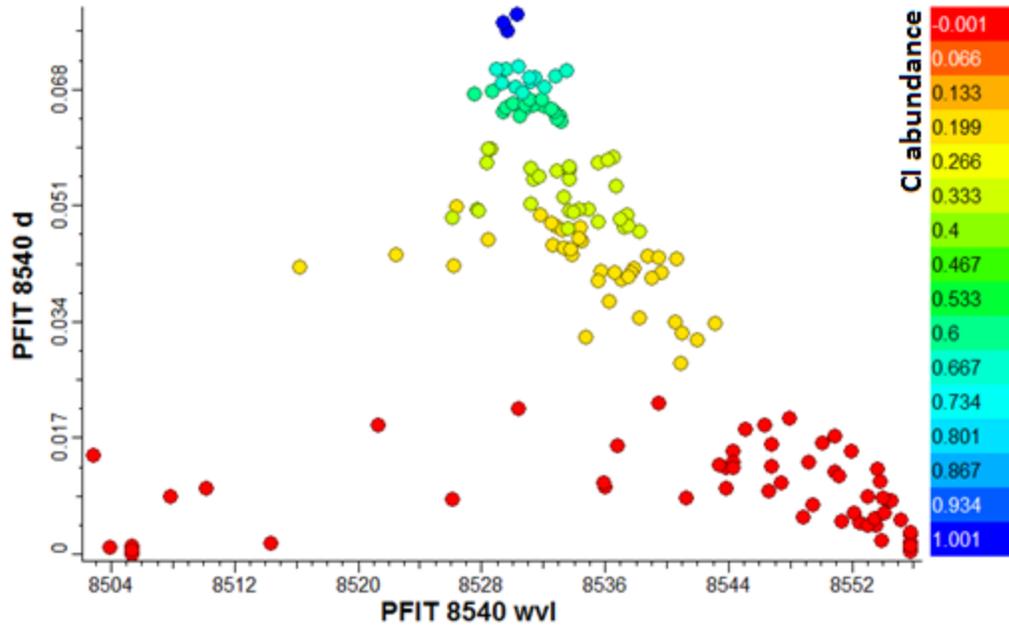


FIGURA 93: PFIT 8540 Y ABUNDANCIA DE CUARZO (CI).

El cuarzo no tiene una buena señal espectral en el rango SWIR, lo que no permite detectarlo con seguridad, sin embargo en el rango termal (TIR) su espectro es bastante claro y se creó un escalár para medir las características del peak en torno a 8540 nm. Este escalár manifiesta un salto en su valor al presentarse cuarzo en la medición, entregando el siguiente parámetro para la detección del mineral:

$$[PFIT\ 8540\ d] \geq 0.0237$$

ECUACIÓN 27: DETECCIÓN CUARZO (CI).

La detección con estos parámetros arrojó 0 falsos positivos y 0 falsos negativos.

5.5.4.2 CUANTIFICACIÓN

En este caso, el mismo escalár escogido para la detección cuenta con una buena correlación con la abundancia de cuarzo y se decidió usar un modelo exponencial para

el ajuste. Finalmente en la Ecuación 28 presenta el modelo de cuantificación, obteniendo un R^2 de 0.894.

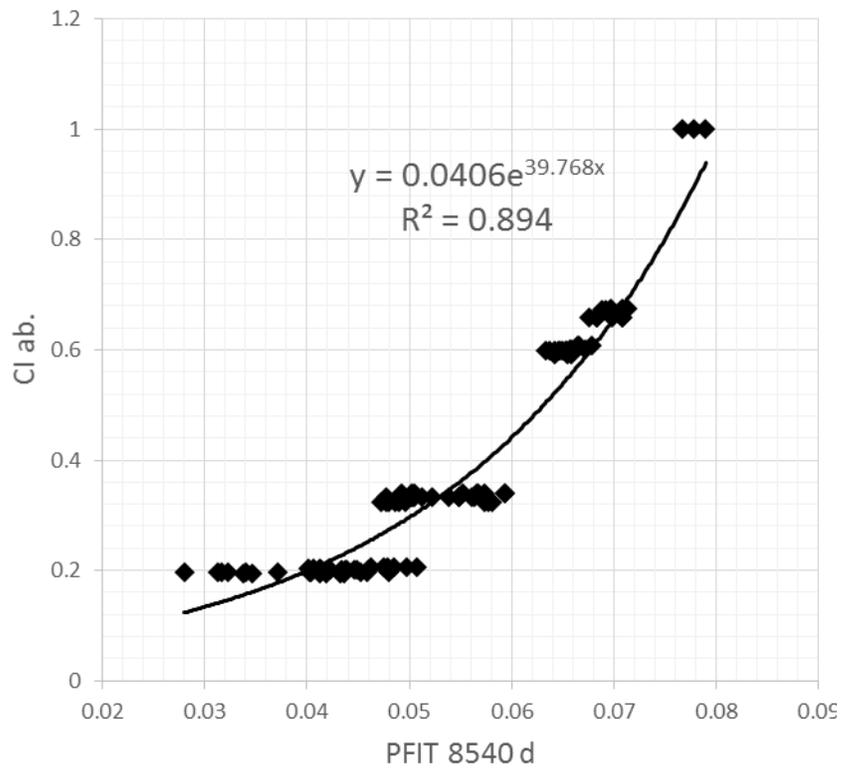


FIGURA 94: MODELO DE CUANTIFICACIÓN DE CUARZO (CI).

$$CI\ ab. = 0.0406 \exp(39.768 [PFIT\ 8540\ d])$$

ECUACIÓN 28: MODELO DE CUANTIFICACIÓN DE CUARZO (CI).

5.5.5 BENTONITA COMACSA (BC)

5.5.5.1 DETECCIÓN

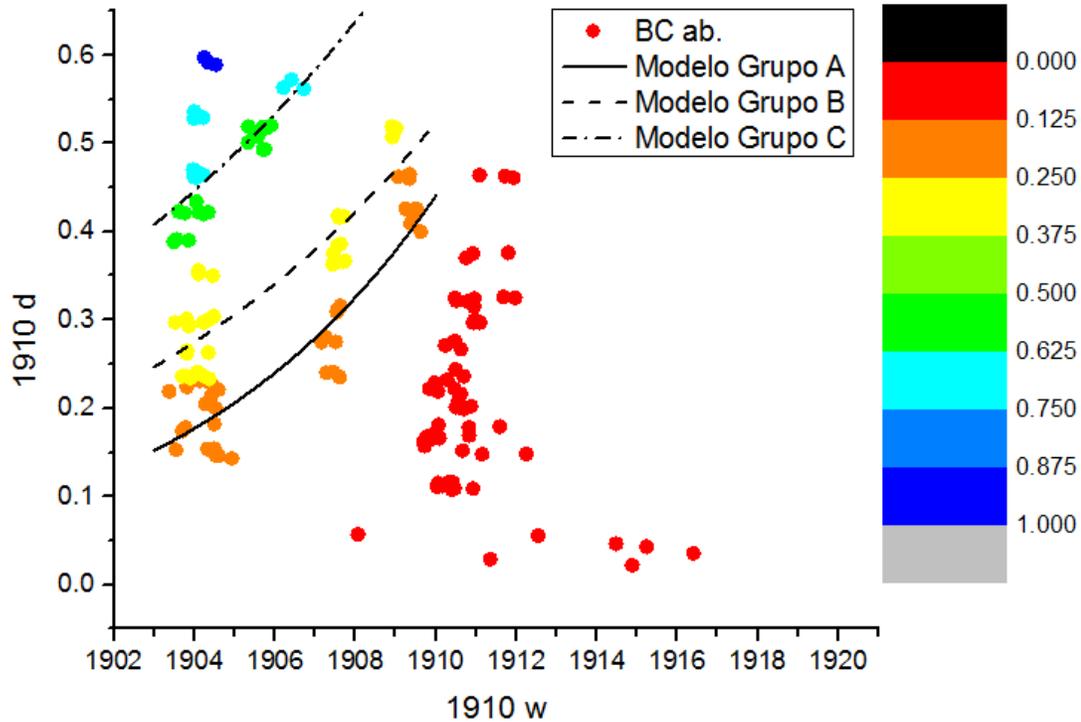


FIGURA 95: ESCALARES 1910 D Y 1910 W Y ABUNDANCIA DE BENTONITA COMACSA (BC).

La detección de bentonita es una tarea relativamente sencilla, sin embargo en este trabajo se utilizaron dos bentonitas de distinta procedencia y de propiedades reológicas muy distintas, incluso encontrándose un efecto sinérgico entre ellas (ver página 91). Además son los minerales con el mayor potencial perjudicial para la operación, por lo que lograr diferenciarlas y cuantificarlas se vuelve una tarea fundamental para el éxito de este trabajo. En la Figura 95 se aprecian la profundidad y posición del mínimo de la banda de absorción en 1910 nm, identificando las muestras con bentonita de ambos tipos, y se observa que fijando un límite vertical y otro horizontal podemos delimitar el área de la bentonita COMACSA (BC).

$$[1910 d] \geq 0.143 \quad y \quad [1910 w] \leq 1909.62$$

ECUACIÓN 29: DETECCIÓN BENTONITA COMACSA (BC).

La detección con estos parámetros arrojó 0 falsos positivos y 1 falso negativo.

5.5.5.2 CUANTIFICACIÓN

Para la generación del modelo primero se observó que los grupos de abundancia se distribuían en las curvas que se observan en la Figura 95. Se establecieron 3 grupos según su abundancia:

- Grupo A: 0.19-0.2
- Grupo B: 0.319-0.335
- Grupo C: 0.493-0.669

A cada grupo se le ajustó un modelo exponencial (ver en la Figura 95, Modelo Grupo A, B y C) donde el coeficiente de posición sería el que tendría correlación con la abundancia del mineral.

$$y = a * \exp(bx)$$

$$\ln(y) = \ln(a) + bx$$

$$\ln(a) = \ln(y) - bx$$

ECUACIÓN 30: COEFICIENTE DE POSICIÓN.

$$\text{Grupo A: } \ln [1910 d] = -290.884 + 0.152[1910 w]$$

$$\text{Grupo B: } \ln [1910 d] = -206.163 + 0.108[1910 w]$$

$$\text{Grupo C: } \ln [1910 d] = -170.749 + 0.089[1910 w]$$

ECUACIÓN 31: MODELOS AJUSTADOS PARA GRUPOS DE ABUNDANCIA DE BENTONITA COMACSA (BC).

Finalmente se probó la calidad del ajuste para todos los datos generados a partir del parámetro b obtenido para cada grupo, para el promedio de b de los tres grupos y para parejas de grupos. El mejor ajuste fue con el parámetro b promedio de los grupos A y B (Figura 96). Finalmente el modelo de abundancia queda descrito por la siguiente ecuación:

$$BC ab. = 0.0412 \exp(1.2361 * (\ln[1910 d] - 0.1297[1910 w] + 250))$$

ECUACIÓN 32: MODELO DE CUANTIFICACIÓN DE BENTONITA COMACSA (BC).

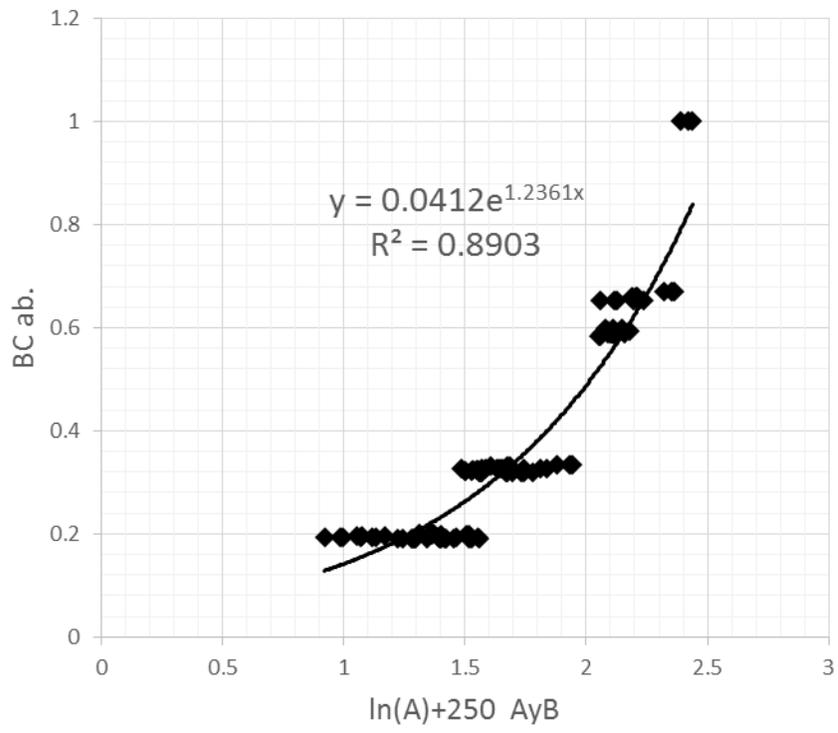


FIGURA 96: MODELO DE CUANTIFICACIÓN DE BENTONITA COMACSA (BC).

5.5.6 BENTONITA ARICA (BA)

5.5.6.1 DETECCIÓN

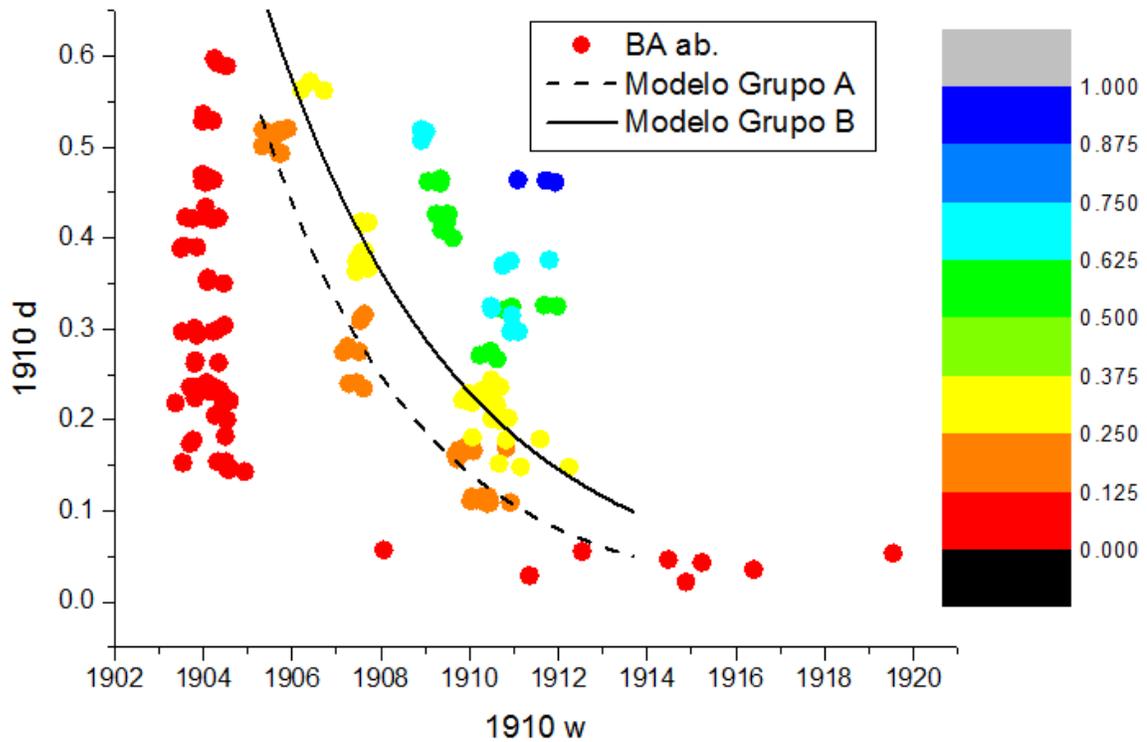


FIGURA 97: ESCALARES 1910 D Y 1910 W Y ABUNDANCIA DE BENTONITA ARICA (BA).

Al igual que en el caso anterior, podemos encontrar límites para el área en el gráfico en el cual se encuentra esta bentonita. Se puede observar claramente que la bentonita Arica (BA) tiene el mínimo del peak en los 1912 nm, y al combinarse con la otra bentonita (que lo tiene en 1904 nm) resultan los puntos intermedios de la combinación aditiva de espectros. Esta vez el área de detección fue delimitada por los siguientes parámetros:

$$[1910 d] \geq 0.0961 \quad y \quad [1910 w] \geq 1905.11$$

ECUACIÓN 33: DETECCIÓN BENTONITA ARICA (BA).

La detección con estos parámetros arrojó 0 falsos positivos y 0 falsos negativos.

5.5.6.2 CUANTIFICACIÓN

Se procedió de igual manera que para la bentonita COMACSA (BC). Se observaron los grupos de abundancia distribuidos en las curvas que se observan en la Figura 97 (Modelo Grupo A y B) y se seleccionaron los siguientes intervalos (según abundancia):

- Grupo A: 0.202 - 0.212
- Grupo B: 0.334 – 0.35

Se ajustó una curva exponencial a cada uno:

$$\text{Grupo A: } \ln [1910 d] = 538.621 - 0.283[1910 w]$$

$$\text{Grupo B: } \ln [1910 d] = 434.918 - 0.229[1910 w]$$

ECUACIÓN 34: MODELOS AJUSTADOS PARA GRUPOS DE ABUNDANCIA DE BENTONITA ARICA (BA).

Finalmente se probó la calidad del ajuste con los parámetros de los modelos para el grupo A y B por si solos y el promedio de ambos, resultando este último el mejor (ver Figura 98). Finalmente el modelo de abundancia de bentonita Arica (BA) queda descrito por la siguiente ecuación:

$$BA \text{ ab.} = 0.1233 \exp(1.0191 * (\ln[1910 d] + 0.2558[1910 w] - 486))$$

ECUACIÓN 35: MODELO DE CUANTIFICACIÓN DE BENTONITA ARICA (BA).

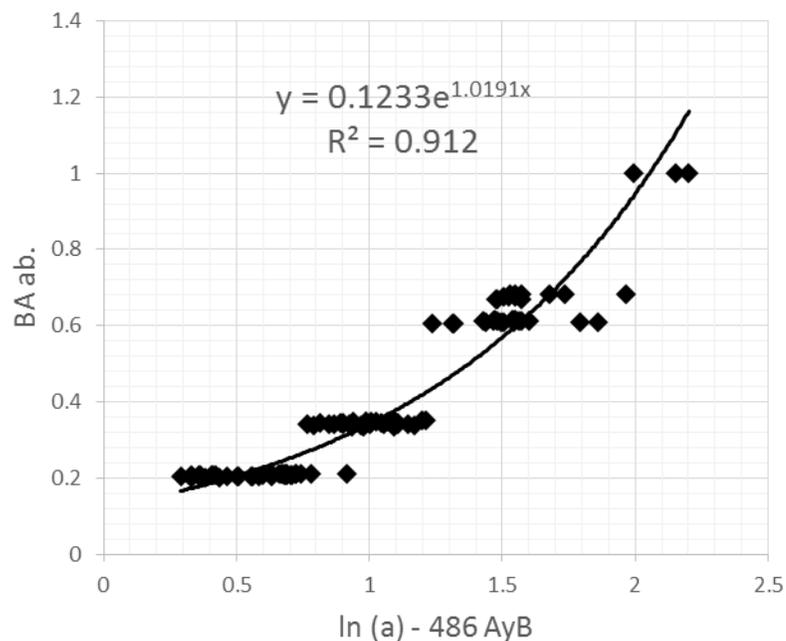


FIGURA 98: MODELO DE CUANTIFICACIÓN DE BENTONITA ARICA (BA).

5.5.7 MICA COMACSA (MC)

5.5.7.1 DETECCIÓN

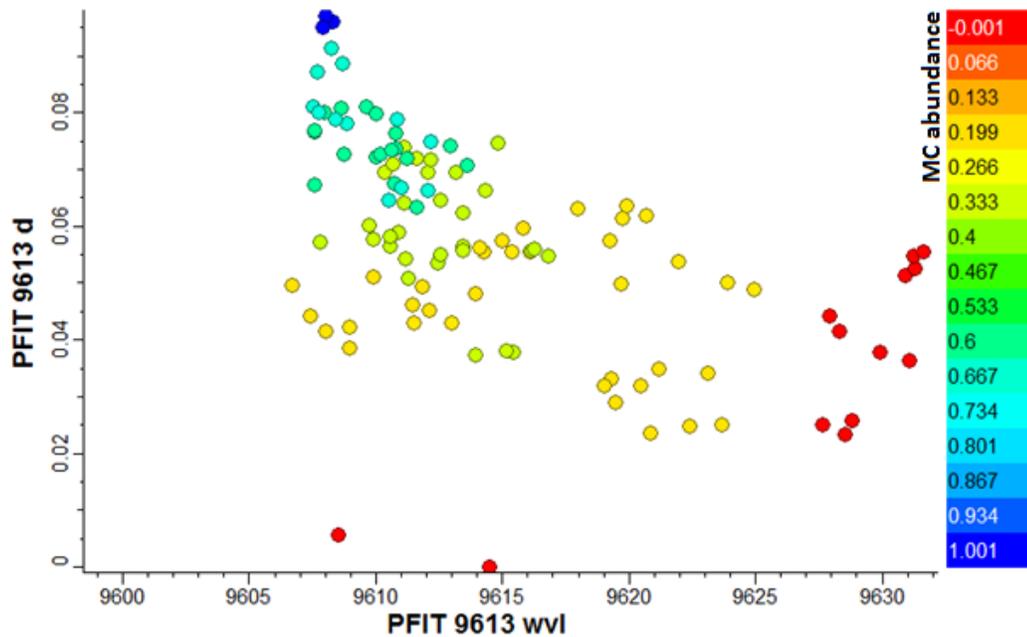


FIGURA 99: PFIT 9613 Y ABUNDANCIA DE MICA COMACSA (MC).

La detección de la mica en el SWIR se vio complicada debido a que sus características espectrales eran muy similares a las de otros minerales presentes en este estudio, confundiéndose fácilmente. Sin embargo, en el rango termal (TIR) fue posible distinguir un peak característico de la muscovita, generando un buen escalar para su detección:

$$[PFIT\ 9613\ d] \geq 0.0212 \quad y \quad [PFIT\ 9613\ wvl] \leq 9627.38$$

ECUACIÓN 36: DETECCIÓN MICA COMACSA (MC).

La detección con estos parámetros arrojó 0 falsos positivos y 4 falsos negativos.

5.5.7.2 CUANTIFICACIÓN

Se observó que el espectro de la muscovita tenía una serie de bandas de absorción adyacentes entre los 2300 y 2500 nm, y se observó una buena correlación entre el área de absorción y la abundancia de mica en ese rango, sin embargo para altas abundancias de caolín se encontraban problemas debido a que este también posee bandas de absorción en el mismo rango (Figura 100).

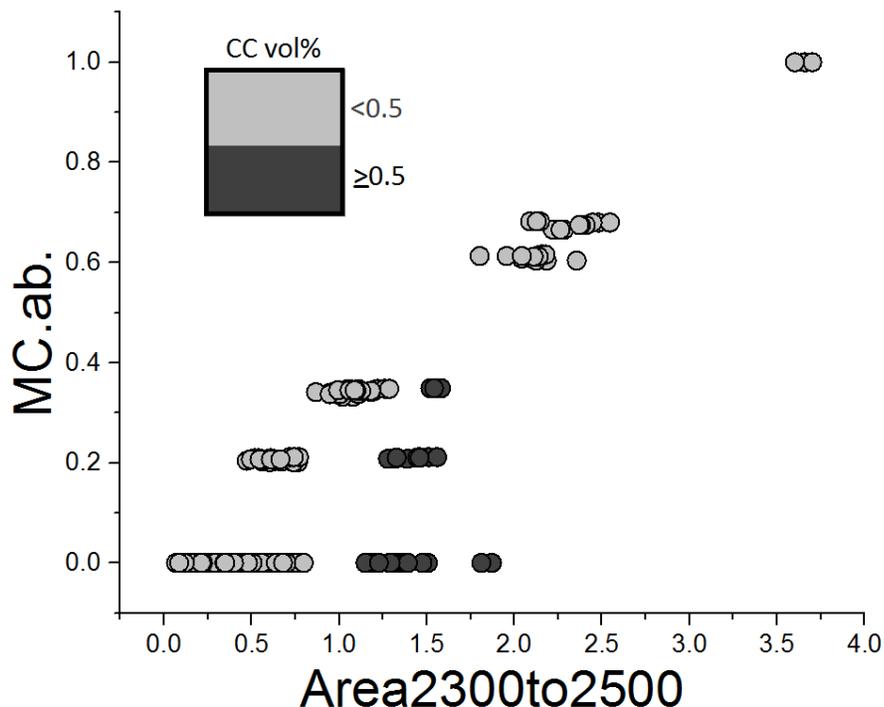


FIGURA 100: ÁREA DE ABSORCIÓN RELATIVA ENTRE 2300 Y 2500 NANÓMETROS VS. ABUNDANCIA DE MICA COMACSA (MC) Y ABUNDANCIA DE CAOLÍN COMACSA (CC).

Para mejorar la correlación se decidió restarle al área de absorción el escalar PFIT 1380 d (ver página 106, Modelo de cuantificación de caolín COMACSA) multiplicado por un parámetro de escalamiento, de manera de eliminar el efecto de este mineral. Este nuevo valor fue llamado MCscalar2 y se puede ver graficado en la Figura 101. Finalmente, utilizando un modelo de regresión lineal (Figura 102) la ecuación queda de la siguiente forma:

$$MC\ ab. = 0.2675[McScalar2] + 0.0485$$

ECUACIÓN 37: MODELO DE CUANTIFICACIÓN DE MICA COMACSA (MC).

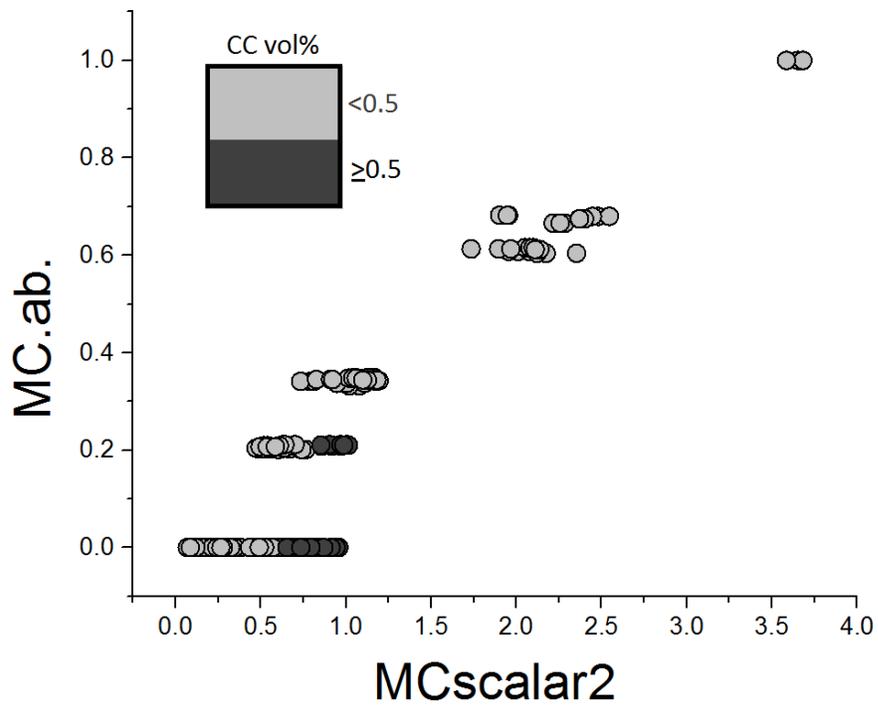


FIGURA 101: MCSCALAR2 VS. ABUNDANCIA DE MICA COMACSA (MC) Y ABUNDANCIA DE CAOLÍN COMACSA (CC).

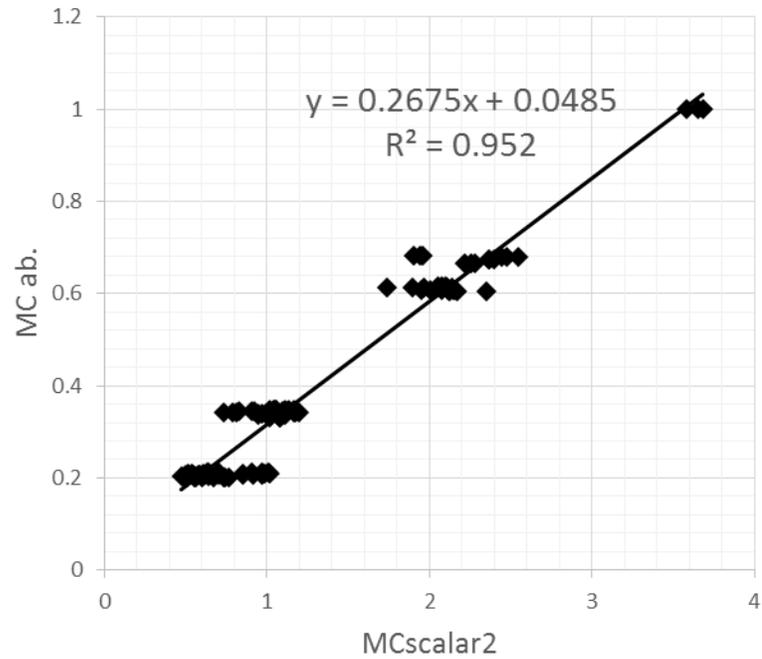


FIGURA 102: MODELO DE CUANTIFICACIÓN DE MICA COMACSA (MC).

5.5.8 NORMALIZACIÓN

Una vez detectados y cuantificados los minerales de una muestra espectral es probable que no sumen 1, y es por esto que se procede con la normalización de los datos de manera de dar sentido físico a los números calculados por los modelos:

$$\frac{x_i}{\sum x_i} = X_i$$

ECUACIÓN 38: NORMALIZACIÓN DE LAS ABUNDANCIAS.

Donde x_i es la abundancia calculada por el modelo del mineral i y X_i es la abundancia normalizada.

5.5.9 EVALUACIÓN DE LOS MODELOS

Para evaluar la calidad de los promedios se utilizaron herramientas estadísticas como el MAPE y el MAD, los cuales cuantifican la diferencia que existe entre el valor real y el entregado por el modelo.

$$MAPE = \sum \left| \frac{x_j - \hat{x}_j}{x_j} \right| * \frac{1}{n} [\%]$$

ECUACIÓN 39: MAPE: PROMEDIO DEL ERROR PORCENTUAL ABSOLUTO.

Donde x_j representa el valor real y \hat{x}_j el valor estimado. El MAPE expresa la precisión del modelo en términos de porcentaje de la variable estimada, que en este estudio puede ser algo confuso ya que también es un porcentaje, y el MAD también estará en porcentaje, sin embargo este es netamente la diferencia entre la abundancia real y la estimada en promedio.

$$MAD = \sum |x_j - \hat{x}_j| * \frac{1}{n}$$

ECUACIÓN 40: MAD: PROMEDIO DE LA DESVIACIÓN ABSOLUTA.

La siguiente tabla muestra la evaluación de la calidad de los modelos creados evaluados en las 447 muestras descritas en la página 105:

Modelo	MAD	Falsos Negativos	Falsos Positivos
BA	2.03%	0	0
BC	2.04%	1	0
MC	3.25%	4	0
CC	2.12%	0	0
CI	1.90%	0	0

TABLA 20: EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE ABUNDANCIA.

6. MODELO INTEGRAL

Finalmente, teniendo los modelos de detección y cuantificación de minerales y por otra parte los ternarios de viscosidad y esfuerzo de fluencia, es posible establecer la relación matemática que existen entre ambos, generando el modelo final de predicción y control reológico.

Con este objetivo se realizaron distintas regresiones, lineales y no lineales, para los ternarios de viscosidad y esfuerzo de fluencia y para el logaritmo de ambas propiedades, de manera de encontrar una relación matemática que tuviese un buen ajuste a los datos.

La discusión de cuál sería el mejor modelo matemático para ajustar queda fuera del alcance de este trabajo, sin embargo hay dos directrices para la elección de dicho ajuste que son importantes de mencionar:

- Debe entregar datos de relevancia física, es decir, no puede entregar valores negativos.
- Debe privilegiar la calidad del ajuste en los valores de relevancia para la operación en cuestión, pueden ser los valores altos o bajos o algún efecto sinérgico según convenga.

6.1 TERNARIOS MICA (MC) – CAOLÍN (CC) – CUARZO (CI)

Como se mencionó anteriormente, el modelamiento matemático de las propiedades reológicas basado en los datos obtenidos queda fuera del alcance, sin embargo se realizaron los modelos de viscosidad y esfuerzo de fluencia para el ternario MC – CC – CI de manera de dar un ejemplo de cómo quedaría el modelo final.

Los datos utilizados para las regresiones fueron las fracciones volumétricas de cada mineral y los valores obtenidos del ajuste de Bingham para cada una de las reometrías. En la Tabla 21 se muestran los datos, y luego los modelos lineales y no lineales obtenidos a partir de ellos.

Es importante mencionar que la fracción volumétrica de los tres componentes son linealmente dependientes y es por esto que se excluye una de ellas en todos los modelos.

X_1	X_2	X_3	MEDIDOS		MODELOS LINEALES		MODELOS NO-LINEALES	
MC	CC	CI	τ	η	τ	η	τ	η
1.00			14.39	52.55	16.65	51.54	15.01	54.38
	1.00		35.13	57.53	56.26	45.53	33.45	58.05
		1.00	0.16	6.20	0.37	6.30	1.16	5.96
0.33	0.67		29.57	43.90	37.49	47.45	32.58	41.38
0.33		0.67	1.30	12.52	1.33	12.69	0.70	14.62
0.67	0.33		30.39	37.27	24.98	49.45	26.43	40.49
	0.33	0.67	4.17	11.82	1.99	12.18	3.68	11.04
0.67		0.33	4.35	35.83	4.70	25.58	5.31	30.54
	0.67	0.33	13.60	22.03	10.58	23.55	14.44	23.57
0.60	0.20	0.20	10.10	33.59	9.94	33.02	11.56	32.27
0.20	0.60	0.20	16.28	31.27	16.18	31.42	17.80	29.71
0.33	0.33	0.33	8.43	22.60	7.05	24.54	7.90	23.53
0.20	0.20	0.60	3.32	13.78	2.18	14.25	1.16	14.19

TABLA 21: DATOS PARA REGRESIONES Y RESULTADOS.

Notar que para simplificar la notación se reemplazó la fracción volumétrica de la mica. El caolín y el cuarzo por X_1 , X_2 y X_3 respectivamente.

6.1.1 MODELOS PROPUESTOS

Modelo lineal para el esfuerzo de fluencia

Para el modelo lineal se observó que el ajuste mejoraba al utilizar el logaritmo del esfuerzo de fluencia:

$$\log(\tau) = 1.75 - 0.529X_1 - 2.177X_3$$

ECUACIÓN 41: MODELO LINEAL PARA EL ESFUERZO DE FLUENCIA DEL TERNARIO MC – CC – CI.

Modelo lineal para la viscosidad

$$\log(\eta) = 1.658 + 0.054X_1 - 0.859X_3$$

ECUACIÓN 42: MODELO LINEAL PARA LA VISCOSIDAD DEL TERNARIO MC – CC – CI.

Modelo no lineal para el esfuerzo de fluencia

$$\tau = 33.451 - 0.319X_1 - 2.193X_3 - 0.65X_1X_2 - 0.771X_1X_3 + 2.277X_2X_3 - 3.058X_1X_2X_3$$

ECUACIÓN 43: MODELO NO LINEAL PARA EL ESFUERZO DE FLUENCIA DEL TERNARIO MC – CC – CI.

Modelo no lineal para la viscosidad

$$\log(\eta) = 1.764 - 0.028X_1 - 0.989X_3 - 0.619X_1X_2 + 0.313X_1X_3 - 0.279X_2X_3 + 0.317X_1X_2X_3$$

ECUACIÓN 44: MODELO NO LINEAL PARA LA VISCOSIDAD DEL TERNARIO MC – CC – CI.

6.1.2 EVALUACIÓN DE MODELOS

Una vez obtenidos las distintas regresiones queda reemplazar X_1 , X_2 y X_3 por los modelos de abundancia de mica, caolín y cuarzo respectivamente y luego evaluar los valores entregados. Es necesario mencionar que los modelos de abundancia fueron realizados para la abundancia en masa, mientras que aquellos para las propiedades reológicas utilizan la abundancia en volumen, por lo que una conversión sencilla es necesaria utilizando las densidades.

En la Figura 103 y Figura 104 se observan las comparaciones de los valores reales versus los calculados, para los modelos lineales y no lineales expuestos anteriormente, en ambos casos se aprecia una mayor calidad en el ajuste para los modelos no lineales.

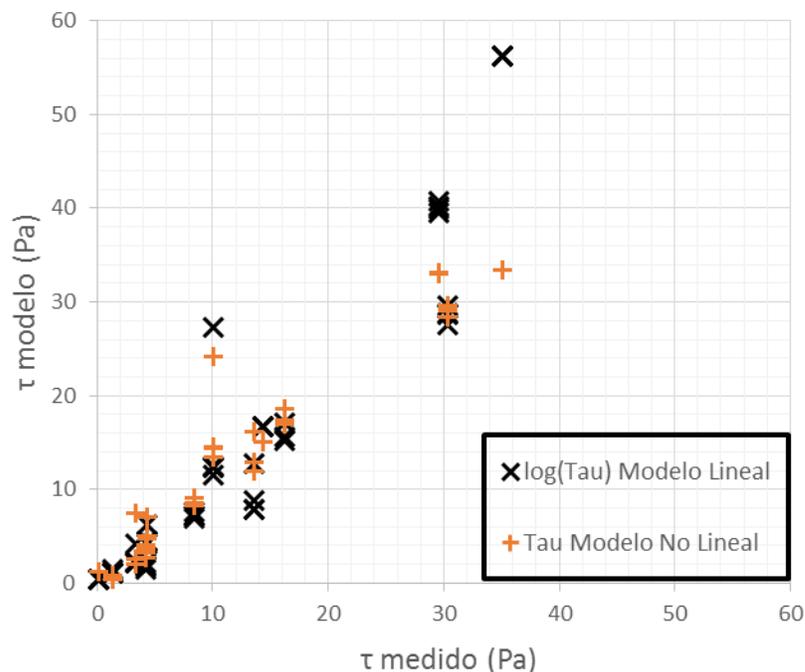


FIGURA 103: COMPARACIÓN DE MODELOS PARA EL ESFUERZO DE FLUENCIA.

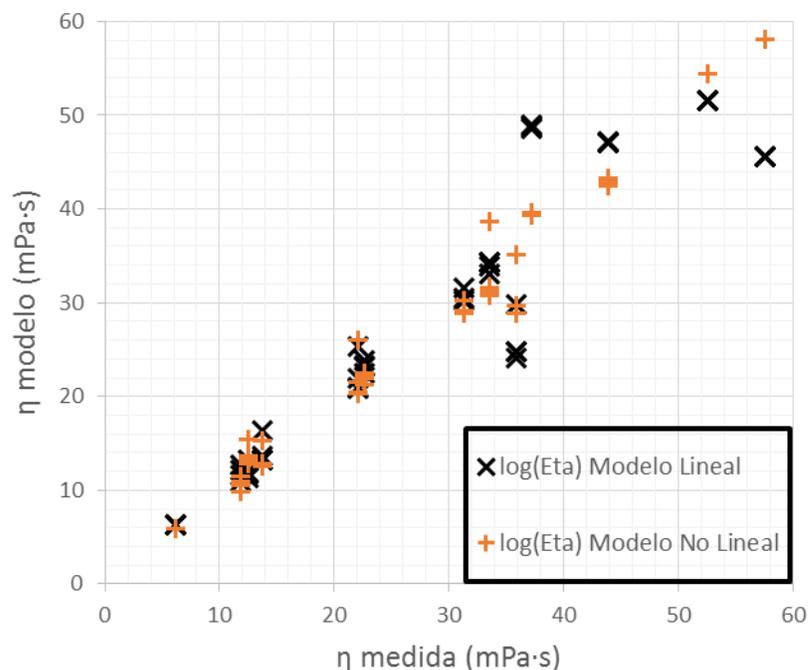


FIGURA 104: COMPARACIÓN DE MODELOS PARA LA VISCOSIDAD.

Los valores se calcularon a partir de 52 muestras espectrales que los modelos de detección indicaron estar en el ternario MC – CC – CI, entre los cuales se encuentra un falso negativo para la mica COMACSA.

Esfuerzo de Fluencia		Viscosidad		
Tipo de regresión	MAD (Pa)	MAPE	MAD (mPa·s)	MAPE
Lineal	4.04	36.65%	3.34	9.37%
No Lineal	1.78	69.51%	1.69	6.56%

TABLA 22: MAD Y MAPE PARA MODELOS DE VISCOSIDAD Y ESFUERZO DE FLUENCIA.

En la Tabla 22 se pueden apreciar los valores del MAD y MAPE (ver página 119) para los valores de viscosidad y esfuerzo de fluencia obtenidos a partir de la caracterización espectral. Se observa que el MAD mejora en todos los casos al utilizar un modelo no lineal, sin embargo se aprecia un empeoramiento considerable en el MAPE, el cual se debe al error del ajuste no lineal para los valores medidos del esfuerzo de fluencia menor a 1, que al quedar como denominadores disparan el valor del coeficiente, sin embargo se privilegió un mejor ajuste en los valores altos.

Finalmente queda comparar los ternarios generados a partir de los modelos.

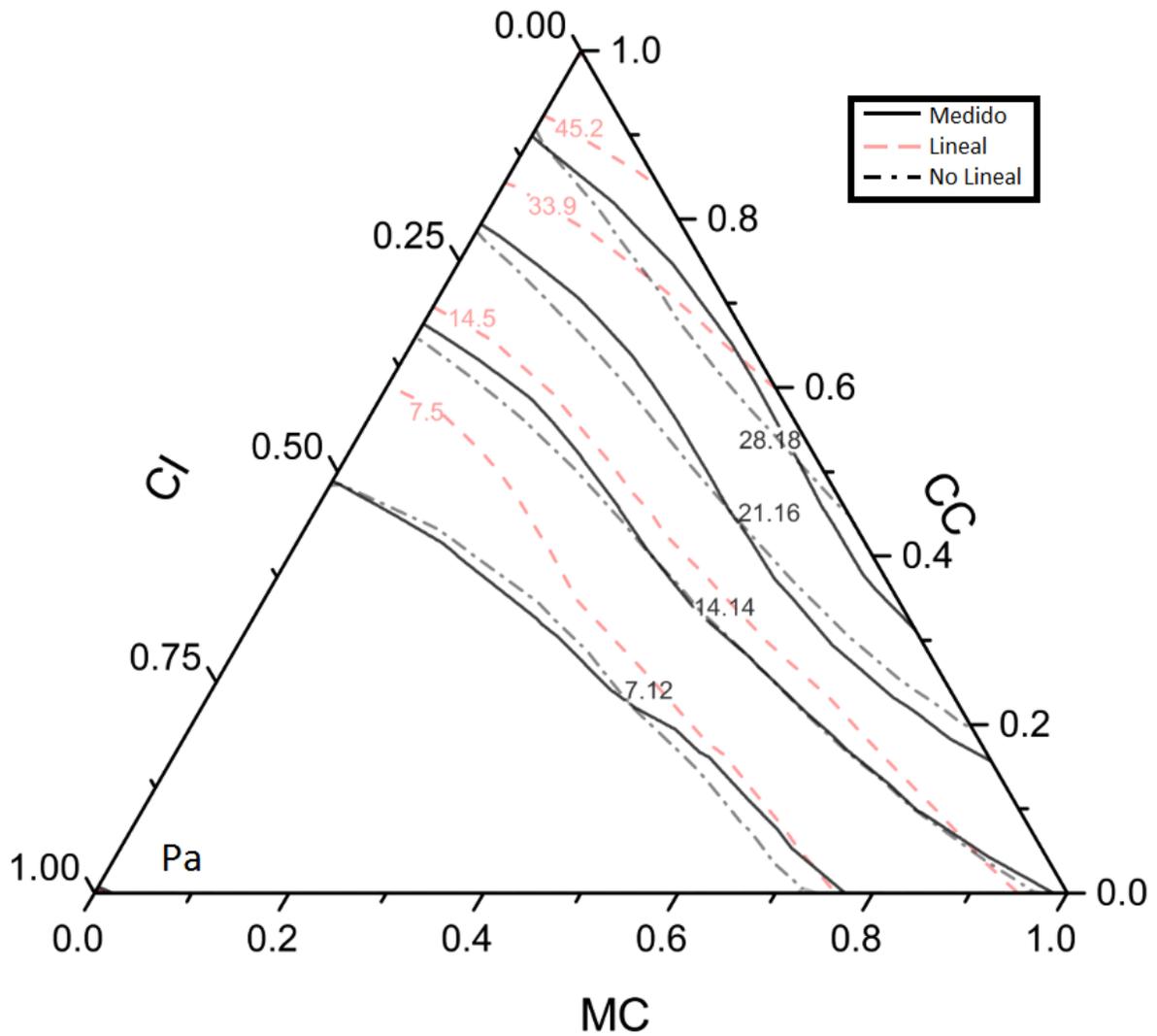


FIGURA 105: TERNARIO DE ESFUERZO DE FLUENCIA PARA MC, CC Y CI, CON LOS VALORES MEDIDOS, DEL MODELO LINEAL Y DEL MODELO NO LINEAL.

En la Figura 105 se observa una gran sobre estimación de los valores altos para el esfuerzo de fluencia por parte del modelo lineal, mientras el no lineal presenta un ajuste de buena calidad, por lo que se decide utilizar este segundo modelo.

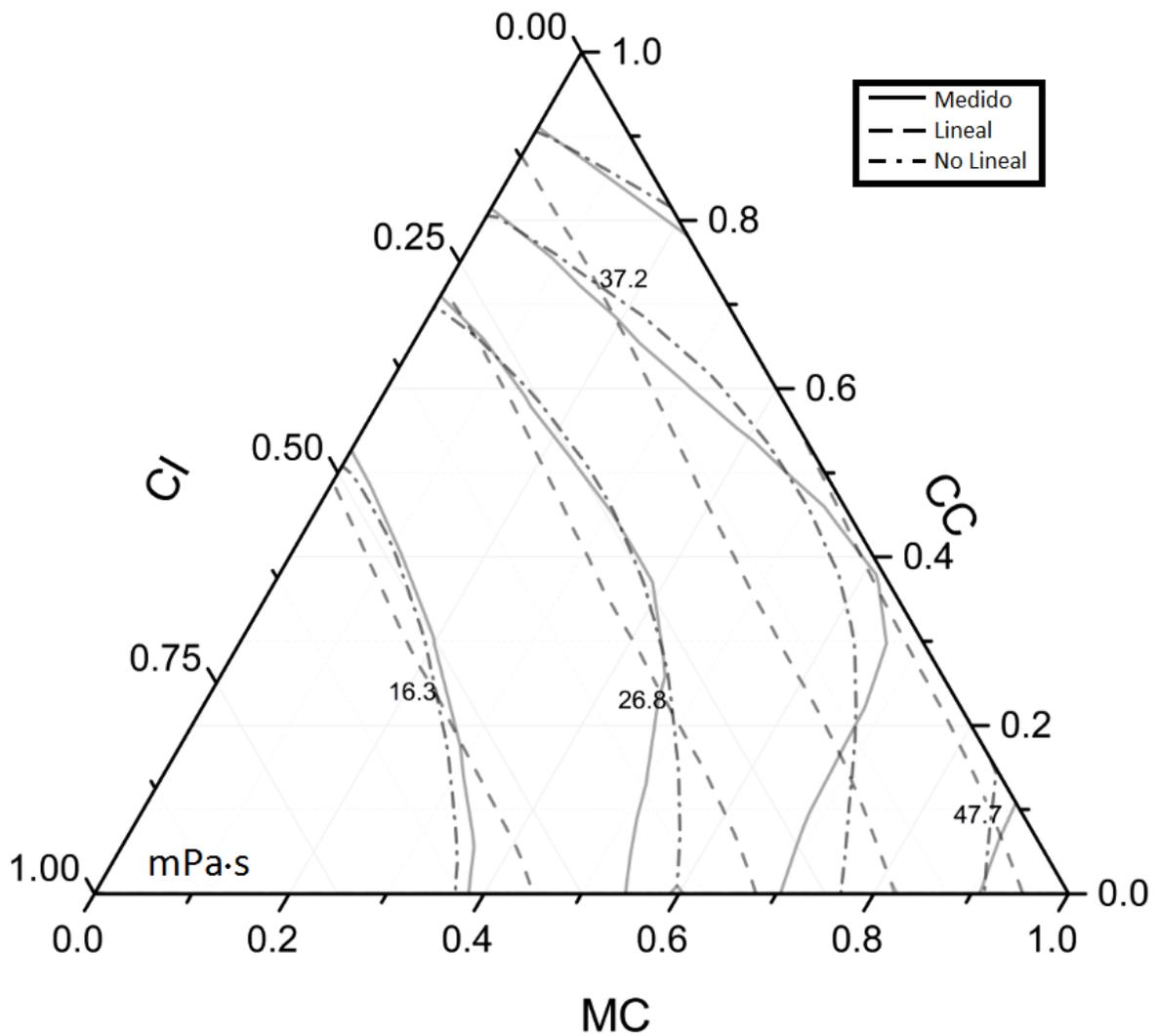


FIGURA 106: TERNARIO DE VISCOSIDAD PARA MC, CC Y CI CON LOS VALORES MEDIDOS, DEL MODELO LINEAL Y DEL MODELO NO LINEAL.

En la Figura 106 es posible apreciar que el diagrama de viscosidad generado a partir del modelo lineal pierde completamente la resolución del efecto sinérgico mencionado en la página 95, mientras el no lineal presenta esta curvatura conservando la característica de mayor interés.

Finalmente, para este caso en particular, se opta por los modelos **no lineales** para la predicción y control de la reología.

6.2 APLICABILIDAD EN LA INDUSTRIA

El modelo desarrollado se puede aplicar en cualquier caso en que se deseen estimar las propiedades reológicas y se tenga acceso a muestras minerales, es decir desde la etapa de evaluación de un yacimiento, como manera de evaluar la factibilidad técnica por parte de la reología, hasta la explotación misma como mecanismo de control y predicción.

Un ejemplo práctico sería imaginar un yacimiento en etapa de evaluación en el cual ya han sido reconocidas ciertas unidades geológicas, definidas, entre otras cosas, por la abundancia de ciertos minerales de ganga y mena, de los cuales quedaría identificar los más influyentes en la reología (arcillas, minerales más abundantes, otros) y desarrollar los modelos de detección y cuantificación de ellos y los modelos reológicos, de manera de dar cuenta tempranamente características reológicas de potencial impacto en la operación de la planta y efectos sinérgicos entre minerales para solucionar posibles problemas o generar beneficios como la disminución de consumo de agua y energía, finalmente traduciéndose por un lado en una mejor estimación de la factibilidad de explotar el yacimiento y por otro contribuyendo desde una disminución de los costos a hacer factible la explotación de un cuerpo mineralizado que de otra manera no lo sería.

Otro posible escenario de aplicación del modelo desarrollado sería en una etapa tardía de explotación, ante la aparición de algún problema con origen en la reología, ya sea en: bombeo y piping, baja eficiencia en molienda o en lixiviación en pulpa, consumo de agua elevado para disminuir viscosidad, entre otros; implementando el mecanismo de predicción de las propiedades reológicas a partir de la caracterización híper-espectral, permitiendo prescindir de las mediciones de viscosidad y esfuerzo de fluencia y así adelantando y optimizando el proceso de toma de decisiones, haciendo uso nuevamente de los efectos sinérgicos o simplemente al anteponerse a una eventual falla de equipos o detenciones para mantención o reemplazo de estos.

De modo general el modelo busca ser un apoyo para la optimización del procesamiento de minerales generando información reológica predictiva a partir de la roca (Figura 107), reemplazando las reometrías en línea que advierten de los problemas una vez que están ocurriendo, por la caracterización híper-espectral y un conocimiento más fenomenológico de dichos problemas.

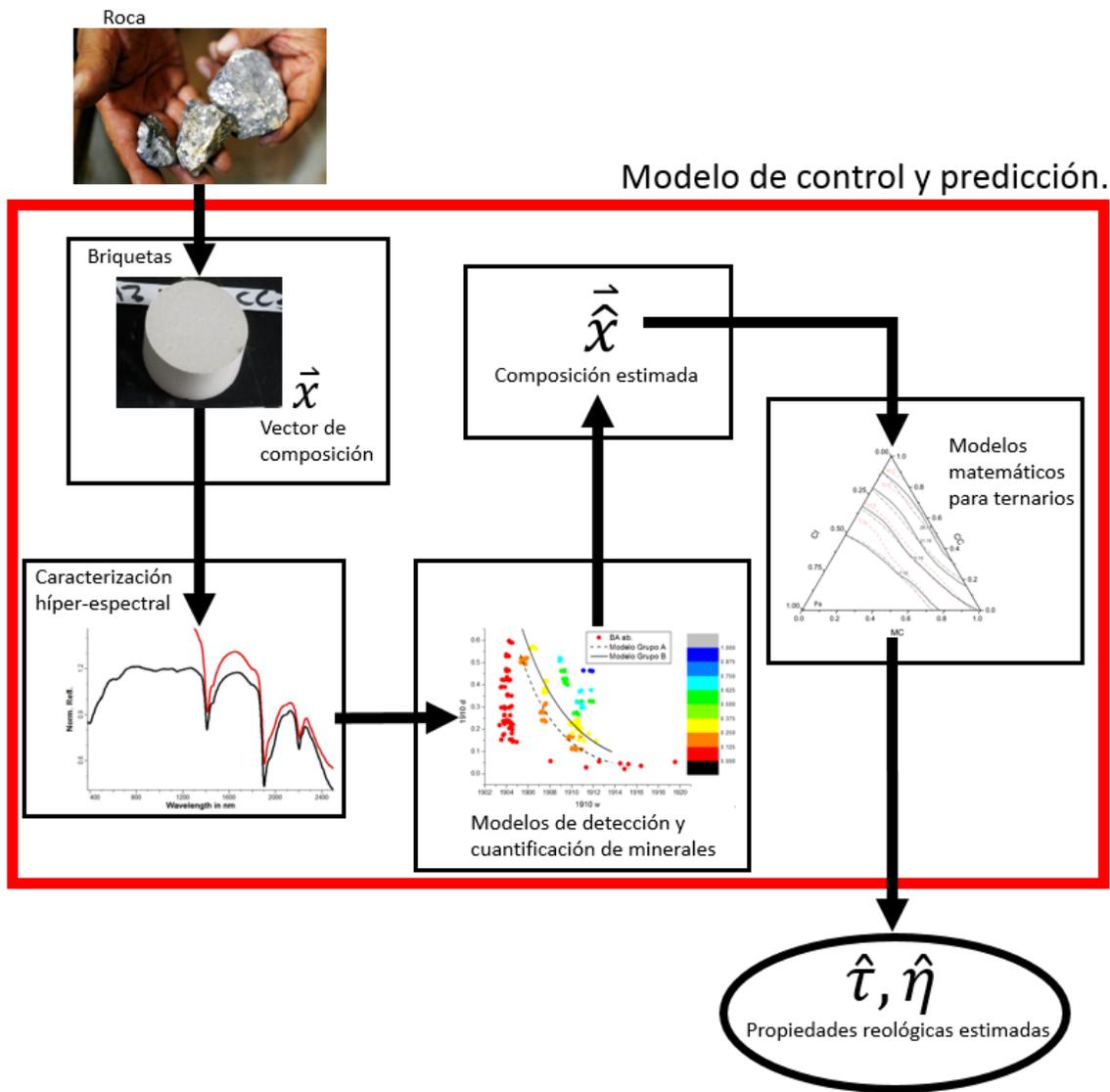


FIGURA 107: ESQUEMA DE APLICABILIDAD DEL MODELO DESARROLLADO.

7. CONCLUSIONES

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

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

La creación de ternarios permitió ver que el efecto de la combinación de minerales sobre la reología de una pulpa está lejos de ser lineal e intuitivo, lo cual debiese ser considerado en el diseño de los distintos sistemas que interactúan con suspensiones minerales.

Mayor investigación debe ser llevada a cabo para identificar el mecanismo mediante el cual las altas viscosidades alcanzadas por pulpas con montmorillonita eran controladas, pudiendo significar un gran beneficio para la industria para mitigar problemas reológicos ocasionados por esta arcilla.

Observando los efectos sinérgicos entre distintos minerales sobre las propiedades reológicas sugieren que la solución para problemas de transporte y espesamiento de pulpas y relaves que muchas veces surgen producto de arcillas u otros minerales, se encuentran en el mismo yacimiento al mezclar con conocimiento previo distintos sectores de la mina, de manera de lograr un producto estable y homogéneo de propiedades adecuadas para el proceso y equipamiento en cuestión.

Un modelo de Bingham funciona bien para tasas de deformación altas, sin embargo el ajuste es de mala calidad para tasas de deformación cercanas a cero. Para el estudio de la reología en esos rangos se recomienda la utilización de otro reómetro y geometría de paletas en el spindle, de manera de obtener datos confiables.

Como se observó para el caso de la mica blanca, algunos minerales exhiben comportamientos temporales complejos en que la viscosidad y esfuerzo de fluencia tienen un efecto de “memoria” que además es alterable por el ajuste de pH. Esto tiene implicancias para la industria ya que se asume normalmente que las suspensiones al estar sometidas a movimiento constante durante horas se encuentran en estado estacionario, sin embargo una modificación del pH puede generar una nueva etapa de transición reológica no considerada, pudiendo generar problemas de dimensionamiento de equipos u otros.

Por otra parte, la utilización de un sistema de caracterización basado en el análisis hiper espectral con fines de control reológico demostró ser factible al manifestar una alta precisión en la detección y cuantificación de los minerales con que se trabajó, siendo necesario un protocolo de preparación de muestras para generar briquetas de manera de garantizar el funcionamiento de los modelos sobre todo de cuantificación, ya que estos requieren una razón señal/ruido estable, y además para el funcionamiento óptimo del espectrómetro TIR.

Se concluye de manera satisfactoria la factibilidad de implementar sistemas de control reológico, implicando una mejor toma de decisiones en la labor metalúrgica, por un lado evitando detenciones de planta por mantenciones correctivas que son de alto impacto para el negocio, y por otro optimizando el uso de recursos como el agua y la energía aumentando la sustentabilidad de una industria de tan alto impacto ambiental como es la industria minera.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ASD. (2013). TerraSpec 4 Hi-Res Mineral Spectrometer. Retrieved from <http://www.asdi.com/products/terraspec/terraspec-hi-res-mineral-spectrometer>
- Barnes, H., & Hutton, J. (1989). *An introduction to rheology*.
- Bekkour, K., Leyama, M., Benchabane, A., & Scrivener, O. (2005). Time-dependent rheological behavior of bentonite suspensions: An experimental study. *Journal of Rheology*, 49(6), 1329–1345. doi:10.1122/1.2079267
- Berman, M., Bischof, L., & Lagerstrom, R. (2011). An Unmixing Algorithm Based on a Large Library of Shortwave Infrared Spectra.
- Bernhardt, C., Reinsch, E., & Husemann, K. (1999). The influence of suspension properties on ultra-fine grinding in stirred ball mills. *Powder Technology*, 105(1-3), 357–361. doi:10.1016/S0032-5910(99)00159-X
- Boger, D. V. (2000). Rheology and the Minerals Industry. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 20(1), 1–25. doi:10.1080/08827509908962460
- CoreScan Pty Ltd. (2014). The CoreScan System. Retrieved from <http://www.corescan.com.au/assets/Corescan HCI-III v1.pdf>.
- Crawford, J., Sittert, F. Van, & Walt, M. Van Der. (2012). The performance of centrifugal pumps when pumping ultra-viscous paste slurries, (NOVEMBER), 16–19.
- Farrokhpay, S. (2009). A review of polymeric dispersant stabilisation of titania pigment. *Advances in Colloid and Interface Science*, 151(1-2), 24–32. doi:10.1016/j.cis.2009.07.004
- Fengqiu, T., Xiaoxian, H., Yufeng, Z., & Jingkun, G. (2000). Effect of dispersants on surface chemical properties of nano-zirconia suspensions, 26, 93–97.
- Geotek. (2014). MSCL-S System Description. Retrieved from <http://www.geotek.co.uk/products/mscl-s>
- Ghosh, P. (n.d.). DLVO Theory and Non-DLVO Forces. *Nptel.ac.in*, 1–17.
- Goetz, A. F. H. (2009). Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113, S5–S16. doi:10.1016/j.rse.2007.12.014
- Goldberg, S. (2002). Competitive adsorption of arsenate and arsenite on oxides and clay minerals. *Soil Science Society of America Journal*, 413–421.

- Greenwood, R., & Kendall, K. (1999). Selection of Suitable Dispersants for Aqueous Suspensions of Zirconia and Titania Powders using Acoustophoresis. *Journal of the European Ceramic Society*, 19(4), 479–488. doi:10.1016/S0955-2219(98)00208-8
- He, M., Wang, Y., & Forssberg, E. (2004). Slurry rheology in wet ultrafine grinding of industrial minerals: a review. *Powder Technology*, 147(1-3), 94–112. doi:10.1016/j.powtec.2004.09.032
- Huntington, J., & Munday, T. (2004). HyLogging Systems. Retrieved from www.csiro.au/org/HyLoggingSystemsGroup
- Huynh, L., Jenkins, P., & Ralston, J. (2000). Modification of the rheological properties of concentrated slurries by control of mineral–solution interfacial chemistry. *International Journal of Mineral Processing*, 59(4), 305–325. doi:10.1016/S0301-7516(99)00082-4
- Klein, B., & Hallbom, D. . (2002). Modifying the rheology of nickel laterite suspensions. *Minerals Engineering*, 15(10), 745–749. doi:10.1016/S0892-6875(02)00170-X
- Kwak, M., James, D. F., & Klein, K. a. (2005). Flow behaviour of tailings paste for surface disposal. *International Journal of Mineral Processing*, 77(3), 139–153. doi:10.1016/j.minpro.2005.06.001
- Leider, P., & Bird, R. (1974). Squeezing flow between parallel disks. I. Theoretical analysis. *Industrial & Engineering Chemistry*
- Maciel, F., Kiryu, H., & Ferreira, O. (2009). Rheological Analysis of Water Clay Compositions in Order to Investigate Mudflows Developing in Canals, XXXI(1).
- Madigan, C., Leong, Y. K., & Ong, B. C. (2009). Surface and rheological properties of as-received colloidal goethite (α -FeOOH) suspensions: pH and polyethylenimine effects. *International Journal of Mineral Processing*, 93(1), 41–47. doi:10.1016/j.minpro.2009.05.005
- Marenduzzo, D., Finan, K., & Cook, P. R. (2006). The depletion attraction: an underappreciated force driving cellular organization. *The Journal of Cell Biology*, 175(5), 681–6. doi:10.1083/jcb.200609066
- Mcfarlane, A. J., & Bremmell, K. (2005). Rheology of flocculated kaolinite dispersions, 17(4), 181–190.
- Mokhtari, M., & East, M. (2011). AADE-11-NTCE-69 Thixotropic and Rheopectic Modeling of Xanthan / Borate Gel System, (1), 1–8.
- Mustard, J. F., Murchie, S. L., Pelkey, S. M., Ehlmann, B. L., Milliken, R. E., Grant, J. A., ... Wolff, M. (2008). Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument, 305–309. doi:10.1038/nature07097

- NASA. (2013). AVIRIS. Retrieved from <http://aviris.jpl.nasa.gov/aviris/index.html>
- Nguyen, Q., Akroyd, T., Kee, D. De, & Zhu, L. (2006). Yield stress measurements in suspensions: an inter-laboratory study. *Korea-Australia Rheology ...*, 18(1), 15–24.
- Nosrati, A., Addai-Mensah, J., & Skinner, W. (2011). Rheology of aging aqueous muscovite clay dispersions. *Chemical Engineering Science*, 66(2), 119–127. doi:10.1016/j.ces.2010.06.028
- Ostrooumov, M. (2007). *Espectrometría Infrarroja de Reflexión en Mineralogía Avanzada, Geomología y Arqueometría*.
- Pearlman, J., Carman, S., & Segal, C. (2001). Overview of the Hyperion Imaging Spectrometer for the NASA EO-1 Mission Hyperion Imaging Spectrometer.
- Quigley, M., & Connor, P. (2014). Hylogging: Infrared Mineral Spectroscopy.
- Rand, B., & Melton, I. E. (1977). Particle interactions in aqueous kaolinite suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 60(2), 308–320. doi:10.1016/0021-9797(77)90290-9
- Specim. (2014). SisuROCK. Retrieved from http://www.specim.fi/files/pdf/sisu/datasheets/SisuROCK_Datasheet-ver1-13.pdf
- SpecTIR. (2012a). AisaEAGLE Datasheet. Retrieved from [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)
- SpecTIR. (2012b). AisaHAWK. Retrieved from http://www.specim.fi/files/pdf/aisa/datasheets/Hawk_datasheet_ver2-2012.pdf
- SpecTIR. (2012c). AisaOWL.
- Tan, H., Skinner, W., & Addai-Mensah, J. (2012). Leaching behaviour of low and high Fe-substituted chlorite clay minerals at low pH. *Hydrometallurgy*, 125-126, 100–108. doi:10.1016/j.hydromet.2012.05.015
- Tan, H., Skinner, W., & Addai-Mensah, J. (2013). Influence of fluorite on the isothermal leaching and rheological behaviours of chlorite mineral pulps at low pH. *International Journal of Mineral Processing*, 123, 1–8. doi:10.1016/j.minpro.2013.04.018
- Terraplus. (2013). PIMA Spectrometer. Retrieved from <http://terraplus.ca/products/properties/pima.aspx>
- Vallar, S., Houivet, D., El Fallah, J., Kervadec, D., & Haussonne, J.-M. (1999). Oxide slurries stability and powders dispersion: optimization with zeta potential and rheological measurements. *Journal of the European Ceramic Society*, 19(6-7), 1017–1021. doi:10.1016/S0955-2219(98)00365-3

Whitbourn, L., Huntington, J., Munday, T., Science, C. E., Cesre, R. E., & Ryde, N. (2011). CSIRO 's HyLogging TM Systems – Production Proven Technology for the Exploration and Mining Sector, 85–88.

Yang, H.-G., Li, C.-Z., Gu, H.-C., & Fang, T.-N. (2001). Rheological Behavior of Titanium Dioxide Suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 236(1), 96–103. doi:10.1006/jcis.2000.7373

ANEXO

1. COMPOSICIÓN DE LAS PULPAS A CV 30%

CV 30%	Masa (g)					Volumen (ml)
	BA	BC	MC	CC	CI	Agua
BA10	89.50	0.00	0.00	0.00	0.00	62.67
MC10	0.00	0.00	81.83	0.00	0.00	70.00
CC10	0.00	0.00	0.00	76.18	0.00	70.00
CI10	0.00	0.00	0.00	0.00	78.89	70.00
BA3 MC7	29.83	0.00	54.56	0.00	0.00	67.56
BA3 CC7	29.83	0.00	0.00	50.78	0.00	67.56
BA3 CI7	29.83	0.00	0.00	0.00	52.59	67.56
BA7 MC3	59.67	0.00	27.28	0.00	0.00	65.11
MC3 CC7	0.00	0.00	27.28	50.78	0.00	70.00
MC3 CI7	0.00	0.00	27.28	0.00	52.59	70.00
BA7 CC3	59.67	0.00	0.00	25.39	0.00	65.11
MC7 CC3	0.00	0.00	54.56	25.39	0.00	70.00
CC3 CI7	0.00	0.00	0.00	25.39	52.59	70.00
BA7 CI3	59.67	0.00	0.00	0.00	26.30	65.11
MC7 CI3	0.00	0.00	54.56	0.00	26.30	70.00
CC7 CI3	0.00	0.00	0.00	50.78	26.30	70.00
BA6 MC2 CC2	53.70	0.00	16.37	15.24	0.00	65.60
BA2 MC6 CC2	17.90	0.00	49.10	15.24	0.00	68.53
BA3 MC3 CC3	29.83	0.00	27.28	25.39	0.00	67.56
BA2 MC2 CC6	17.90	0.00	16.37	45.71	0.00	68.53
BA6 MC2 CI2	53.70	0.00	16.37	0.00	15.78	65.60
BA2 MC6 CI2	17.90	0.00	49.10	0.00	15.78	68.53
BA3 MC3 CI3	29.83	0.00	27.28	0.00	26.30	67.56
BA2 MC2 CI6	17.90	0.00	16.37	0.00	47.33	68.53
BA6 CC2 CI2	53.70	0.00	0.00	15.24	15.78	65.60
BA2 CC6 CI2	17.90	0.00	0.00	45.71	15.78	68.53
BA3 CC3 CI3	29.83	0.00	0.00	25.39	26.30	67.56
BA2 CC2 CI6	17.90	0.00	0.00	15.24	47.33	68.53
MC6 CC2 CI2	0.00	0.00	49.10	15.24	15.78	70.00
MC2 CC6 CI2	0.00	0.00	16.37	45.71	15.78	70.00
MC3 CC3 CI3	0.00	0.00	27.28	25.39	26.30	70.00
MC2 CC2 CI6	0.00	0.00	16.37	15.24	47.33	70.00

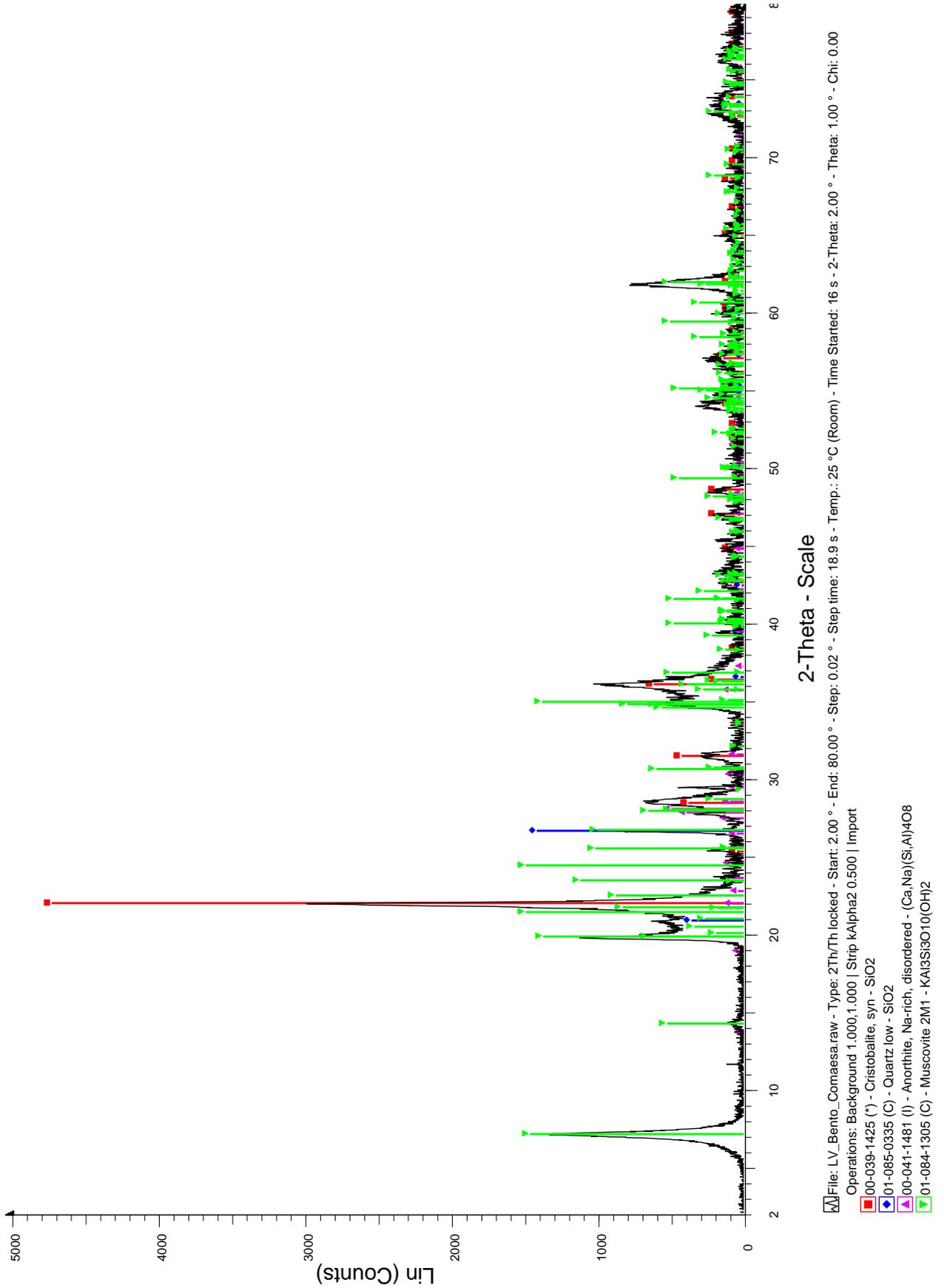
2. COMPOSICIÓN DE LAS PULPAS A CV 15% (A)

CV 15%	Masa (g)					Volumen (ml)	
	Código de prueba	BA	BC	MC	CC	CI	Agua
BA10	44.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	81.33
BC10	0.00	42.81	0.00	0.00	0.00	0.00	80.64
MC10	0.00	0.00	40.92	0.00	0.00	0.00	85.00
CC10	0.00	0.00	0.00	0.00	38.09	0.00	85.00
CI10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	39.44	85.00
BA3 BC7	14.92	28.54	0.00	0.00	0.00	0.00	80.87
BA3 MC7	14.92	0.00	27.28	0.00	0.00	0.00	83.78
BA3 CC7	14.92	0.00	0.00	0.00	25.39	0.00	83.78
BA3 CI7	14.92	0.00	0.00	0.00	0.00	26.30	83.78
BA7 BC3	29.83	14.27	0.00	0.00	0.00	0.00	81.10
BC3 MC7	0.00	14.27	27.28	0.00	0.00	0.00	83.55
BC3 CC7	0.00	14.27	0.00	0.00	25.39	0.00	83.55
BC3 CI7	0.00	14.27	0.00	0.00	0.00	26.30	83.55
BA7 MC3	29.83	0.00	13.64	0.00	0.00	0.00	82.56
BC7 MC3	0.00	28.54	13.64	0.00	0.00	0.00	82.09
MC3 CC7	0.00	0.00	13.64	0.00	25.39	0.00	85.00
MC3 CI7	0.00	0.00	13.64	0.00	0.00	26.30	85.00
BA7 CC3	29.83	0.00	0.00	0.00	12.70	0.00	82.56
BC7 CC3	0.00	28.54	0.00	0.00	12.70	0.00	82.09
MC7 CC3	0.00	0.00	27.28	0.00	12.70	0.00	85.00
CC3 CI7	0.00	0.00	0.00	0.00	12.70	26.30	85.00
BA7 CI3	29.83	0.00	0.00	0.00	0.00	13.15	82.56
BC7 CI3	0.00	28.54	0.00	0.00	0.00	13.15	82.09
MC7 CI3	0.00	0.00	27.28	0.00	0.00	13.15	85.00
CC7 CI3	0.00	0.00	0.00	0.00	25.39	13.15	85.00
BA6 BC2 MC2	26.85	8.56	8.18	0.00	0.00	0.00	81.93
BA2 BC6 MC2	8.95	25.68	8.18	0.00	0.00	0.00	81.65
BA3 BC3 MC3	14.92	14.27	13.64	0.00	0.00	0.00	82.32
BA2 BC2 MC6	8.95	8.56	24.55	0.00	0.00	0.00	83.39
BA6 BC2 CC2	26.85	8.56	0.00	0.00	7.62	0.00	81.93
BA2 BC6 CC2	8.95	25.68	0.00	0.00	7.62	0.00	81.65
BA3 BC3 CC3	14.92	14.27	0.00	0.00	12.70	0.00	82.32
BA2 BC2 CC6	8.95	8.56	0.00	0.00	22.85	0.00	83.39
BA6 BC2 CI2	26.85	8.56	0.00	0.00	0.00	7.89	81.93
BA2 BC6 CI2	8.95	25.68	0.00	0.00	0.00	7.89	81.65
BA3 BC3 CI3	14.92	14.27	0.00	0.00	0.00	13.15	82.32
BA2 BC2 CI6	8.95	8.56	0.00	0.00	0.00	23.67	83.39
BC6 MC2 CC2	0.00	25.68	8.18	0.00	7.62	0.00	82.38

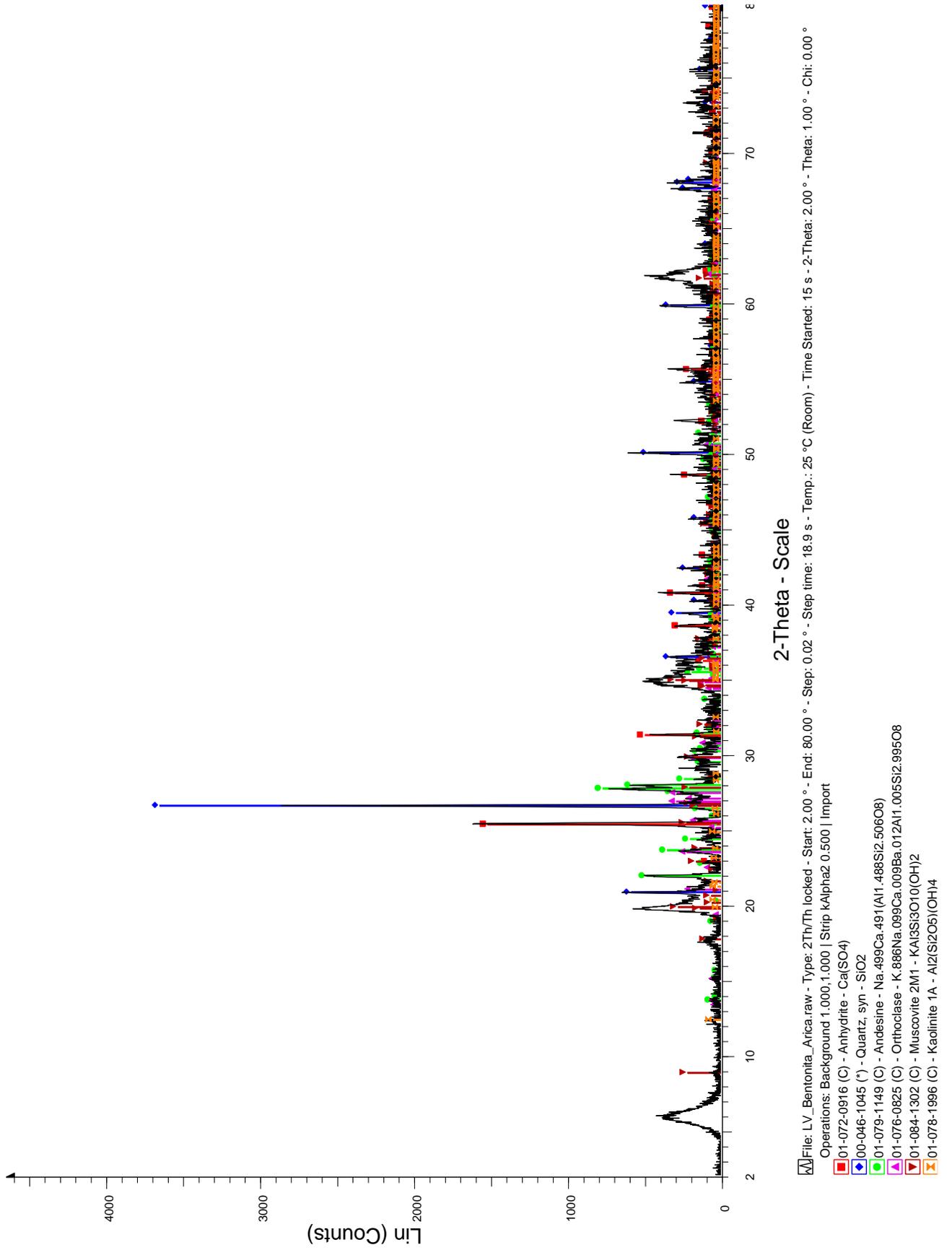
3. COMPOSICIÓN DE LAS PULPAS A CV 15% (B)

CV 15%	Masa (g)					Volumen (ml)	
	Código de prueba	BA	BC	MC	CC	CI	Agua
	BC2 MC6 CC2	0.00	8.56	24.55	7.62	0.00	84.13
	BC3 MC3 CC3	0.00	14.27	13.64	12.70	0.00	83.55
	BC2 MC2 CC6	0.00	8.56	8.18	22.85	0.00	84.13
	BC6 MC2 CI2	0.00	25.68	8.18	0.00	7.89	82.38
	BC2 MC6 CI2	0.00	8.56	24.55	0.00	7.89	84.13
	BC3 MC3 CI3	0.00	14.27	13.64	0.00	13.15	83.55
	BC2 MC2 CI6	0.00	8.56	8.18	0.00	23.67	84.13
	BC6 CC2 CI2	0.00	25.68	0.00	7.62	7.89	82.38
	BC2 CC6 CI2	0.00	8.56	0.00	22.85	7.89	84.13
	BC3 CC3 CI3	0.00	14.27	0.00	12.70	13.15	83.55
	BC2 CC2 CI6	0.00	8.56	0.00	7.62	23.67	84.13

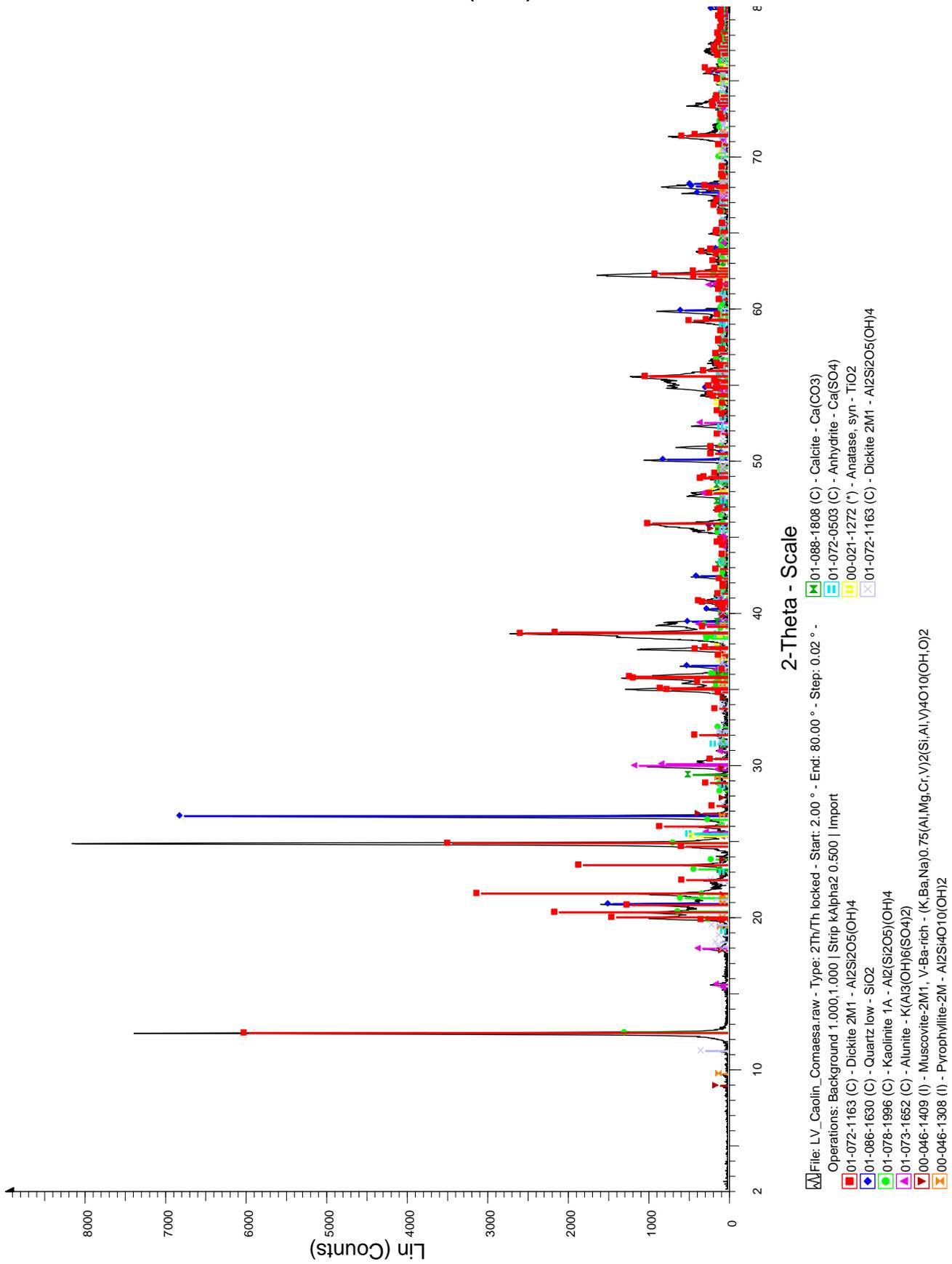
4. XRD BENTONITA COMACSA (BC)



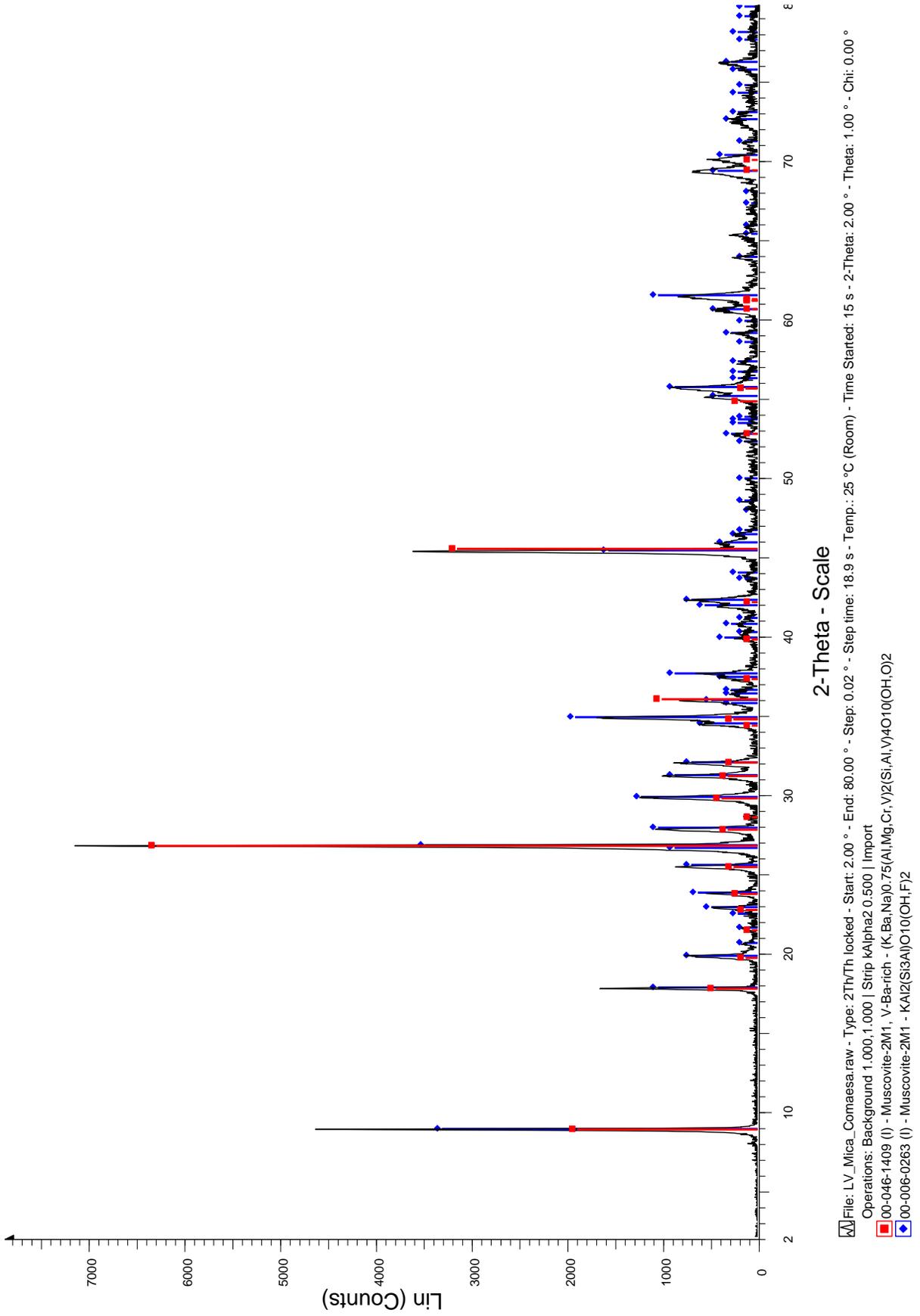
5. XRD BENTONITA ARICA (BA)



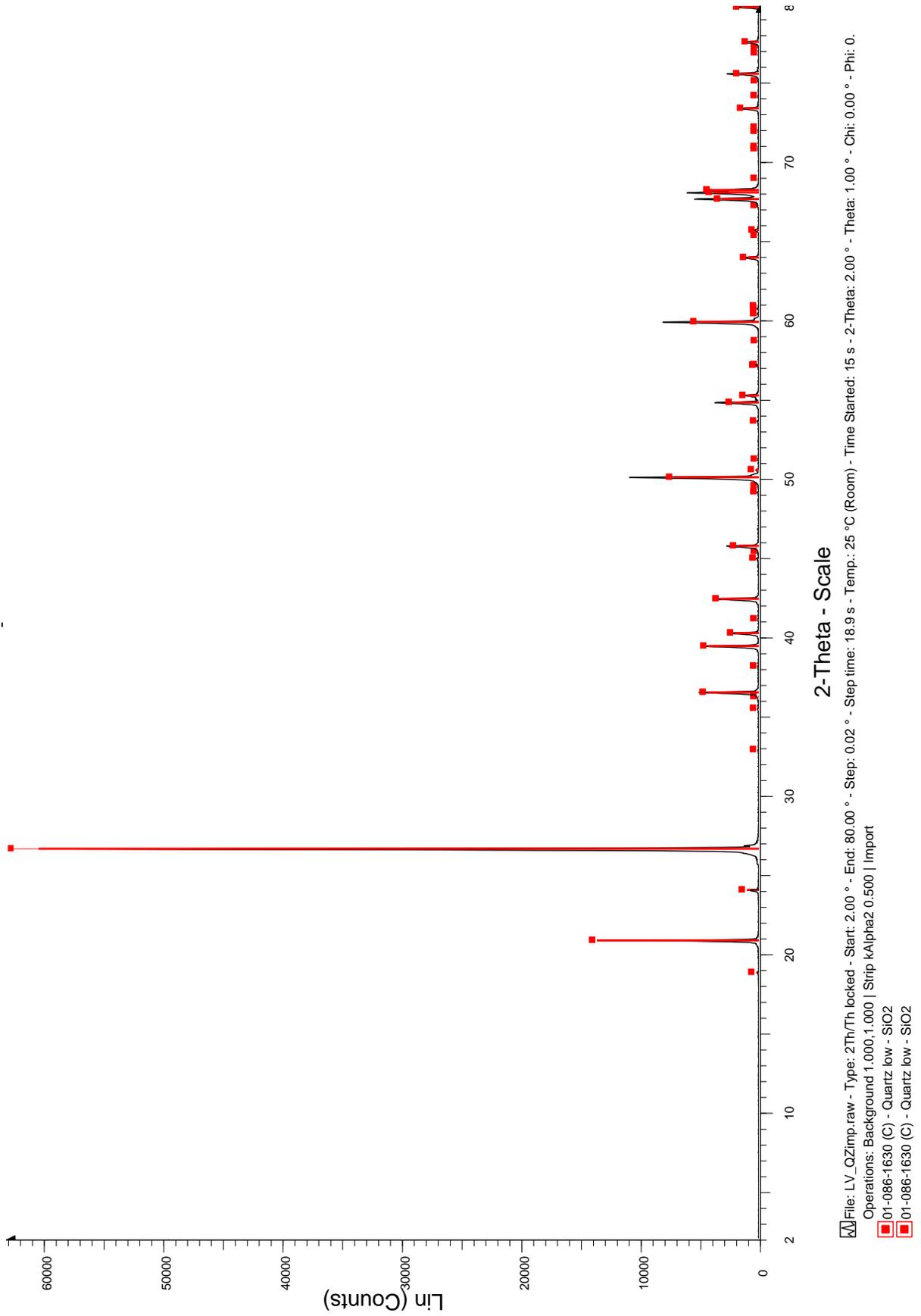
6. XRD CAOLÍN COMACSA (CC)



7. XRD MICA COMACSA (MC)



8. XRD CUARZO IMPALPABLE (CI)



9. RESULTADO DE AJUSTE DE BINGHAM REOMETRÍAS CV 30%

Código de Prueba (Cv 30%)	minimum shear rate (s ⁻¹)	maximum shear rate (s ⁻¹)	Yield Stress (Pa)	Viscosity (mPa·s)	pH
BA10	100	200	146.74	296.11	7
MC10	100	200	14.39	52.551	7.24
CC10	100	200	35.126	57.533	6.98
CI10	100	200	0.16014	6.199	7.08
BA3MC7	150	250	67.192	57.698	6.75
BA3CC7	150	250	37.829	52.636	6.99
BA3CI7	150	250	5.4348	15.067	7.2
BA7MC3	150	250	104.33	125.58	7.2
MC3CC7	150	250	29.572	43.902	6.99
MC3CI7	150	250	1.2951	12.521	7.03
BA7CC3	75	250	65.68	92.945	6.92
MC7CC3	150	250	30.391	37.266	6.8
CC3CI7	100	250	4.1743	11.823	6.81
BA7CI3	100	250	31.446	52.514	7.11
MC7CI3	150	250	4.3476	35.832	7.12
CC7CI3	150	250	13.596	22.029	7.12
BA6MC2CC2	150	250	68.133	78.175	6.97
BA2MC6CC2	150	250	59.69	53.66	7.18
BA3MC3CC3	150	250	49.344	54.595	7.2
BA2MC2CC6	100	250	38.61	57.694	7.12
BA6MC2CI2	150	250	42.675	59.045	7.2
BA2MC6CI2	100	250	32.385	34.292	6.88
BA3MC3CI3	100	250	18.049	31.76	6.92
BA2MC2CI6	150	250	5.5699	15.501	7.06
BA6CC2CI2	100	250	31.663	52.696	6.9
BA2CC6CI2	100	250	16.957	30.913	7.06
BA3CC3CI3	100	250	12.367	24.304	7.03
BA2CC2CI6	100	250	4.3684	13.751	7.02
MC6CC2CI2	100	250	10.103	33.59	7.12
MC2CC6CI2	100	250	16.283	31.272	6.96
MC3CC3CI3	100	250	8.4323	22.602	7.24
MC2CC2CI6	100	250	3.3159	13.781	6.82

10. RESULTADO DE AJUSTE DE BINGHAM REOMETRÍAS CV 15% (A)

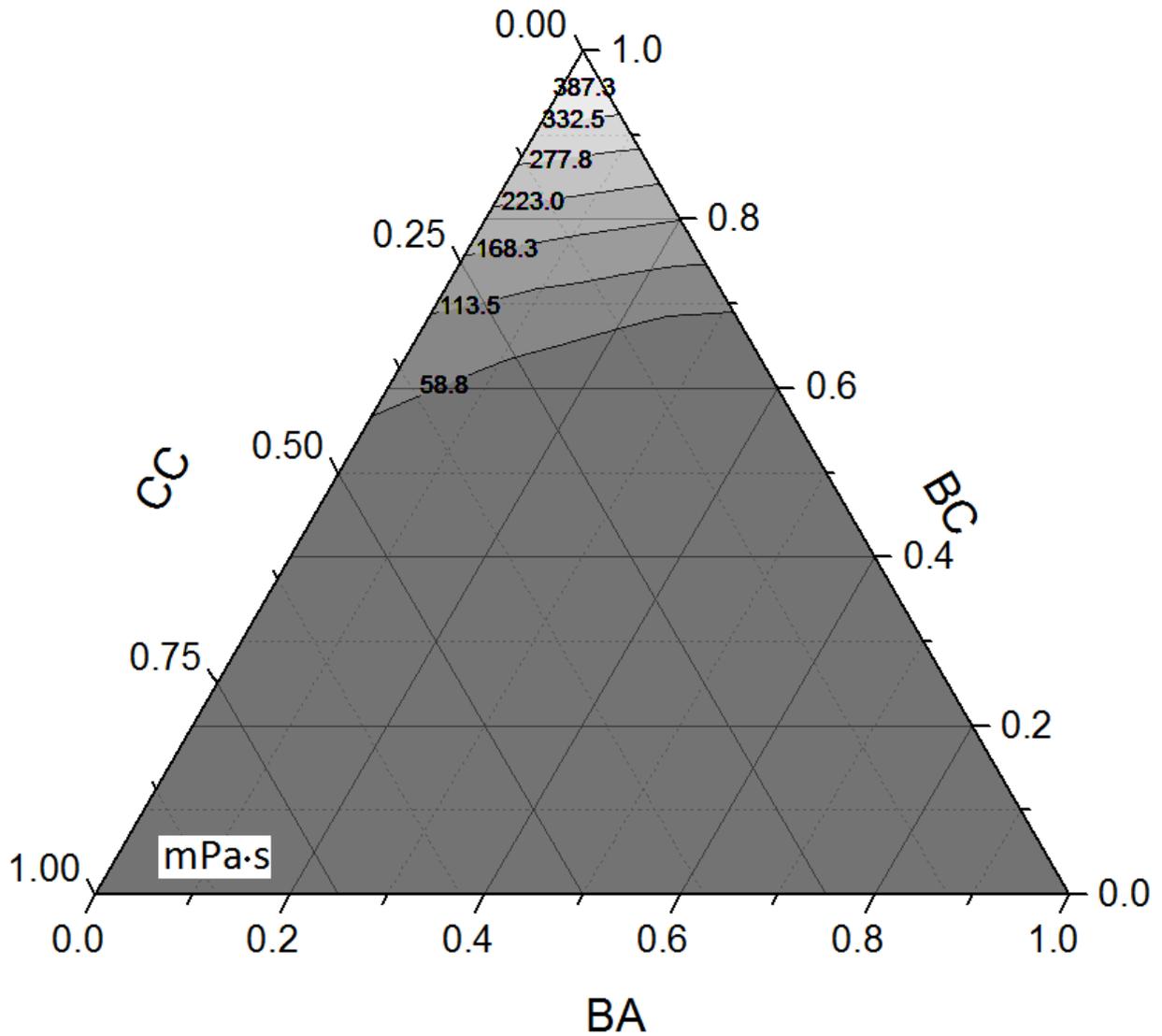
Código de Prueba (Cv 15%)	minimum shear rate (s ⁻¹)	maximum shear rate (s ⁻¹)	Yield Stress (Pa)	Viscosity (mPa·s)	pH
BA10	120	240	0.87222	5.881	6.98
BC10	-	-	293.634	440.693	-
MC10	50	150	0	6.554	7.14
CC10	150	230	1.206	5.646	6.89
CI10	130	230	0	5.0027	6.85
BA3BC7	100	250	23.341	27.832	7.1
BA3MC7	150	250	1.2555	4.2322	6.88
BA3CC7	150	250	1.3075	4.10247	7.11
BA3CI7	200	300	0	7.4053	6.9
BA7BC3	50	100	3.6791	12.565	7.05
BC3MC7	100	200	80.36	43.972	7.21
BC3CC7	100	200	46.409	24.176	6.96
BC3CI7	100	200	30.881	38.286	6.89
BA7MC3	150	250	1.1514	4.8086	6.99
BC7MC3	100	200	266.94	400.63	8.15
MC3CC7	150	250	1.115	4.5286	7.19
MC3CI7	150	250	0.1041	5.2472	7.01
BA7CC3	150	250	1.8986	4.2108	7.22
BC7CC3	100	200	207.6	96.352	7.06
MC7CC3	180	280	0	8.9981	7.18
CC3CI7	200	300	0	7.3308	7.11
BA7CI3	200	300	0	8.999	7.13
BC7CI3	100	200	116.26	146.49	7.28
MC7CI3	200	300	0	7.6516	7.17
CC7CI3	150	300	0.93809	5.4066	7.16
BA6BC2MC2	150	250	2.4673	4.5021	7.12
BA2BC6MC2	150	250	26.154	26.076	6.98
BA3BC3MC3	80	180	5.6199	4.6154	7.02
BA2BC2MC6	150	250	3.0076	3.4433	7.01
BA6BC2CC2	150	250	2.1637	5.8374	7.06
BA2BC6CC2	150	250	21.364	20.82	7.13
BA3BC3CC3	130	230	3.5945	5.9188	6.96
BA2BC2CC6	150	250	2.2434	4.1201	7.02
BA6BC2CI2	150	250	1.6763	4.4102	7.04
BA2BC6CI2	150	250	16.612	20.489	6.99
BA3BC3CI3	120	220	20.5459	5.5512	7.06

11. RESULTADO DE AJUSTE DE BINGHAM REOMETRÍAS CV 15% (B)

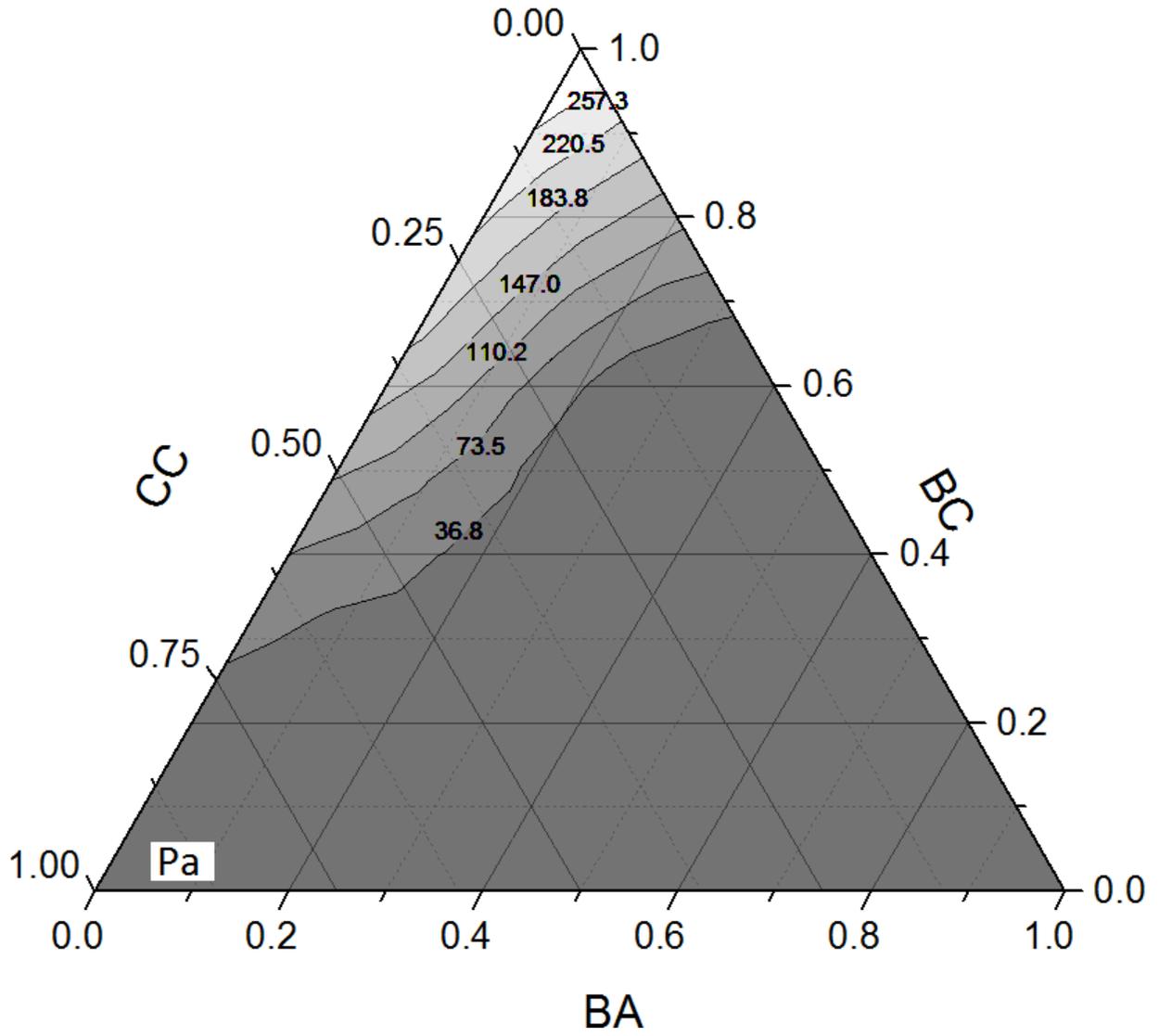
Código de Prueba (Cv 30%)	minimum shear rate (s ⁻¹)	maximum shear rate (s ⁻¹)	Yield Stress (Pa)	Viscosity (mPa·s)	pH
BA2BC2CI6	150	250	0.76311	3.8596	7
BC6MC2CC2	150	250	164.78	168.98	7.23
BC2MC6CC2	150	250	18.615	11.002	7.06
BC3MC3CC3	100	200	65.553	36.342	6.88
BC2MC2CC6	100	200	12.449	6.755	7.1
BC6MC2CI2	150	250	145.41	162.54	7.19
BC2MC6CI2	150	250	18.367	15.306	7.01
BC3MC3CI3	150	250	52.455	30.724	7
BC2MC2CI6	100	200	6.5457	8.057	7.02
BC6CC2CI2	150	250	140.3	116.54	7.26
BC2CC6CI2	150	250	10.531	6.1569	6.97
BC3CC3CI3	150	250	42.27	16.928	6.93
BC2CC2CI6	100	200	8.4561	5.3809	7.03

12. DIAGRAMAS TERNARIOS DE VISCOSIDAD Y ESFUERZO DE FLUENCIA

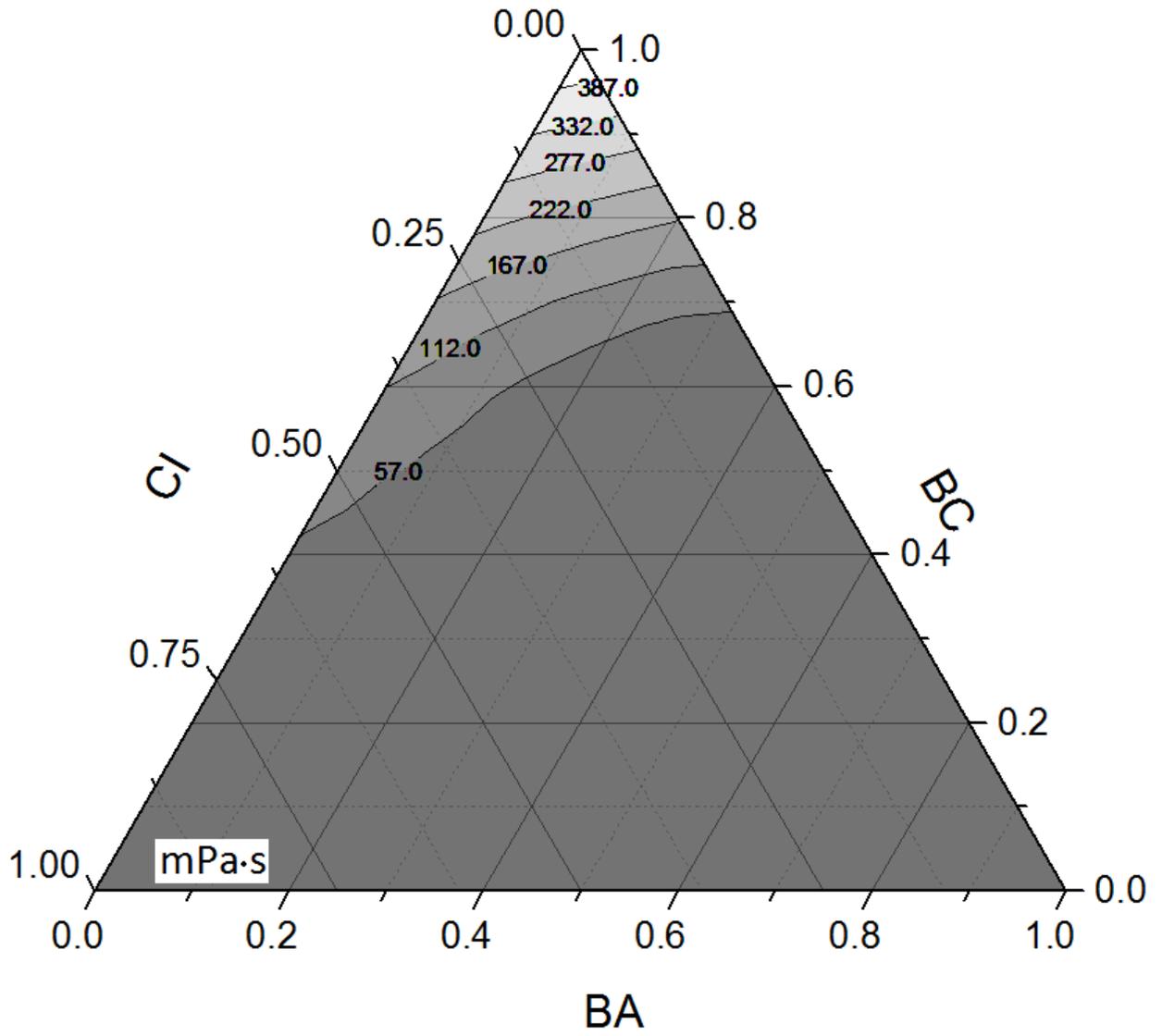
12.1 VISCOSIDAD PARA BA BC CC, CV 15%, PH 7



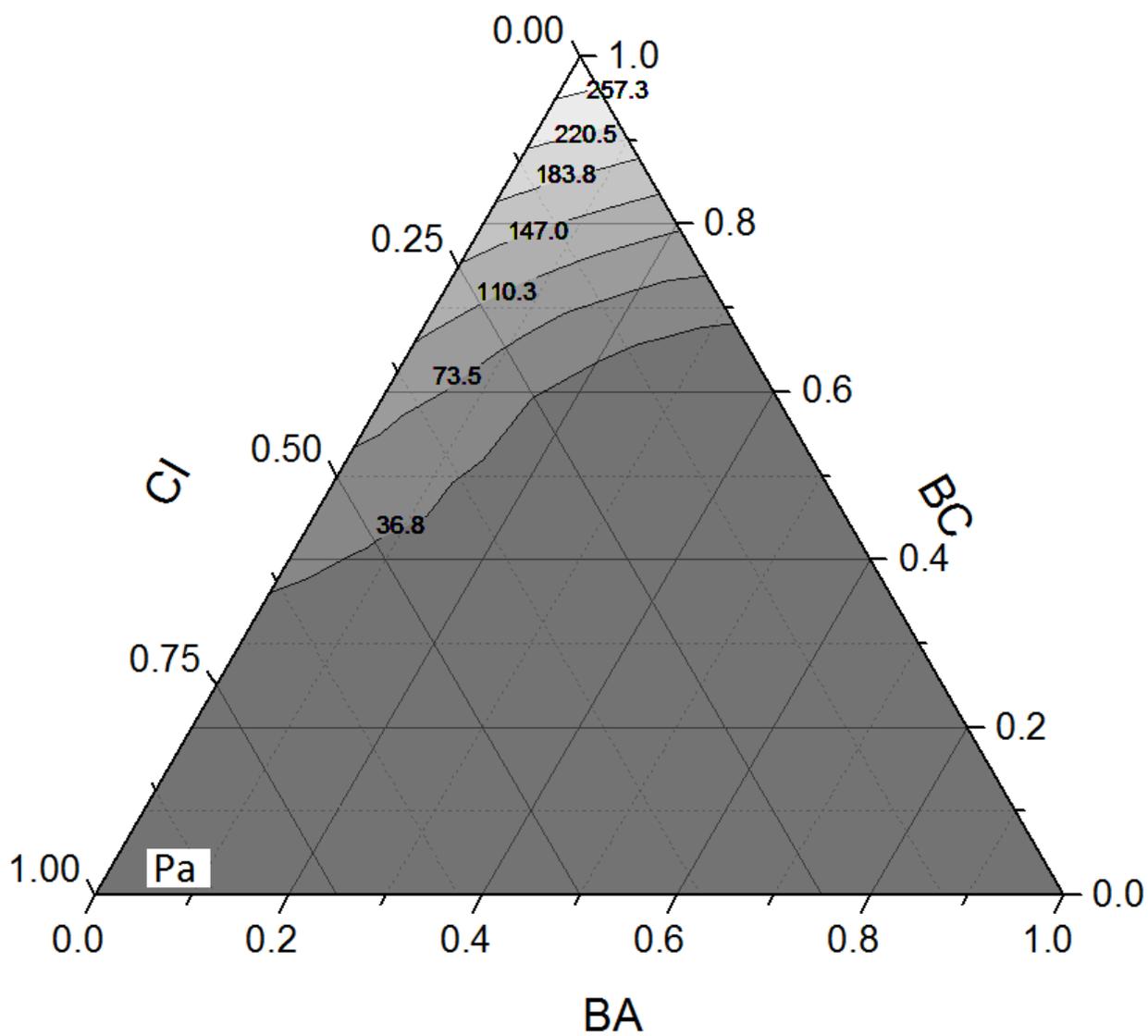
12.2 ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BA BC CC, CV 15%, PH 7



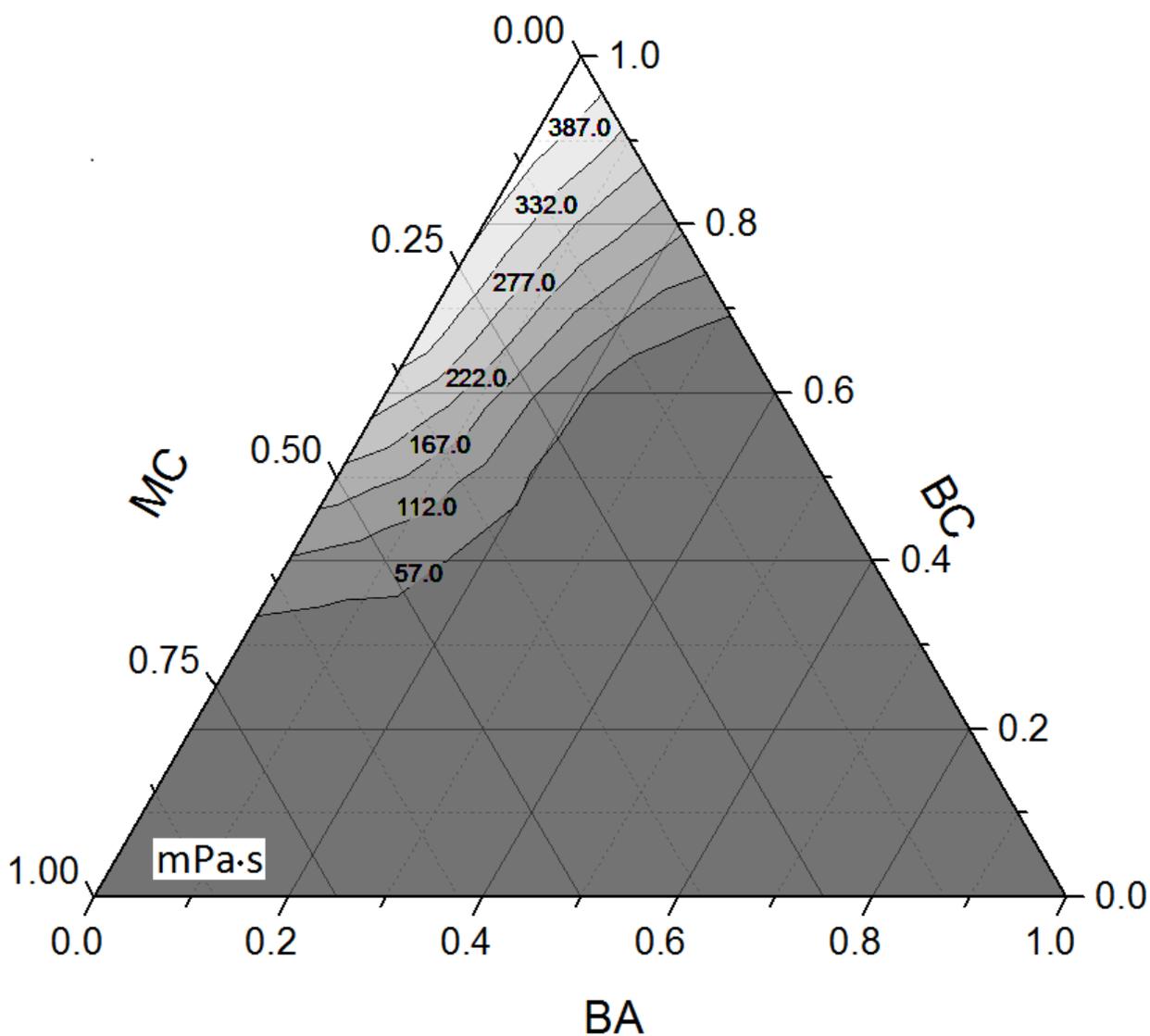
12.3 VISCOSIDAD PARA BA BC CI, CV 15%, PH 7



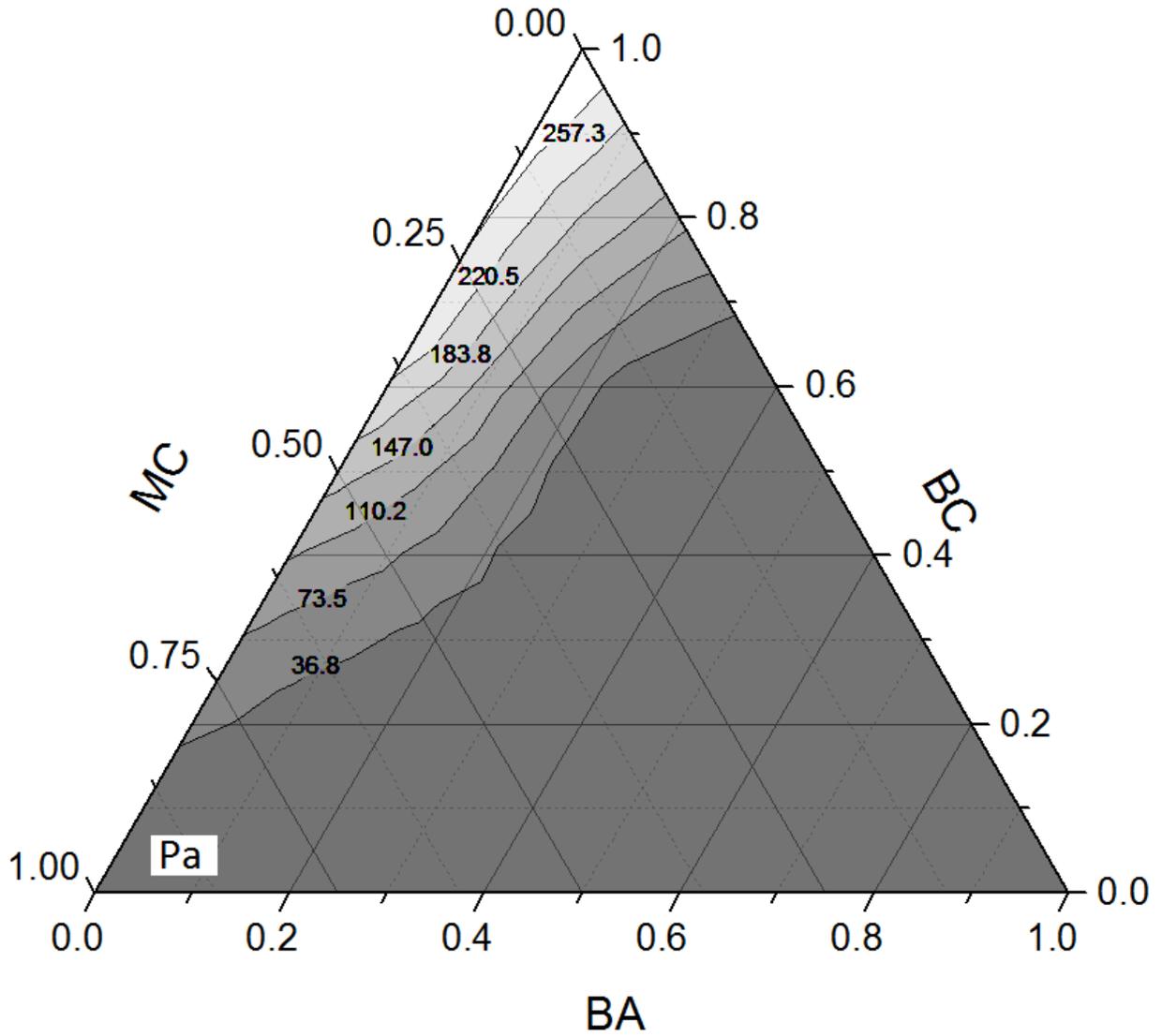
12.4 ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BA BC CI, CV 15%, PH 7



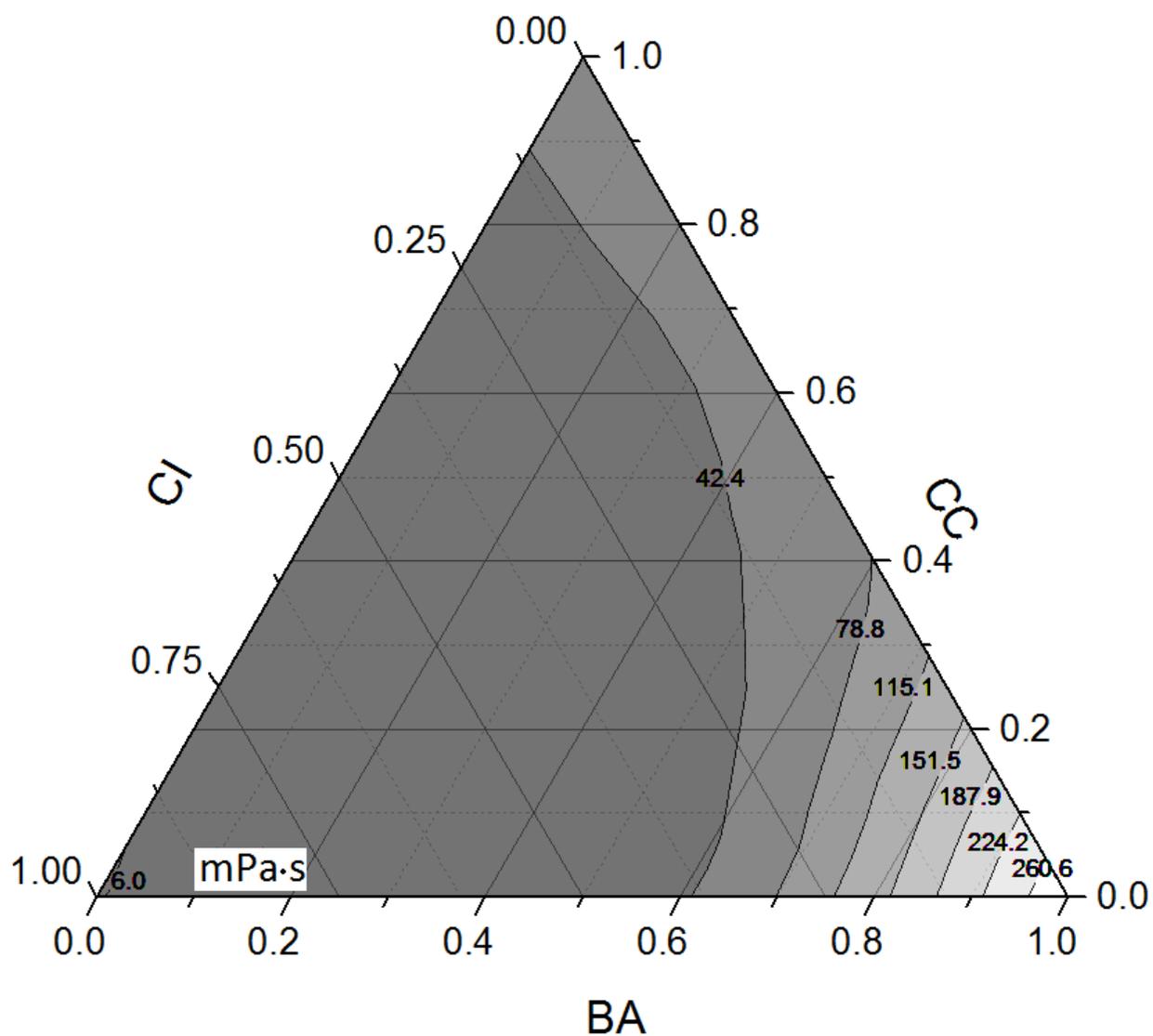
12.5 VISCOSIDAD PARA BA BC MC, CV 15%, PH 7



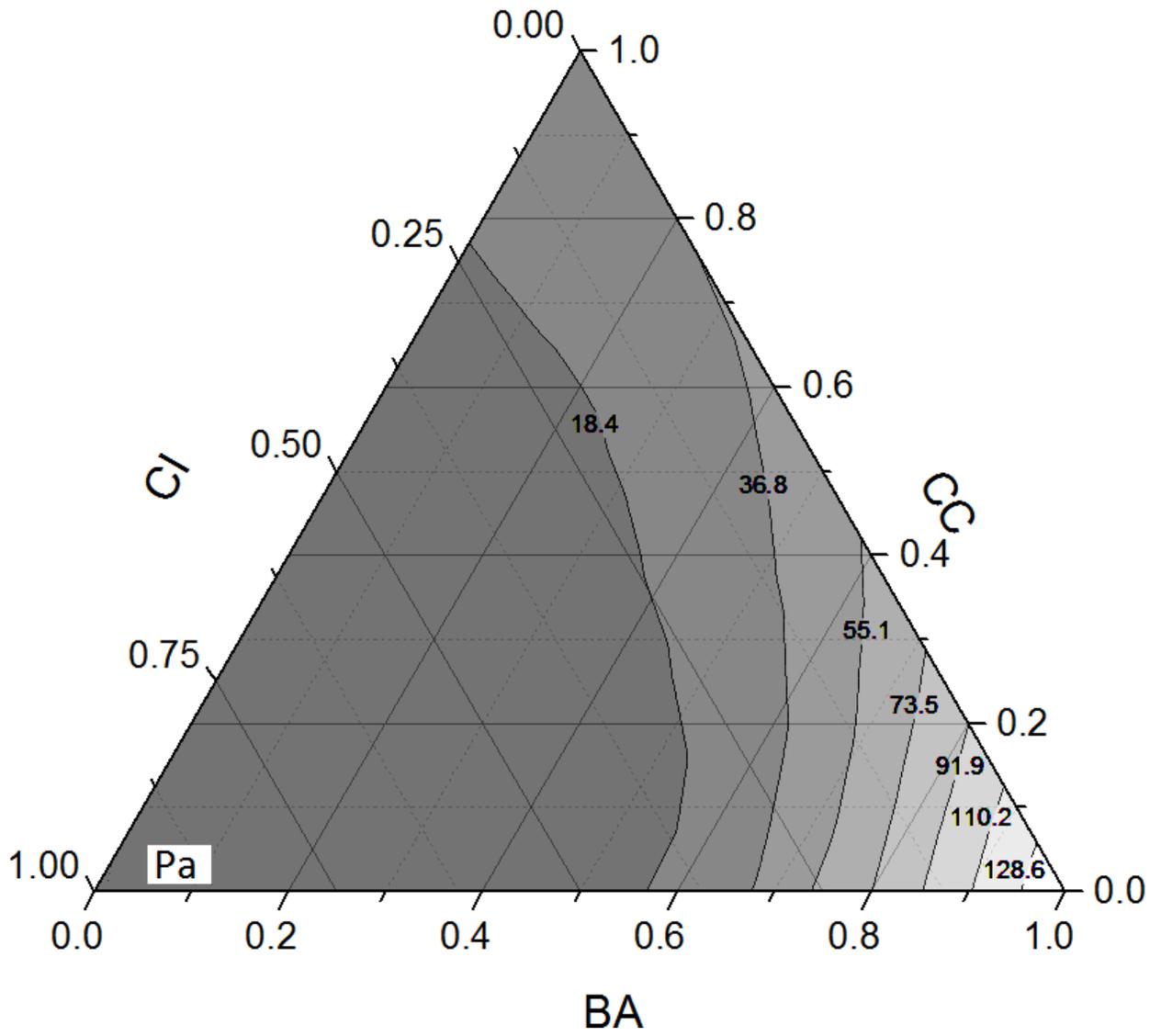
12.6 ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BA BC MC, CV15%, PH 7



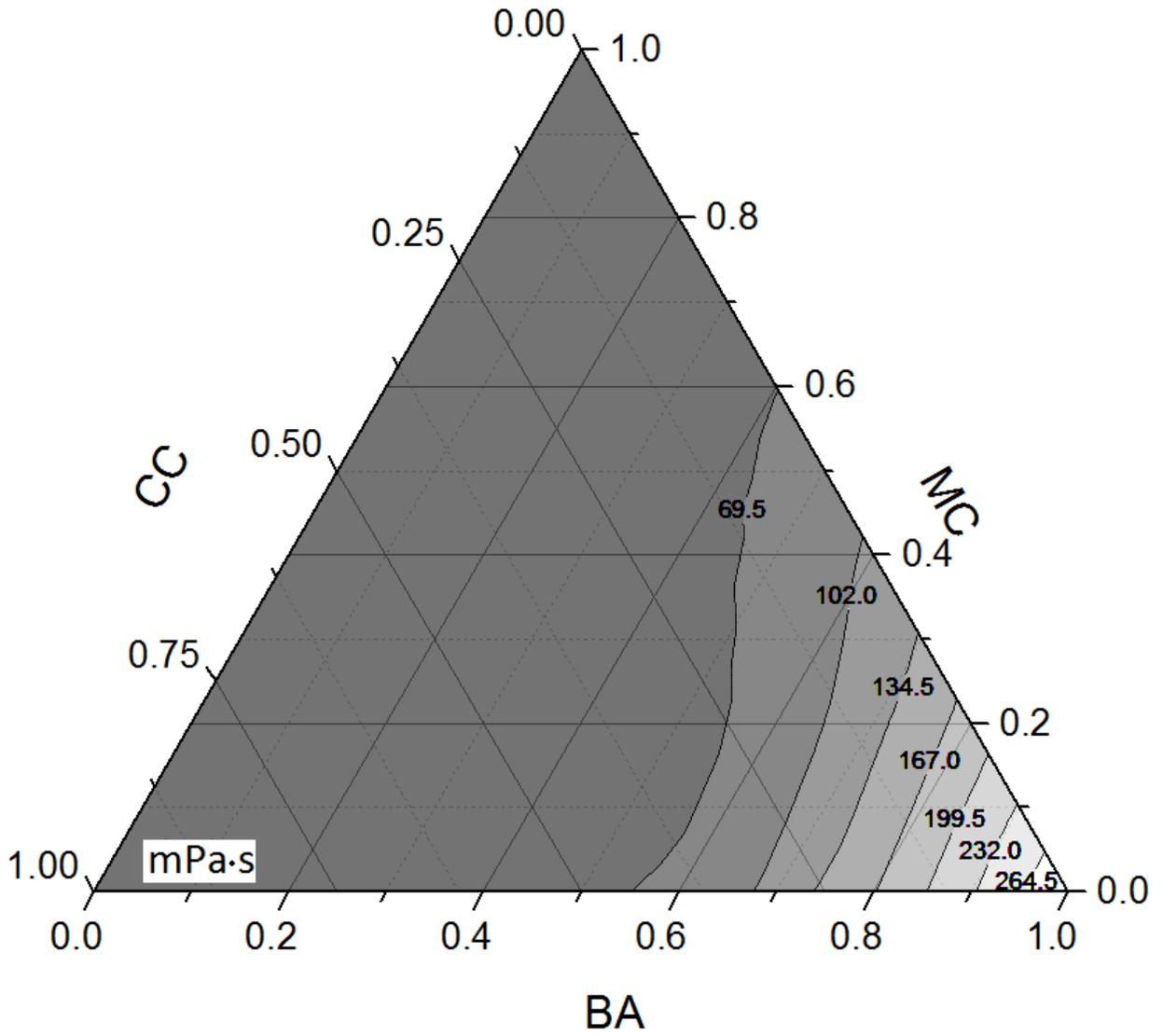
12.7 VISCOSIDAD PARA BA CC CI, CV 30%, PH 7



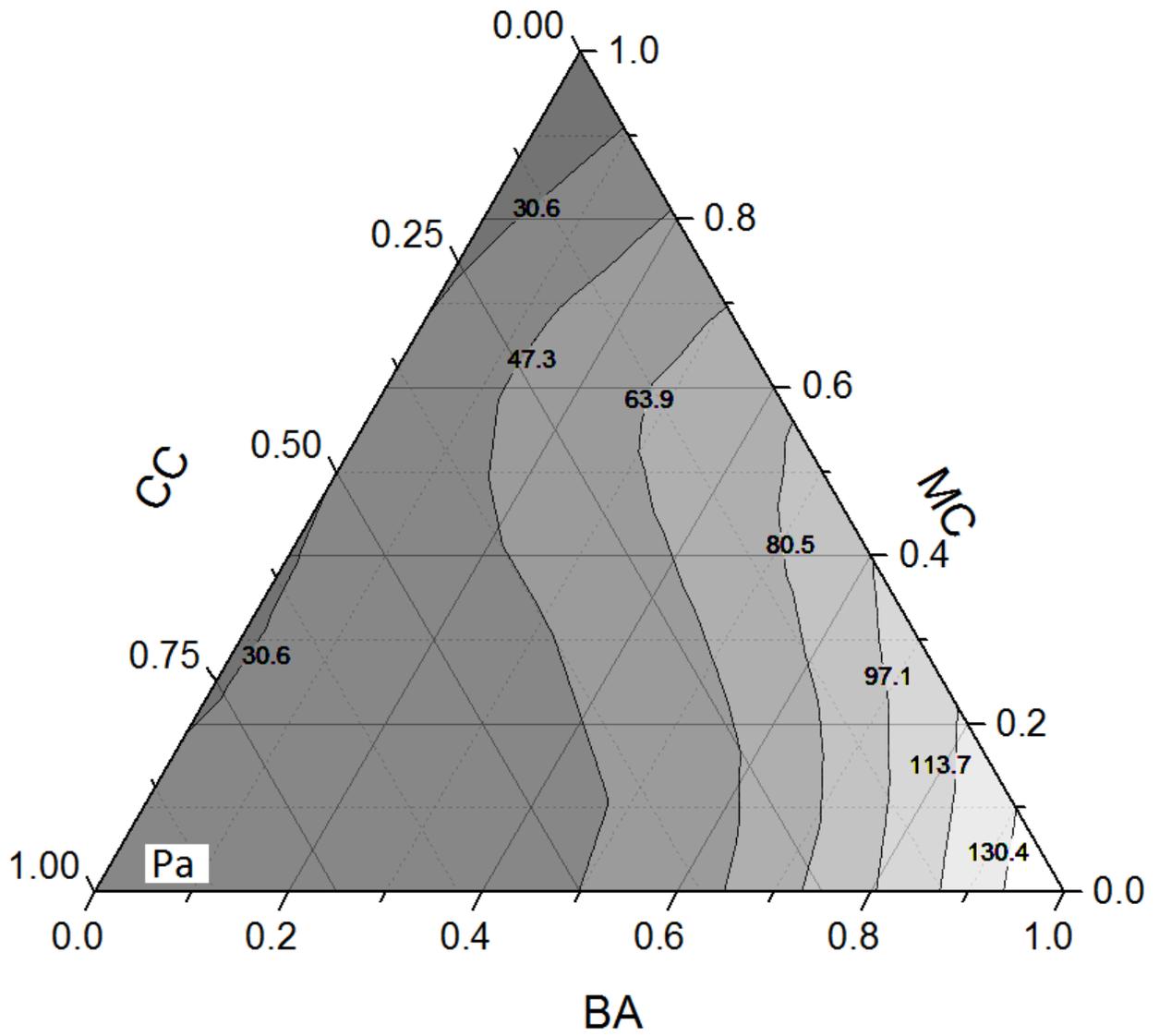
12.8 ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BA CC CI, CV 30%, PH 7



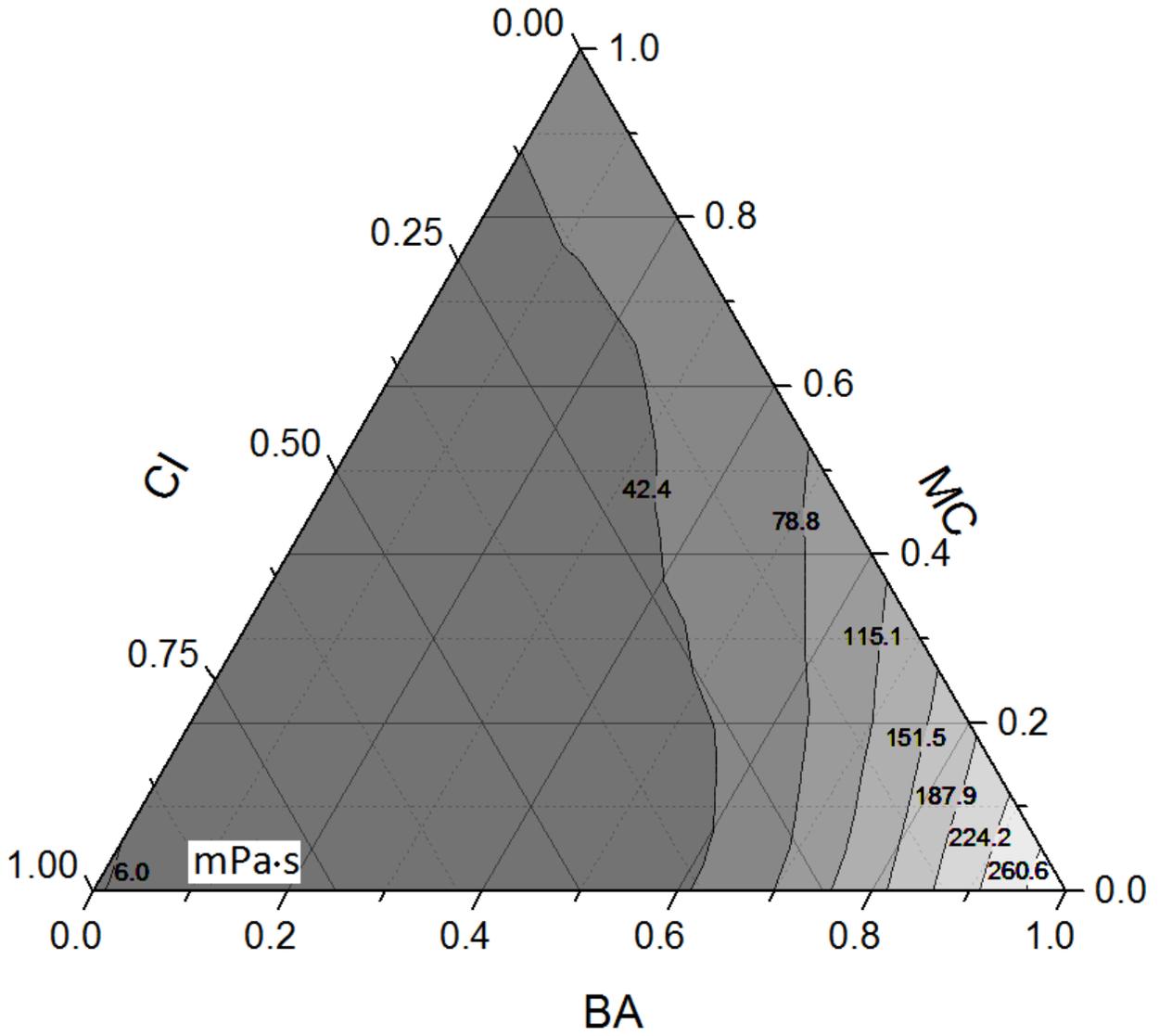
12.9 VISCOSIDAD PARA BA MC CC, CV 30%, PH 7



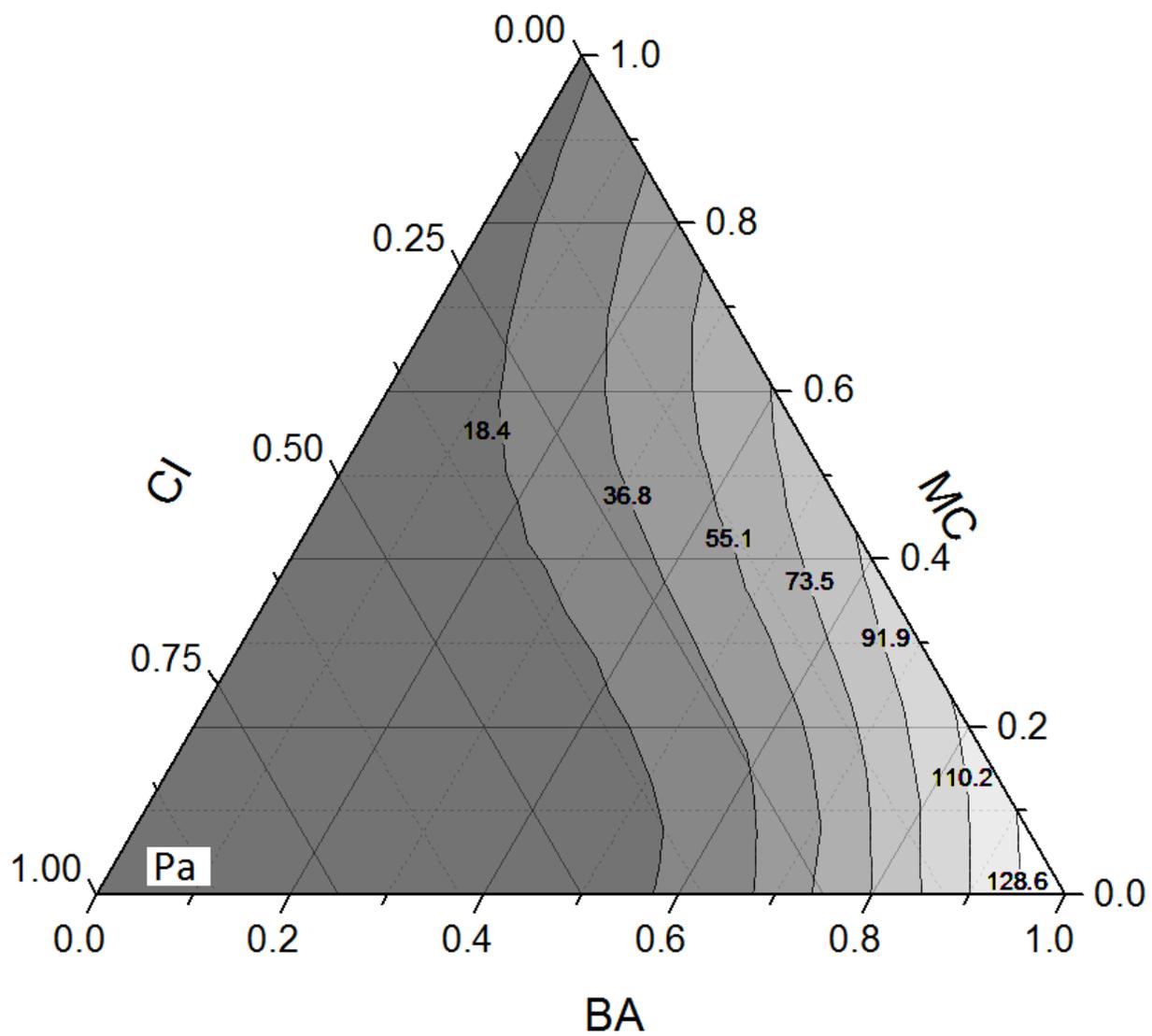
12.10 ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BA MC CC, CV 30%, PH 7



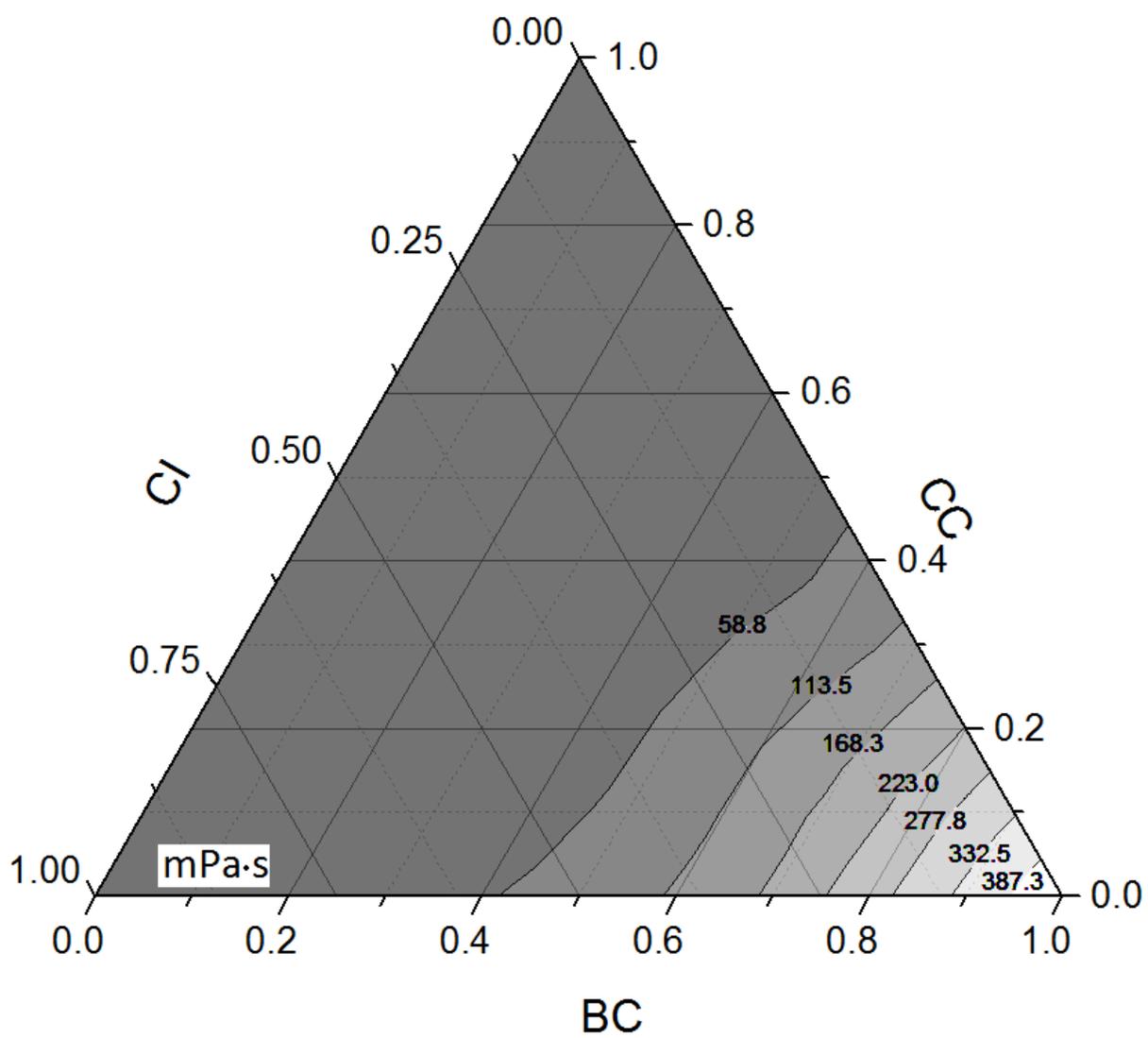
12.11 VISCOSIDAD PARA BA MC CI, CV 30%, PH 7



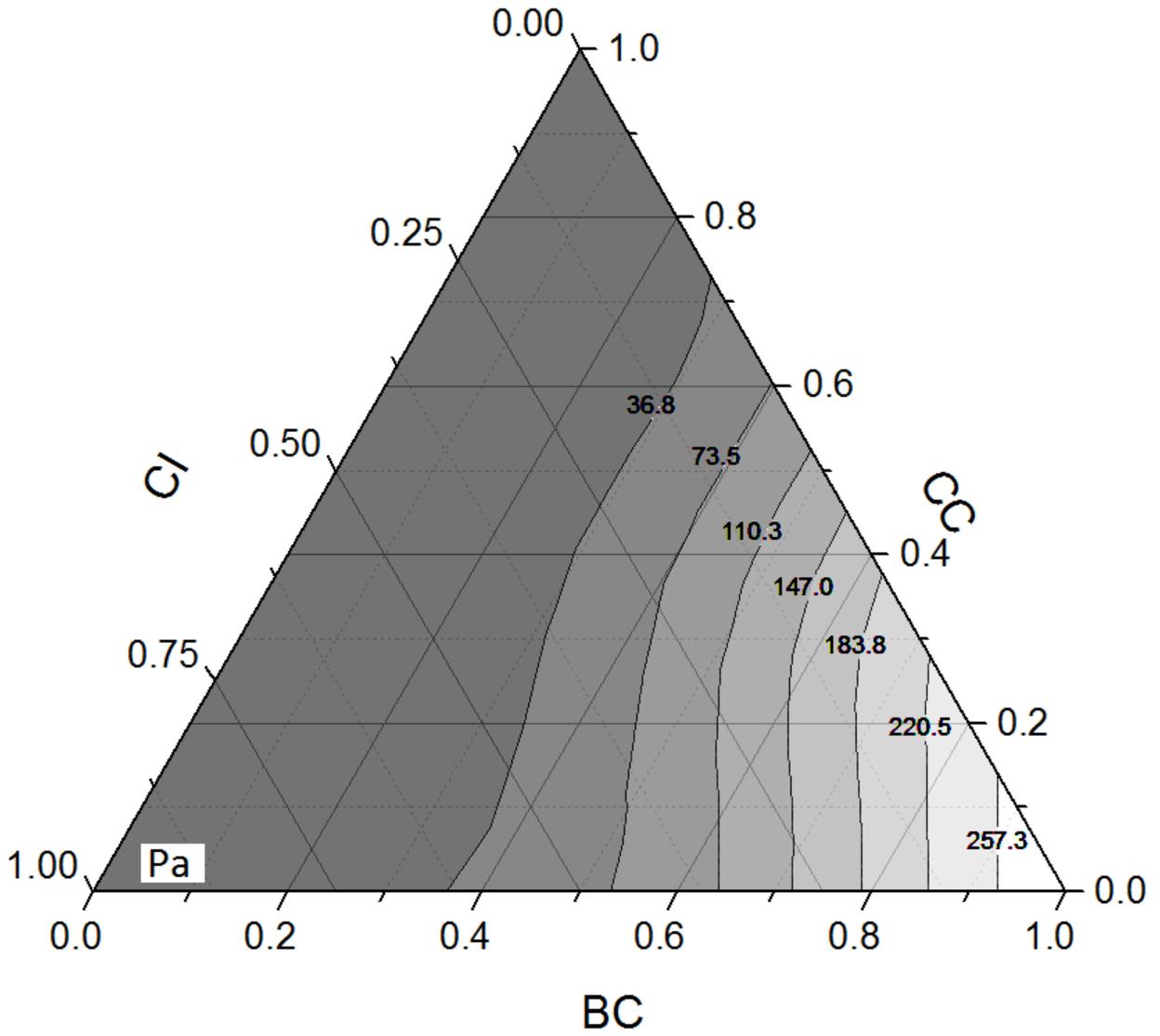
12.12 ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BA MC CI, CV 30%, PH 7



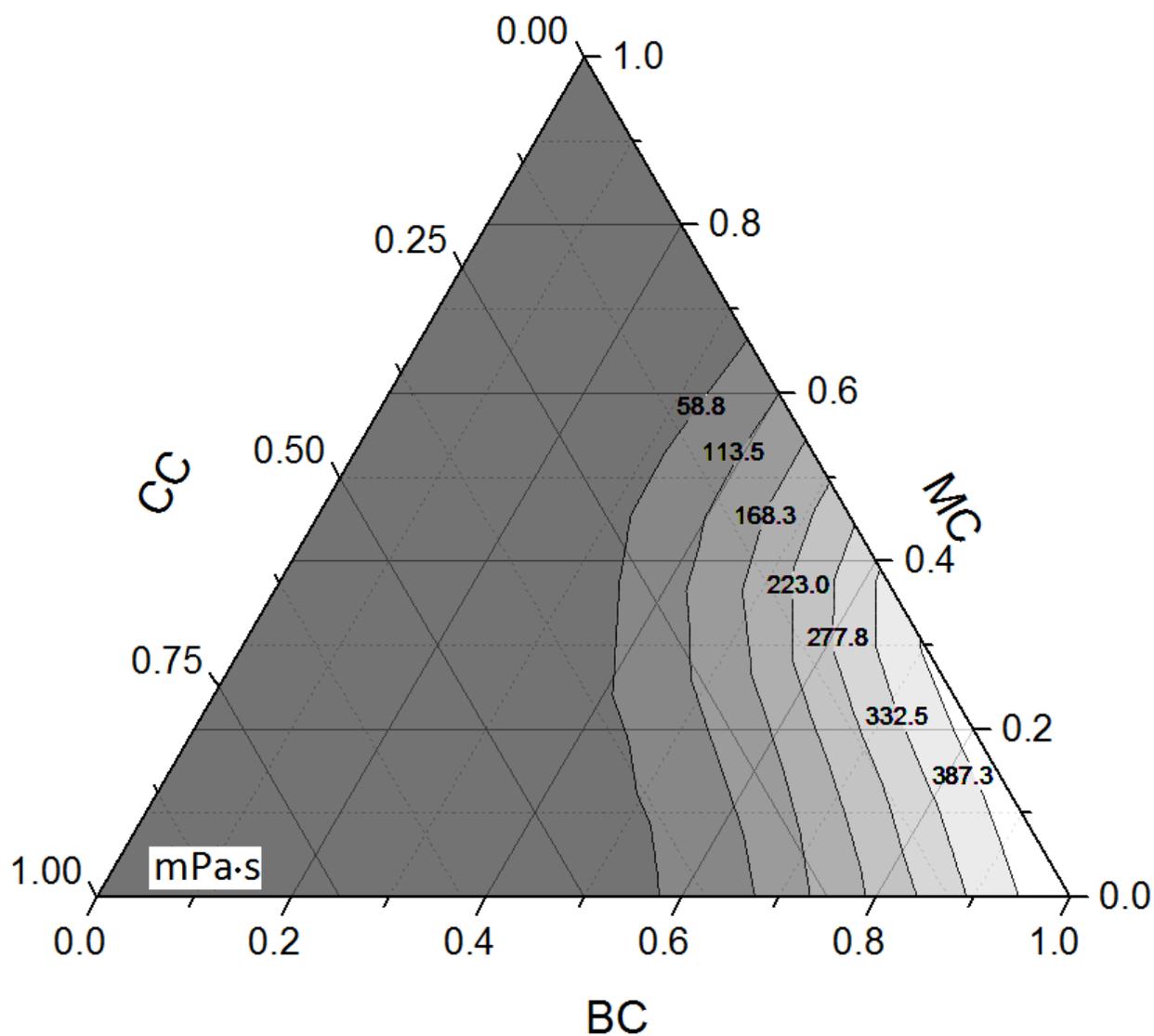
12.13 VISCOSIDAD PARA BC CC CI, CV 15%, PH 7



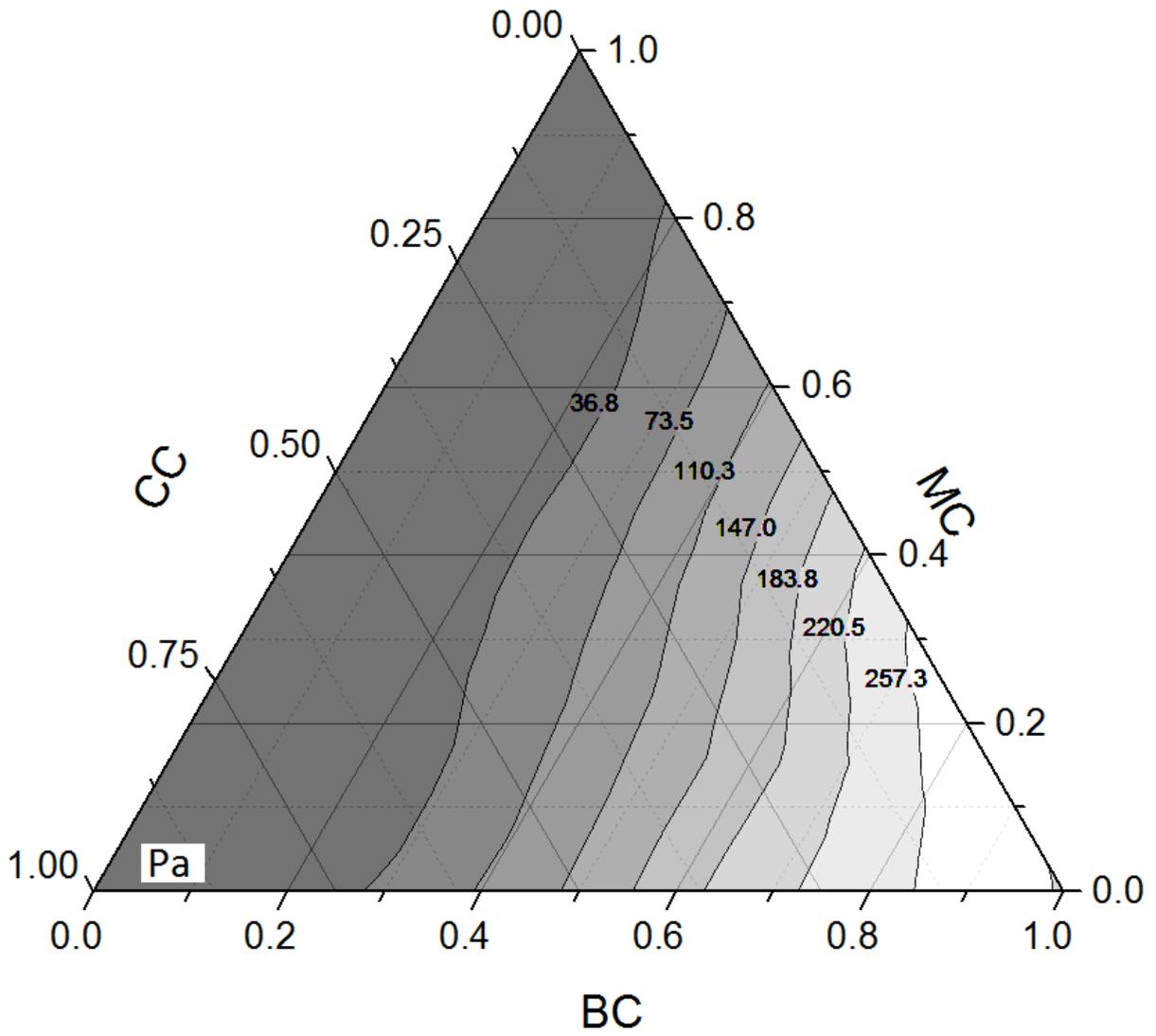
12.14 ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BC CC CI, CV 15%, PH 7



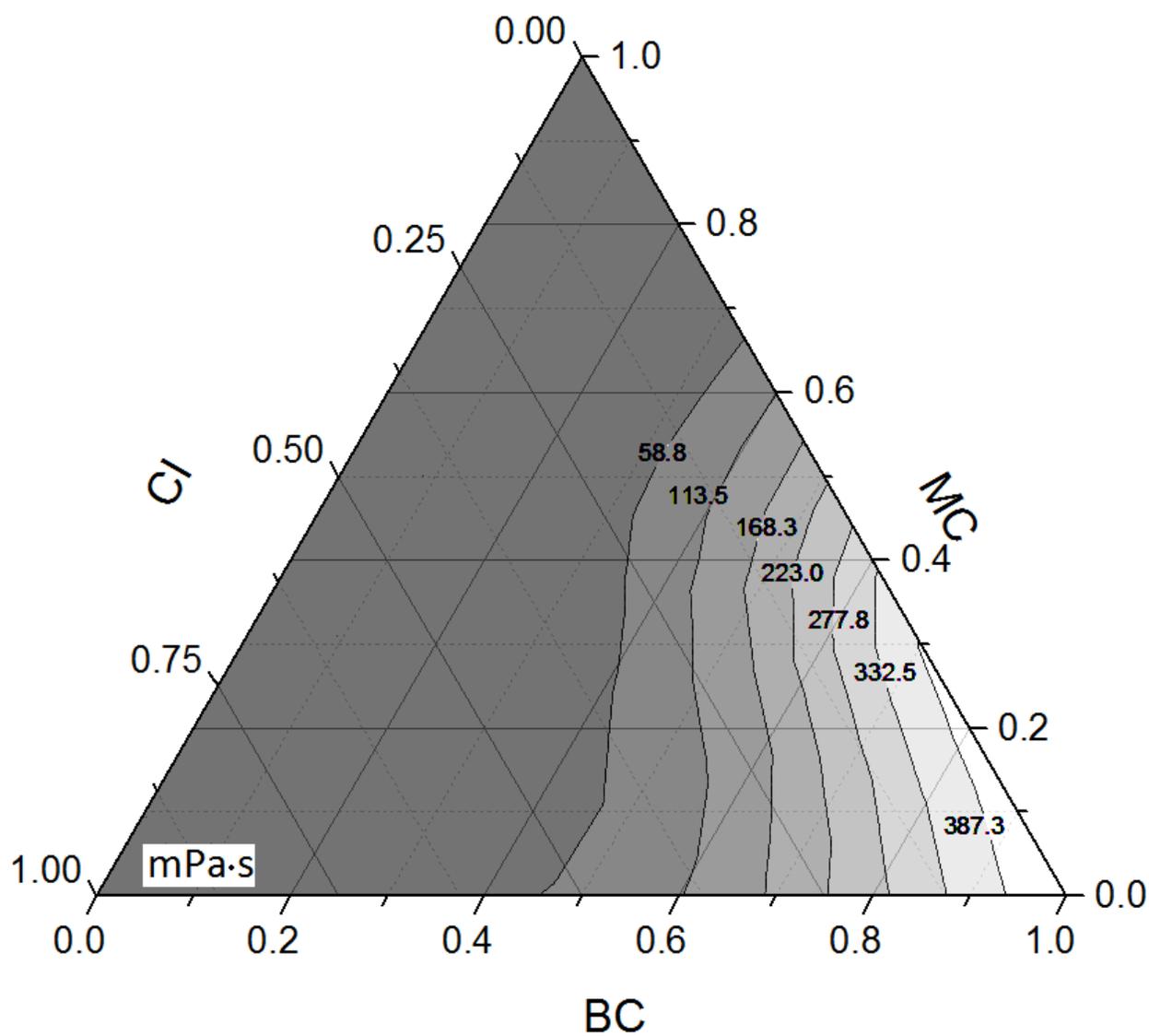
12.15 VISCOSIDAD PARA BC MC CC, CV 15%, PH 7



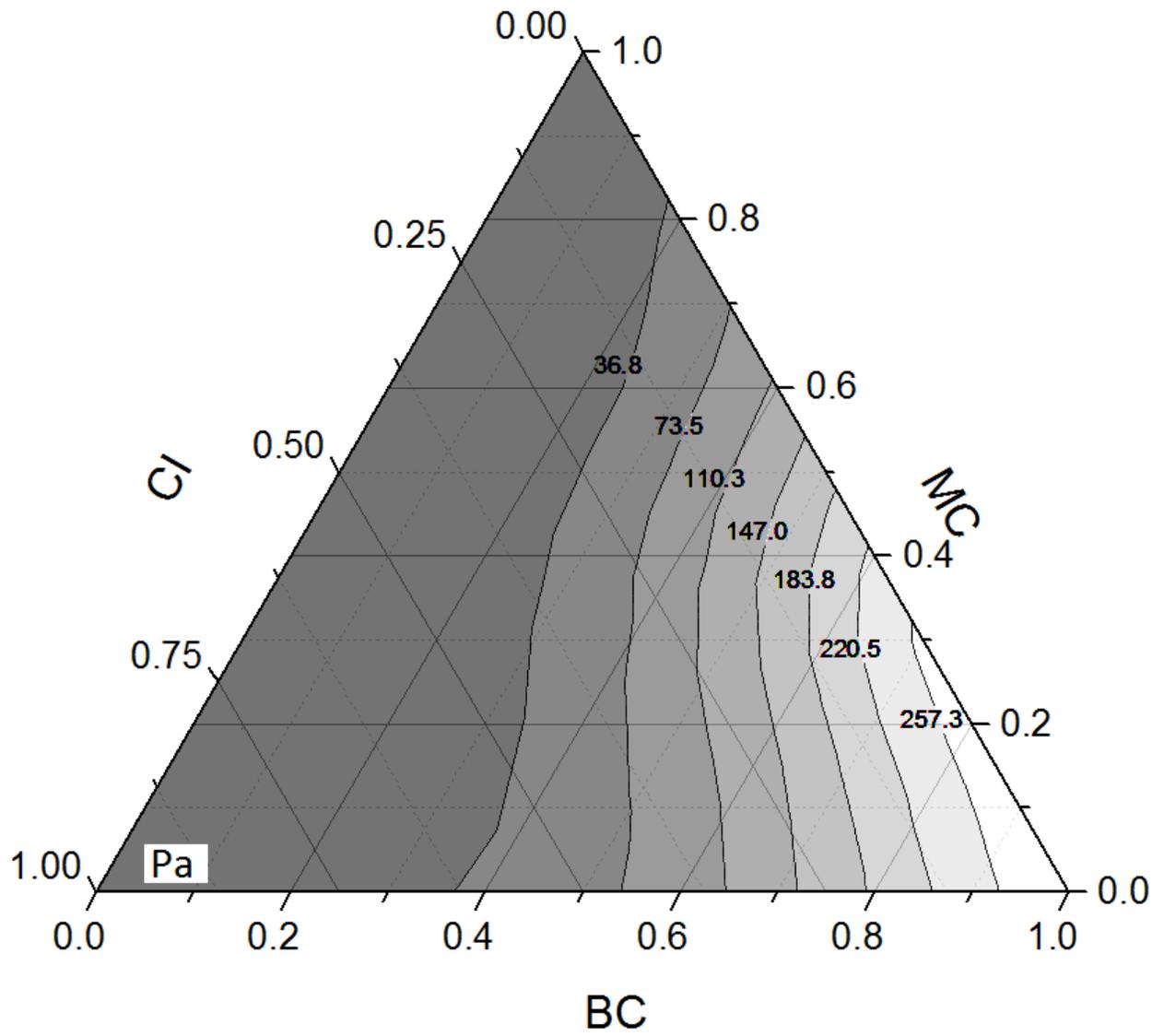
12.16 ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BC MC CC, CV 15%, PH 7



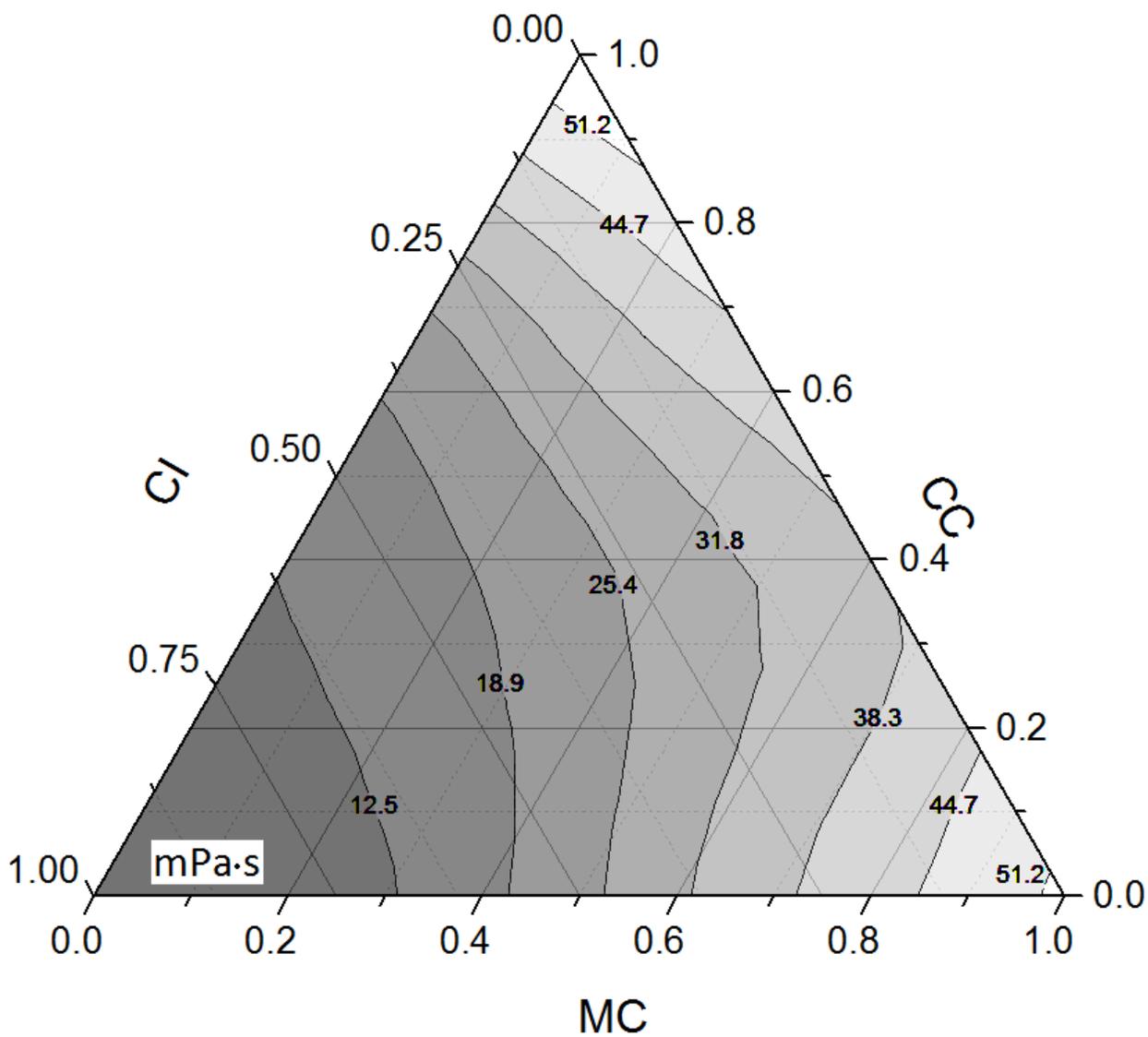
12.17 VISCOSIDAD PARA BC MC CI, CV 15%, PH 7



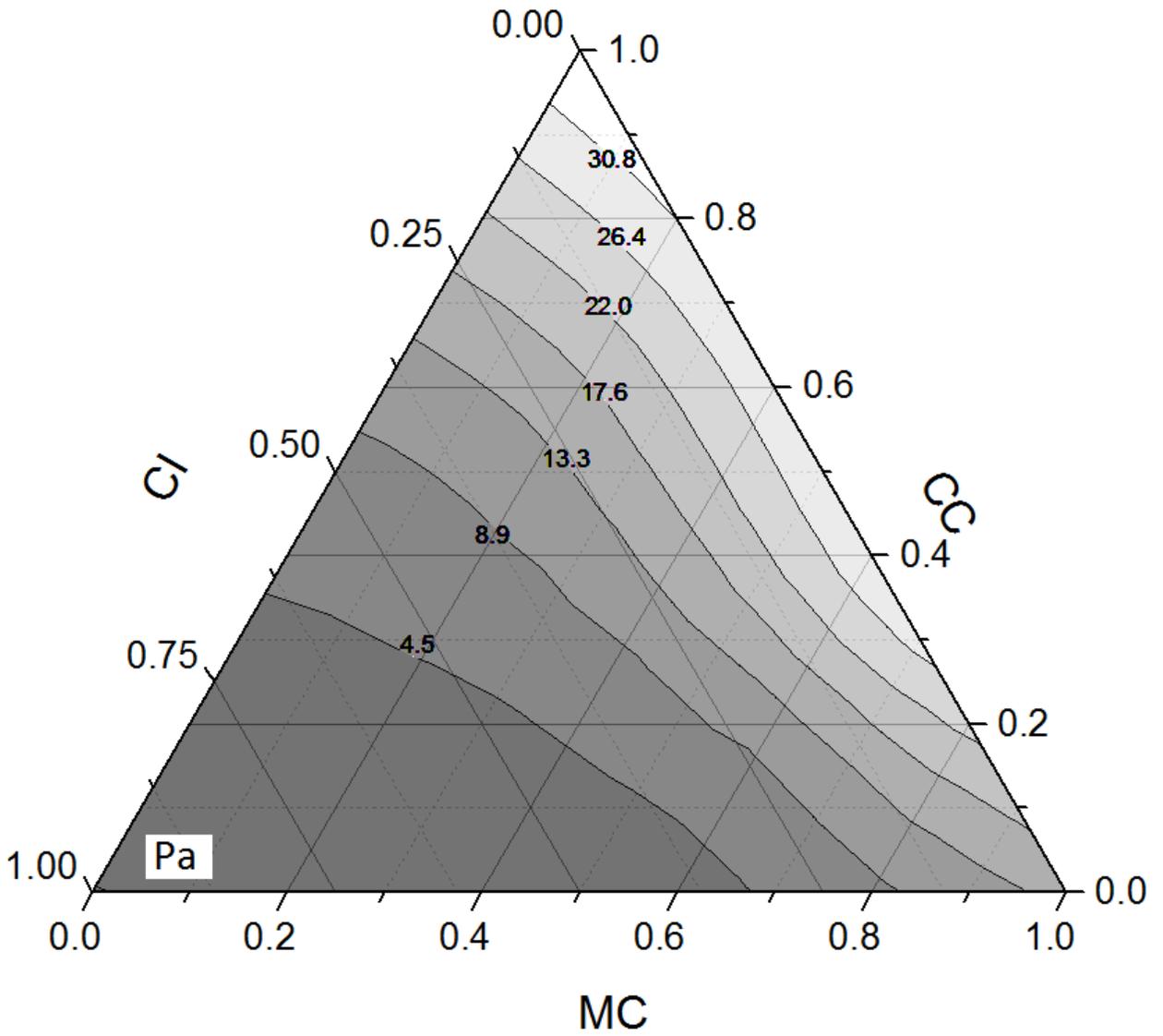
12.18 ESFUERZO DE FLUENCIA PARA BC MC CI, CV 15%, PH 7



12.19 VISCOSIDAD PARA MC CC CI, CV 30%, PH 7

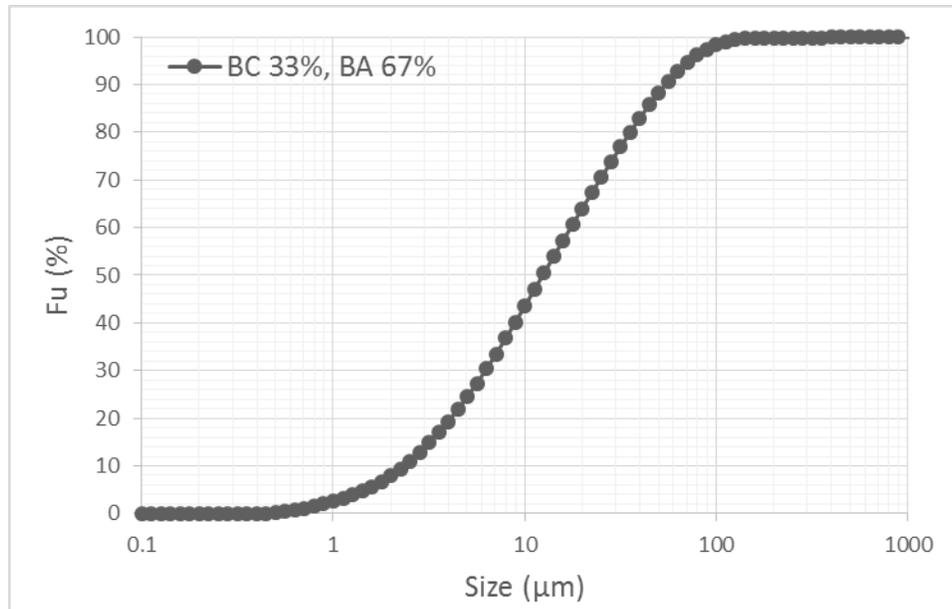


12.20 ESFUERZO DE FLUENCIA PARA MC CC CI, CV 30%, PH 7

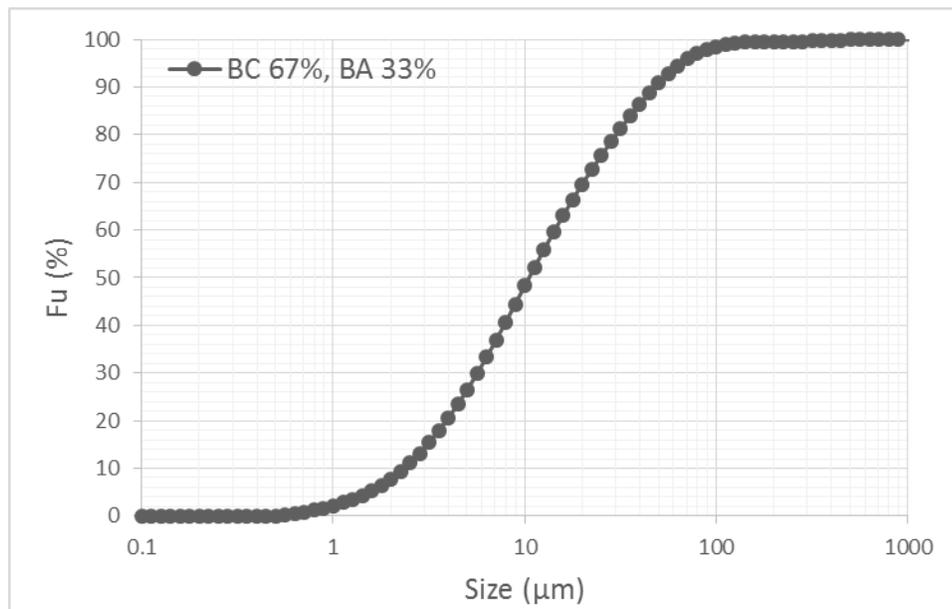


13. GRANULOMETRÍAS

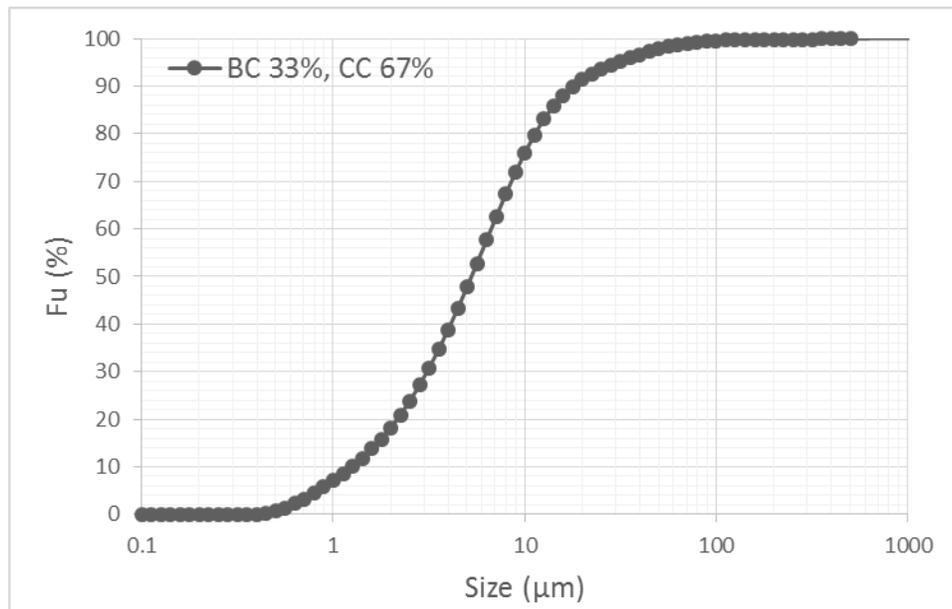
13.1 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC3 BA7



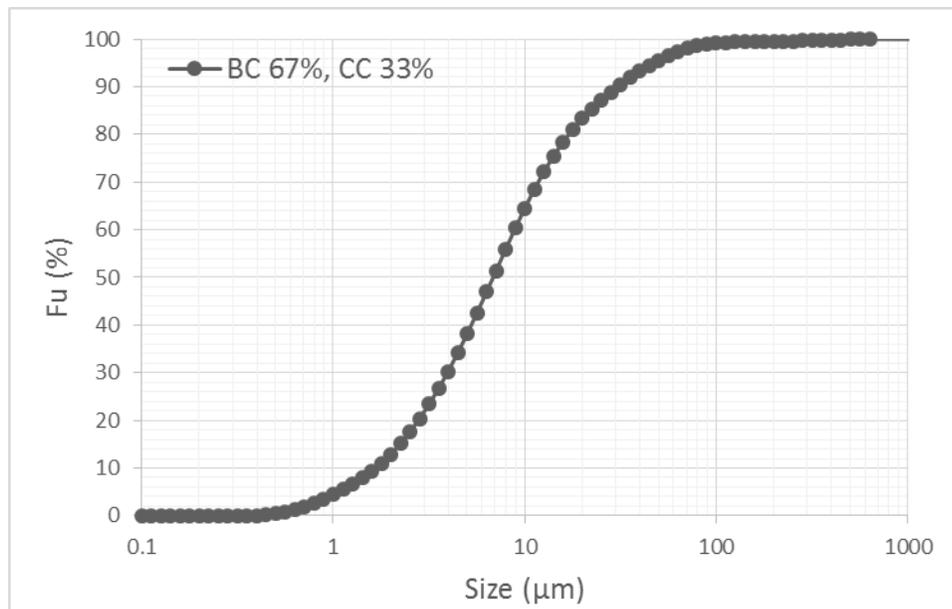
13.2 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC7 BA30



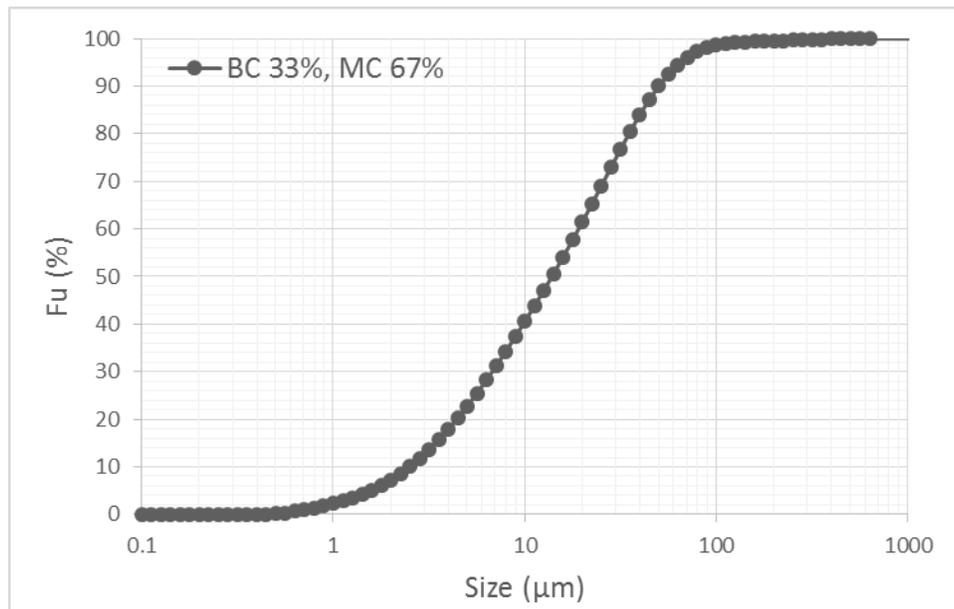
13.3 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC3 CC7



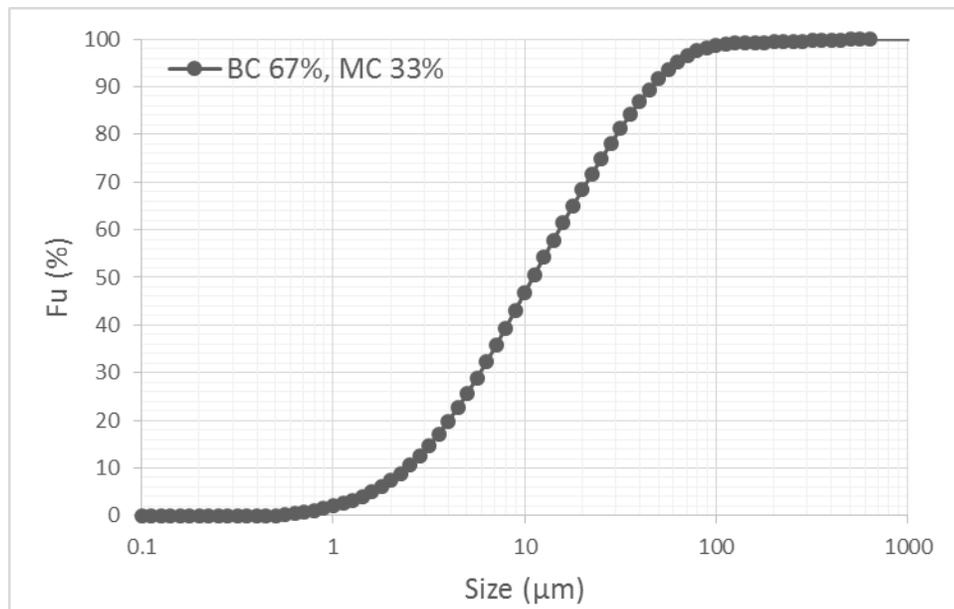
13.4 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC7 CC3



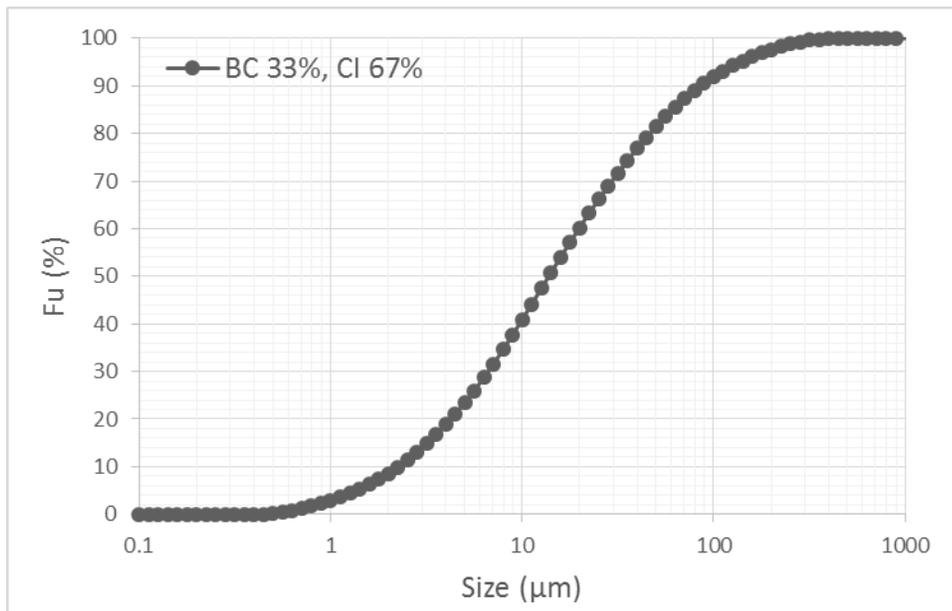
13.5 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC3 MC7



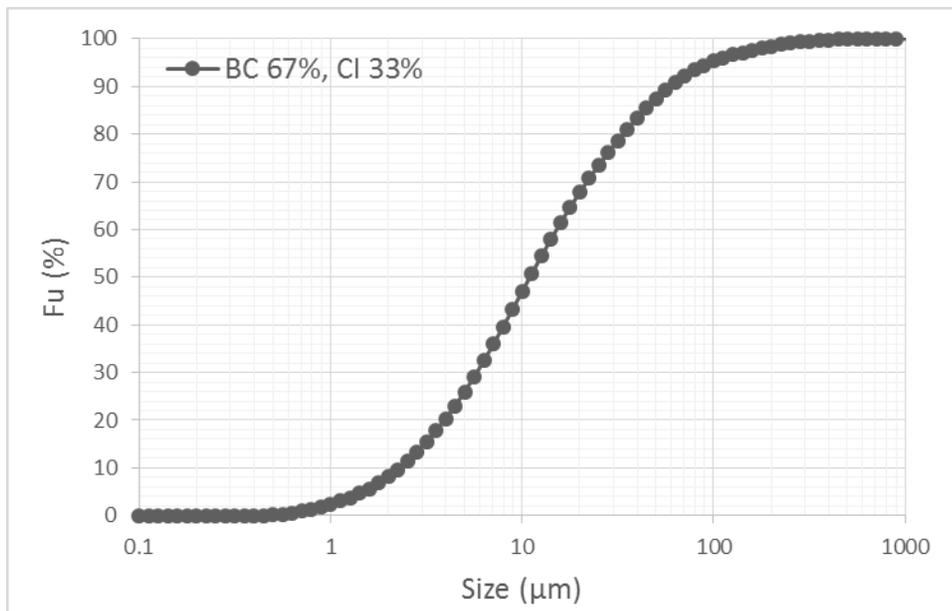
13.6 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC7 MC3



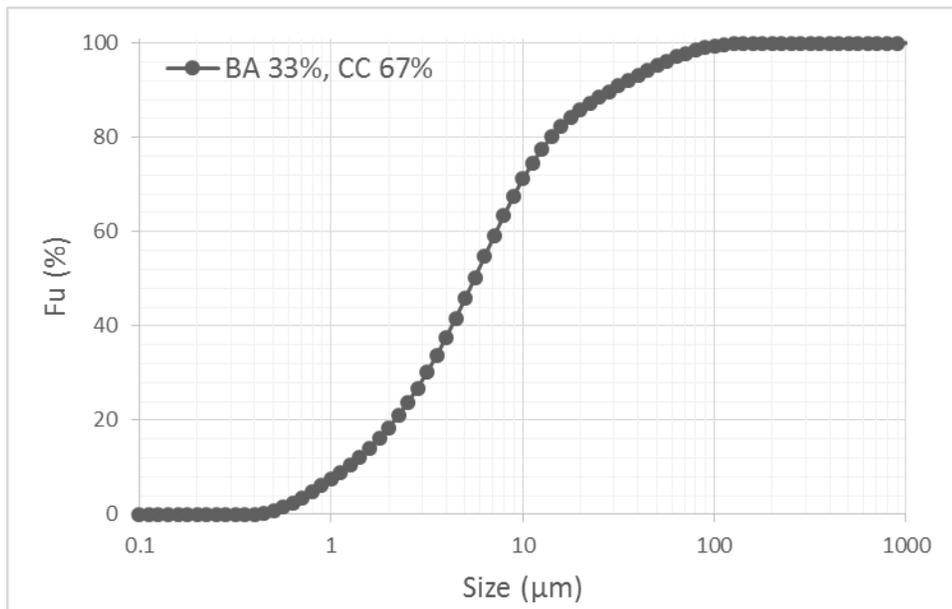
13.7 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC3 CI7



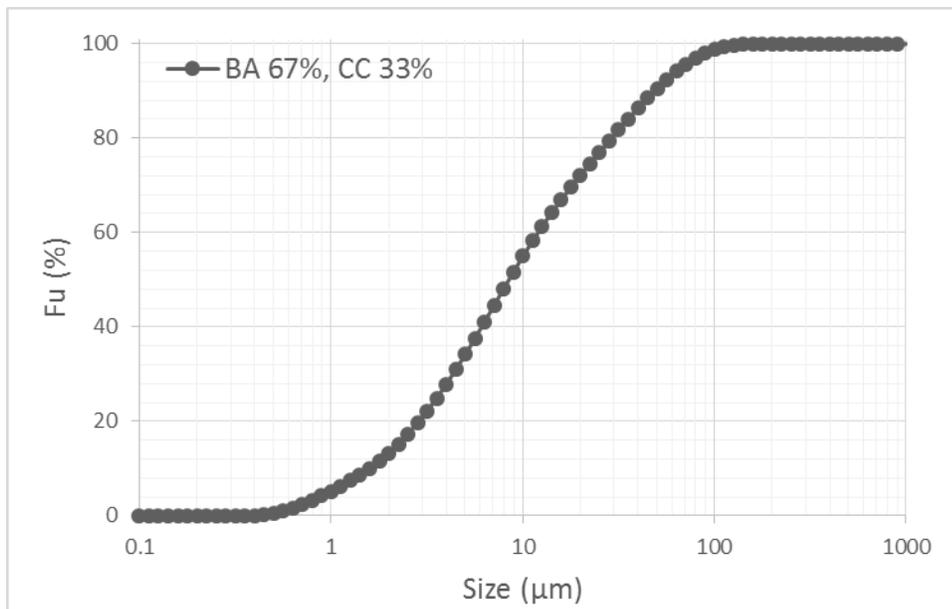
13.8 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC7 CI3



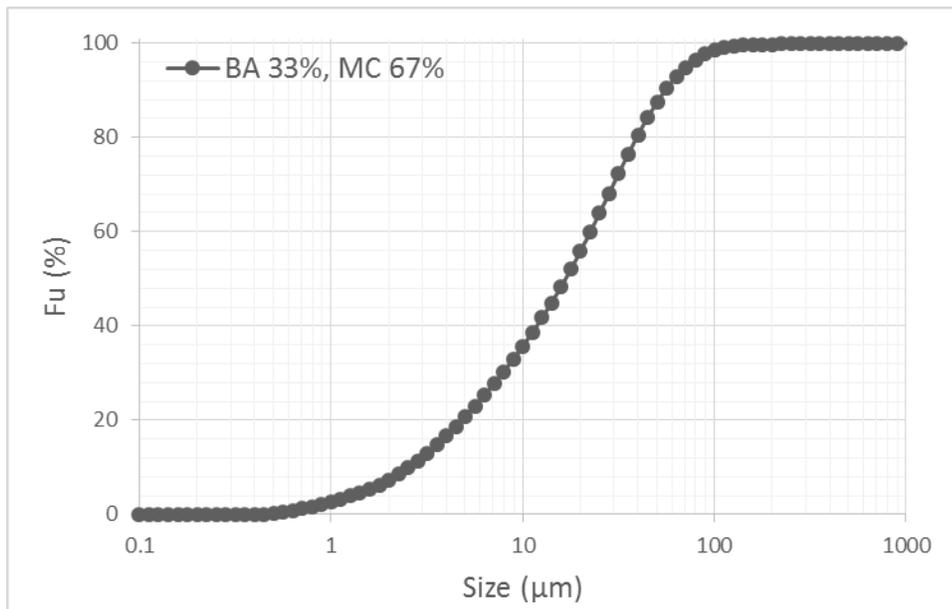
13.9 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA3 CC7



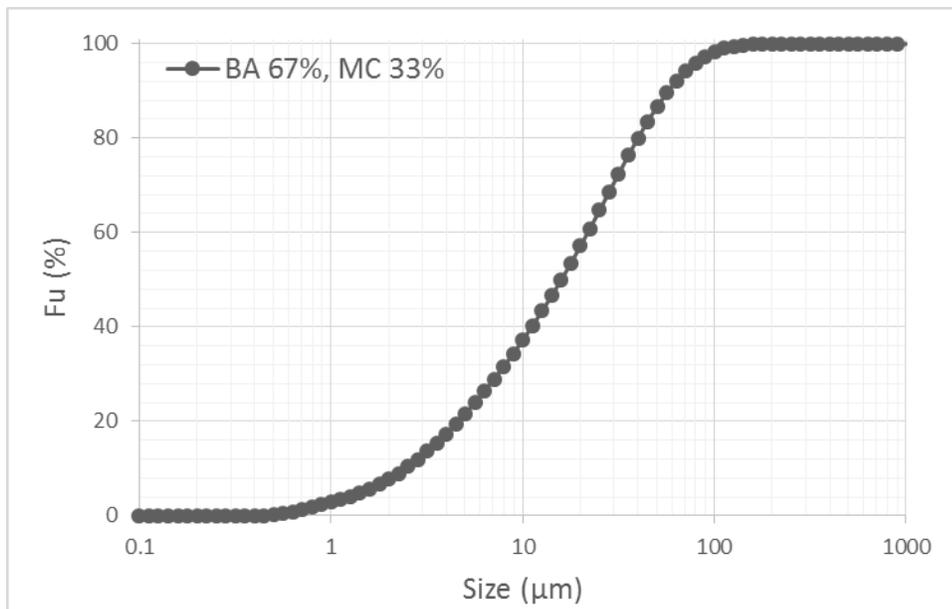
13.10 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA7 CC3



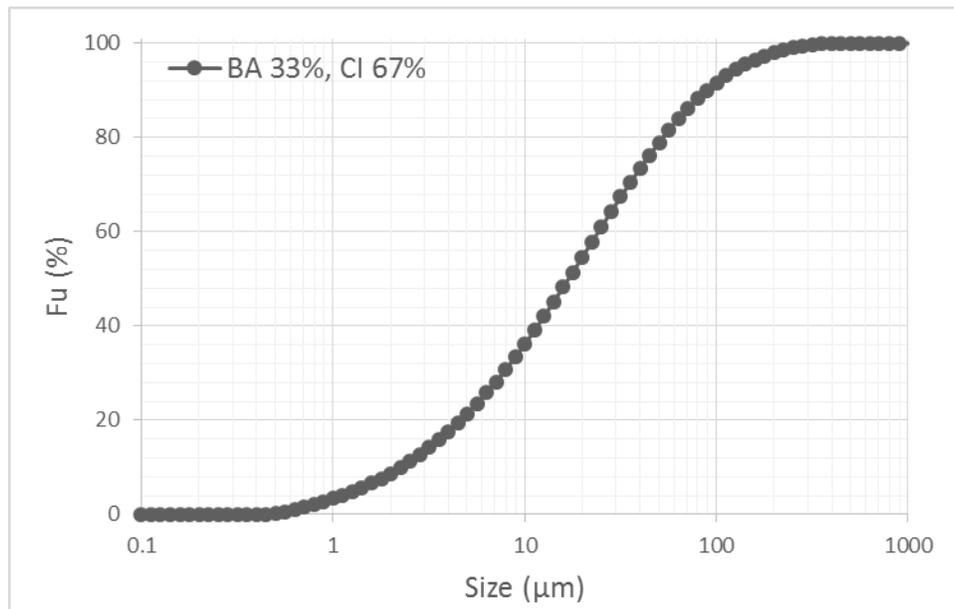
13.11 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA3 MC7



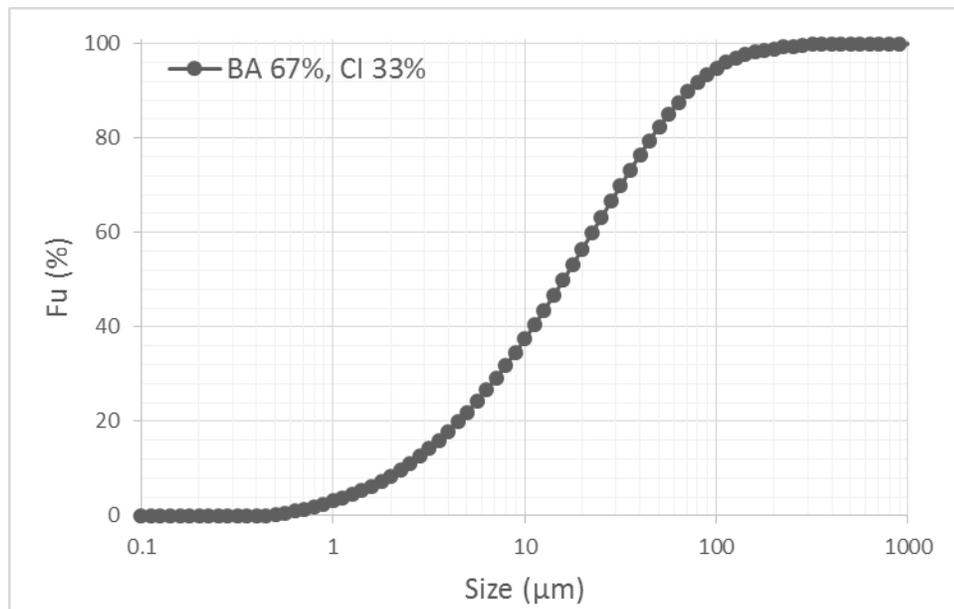
13.12 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA7 MC3



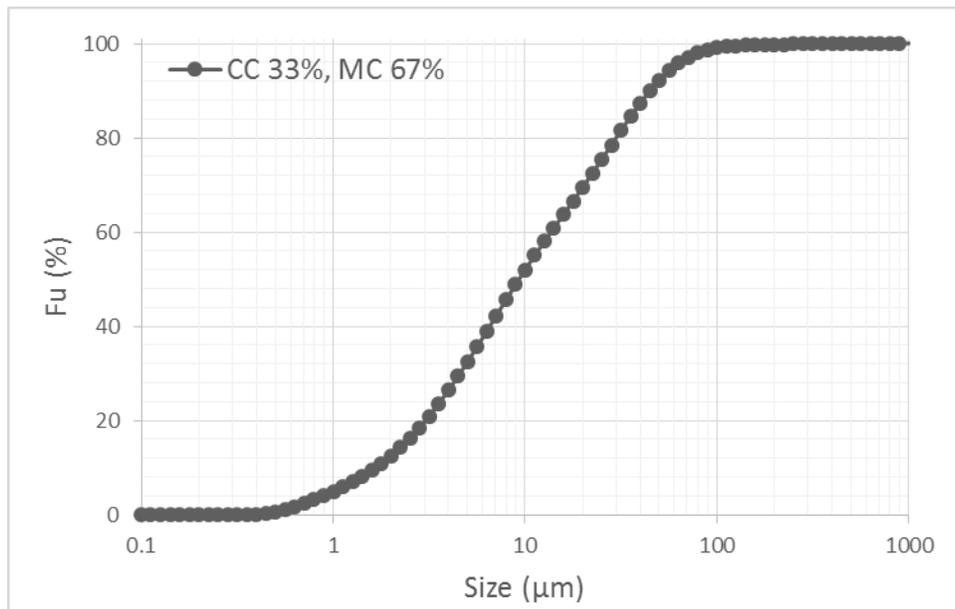
13.13 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA3 CI7



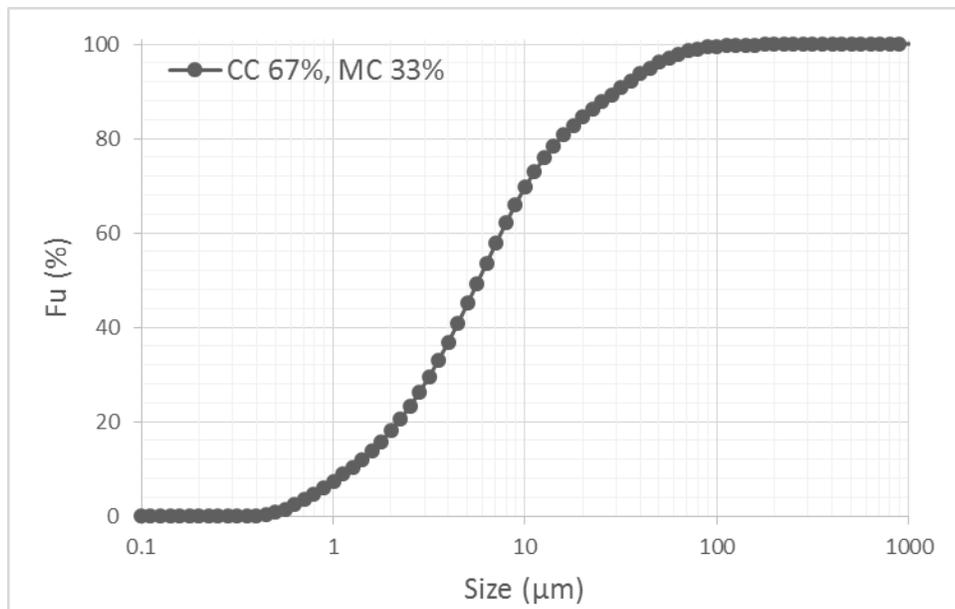
13.14 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA7 CI3



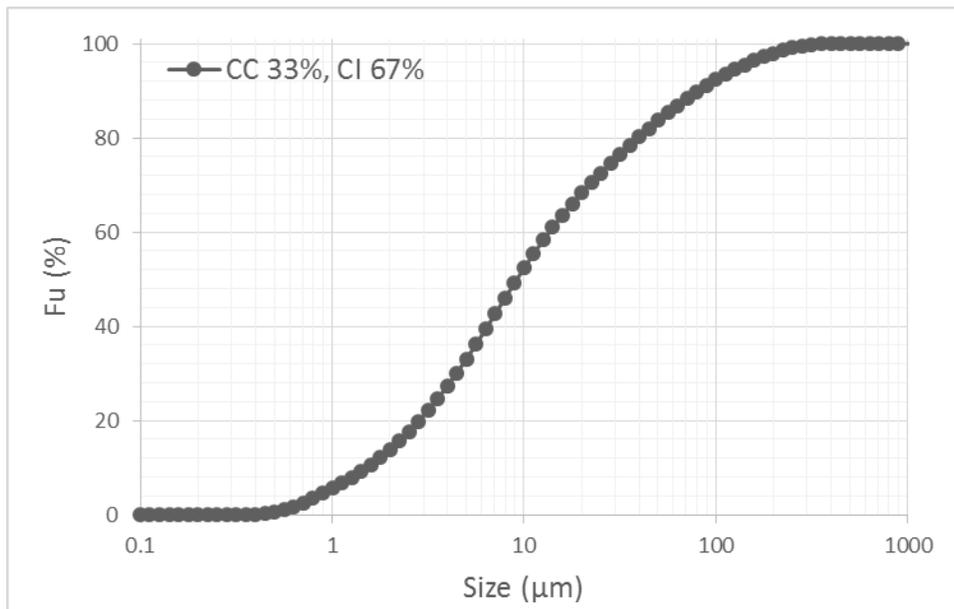
13.15 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO CC3 MC7



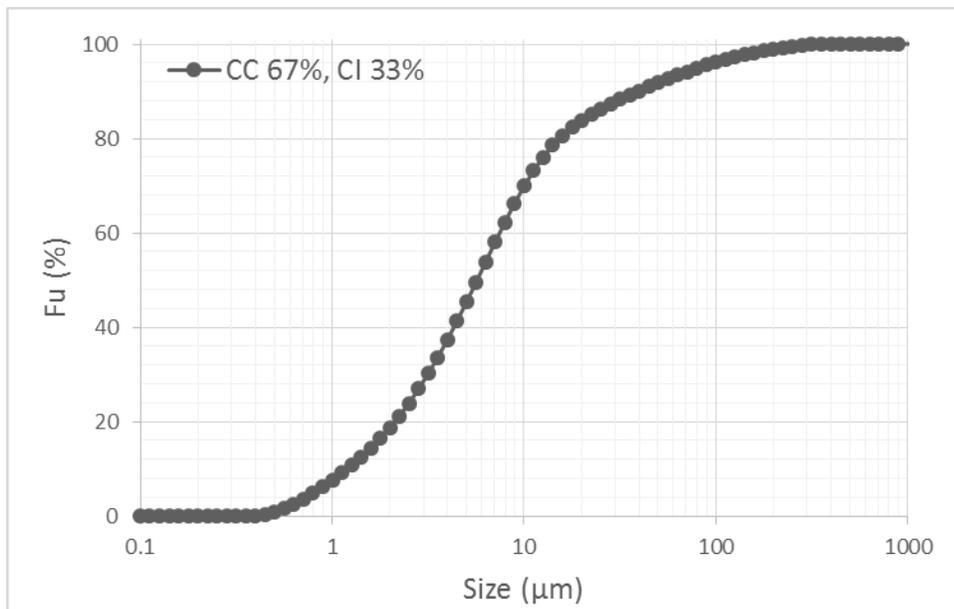
13.16 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO CC7 MC3



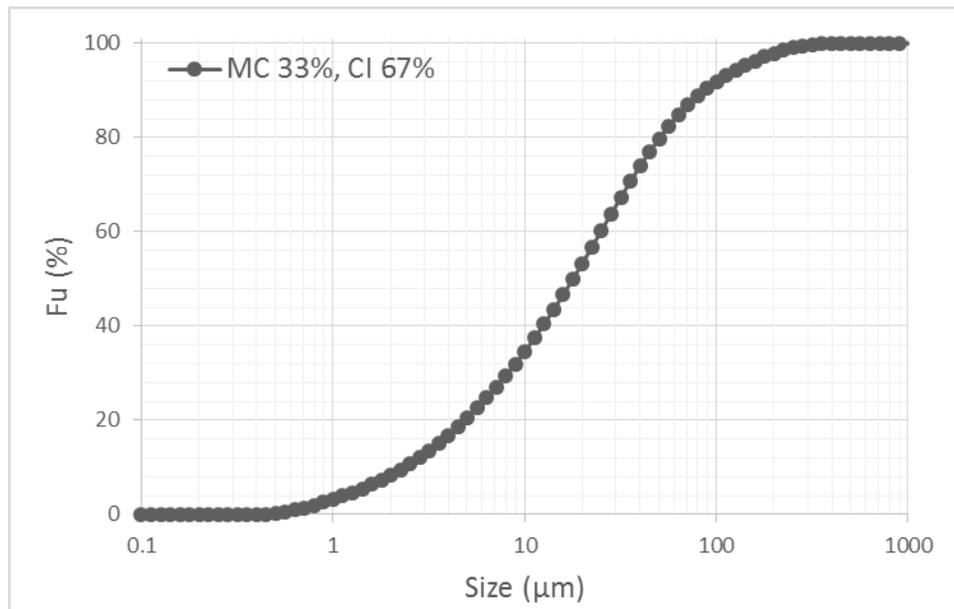
13.17 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO CC3 CI7



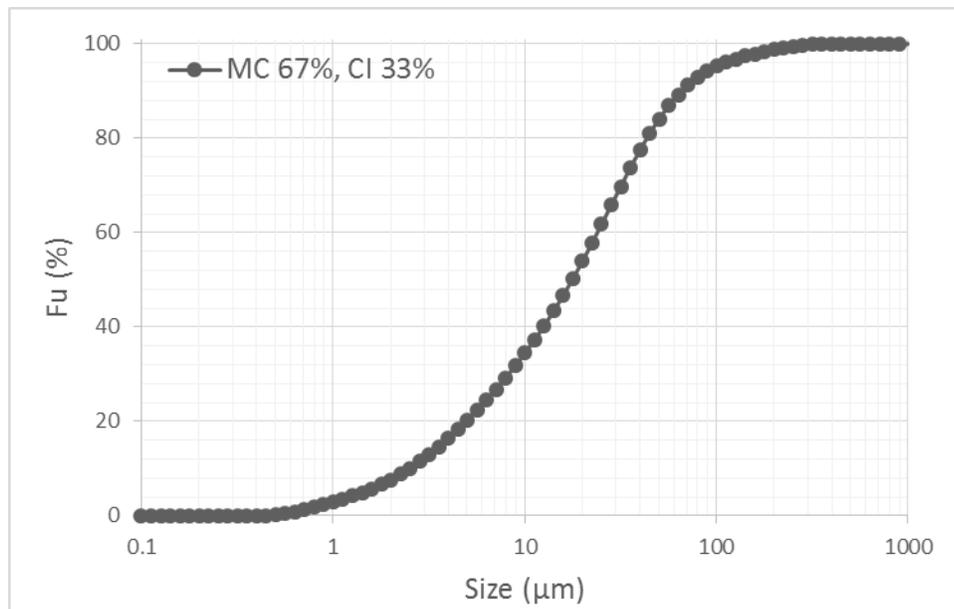
13.18 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO CC7 CI33



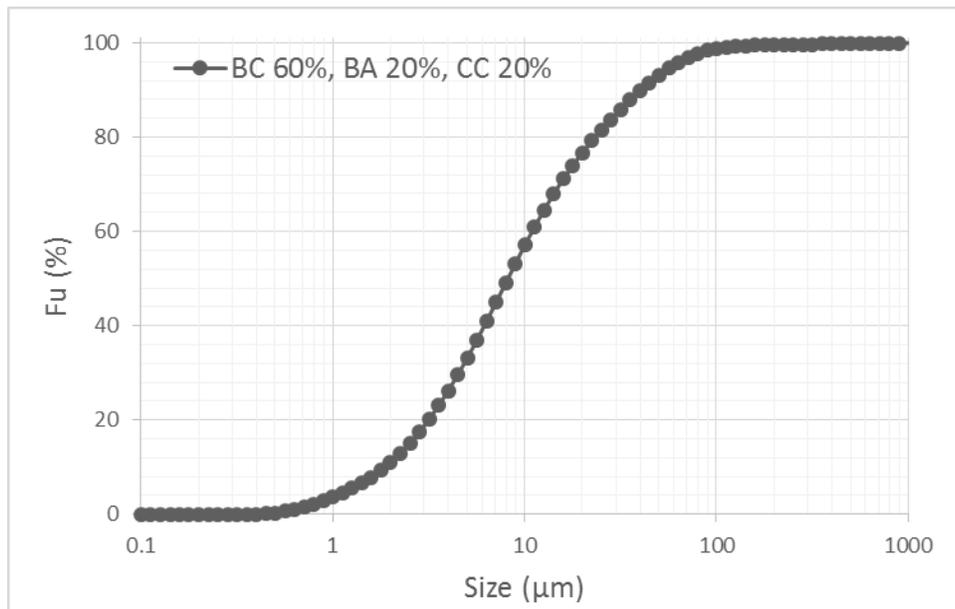
13.19 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO MC3 CI7



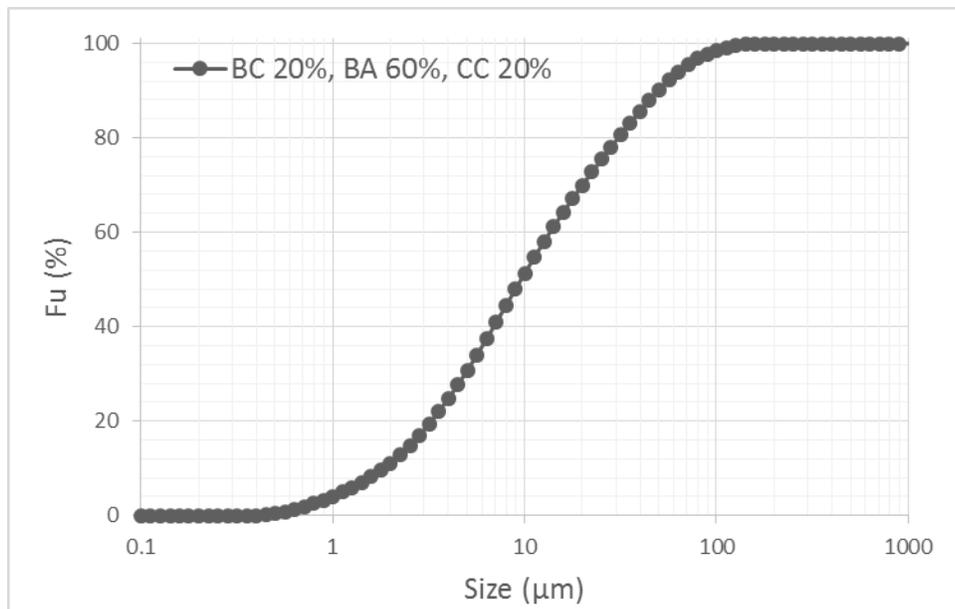
13.20 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO MC7 CI3



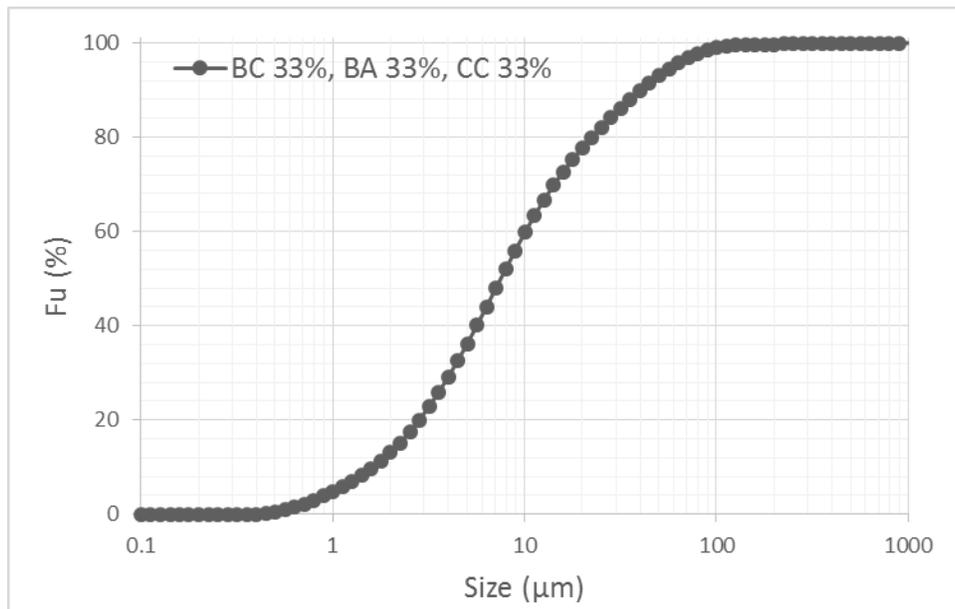
13.21 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC6 BA2 CC2



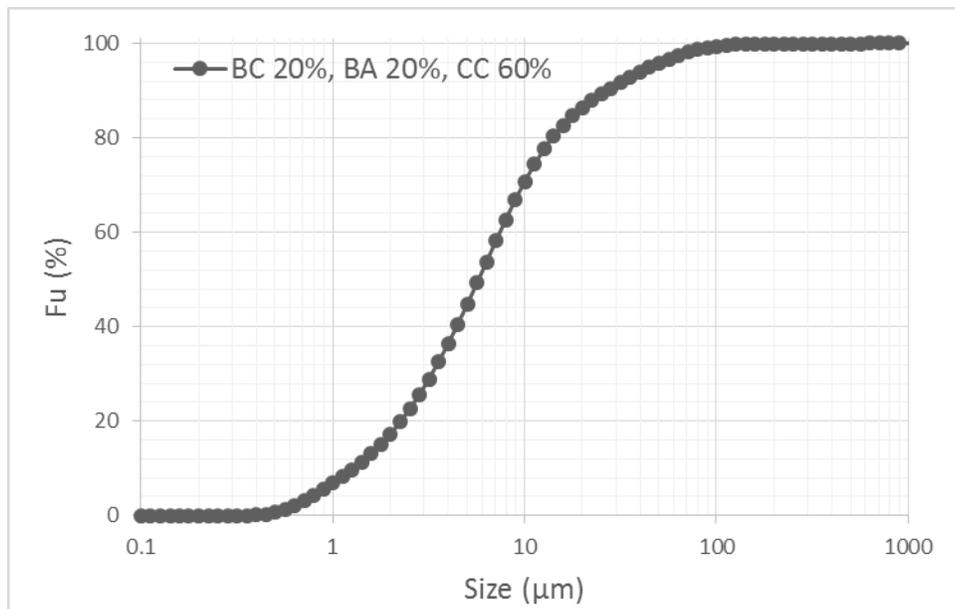
13.22 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 BA6 CC2



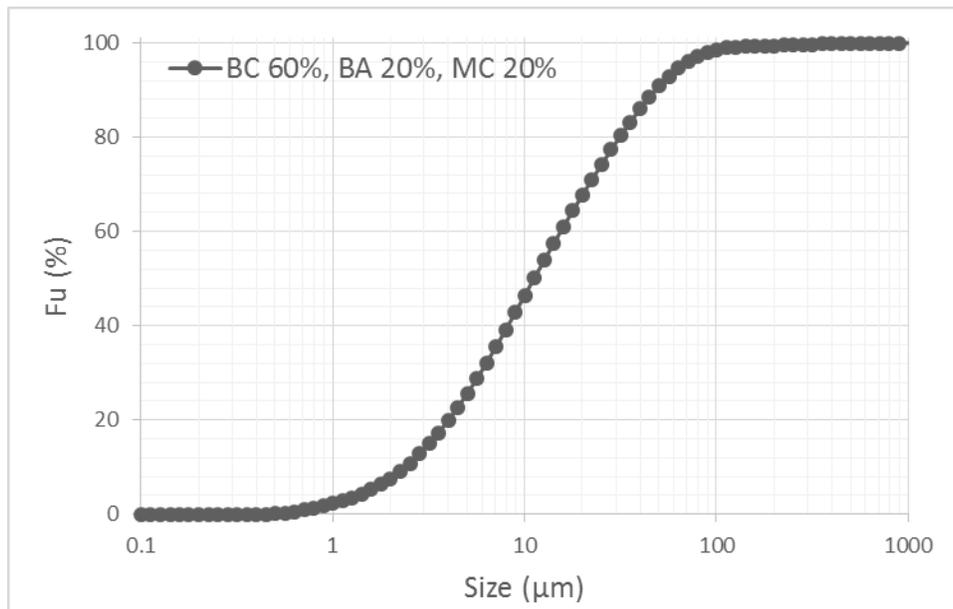
13.23 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC3 BA3 CC3



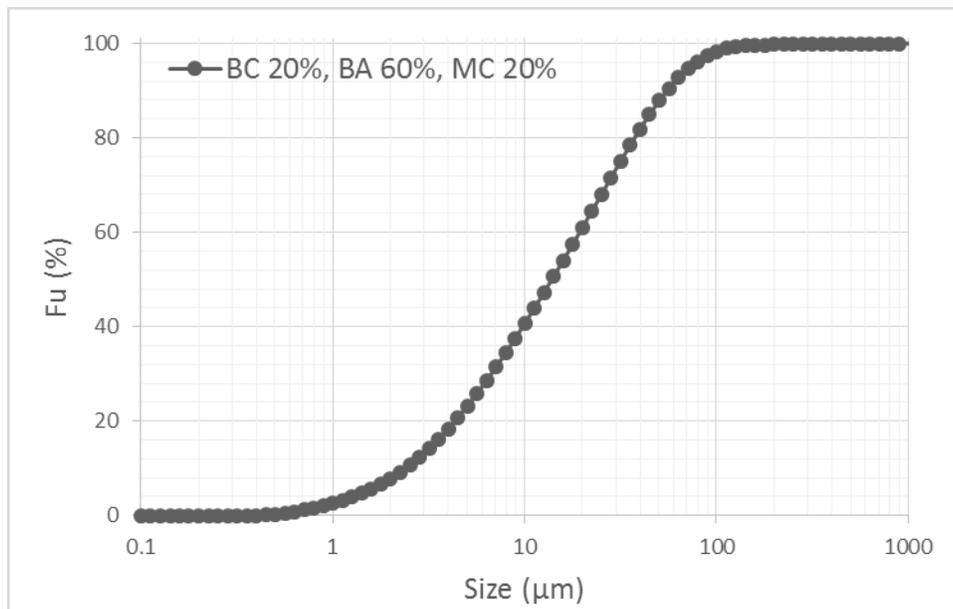
13.24 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 BA2 CC6



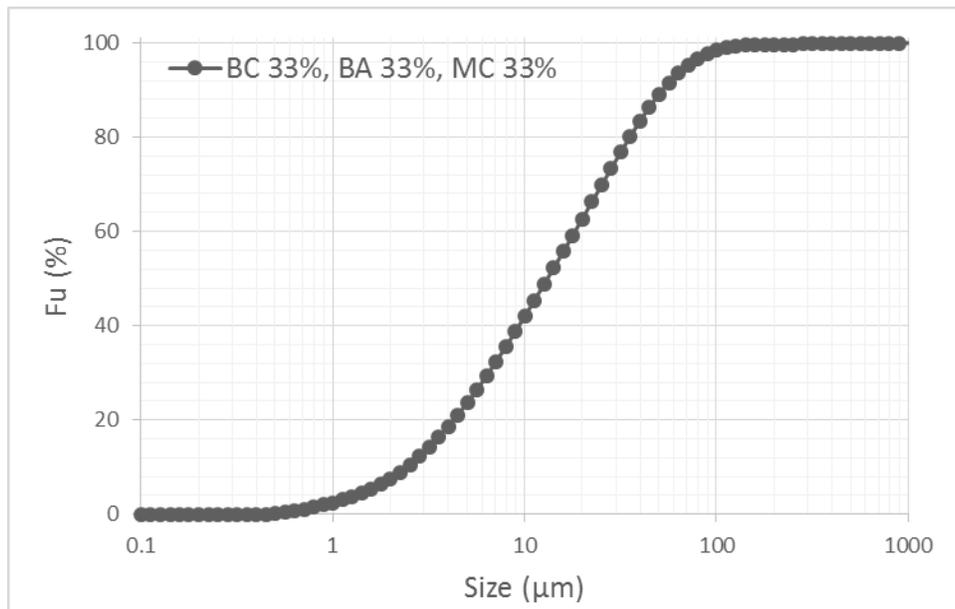
13.25 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC6 BA2 MC2



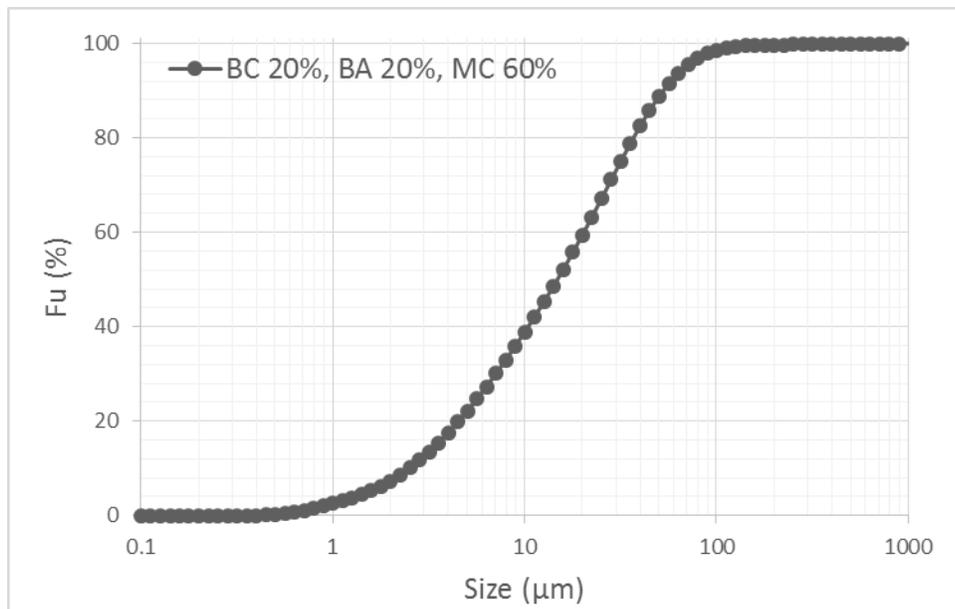
13.26 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 BA6 MC2



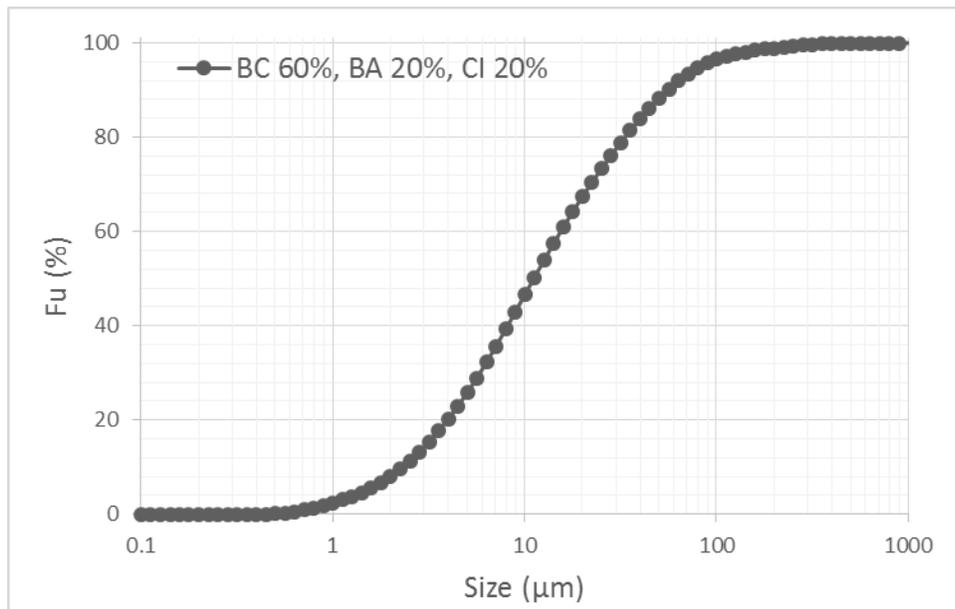
13.27 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC3 BA3 MC3



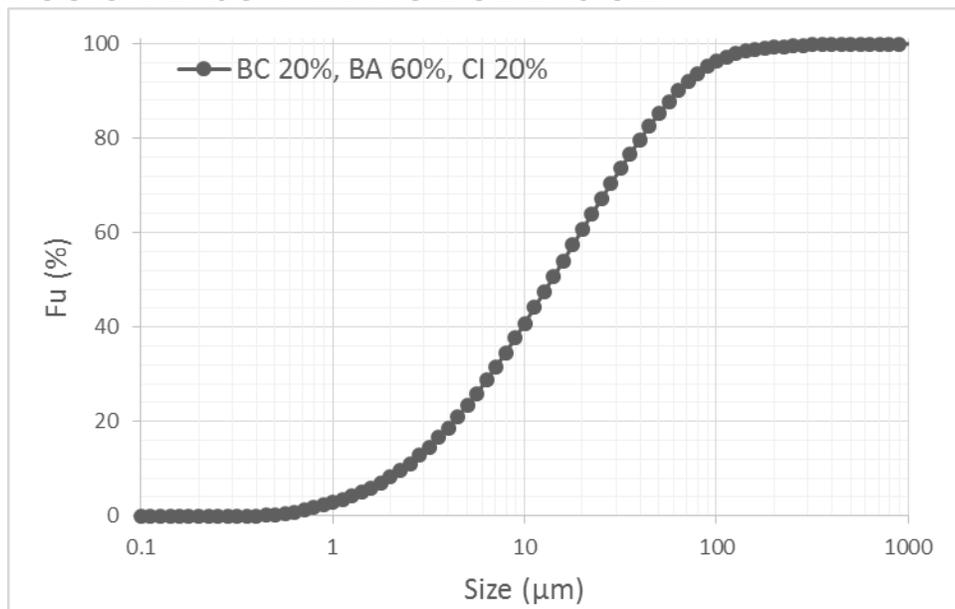
13.28 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 BA2 MC6



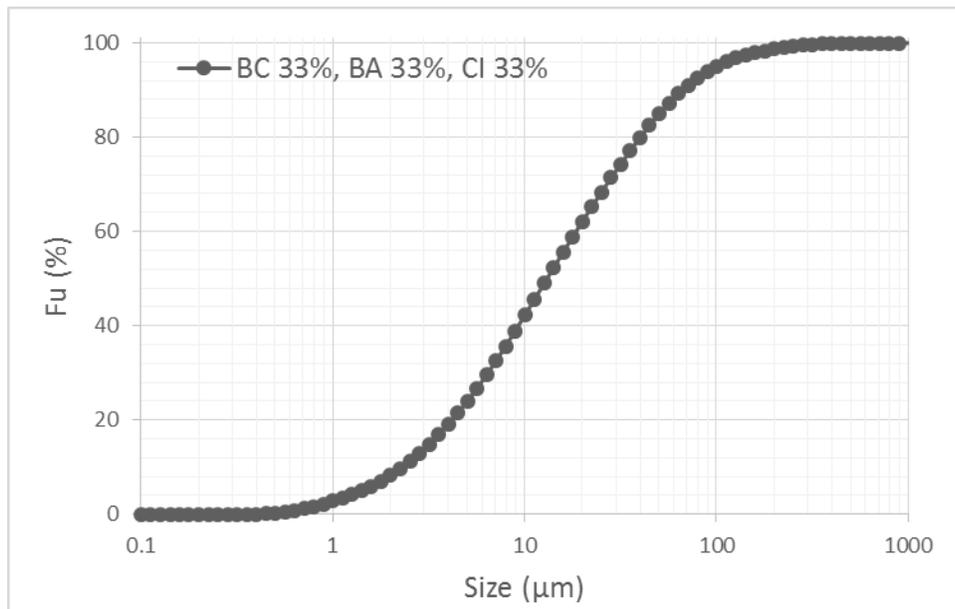
13.29 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC6 BA2 CI2



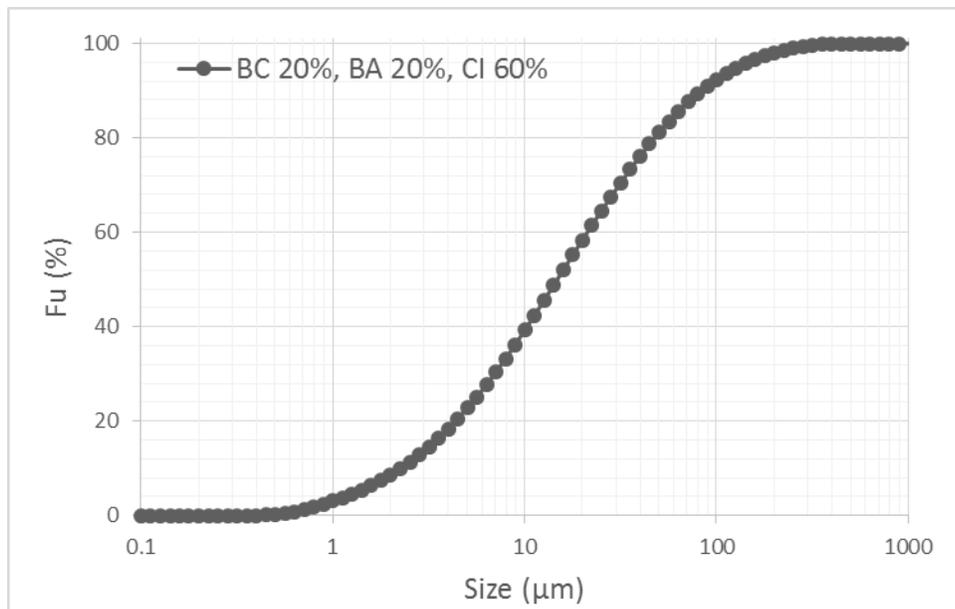
13.30 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 BA6 CI2



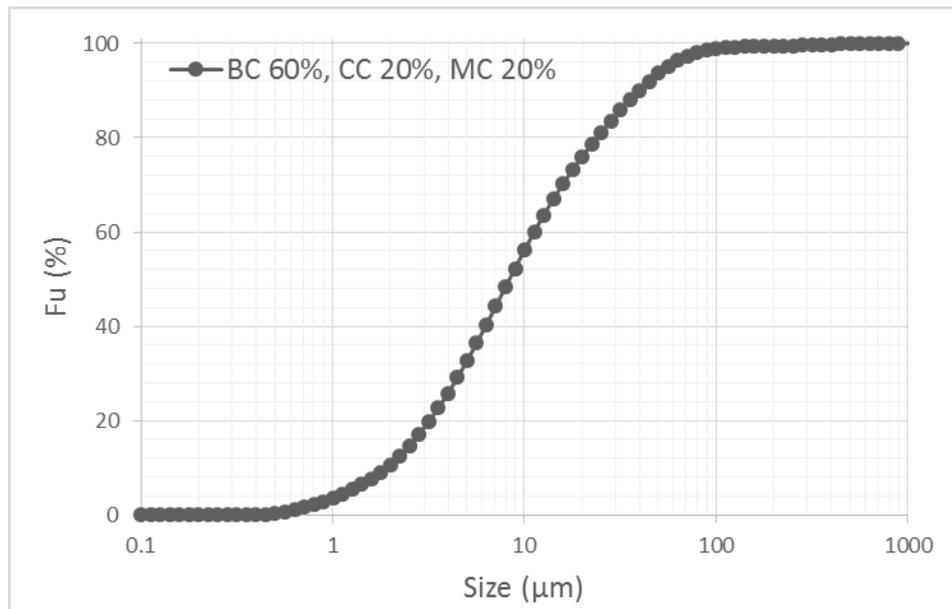
13.31 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC3 BA3 CI3



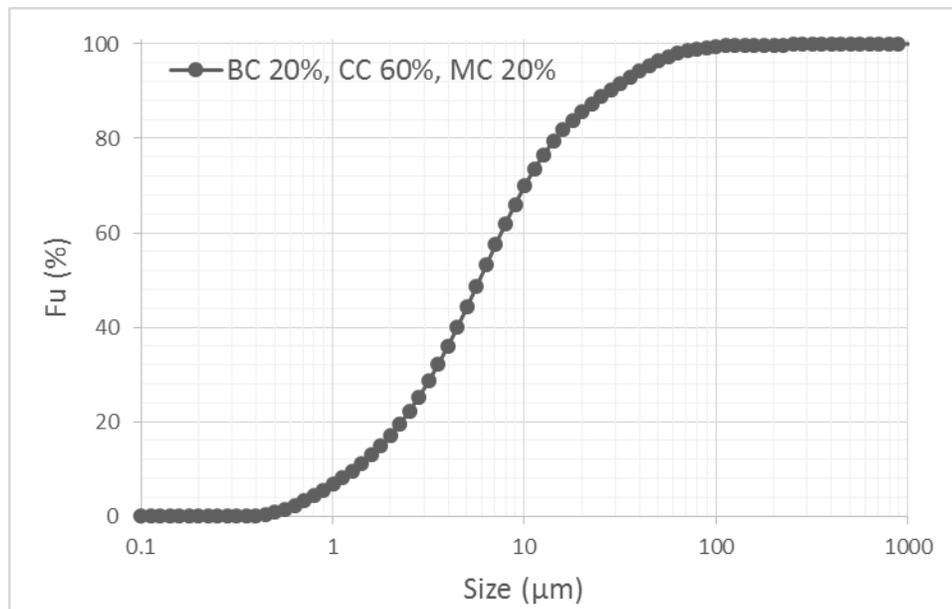
13.32 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 BA2 CI6



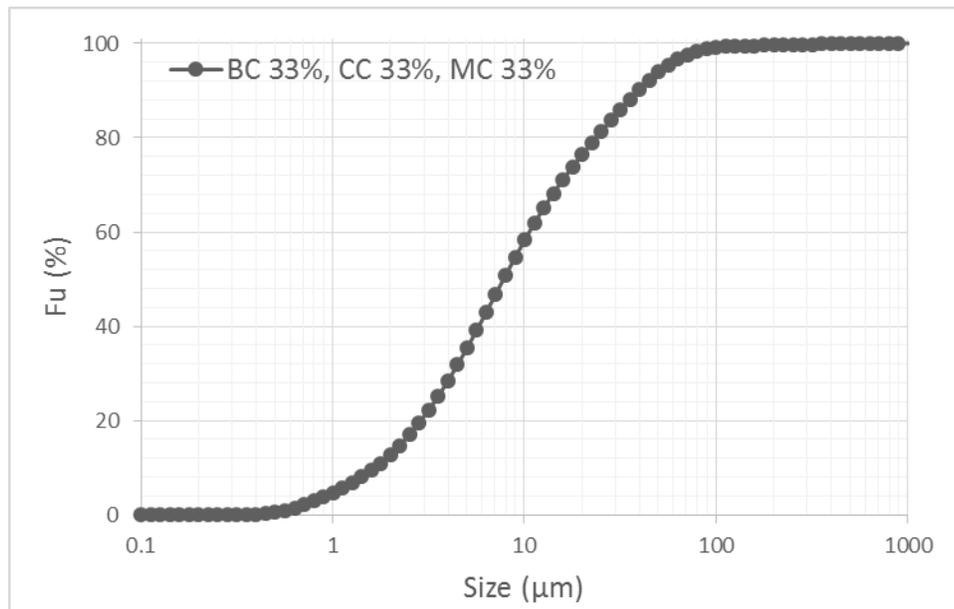
13.33 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC6 CC2 MC2



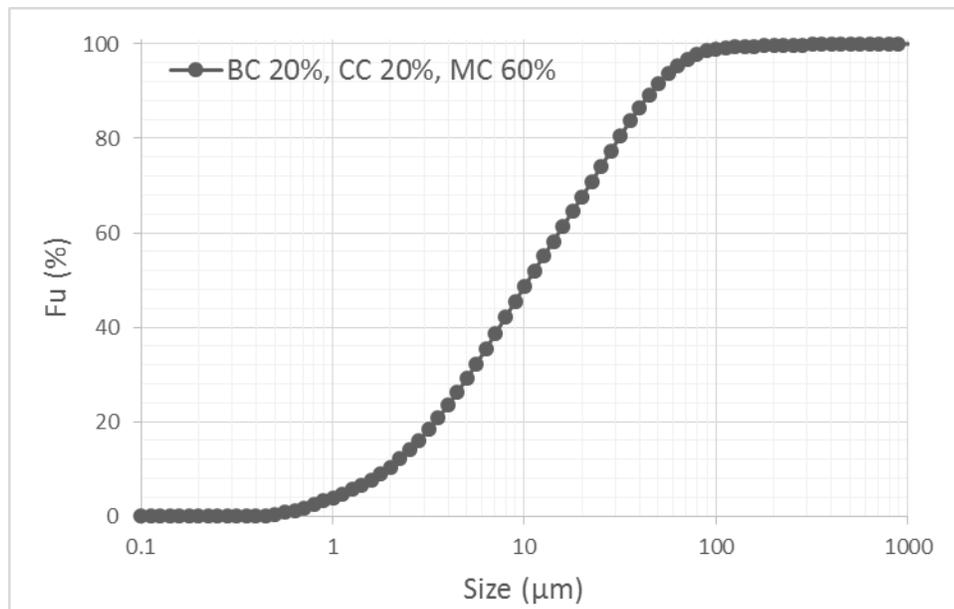
13.34 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 CC6 MC2



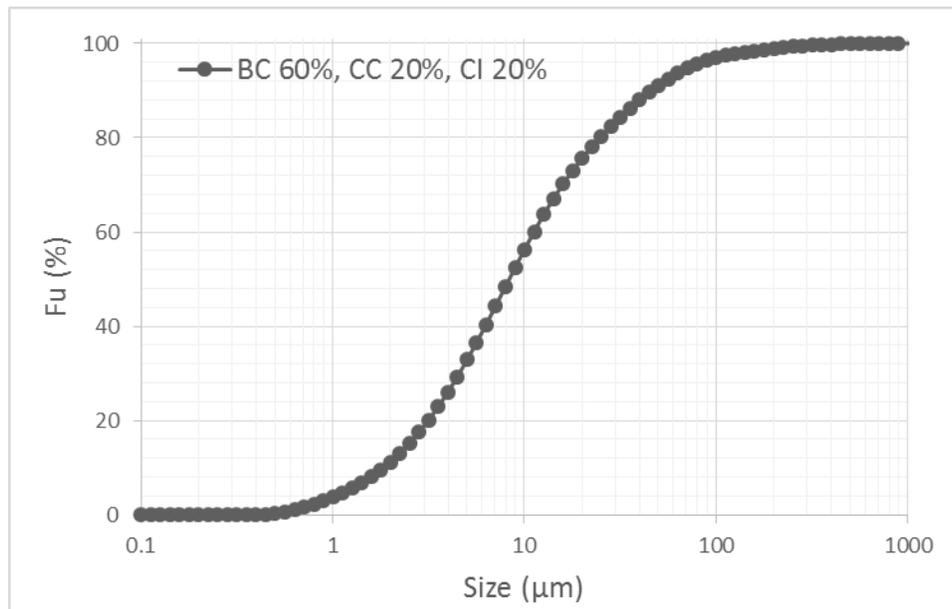
13.35 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC3 CC3 MC3



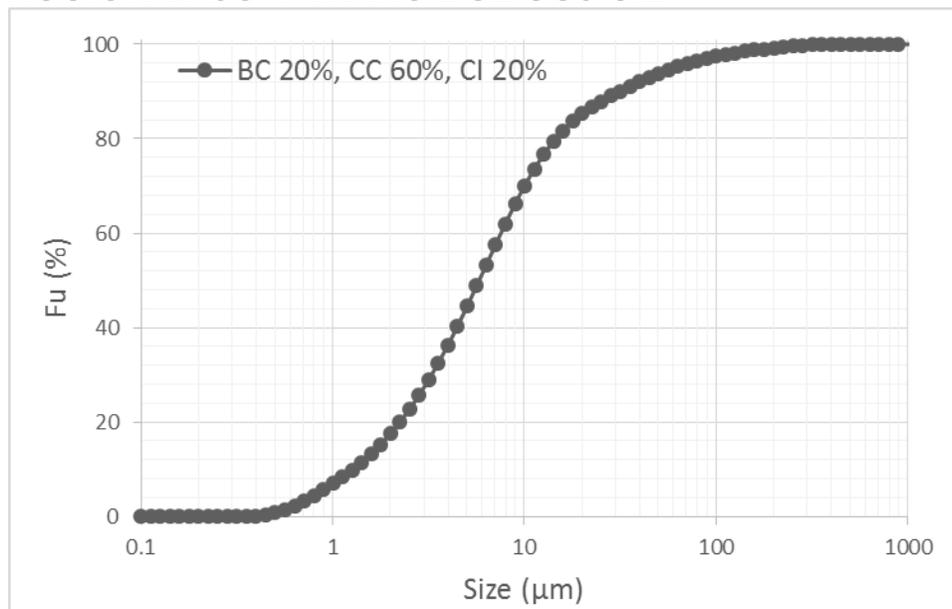
13.36 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 CC2 MC6



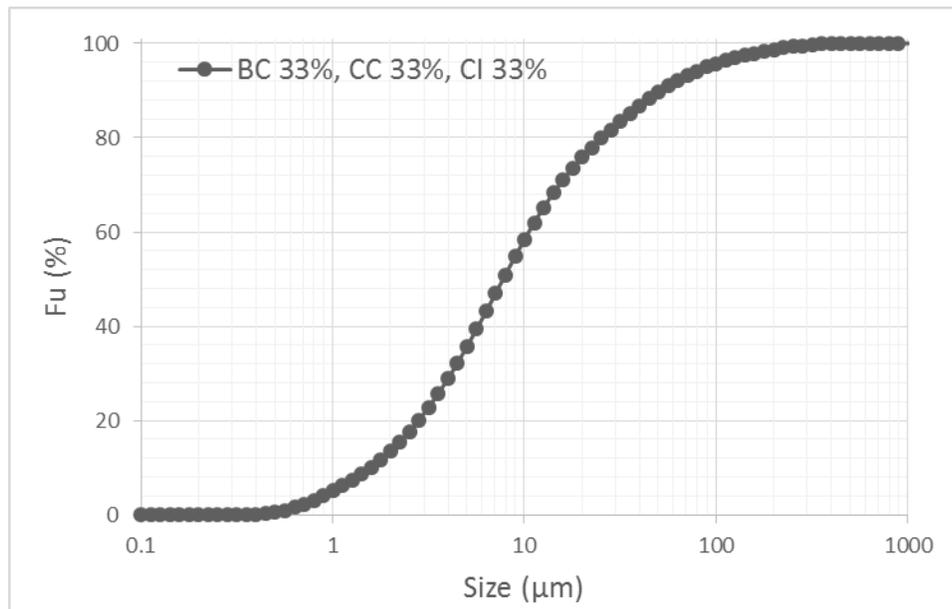
13.37 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC6 CC2 CI2



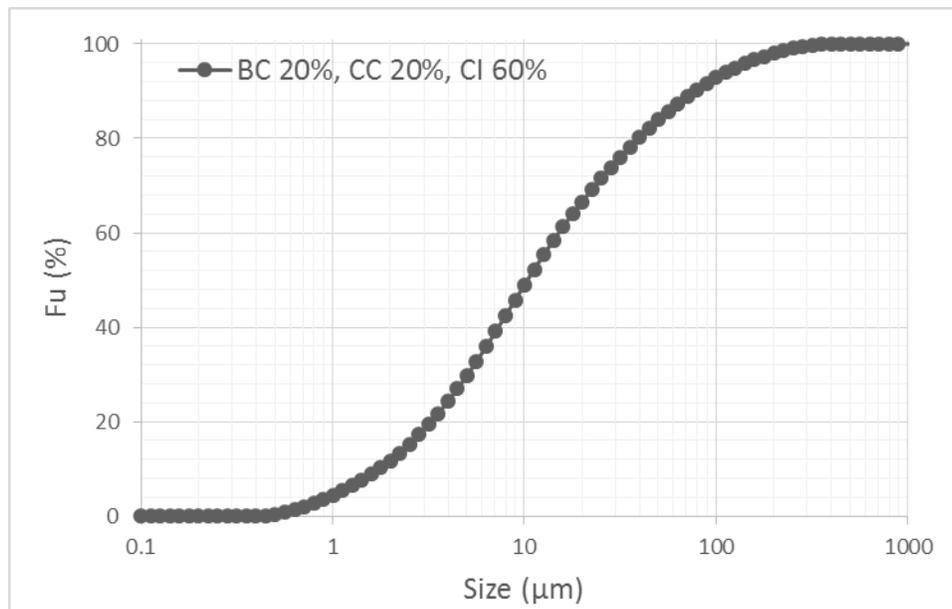
13.38 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 CC6 CI2



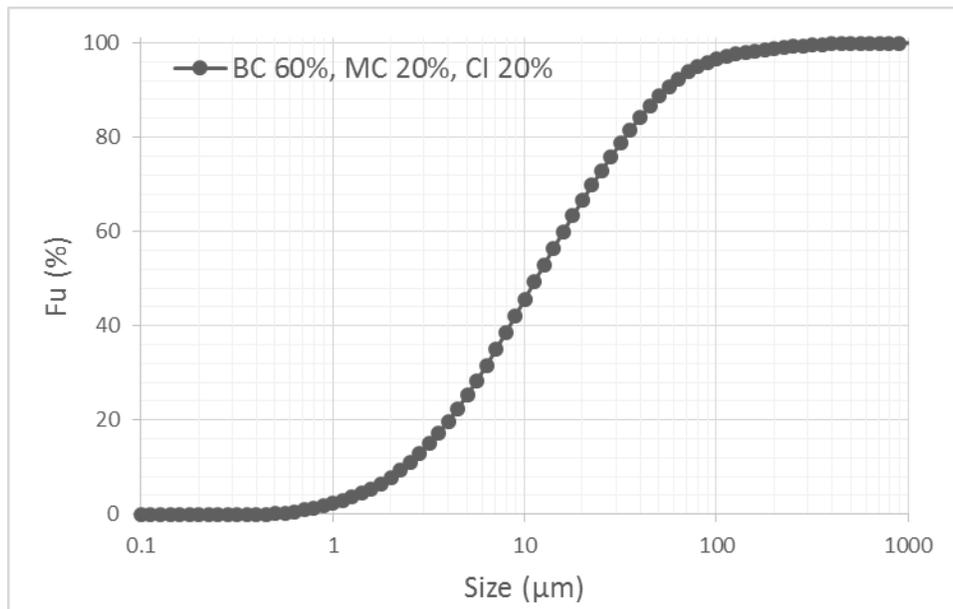
13.39 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC3 CC3 CI3



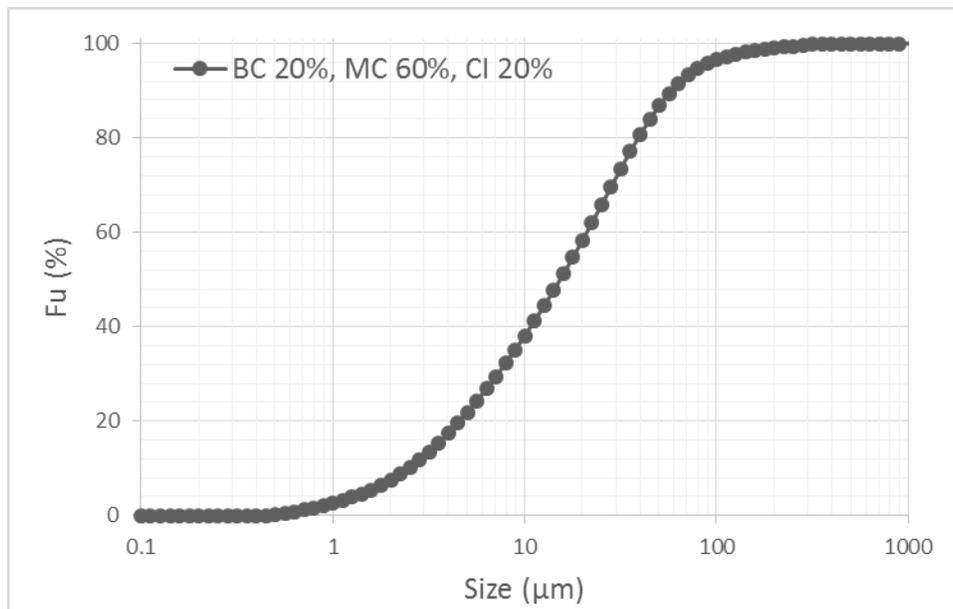
13.40 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 CC2 CI6



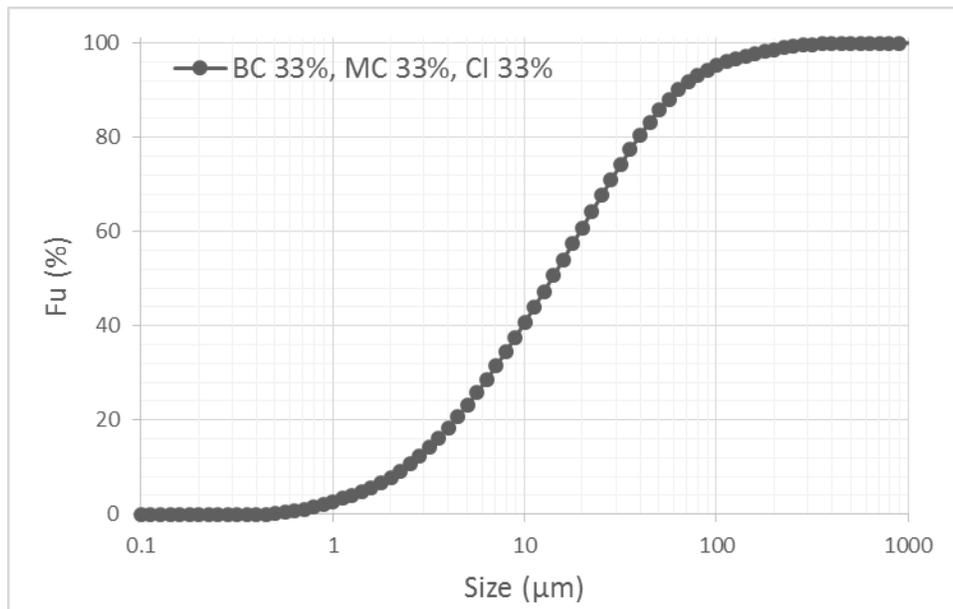
13.41 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC6 MC2 CI2



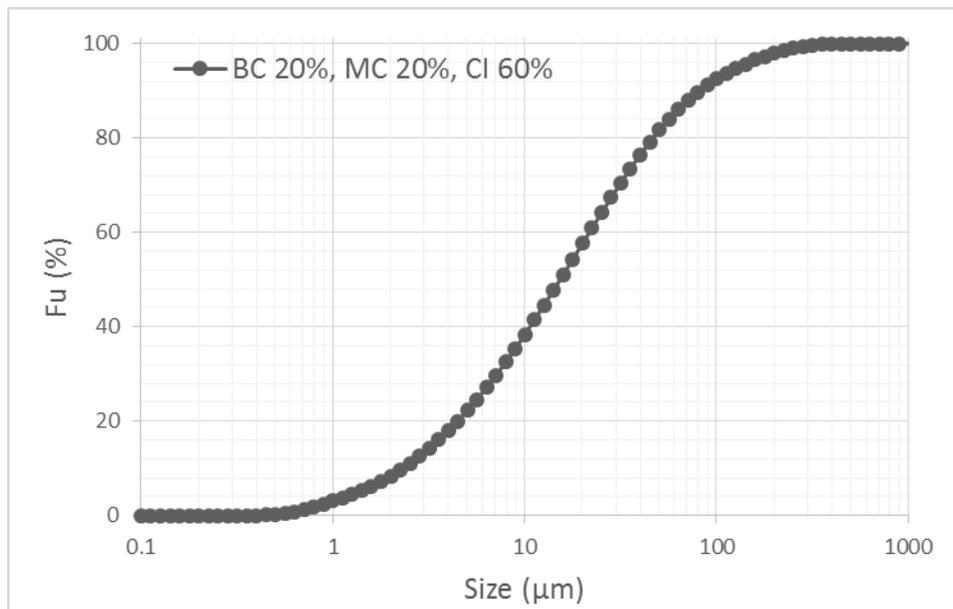
13.42 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 MC6 CI2



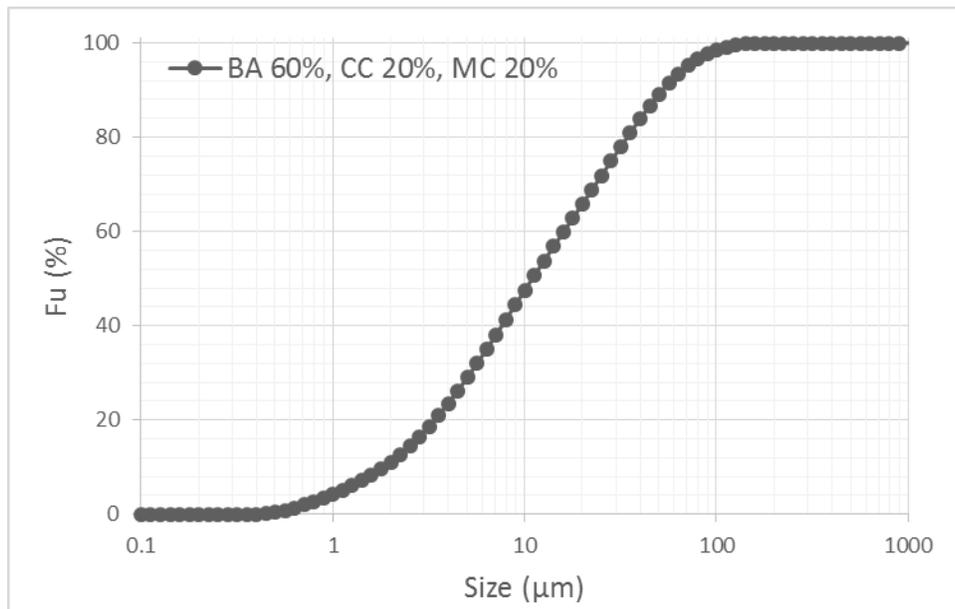
13.43 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC3 MC3 CI3



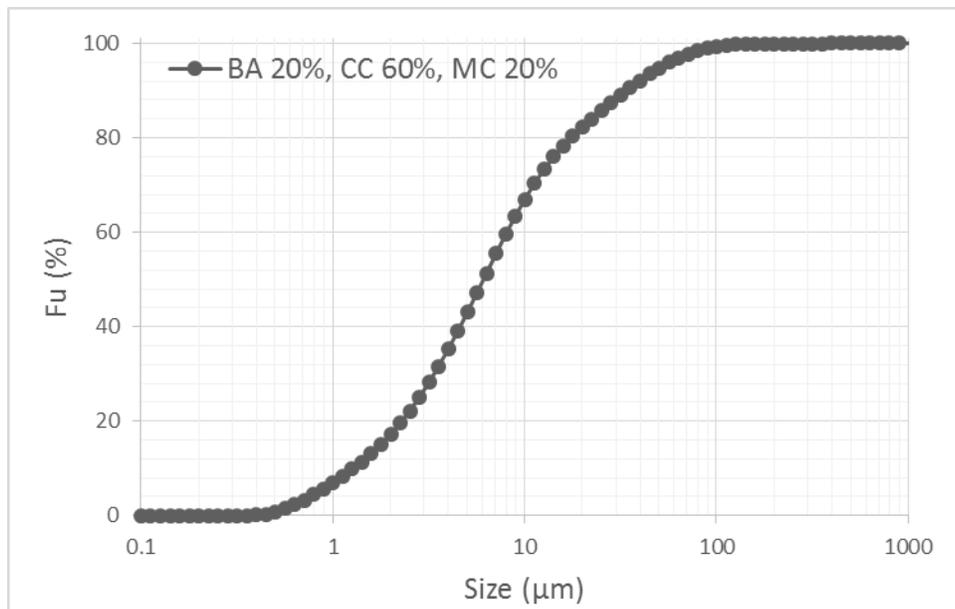
13.44 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BC2 MC2 CI6



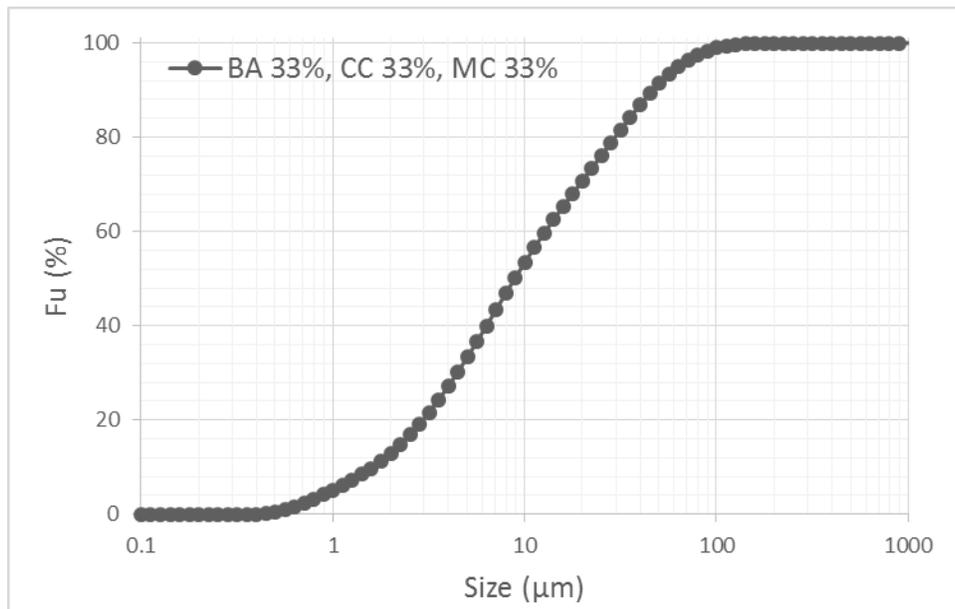
13.45 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA6 CC2 MC2



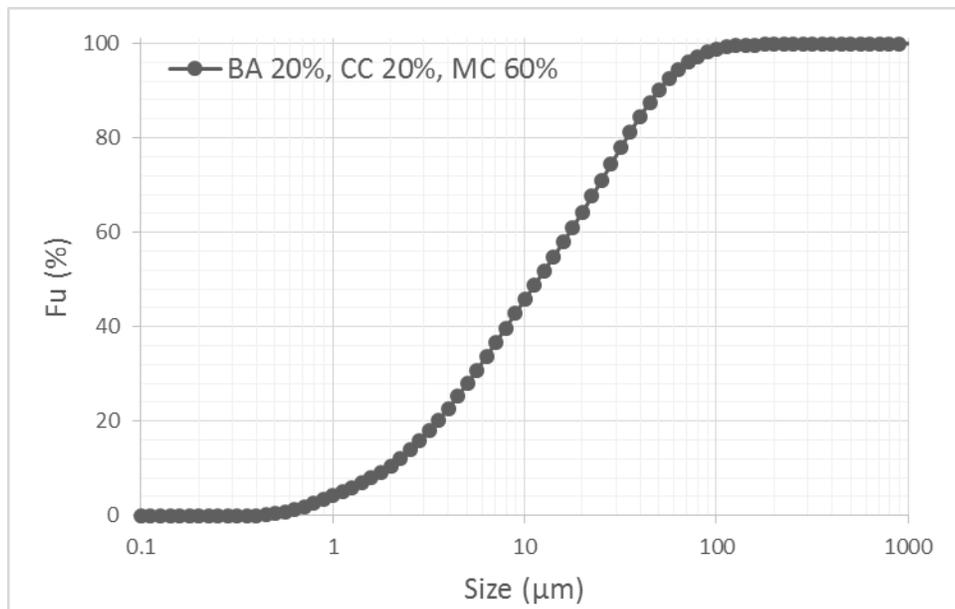
13.46 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA2 CC6 MC2



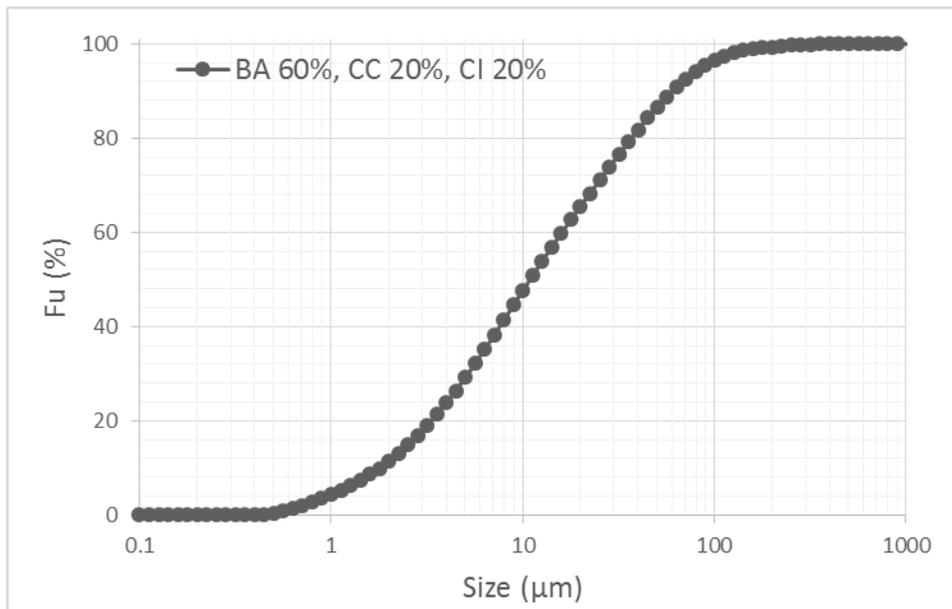
13.47 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA3 CC3 MC3



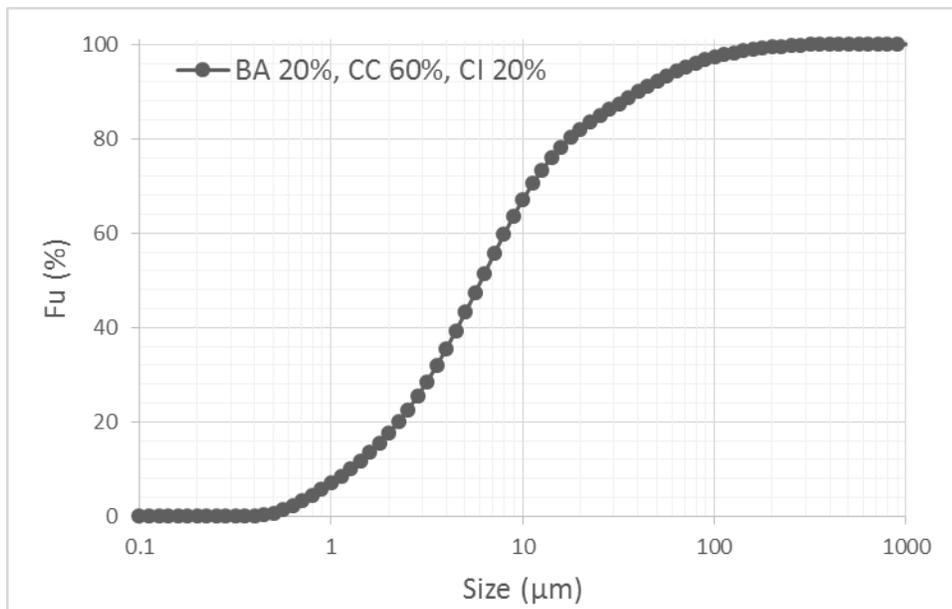
13.48 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA2 CC2 MC6



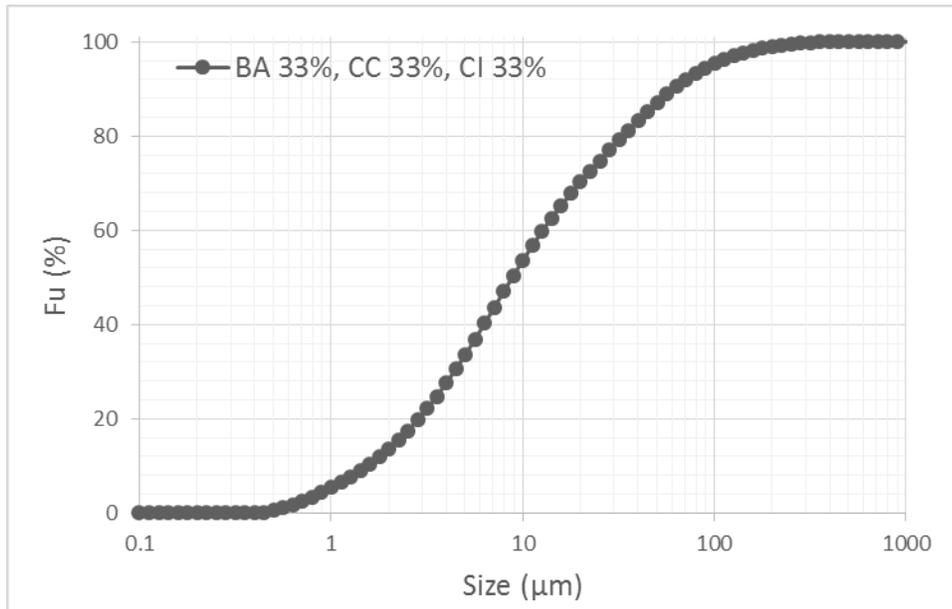
13.49 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA6 CC2 CI2



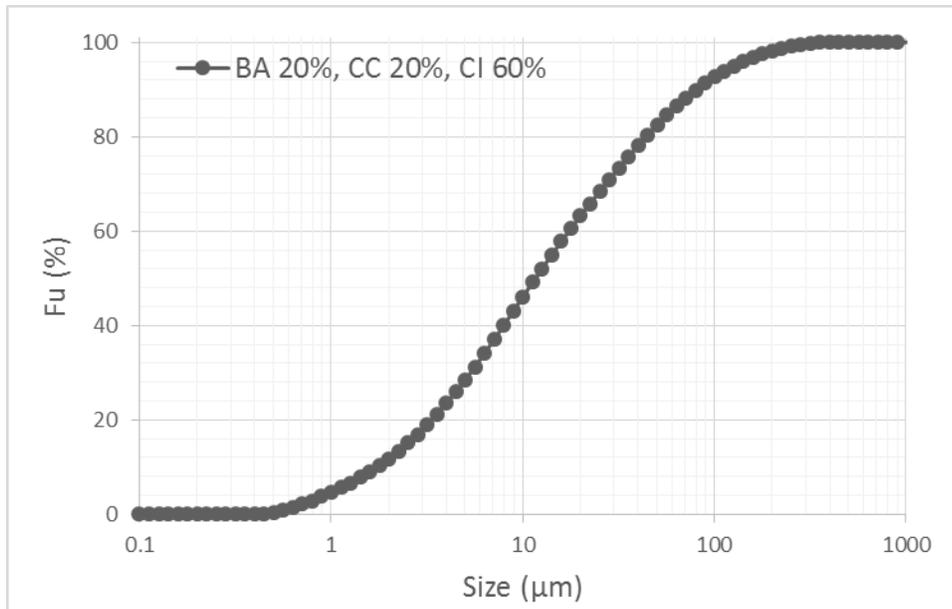
13.50 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA2 CC6 CI2



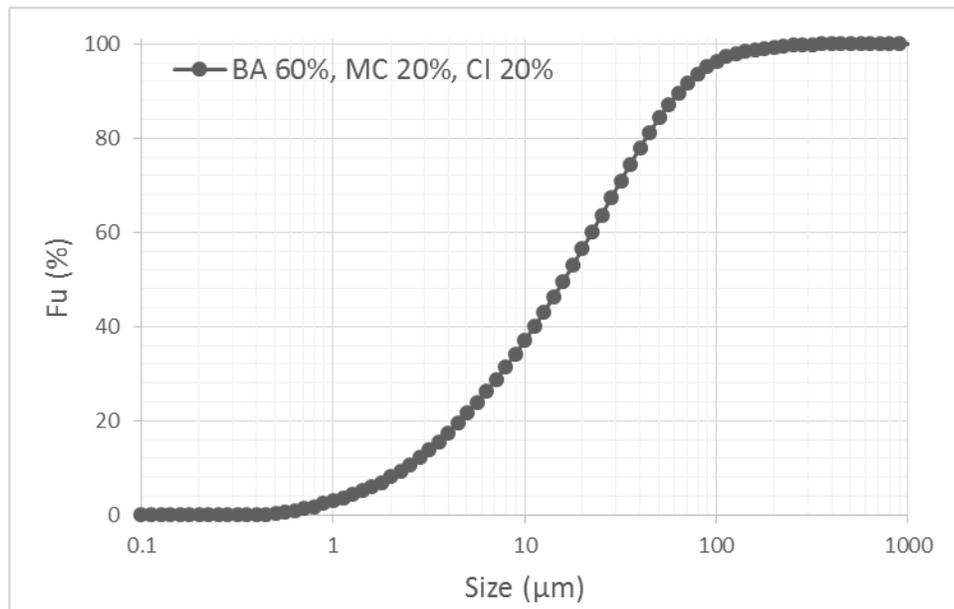
13.51 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA3 CC3 CI3



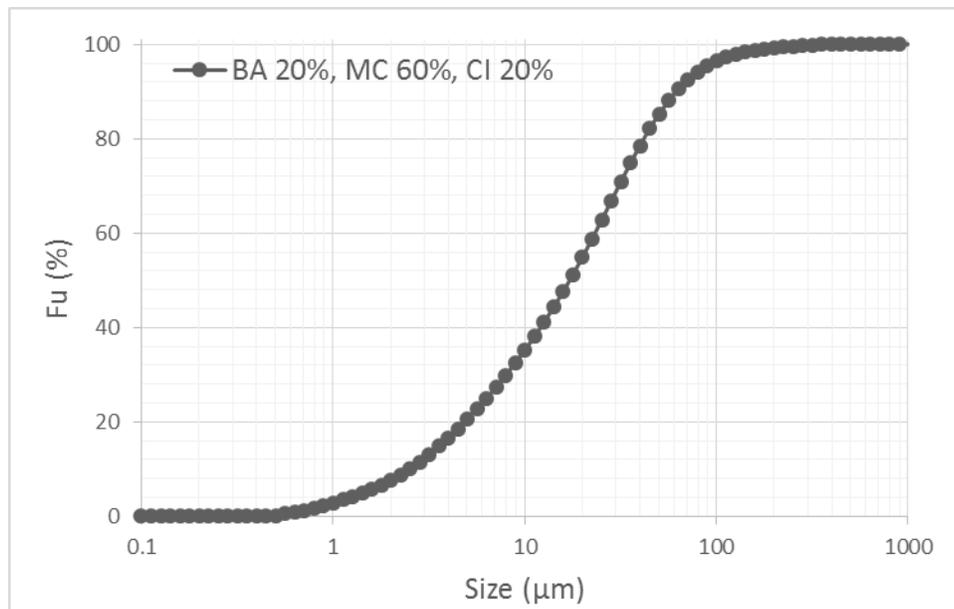
13.52 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA2 CC2 CI6



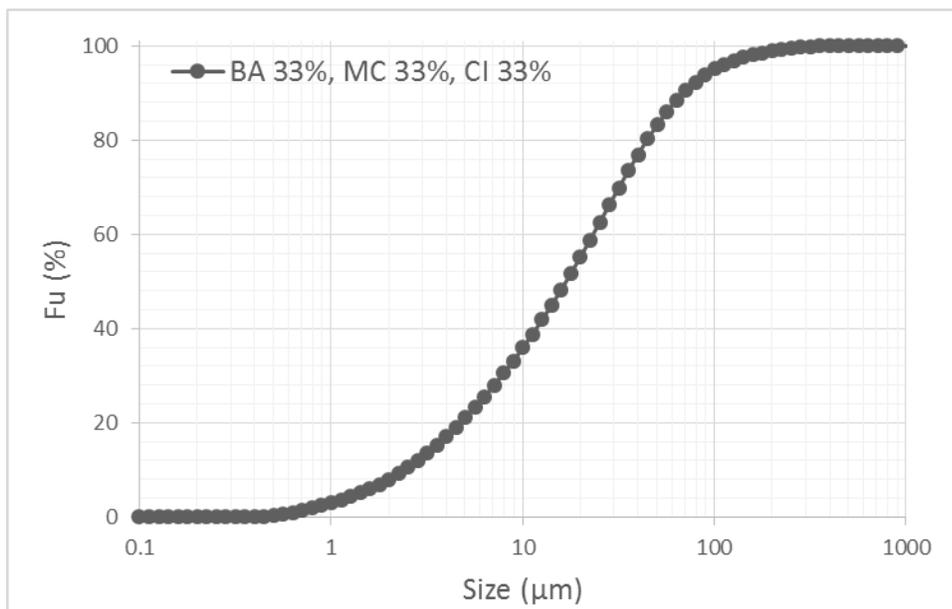
13.53 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA6 MC2 CI2



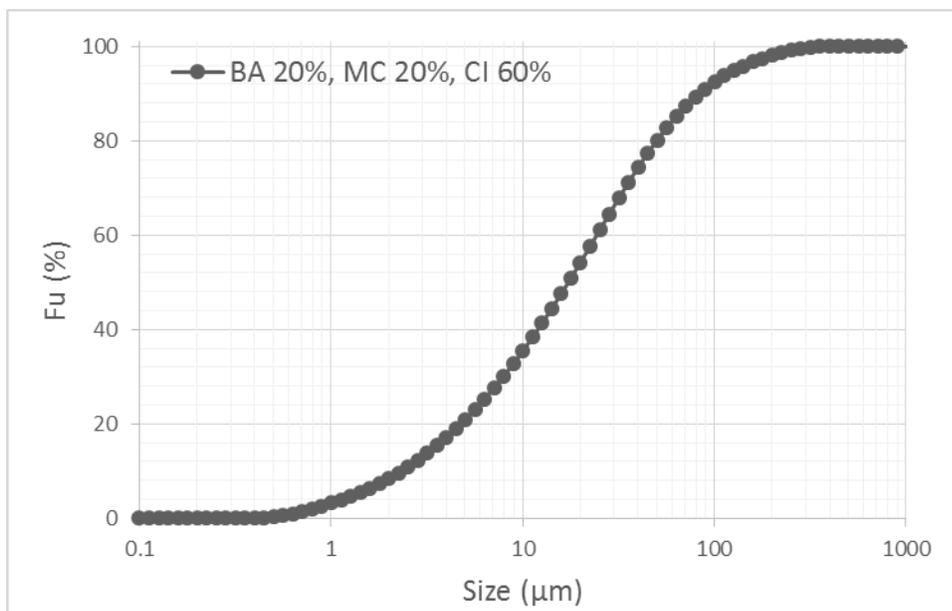
13.54 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA2 MC6 CI2



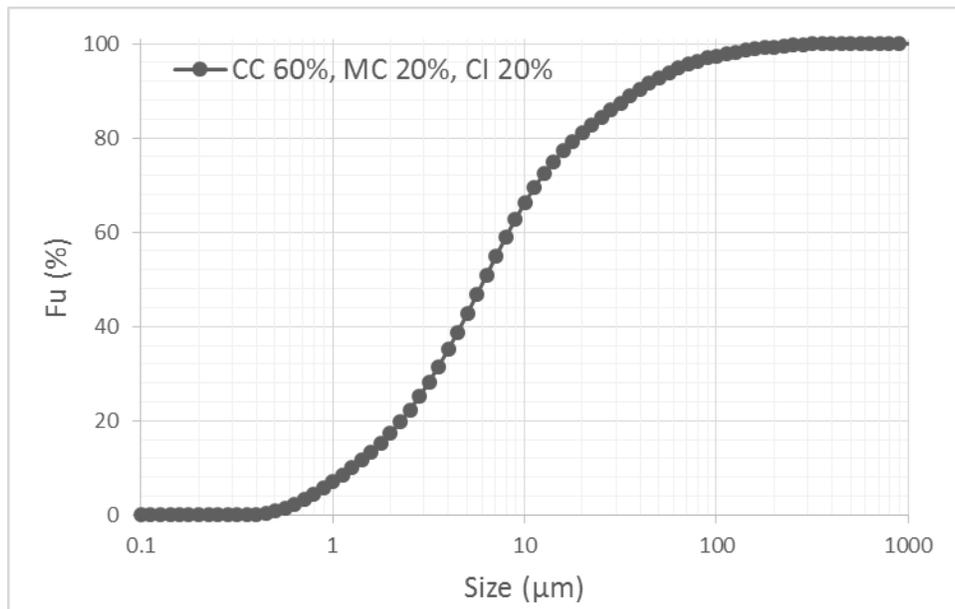
13.55 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA3 MC3 CI3



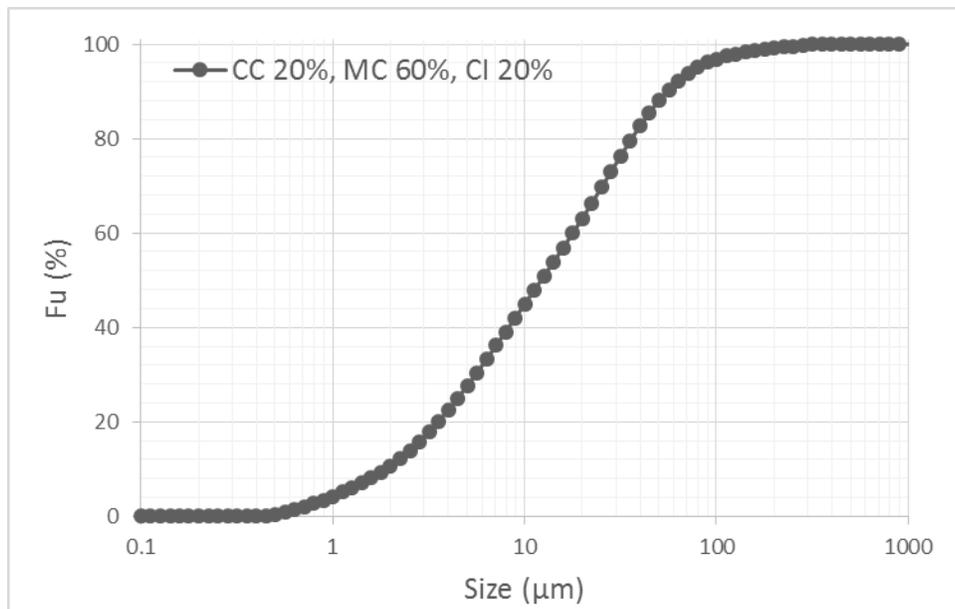
13.56 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO BA2 MC2 CI6



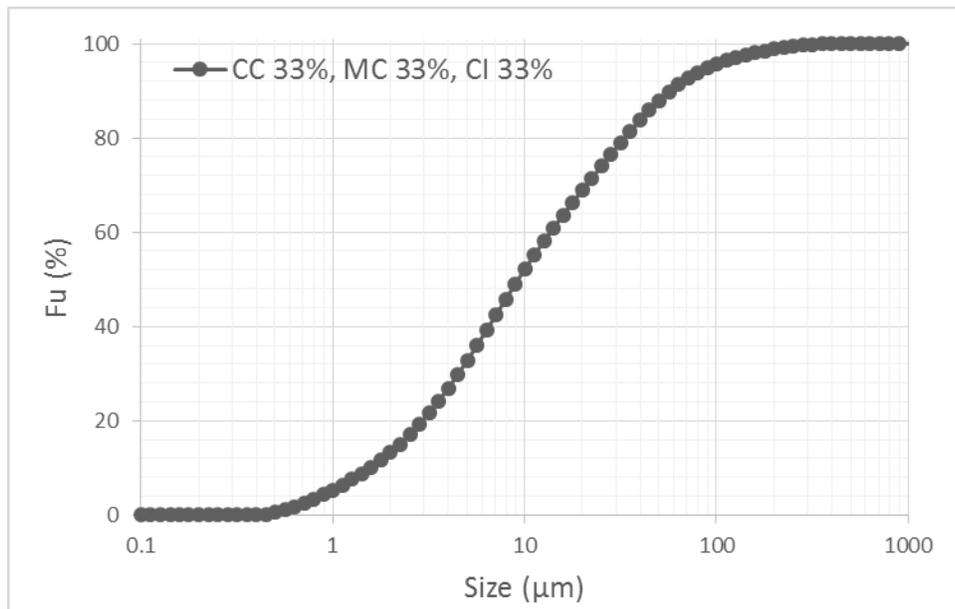
13.57 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO CC6 MC2 CI2



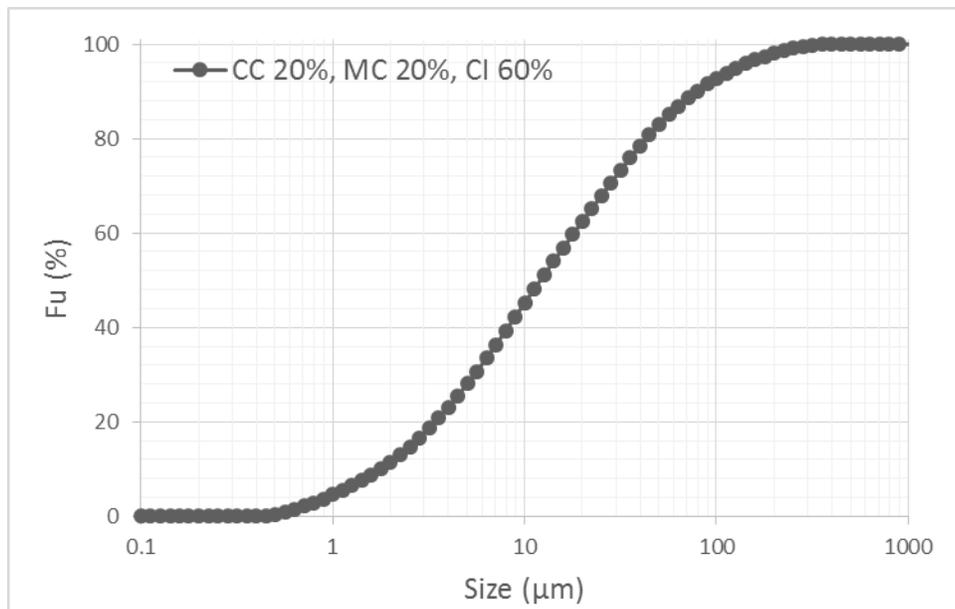
13.58 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO CC2 MC6 CI2



13.59 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO CC3 MC3 CI3



13.60 FRACCIÓN BAJO TAMAÑO CC2 MC2 CI6



14. PARÁMETROS ESCALARES

14.1 AJUSTES POLINOMIALES (TIPO PFIT)

Name	Target		Fitting		Focus		RMSE
PFIT 1380 d	Troughs	Minima	1370	1400	1375	1385	0
PFIT 1380 wvl	Troughs	Minima	1370	1400	1375	1385	0
PFIT 2200 d	Troughs	Minima	2195	2215	2198	2213	0
PFIT 2200 wvl	Troughs	Minima	2195	2215	2198	2213	0
PFIT 8540 d	Peaks	Maxima	8400	8586	8500	8556	0
PFIT 8540 wvl	Peaks	Maxima	8400	8586	8500	8556	0
PFIT 9613 d	Peaks	Maxima	9560	9680	9590	9632	0
PFIT 9613 wvl	Peaks	Maxima	9560	9680	9590	9632	0

Name	Depth	Area	BkSlope	Local Continuum	
PFIT 1380 d	0	0	0	Hull envelope	Divide
PFIT 1380 wvl	0	0	0	Hull envelope	Divide
PFIT 2200 d	0	0	0	Hull envelope	Divide
PFIT 2200 wvl	0	0	0	Hull envelope	Divide
PFIT 8540 d	0	0	0	Hull envelope	Divide
PFIT 8540 wvl	0	0	0	Hull envelope	Divide
PFIT 9613 d	0	0	0	Hull envelope	Divide
PFIT 9613 wvl	0	0	0	Hull envelope	Divide

Name	Layer	Polynomial Order	Root	Result
PFIT 1380 d	HullQuot	8	Auto	Relative Depth
PFIT 1380 wvl	HullQuot	8	Auto	Wavelength at Minimum
PFIT 2200 d	HullQuot	4	Auto	Relative Depth
PFIT 2200 wvl	HullQuot	4	Auto	Wavelength at Minimum
PFIT 8540 d	Base Refl.	5	Auto	Relative Height
PFIT 8540 wvl	Base Refl.	5	Auto	Wavelength at Maximum
PFIT 9613 d	Base Refl.	5	Auto	Relative Height
PFIT 9613 wvl	Base Refl.	5	Auto	Wavelength at Maximum

14.2 ESCALARES DESDE UN PERFIL ESPECTRAL (TIPO PROFILE)

Name	Spectral Layer	Smoothing	Centre wavelength
Area Abs. 2300-2500	HullQuot	None	2394
1910 d	HullQuot	None	1910
1910 w	HullQuot	None	1910

Name	Radius	Local continuum removal	Profile type	Fit
Area Abs. 2300-2500	100		Relative Absorption Area	7 Channels
1910 d	10		Relative Absorption Depth	7 channels
1910 w	10		Wavelength at minimum	7 channels

14.3 ESCALARES A PARTIR DE OPERACIONES MATEMÁTICAS (TIPO ARITH)

Name	Scalar A		Operation	Scalar B		Output
PFIT 1380 d*10	Plain	PFIT 1380 d*10	Times	Constant	10	Plain
MC scalar 2	Plain	Area Abs. 2300-2500	Minus	Plain	PFIT 1380 d*10	Plain

15. DATOS REÓMETRO

Measuring System Data Sheet

Messsystem-Datenblatt



Anton Paar
GERMANY

CC39/S- SN13503

Item / Artikel: 81055

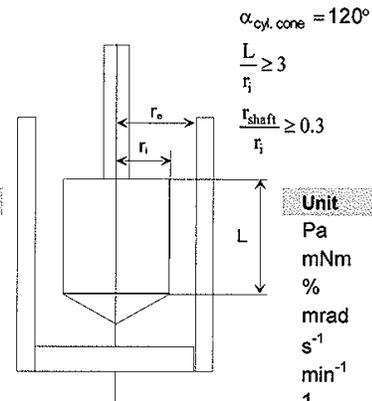
Geometry Data	Geometrie-Daten	SN	Dimension
Measuring Bob, Diameter, D_i	Messkörper, Durchmesser, D_i	13503	39.005
Measuring Bob, Gap Length, L	Messkörper, Länge Messspalt, L		59.825
Measuring Cup, Diameter, D_e	Messbecher, Durchmesser, D_e	0	42.000

Description	Beschreibung
Coaxial cylinder measuring system Standard: ISO 3219 ($\delta \leq 1,2$)	Koaxiales Zylindermesssystem Norm: ISO 3219 ($\delta \leq 1,2$)

$$\gamma = \frac{1}{10} \cdot \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} \cdot \varphi ; \quad \delta = \frac{r_e}{r_i}$$

$$\dot{\gamma}_{rep} = \frac{\pi \cdot n}{30} \cdot \frac{1 + \delta^2}{\delta^2 - 1} ; \quad \omega = \frac{2\pi}{60} \cdot n$$

$$\tau_{rep} = \frac{1 + \delta^2}{2000 \cdot \delta^2} \cdot \frac{M}{2\pi L \cdot r_i^2 \cdot C_L}$$



Variable	Variable	Unit
τ ...shear stress	τ ...Schubspannung	Pa
M...torque	M...Moment	mNm
γ ...strain	γ ...Deformation	%
φ ...deflection angle	φ ...Auslenkwinkel	mrاد
$\dot{\gamma}$...shear rate	$\dot{\gamma}$...Scherrate	s ⁻¹
n...speed	n...Geschwindigkeit	min ⁻¹
δ ...radius ratio	δ ...Radienverhältnis	1
R_i / R_e ...internal/external cylinder radius	R_i / R_e ...innerer/äußerer Zylinderradius	m
ω ...angular velocity	ω ...Winkelgeschwindigkeit	s ⁻¹
C_L ...end effect correction factor	C_L ...Stirnflächen-Faktor	1

Dimensions	Abmessungen	
Measuring Bob, Radius, r_i	Messkörper, Radius, r_i	19.503 mm
Measuring Cup, Radius, r_e	Messbecher, Radius, r_e	21.000 mm
Ratio of Radii ⁽²⁾ δ	Radienverhältnis ⁽²⁾ δ	1.0768
Gap Length ⁽²⁾ L	Länge, Messspalt ⁽²⁾ L	59.825 mm
Cone Angle ⁽²⁾	Kegelwinkel ⁽²⁾	120 °
Measuring Gap ⁽²⁾	Messspalt ⁽²⁾	1.498 mm
End Effect Correction Factor ⁽⁴⁾ C_L	Stirnflächen-Faktor ⁽⁴⁾ C_L	1.10

Geometry Data	Geometriedaten	
Approximate Sample Volume	Probenmenge, ungefähr	55.96 ml
Active Length (Check Length)	Aktive Länge (Prüflänge)	143.80 mm
Positioning Length	Positionierungslänge	72.50 mm

Conversion Factors	Umrechnungsfaktoren	
Conversion Factor C_{SS} ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	Umrechnungsfaktor C_{SS} ⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾	5.9214 Pa / mNm
Conversion Factor C_{SR} ⁽²⁾⁽³⁾	Umrechnungsfaktor C_{SR} ⁽²⁾⁽³⁾	1.4181 s ⁻¹ / min ⁻¹
(1) conversion factor C_{SS} for Rheoplus & US200	(1) Umrechnungsfaktor C_{SS} für Rheoplus & US200	
(2) acc. to the standard	(2) normgerecht	
(3),(4) see next page	(3),(4) siehe nächste Seite	

Measuring System Data Sheet

Messsystem-Datenblatt

CC39/S - SN13503

Item / Artikel: 81055



Anton Paar
GERMANY

...Additional Data	...Zusätzliche Daten
Conversion Factor C_{SD}	Umrechnungsfaktor C_{SD} 1.3542 % / mrad
Conversion Factor C_{SD} [SI-Unit]	Umrechnungsfaktor C_{SD} [SI-Einheit] 13.5419 1 / rad
Conversion Factor C_{SS} [SI-Unit]	Umrechnungsfaktor C_{SS} [SI-Einheit] 5921.4 Pa / Nm
Conversion Factor [relative] C_{SS} ⁽⁵⁾	Umrechnungsfaktor C_{SS} [relativ] ⁽⁵⁾ 0.296069 Pa / ° / ∞
Conversion Factor C_{SR} [SI-Unit]	Umrechnungsfaktor C_{SR} [SI-Einheit] 85.0860 s ⁻¹ / s ⁻¹
-> Calculated Values	-> berechnete Werte
(5) Conversion Factor C_{SS} for US200 < V2.10	(5) Umrechnungsfaktor C_{SS} für US200 < V2.10

Calculation / Conversion Factors	Berechnung / Umrechnungsfaktoren
C_{SS}	$\tau = C_{SS} \cdot M$
C_{SD}	$\gamma = C_{SD} \cdot \varphi$
C_{SR}	$\dot{\gamma} = C_{SR} \cdot n$

Recommended for	Empfohlen für
low viscous fluids > 50 mPas	niedrigviskose Fluids > 50 mPas

(3) Surface Treatment	(3) Oberflächenbehandlung
Calculated under the assumption of a plain surface. Cylinders with special surface treatment are relative cylinders. For absolute viscosity measurements it is requested to perform a calibration measurement using a viscosity standard similar to the sample viscosity.	erechnet unter der Annahme einer planen Oberfläche. Zylinder mit spezieller Oberflächenbehandlung sind relative Zylinder. Um absolute Messungen durchführen zu können empfehlen wir die Eichung mit einem Viskositätsstandard entsprechend der zu messenden Proben.

Calibration	Kalibrierung
The measuring system can be calibrated by changing the calibration factor of the measuring system properties (Tools/Setup/Device and accessories/Measuring System/Edit/...) The calibration factor is available with Rheoplus V3.21 or any higher. Before calibration it is strongly recommended to reset the original Toolmaster data by pressing the button "calculate values" Suitable templates for calibration can be found in the RheoManager in the "Support" tab.	Die Messsysteme können durch die Veränderung des Kalibrierfaktors in den Messsystemeinstellungen (Extras/Einrichten/Gerät und Messsysteme/Bearbeiten/...) kalibriert werden. Der Kalibrierfaktor ist ab Rheoplus V3.21 verfügbar Vor der Kalibrierung sollten unbedingt die original Toolmasterdaten durch Betätigen des Buttons "Werte berechnen" wieder hergestellt werden! Sinnvolle Vorlagen können im Rheomanager in der Rubrik "Support" gefunden werden.

(4) Empirical value	(4) Empirischer Wert
$C_L = 1,1$ for newtonian liquids and up to 1,2 for shear thinning liquids. For pseudo-plastic liquids at low shear rates C_L is up to 1,28.	$C_L = 1,1$ für newtonsche Flüssigkeiten und bis 1,2 bei scherverdünnenden Flüssigkeiten. Bei pseudo-plastischen Flüssigkeiten im unteren Scherratenbereich bis 1,28.