



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA,
BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

USO DE MODIFICADORES REOLÓGICOS PARA OPTIMIZAR LA SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO EN EL ESPESADOR DE RELAVES EN PASTA DEL PROCESO PRODUCTIVO DEL ORO Y PLATA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL QUÍMICO E INGENIERO CIVIL
EN BIOTECNOLOGÍA

JAVIER IGNACIO OLAVE RIQUELME

PROFESOR GUÍA:

JUAN QUIJADA ABARCA

PROFESOR CO-GUÍA:

HUMBERTO PALZA CORDERO

COMISIÓN:

OMAR GAETE GONZÁLEZ

El presente trabajo fue financiado por la empresa Veolia WTS Chile Ltda.

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL QUÍMICO E
INGENIERO CIVIL EN BIOTECNOLOGÍA
POR: JAVIER IGNACIO OLAVE RIQUELME
FECHA: 2024
PROFESOR GUÍA: JUAN QUIJADA ABARCA

USO DE MODIFICADORES REOLÓGICOS PARA OPTIMIZAR LA SEPARACIÓN SÓLIDO-LÍQUIDO EN EL ESPESADOR DE RELAVES EN PASTA DEL PROCESO PRODUCTIVO DEL ORO Y PLATA

Debido a la crisis hídrica que existe en la actualidad es fundamental optimizar el consumo de agua en las industrias. En particular, la mayor pérdida de agua de la industria minera es la que está contenida en sus residuos, conocidos como relaves, los que se tratan convencionalmente en espesadores gravitacionales. La principal limitación de este proceso es que, ante una mayor recuperación de agua, incrementan las propiedades reológicas del relave, pudiendo embancar el espesador deteniendo el proceso productivo.

El objetivo del presente trabajo es estudiar la factibilidad de aumentar la recuperación de agua del proceso de espesamiento de relaves del proceso productivo del oro y la plata de Minera Florida con el uso de modificadores reológicos y floculantes, estudiando las propiedades reológicas del relave espesado mediante análisis a escala de laboratorio.

Mediante el método de la probeta graduada y análisis reológicos se determinó, en base a las variables de la velocidad de sedimentación, turbidez del agua, compactación y propiedades reológicas del relave espesado, de siete floculantes aquel que mejoraba en mayor grado el rendimiento del espesamiento para luego determinar, de los cuatro modificadores reológicos el que más acrecienta el rendimiento logrado por el floculante en función de sus respectivas dosis

Se demostró, con un nivel de confianza del 95%, que la mezcla de un floculante no iónico con otro de carga aniónica del 40% molar de medio y alto peso molecular, respectivamente, en una razón másica de 1:1 a una dosis de 20 [g/t], en comparación con el uso de los productos utilizados por Minera Florida en el proceso, aumenta la velocidad de sedimentación hasta en un 11% y la recuperación de agua desde un 0,84% al 1,64%, lo que equivale a una recuperación máxima de $2,0 \left[\frac{\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{h}} \right]$, además de disminuir la turbidez del agua en un 9% y mantener las propiedades reológicas del relave.

En cuanto al uso de modificadores reológicos se concluye que ninguno en particular logró mejorar el rendimiento del proceso de espesamiento de relaves logrado por los floculantes estudiados, puesto que el modificador reológico MRorg2 si bien aumenta la velocidad de sedimentación hasta en un 63%, también aumenta la turbidez hasta en un 40%, manteniendo la compactación y las propiedades reológicas. En cambio, el modificador reológico inorgánico (MRinorg) si bien mantiene la compactación y la turbidez, disminuye la velocidad de sedimentación hasta en un 42% y aumenta la viscosidad hasta en un 44%. Respecto de los floculantes ensayados, se concluye que deben tener una carga aniónica molar entre el 10 y 20%, además de un peso molecular medio para optimizar el proceso de espesamiento de relaves en Minera Florida.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a todas las personas que me acompañaron en este proceso universitario, comenzando por mi padre Sergio, mi madre Andrea y mis hermanos Joaquín y Jorge que me ayudaron, aguantaron y aconsejaron constantemente, ya que sin ellos no podría ser lo que soy actualmente. A mis abuelos, que me apoyaron siempre y enseñarme aspectos de la vida que solo te los da la experiencia.

También, agradecer a mis amigos por los momentos que hemos compartido y por la ayuda que me otorgaron a lo largo de mis años de estudio en la universidad Mito, Juaca, Pablito, Basti, Alexis, Laura y mis amigos de especialidad, Max, Martín, Mallen y Seba.

A Guillermo Muñoz y Solange que me dieron alojamiento para que pudiera desarrollar mi tercera práctica profesional en Punta Arenas, a Jeremías por la compañía y en especial a Bastián que me dio su pieza por dos meses.

A Delia y María José por recibirme de una manera impecable en la pensión de Alhué. Sin duda la mejor pensión de la comuna.

A mis compañeros de oficina de Veolia por volver agradables los momentos de trabajo. Ayrón, Edison, Natalia, Pablo, Lou, Rodrigo y Christopher.

Respecto de mi formación profesional, agradecer a Laura Börgel, Yerko, Giovanni, Alejandra, Gustavo, Víctor, Robinson, Catalina, Reinaldo, Eduardo Retamales, José Farías, Manuel Dellarossa, Jaime Caro, Gabriela Zúñiga, Gonzalo Montes, José Sanhueza, Víctor, Darío Morales, Manuel Aguirre, Juan Carlos, Pablo Valdivia, Juan Francisco, Carlos Paredes, Omar Gaete y a mis profesores de la universidad. Hacer mención especial a Alejandra Teneo y Giovanni que me ayudaron bastante durante mi carrera profesional en todo sentido, además de Omar Gaete, que me ayudó y enseñó durante el período de mi memoria en la empresa Veolia.

A Pedro Ramírez y Ulises por permitirme trabajar en el liceo Alberto Blest Gana, a Claudia, Laura, José por la ayuda, consejos y enseñanzas que me otorgaron.

Agradecer a mis amigos personales que me apoyaron durante toda la carrera, Juaco, Yosep, Nico, Tomi, Ignacio Rodríguez, Ignacio Gómez, Aldo, Myweather y Jaime.

También agradecer la motivación que me dio Malala a lo largo de los años.

A toda la gente de la fundación Paso a Paso que me acompañó y dio la oportunidad para poder enseñar durante 2 años y medio.

Agradecer a mi profesor guía Raúl Quijada y a Humberto Palza, por compartir sus conocimientos, orientación y tiempo.

Finalmente, agradecer a Dios, que permitió que todo se desarrollara en los tiempos que se presentaron.

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción	1
1.1. Escasez hídrica	1
1.2. Industria minera	1
1.3. Relaves	2
1.3.1. Producción de relaves	2
1.3.2. Tipo y composición de los relaves	2
1.4. Pérdidas de agua en la industria minera	3
1.5. Recuperación de agua en la industria minera	4
1.5.1. Estado del arte	5
1.6. Proceso productivo del oro	7
1.7. Minera Florida	8
1.7.1. Proceso productivo	9
1.8. Alcances del trabajo	10
2. Marco teórico	11
2.1. Reología	11
2.1.1. Comportamiento de los fluidos independiente del tiempo	12
2.1.2. Viscosidad	13
2.1.3. Radio de giro	14
2.1.4. Radio hidrodinámico	16
2.1.5. Yield stress	17
2.1.6. Módulo de almacenamiento y de pérdida	19
2.1.7. Dimensión fractal masa-longitud	21
2.1.8. Efecto del shear-banding	21
2.2. Factores que afectan la reología de los fluidos	22
2.2.1. Naturaleza del fluido	22
2.2.2. Tamaño de partícula	23
2.2.3. Distribución granulométrica	23
2.2.4. Forma de las partículas	24
2.3. Composición de los relaves	25
2.3.1. Caolinita	27
2.3.2. Montmorillonita	28
2.4. Potencial zeta	29
2.5. Coagulación	31
2.5.1. Mecanismo de carga-parche	33
2.5.2. Mecanismo por el aumento de la concentración de iones	34
2.6. Modificadores reológicos	34
2.7. Floculación	36
2.7.1. Floculación por puenteo	36
2.7.2. Floculación por enlace salino	38
2.7.3. Floculación por barrido	38
2.7.4. Aspectos generales de la floculación	39
2.7.5. Rotura y reconfiguración de los flóculos	40
2.8. Floculantes	40
2.8.1. Floculantes no iónicos	41
2.8.2. Floculantes aniónicos	41
2.9. Espesamiento de relaves con modificadores reológicos y floculantes	43

2.9.1.	Velocidad de sedimentación	43
2.9.2.	Claridad del agua recuperada	44
2.9.3.	Concentración de sólidos del relave	45
2.10.	Factores que afectan la coagulación y floculación:.....	46
2.10.1.	pH.....	46
2.10.2.	Peso molecular del floculante.....	48
2.10.3.	Sales disueltas en el medio	49
2.10.4.	Velocidad de cizallamiento o de corte	49
2.10.5.	Dosis de los modificadores reológicos y floculantes.....	50
2.10.6.	Concentración inicial de sólidos suspendidos (Cp)	51
2.10.7.	Temperatura	52
2.10.8.	Tamaño de partícula	53
2.11.	Preparación de polímeros	54
2.11.1.	Envejecimiento de la solución.....	54
2.12.	Pruebas de sedimentación	55
2.13.	Reometría	56
2.14.	Espesadores	57
2.15.	Transporte de relaves a través de tuberías.....	59
2.16.	Validación estadística de resultados	60
2.16.1.	Coefficiente de determinación	60
2.16.2.	Test de hipótesis.....	60
2.16.3.	Prueba t de Student.....	60
3.	Datos operacionales de Minera Florida.....	62
3.1.	Flujo másico de relave al espesador de pasta	62
3.2.	Granulometría de los relaves	62
3.3.	Gravedad específica del sólido	63
3.4.	Coagulante utilizado por Minera Florida	63
3.5.	Floculantes utilizados por Minera Florida.....	63
3.6.	Mineralogía	64
3.7.	Torque del espesador	64
3.8.	Velocidad angular de las rastras del espesador	64
4.	Caracterización de los productos a estudiar	65
4.1.	Floculantes	65
4.2.	Modificadores reológicos	66
5.	Metodología	67
5.1.	Diseño experimental	67
5.2.	Materiales y métodos.....	67
5.2.1.	Preparación de las probetas.....	67
5.2.2.	Prueba de sedimentación	68
5.2.3.	Cálculo de la velocidad de sedimentación.....	69
5.2.4.	Cálculo de la concentración de sólidos a las 2 horas	69
5.2.5.	Registro de turbidez a las 2 horas	69
5.2.6.	Registro de pH del sobrenadante	70
5.2.7.	Descarte de sobrenadante y pretratamiento reológico	70
5.2.8.	Análisis reológico.....	70
5.2.9.	Cálculo de viscosidad	71
5.3.	Validación estadística de los resultados	72
5.4.	Análisis de resultados	72

6. Objetivo	74
6.1. Objetivo general.....	74
6.2. Objetivos específicos.....	74
7. Resultados y discusiones	75
7.1. Ensayos con el floculante 10FM a diferentes dosis.....	77
7.2. Ensayos con la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a 20 [g/t].....	90
7.3. Recuperación de agua.....	94
8. Conclusiones	96
9. Bibliografía	98
Anexo	103
Anexo A. Tecnología TTD.....	103
Anexo B. Composición mineralógica del material a procesar.....	104
Anexo C. Composición elemental del relave a procesar.....	107
Anexo D. Granulometría del relave en pasta.....	109
Anexo E. Dosis de coagulante SNF.....	111
Anexo F. Totalidad de los productos químicos a ensayar.....	112
Anexo G. Materiales y métodos.....	114
Anexo G.1. Densidad del agua.....	114
Anexo G.2. Preparación de solución madre y de trabajo de polímeros en forma de polvo.....	115
Anexo G.3. Preparación de solución madre y de trabajo de polímeros en forma de líquido o emulsión.....	119
Anexo G.4. Toma de muestra.....	121
Anexo G.5. Dilución de la muestra.....	122
Anexo G.6. Preparación de las probetas.....	126
Anexo G.7. Prueba de sedimentación.....	127
Anexo G.8. Cálculo de velocidad de sedimentación.....	129
Anexo G.9. Cálculo de la compactación a las 2 horas y final.....	129
Anexo G.10. Análisis reológico.....	130
Anexo G.11. Memoria de cálculo de la viscosidad.....	133
Anexo H. Cálculo de la ganancia de recuperación de agua.....	135
Anexo I. Error de la medición de turbidez (colorímetro DR890).....	137
Anexo J. Lectura de gráficos.....	139
Anexo K. Resultados.....	140
Anexo K.1. Variación de la concentración inicial de sólidos del relave.....	140
Anexo K.2. Ensayos únicamente con floculantes.....	143
Anexo K.3. Ensayos con modificadores reológicos.....	153
Anexo L. Curvas reológicas y regímenes elásticos.....	164
Anexo L.1. Curvas reológicas del relave espesado de la muestra 1.....	164
Anexo L.2. Curvas reológicas del relave espesado de la muestra 2.....	172
Anexo L.3. Curvas reológicas del relave espesado de la muestra 3.....	177
Anexo L.4. Curvas reológicas del relave espesado de la muestra 4.....	182
Anexo M. Pruebas estadísticas de t-student de contraste de medias.....	186
Anexo M.1. Ensayos con el floculante 10FM 20 [g/t].....	186
Anexo M.2. Ensayos con el floculante 10FM 30 [g/t].....	195
Anexo M.3. Ensayos con la mezcla de floculantes (00FM+40FA) 20 [g/t].....	210
Anexo N. Totalidad de ensayos de reproducibilidad.....	217
Anexo N.1. Ensayos únicamente con floculantes.....	217

Anexo N.2. Efecto de los modificadores reológicos	221
Anexo O. Pruebas estadísticas de t-student auxiliares de las pruebas de reproducibilidad.....	228
Anexo O.1. Ensayos con floculantes de la muestra 1 de relave	228
Anexo O.2. Ensayos con floculantes de la muestra 2 de relave	230
Anexo O.3. Ensayos con floculantes de la muestra 3 de relave	233
Anexo O.4. Efecto de modificadores reológicos en la muestra 1 de relave ...	235
Anexo O.5. Efecto de modificadores reológicos en la muestra 3 de relave ...	240
Anexo O.6. Efecto de modificadores reológicos en la muestra 4 de relave ...	243
Anexo P. Datos experimentales	250
Anexo P.1. Ensayos de reproducibilidad con la muestra 1 de relave	250
Anexo P.2. Ensayos de reproducibilidad con la muestra 2 de relave	252
Anexo P.3. Ensayos de reproducibilidad con la muestra 3 de relave	254
Anexo P.4. Ensayos de reproducibilidad con la muestra 4 de relave	256
Anexo P.5. Condiciones muestra 5 a 12	258
Anexo Q. Cantidad de ensayos realizados	259
Anexo Q.1. Floculantes y sus mezclas	259
Anexo Q.2. Modificadores reológicos	260
Anexo Q.3. Totalidad de ensayos	261

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Escasez hídrica

Según Arjmand et al. (2019) la demanda mundial de agua es cada vez mayor debido al aumento de la población mundial, los cambios en los patrones de consumo y el desarrollo de industrias. Además, se prevé que aproximadamente la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua en 2025 (Quist-Jensen et al., 2019).

El agua en los últimos 55 años ha sido vista como un recurso escaso para la humanidad, en la medida que su consumo ha ido creciendo de forma insostenible en relación con su disponibilidad (Santibáñez, 2018). En particular, Chile hacia el año 2025 aparece dentro de los 30 países con mayor riesgo hídrico en el mundo (FUNDACIÓN CHILE, 2018). Además, según Fuentes et al. (2021) Chile utilizó el puesto 24 en una clasificación de países con estrés hídrico para 2040. La investigación del Consejo Minero (2020) indica que el mayor usuario de agua en Chile es el sector agropecuario, con un 82% del total nacional, seguido por el 8% en agua potable, el uso industrial que alcanza un 7% y finalmente el sector minero con un 3%. Si bien el sector minero es la industria que menos consume agua a nivel nacional, este se ubica en las zonas de mayor escasez de agua, como lo es en el norte de Chile, por lo que la optimización de los sistemas de recuperación de agua es de vital importancia.

Es por lo anterior que, según Leiva et al. (2021), el desarrollo tecnológico en las industrias, debido a su alta capacidad de procesamiento, es fundamental para mejorar el reciclaje y el consumo de agua para disminuir los impactos sociales y ambientales.

1.2. Industria minera

Las regiones central y septentrional de Chile son económica y socialmente importantes debido a la presencia de explotaciones agrícolas y mineras (Aitken et al., 2016). Con respecto a la industria minera, la Tabla 1.1 demuestra que Chile es potencia mundial en el desarrollo de la minería, siendo el mayor productor de cobre a nivel mundial. Asimismo, la minería representa el 10% del Producto Interno Bruto de Chile (Consejo Minero, 2020).

Ranking de Chile como productor a nivel global	Mineral	Producción anual mundial [%]	Producción en 2019 [ton]
1°	Cobre	29	5.800.000
2°	Molibdeno	18,9	55.000
5°	Plata	4,4	1189
14°	Oro	1,1	33

Tabla 1.1. Posición de Chile como productor de minerales a nivel global con su respectiva producción (Consejo Minero, 2020).

Conforme a lo expuesto por el Consejo Minero de Chile (2020), el 41% y 30% del abastecimiento de agua para la minería proviene de fuentes subterráneas y superficiales, respectivamente, el 23% del mar y un 6% de terceros. Además, el 75% del agua usada en los procesos mineros es recirculada. Por esto, uno de los objetivos consiste en

recuperar la mayor cantidad de agua para minimizar la entrada de agua fresca al proceso (C. Wang et al., 2014). Adicionalmente, la demanda de agua depende de la ley o concentración del mineral deseado en el yacimiento, ley que va disminuyendo en función del tiempo, lo que genera un mayor consumo de agua para producir la misma cantidad de mineral (Lewinsohn 2017, n.d.).

1.3. Relaves

En la industria minera se producen residuos, hasta ahora, sin valor económico, conocidos como relaves, que deben eliminarse de forma aceptable desde el punto de vista medioambiental y económico (Taylor et al., 2002). Los relaves están compuestos por pequeñas cantidades de minerales o metales valiosos, productos químicos orgánicos e inorgánicos, mineral no valioso o ganga y agua (Adiansyah et al., 2015).

Según Cacciuttolo et al (2023), existen diferentes definiciones de los residuos mineros dependiendo de la disciplina profesional implicada en la gestión de estos. Por ejemplo, desde el punto de vista metalúrgico, los relaves mineros se definen como el material de baja ley del metal valioso, es decir, la ganga que se obtiene del proceso de flotación y lixiviación. Conforme a la disciplina del área hidráulica, los relaves se definen como una mezcla sólido-líquido con una concentración de sólidos determinada en peso asociada a un comportamiento hidráulico viscoso con reología de tipo newtoniana o no newtoniana.

1.3.1. Producción de relaves

Conforme a lo expuesto en el trabajo de Adiansyah et al (2015), en 2010 la industria minera global generó 14.000 millones de toneladas de relaves. Por otro lado, en Chile se depositan cerca de 537 millones de toneladas anuales de relaves (SERNAGEOMIN, 2023).

1.3.2. Tipo y composición de los relaves

Existen distintos tipos de relaves que se puede categorizar en función de su tratamiento y composición másica de agua, los principales se describen en la Tabla 1.2. Cabe mencionar que el sólido hace referencia a la ganga y al mineral valioso.

Tipo de relave	Sólido	Agua	Otros compuestos	Tratamiento
Convencional	$C_p < 55\%$	$45\% < H_2O$	Trazas	No se trata
Espesado	$56\% < C_p < 65\%$	$35\% < H_2O < 44\%$	Trazas	Espesamiento
Pasta	$66\% < C_p < 75\%$	$25\% < H_2O < 34\%$	Trazas	Espesamiento
Filtrado	$80\% < C_p$	$H_2O < 20\%$	Trazas	Filtración

Tabla 1.2. Tratamiento y composición másica general de los distintos tipos de relaves (Rumbo Minero, 2017) (SERNAGEOMIN, 2023).

Según Williams (2007) la arcilla es un contaminante mineral común y, debido a su bajo tamaño de partícula, de aproximadamente 10 [μm] de diámetro, la recuperación de agua de los efluentes mineros desechados es problemática. Es por lo anterior que la eficiencia

del proceso de separación sólido-líquido a escala industrial suele ser menor ante la abundancia de mineral arcilloso en los relaves.

El relave minero, además de contener sólido mineral y agua, puede tener ácido, reguladores de pH, depresores, colectores, espumantes, floculantes, entre otros compuestos que se agregan a lo largo de todo el proceso previo, ya sea en molienda, flotación y lixiviación. En la Tabla 1.3 se presentan los agentes metalúrgicos típicos que se pueden encontrar en los relaves mineros de oro y plata.

Clasificación	Ejemplo	Cantidad usada [g/ton de relave]
Ácidos	Ácido sulfúrico (H_2SO_4)	500-2500
Reguladores de pH	Carbonato de sodio	550-3500
	Hidróxido de calcio	200-800
Depresores, activadores y dispersantes	Sulfato de zinc	50-2000
	Sulfato de sodio	50-3000
	Dióxido de azufre	50-850
Colectores	Aminas	30-300
	X-Isopropilxantato	10-30
	Petróleo	10-100
Espumantes	Aceite de pino	5-25
	Espumante HBTA	25-100
Floculantes	Floculante de medio peso molecular	10-25

Tabla 1.3. Agentes metalúrgicos típicos presentes en los relaves de minas de oro y plata (Cacciuttolo et al., 2023).

1.4. Pérdidas de agua en la industria minera

De acuerdo con Valencia et al. (2018) la mayor pérdida de agua de los procesos mineros es la que está contenida en los relaves. En general, los relaves suelen contener una concentración másica de agua sobre un 30%, por lo que dicha agua se pierde cuando estos desechan en el depósito de relaves. Según Wels y Robertson (2003), el agua se pierde debido a distintos fenómenos:

- Por atrapamiento. Se refiere al agua que está retenida capilarmente en los microporos de la estructura sólida del relave (Valencia Camilo et al., 2018).
- Por evaporación. Normalmente, en los depósitos de relave se forman lagunas de agua (Figura 1.1) que se evaporan a medida que transcurre el tiempo.
- Por resaturación. Se refiere al agua retenida en los relaves cuando vuelven a absorber agua una vez deshidratados.

Conforme a lo expuesto por Wels y Robertson (2003), en general, el 52% del agua perdida es por atrapamiento, el 17% por evaporación y el 11% por resaturación y el resto es reprocesada al proceso.

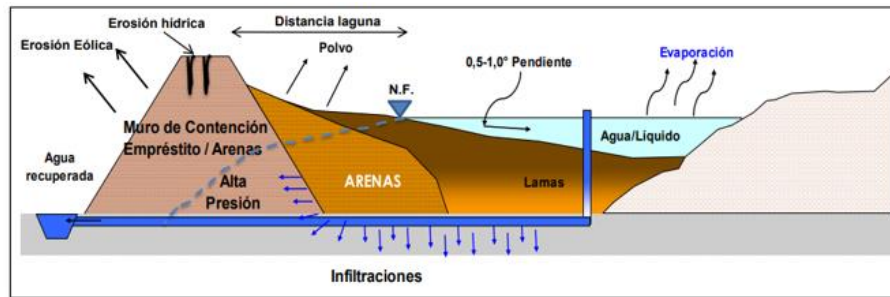


Figura 1.1. Diagrama de la estructura de un depósito de relaves convencional (Minera Florida, 2023).

1.5. Recuperación de agua en la industria minera

En la industria minera se suele recuperar agua de distintas formas. Según Castillo et al. (2023) la filtración y centrifugación se aplican cada vez más para la separación sólido-líquido de los relaves, aunque el espesamiento por gravedad sigue siendo la operación unitaria dominante. Lo anterior, conforme con Arjmand et al. (2019), se debe a que la técnica del espesamiento es reconocida como una de las tecnologías más rentables para la recuperación de agua desde los relaves mineros.

De acuerdo con Castillo et al. (2023) en muchas operaciones industriales el agua recuperada de los relaves se recircula al proceso, la que se dirige hacia los estanques de almacenamiento de agua, desde donde se distribuye hacia diferentes etapas del proceso, principalmente a la etapa de molienda.

Conforme con la literatura, el método más común para tratar la separación sólido-líquido de los relaves es por espesamiento por gravedad con el uso de floculantes y/o coagulantes, sin embargo, hay otros métodos menos comunes como la filtración y la centrifugación (Madin, 2007).

En particular, la técnica de espesamiento por gravedad convencional consiste en la incorporación de floculantes y/o coagulantes al pozo de alimentación del espesador, generando agregados de sedimentación rápida que se depositan en el fondo del equipo que se descargan a través de un cono inferior. (Leiva et al., 2021).

La técnica del espesamiento por gravedad convencional se puede optimizar mediante el uso de la tecnología Thickened Tailings Disposal (TTD), detallada en el Anexo A, la que alcanza altas concentraciones de sólido a la salida del espesador. Una de las limitaciones de este método es que se puede recuperar una cantidad restringida de agua, debido a la imposibilidad de retirar el agua atrapada entre las partículas minerales arcillosas como la montmorillonita por la naturaleza de la floculación. En consecuencia, para aumentar la deshidratación del sistema, se requiere la utilización de energías externas, normalmente en forma de energía mecánica, térmica y eléctrica (Shafaei et al., 2022).

De acuerdo con Leiva et al. (2021) el comportamiento reológico del relave o pulpa tiene una relación directa con la eficiencia de las operaciones de separación sólido-líquido en las plantas de procesamiento de minerales, como el espesamiento, el bombeo de pulpas concentradas y los depósitos de relaves. En particular, los parámetros reológicos del relave espesado aumentan exponencialmente con su densidad, generando un aumento en el torque ejercido por el espesador y dificultando su transporte hacia el depósito de relaves debido a la disminución de su velocidad, lo que provoca que el régimen de la tubería deje de ser turbulento, causando la sedimentación de las partículas en la tubería. En caso de que las propiedades reológicas aumenten significativamente, ocurrirá un atascamiento en el espesador o la obstrucción de las tuberías que transportan la pulpa espesada, deteniendo el proceso productivo.

En base a lo expuesto, otra limitación de la separación sólido-líquido de los relaves por el método de espesamiento por gravedad son las propiedades reológicas del relave espesado. En consecuencia, para obtener una mayor recuperación de agua de los relaves, es fundamental mantener controladas las propiedades reológicas del relave espesado para evitar el atascamiento del espesador y la obstrucción de las tuberías que transportan la pulpa espesada.

1.5.1. Estado del arte

Espesamiento con el uso de floculantes.

Arjmand et al. (2019) optimizó el proceso de espesamiento de relaves con el uso de floculantes de una planta productiva de hierro mediante el estudio del efecto de la dosificación de floculante en un rango de 5 a 20 [g/ton sólido], la concentración de sólidos del relave entre un 3 y 12%, el pH de 4 a 12 y la dilución de la solución de floculante desde un 0,05 a 1% en función de las variables de velocidad de sedimentación, turbidez del sobrenadante y la recuperación de agua. Sus resultados indican que el rendimiento de la floculación mejora a nivel industrial en un rango de pH de 8,1 a 11,2 y una dosis de floculante de 8 a 13 [g/ton sólido]. Dichas modificaciones redujeron el 23% del consumo total de agua, generando un ahorro de 576.000 dólares anuales, volviendo el proceso productivo más sostenible en el tiempo.

Filtración.

Shafei et al. (2022) estudió la recuperación de agua de los relaves de la minera de cobre de la ciudad iraní de Miduk por el método de la Deshidratación Mecánica Eléctrica (EDW, por sus siglas en inglés). Como resultados se obtuvo que la filtración mecánica extrajo el 63% y el 71% del agua de proceso a 3 y 6 [bar], respectivamente. Además, los experimentos con EDW recuperaron entre un 8 y un 31% más de agua adicional. En resumen, se consiguió una mayor tasa de recuperación del agua de proceso, aplicando más voltaje y aumentando al mismo tiempo el consumo de energía. Concretamente, una combinación de una presión mecánica de 3 [bar] y una tensión de 90 [V] recuperó hasta el 92% del agua total del proceso.

Por su parte, en cuanto a la filtración mecánica, el trabajo realizado por Mamghaderi et al. (2018) indica que escoger un valor óptimo para la caída de presión, espesor de la torta y la concentración de sólidos del relave mejora el reciclado de hierro en la planta industrial, mejorando la gestión de los residuos y la recuperación de agua en el tratamiento de minerales (Mamghaderi et al., 2018).

Destilación por membrana.

Jiménez y Ulbricht (2019) estudiaron la recuperación de agua desde los relaves mineros mediante destilación por membranas, que es un método en el que se aplica calor para evaporar el agua que luego pasa por membranas semipermeables reteniendo impurezas para luego condensarlo y obtener agua purificada. Como resultado obtuvieron una recuperación de agua del 40% utilizando una membrana laminada de difluoruro de polivinilideno (PVDF) con un tamaño nominal de poro de 0,2 [µm]. El coste total estimado (0,739 USD/m³ relave a procesar) demuestra que el proceso es competitivo con otros métodos de desalinización (Jimenez & Ulbricht, 2019).

Métodos compuestos.

Bourges-Gastaud et al. (2017) plantea el uso de geocompuestos electrocinéticos planares (eGCP, por sus siglas en inglés) en el método de la electroósmosis para la recuperación de agua de los relaves mineros. Como resultado se tuvo que el contenido final de sólidos en ese caso fue de aproximadamente el 70%, partiendo de un contenido inicial de sólidos del 45% utilizando una energía equivalente a 10,6 [kWh] por tonelada seca. Finalmente, se concluye que la electroósmosis fue eficaz para extraer el agua que quedaba tras la deshidratación mecánica (Bourgès-Gastaud et al., 2017).

Disposición de espesadores de relaves.

El trabajo expuesto por McMahoan (2014) demuestra que la disposición y combinación de espesadores de relaves convencionales en conjunto con espesadores de pasta permiten una reutilización del agua del proceso en un alto porcentaje, con una mejora de la capacidad y la estabilidad de la deposición de relaves en una mina de hierro de Khumani, Sudáfrica (McMahoan, 2014).

Centrifugación.

Conforme con Klug y Schwarz (2019), la tecnología de una centrifugadora decantadora aumenta hasta más del 90% la recuperación de agua de los procesos mineros debido a la separación centrífuga, que se produce a una velocidad de hasta 29.430 m/s² (3.000 × aceleración gravitatoria o g).

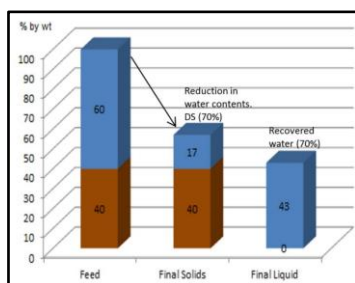


Figura 1.2. Recuperación de agua típica de la alimentación de un flujo de relave de una mina de oro (Klug & Schwarz, 2019).

Uso de modificadores reológicos.

El trabajo realizado por Leiva et al. (2021) demostró que el uso del tripolifosfato de sodio (STPP por sus siglas en inglés) en el tratamiento de relaves concentrados en caolinita, un mineral arcilloso, conlleva cambios beneficiosos en las propiedades reológicas de la pulpa para disminuir los costos energéticos en su transporte y aumentar la recuperación de agua. Del documento se puede concluir que la adición de STPP en una dosis de 0,53 [kg/ton] genera una reducción significativa de las propiedades reológicas del relave, permitiendo que una mayor cantidad de agua recuperada (Leiva et al., 2021).

En base al estudio del arte realizado, si bien existen estudios que verifican el uso de modificadores reológicos para disminuir las propiedades reológicas de distintos tipos de fluidos, entre ellos, relaves concentrados en caolinita, no se revelan evidencias del uso de modificadores reológicos en aplicaciones de la industria minera para aumentar la recuperación de agua de los relaves. En consecuencia, el uso de modificadores reológicos en la práctica industrial podría mejorar la eficacia del espesamiento de relaves, puesto que reduce la limitación de las propiedades reológicas de la pulpa en el espesador y en su transporte hacia el depósito de relaves.

1.6. Proceso productivo del oro

Conforme a lo expuesto en el trabajo de Cacciuttolo et al. (2023), el proceso de producción de oro estándar se resume en las siguientes etapas:

1. En primer lugar, se extraen los fragmentos de roca de las betas mineras con el uso de explosivos para luego cargarlos en camiones mineros hacia la etapa de chancado.
2. Luego, en la etapa de chancado se tritura la roca y se reduce su tamaño, generalmente hay dos o tres etapas de chancado. Posteriormente, el material triturado se transporta mediante cintas transportadoras o correas hasta la planta concentradora, donde se apila en un acopio cubierto para evitar la emisión de partículas. Seguidamente, la roca triturada se traslada a través de los alimentadores de delantal o de placa para iniciar la etapa de molienda.
3. En la etapa de molienda se agrega agua fresca y/o reprocesada formándose una pulpa mineral. Normalmente, hay dos etapas de molienda, la molienda en molinos

- SAG y en molinos de bolas, donde la roca se muele, logrando un tamaño de partícula mucho menor que el alcanzado en la etapa de chancado.
- Una vez finalizada la etapa de molienda, la pulpa mineral es conducida a través de bombas hidráulicas y tuberías al proceso de flotación, el que concentra el oro en aproximadamente el 10% de la masa original del mineral, además de separarlo del material pobre en mineral deseado. Posteriormente, la pulpa concentrada se envía hacia la lixiviación con cianuro y la pulpa pobre en oro o relave se envía como desecho al tranque de relaves.
 - La pulpa concentrada producida por el proceso de flotación se somete a la lixiviación con carbón activado y cianuro para recuperar el oro. El proceso con cianuro consiste en disolver el oro y la plata presente en forma soluble del mineral molido en una solución diluida de cianuro, normalmente $NaCN$ o KCN en presencia de cal y oxígeno. El método típico consiste en utilizar los procesos de espesamiento por decantación en contra corriente (CCD por sus siglas en inglés) y de sedimentación por carbono en lixiviación (CIL por sus siglas en inglés). En esto, a la pulpa concentrada se le añade carbón con cianuro, aire y cal, y el oro se recupera en el carbón al ser lixiviado por el cianuro.
 - Luego, se continúa con el proceso de desorción del oro del carbón activado y la solución rica en oro continúa a la etapa de electroobtención (EW, por sus siglas en inglés).
 - En la EW se generan electrodos de una aleación de oro y plata, los que se ingresan al horno de fundición obteniendo los lingotes de aleación de oro y plata, conocidos como metal Doré (Tecsop, 2022).

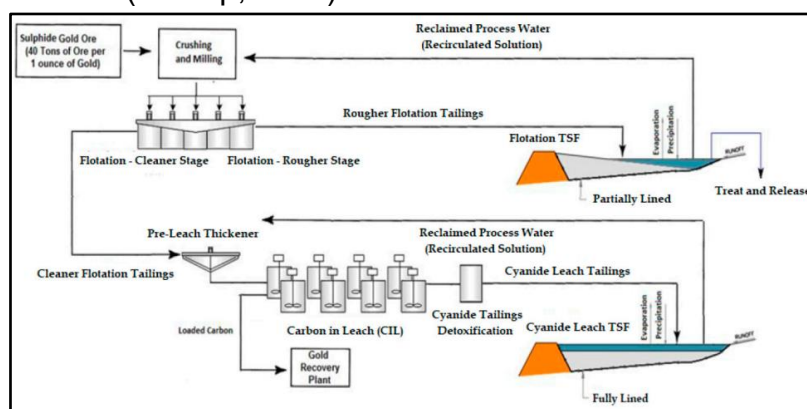


Figura 1.3. Diagrama de flujo típico del mineral de oro y su gestión de relaves en minas de oro (Cacciuttolo et al., 2023).

1.7. Minera Florida

Minera Florida Ltda. (MFL), opera un complejo minero para la extracción de oro y plata que se utiliza para la producción de metal doré, obteniendo como producto secundario una aleación de zinc con plomo. El complejo cuenta la Planta de Lixiviación y Concentrado (PLC) que está conectada con la Planta de Tratamiento de Relaves (PTR). La PLC lleva a cabo las etapas de flotación y lixiviación, por su parte, la PTR procesa los relaves generados por la PLC y reprocesa los relaves antiguos acumulados que

- El 100% del mineral chancado tiene un diámetro de partícula bajo 10 [mm]. Dicho mineral se alimenta a los molinos de la PLC a una tasa de 2700-4.000 toneladas métricas secas por día $\left(\left[\frac{TMS}{día}\right]\right)$.
- El producto de molienda, con el 80% de las partículas con un diámetro menor a 120 [µm] (P80=120[µm]), se envía a la flotación Bulk donde se concentra 15 veces. El concentrado obtenido se envía a la lixiviación con cianuro de sodio ($NaCN$) en la PLC.
- Los relaves del proceso de flotación Bulk se envían a la lixiviación PTR pasando por una etapa de remolienda, dependiendo si se encuentra operativa.
- La solución pobre de la etapa de EW con cianuro libre residual de $2,5 \left[\frac{g}{L}\right]$ se envía a lixiviación PTR para que se mezcle con los relaves de la flotación Bulk.
- A la pulpa pobre en oro de la lixiviación de la PTR se le añade cianuro adicional para disolver el oro más una dosis de $0,5 \left[\frac{kg NaCN}{TMS}\right]$.
- Luego de la lixiviación de la PTR, el relave entra en el circuito de carbón en pulpa (CIP por sus siglas en inglés) donde se realiza la adsorción del oro contenido en el líquido.
- Al mezclar los relaves de la flotación Bulk, que tienen una concentración de $0,4 \left[\frac{g Au}{L}\right]$, con la solución pobre de EW se tiene un 60% de recuperación de oro. Sumando la recuperación de oro de la lixiviación de concentrado en la PLC se logra una recuperación global de 92% de oro.
- Posteriormente, el relave que egresa del proceso CIP con un contenido de $0,15 \left[\frac{g Au}{Kg relave}\right]$ pasa al proceso DETOX, que consiste en un proceso de eliminación del cianuro residual contenido en el relave utilizando bisulfito de sodio y peróxido de hidrógeno mediante oxidación.
- Minera Florida trata sus relaves utilizando la tecnología TTD, alcanzando una concentración de sólidos en un rango de 69-72% en peso.
- El relave en pasta que egresa por el cono inferior del espesador es impulsado al depósito de relaves a través de tuberías de 6 pulgadas de diámetro y una longitud desde 200 a 1500 metros aproximadamente.

1.8. Alcances del trabajo

Si bien los resultados obtenidos por los floculantes y modificadores reológicos sobre el proceso de espesamiento de relaves de una faena minera particular no son extrapolables a una faena minera ajena por la variabilidad de las condiciones del proceso productivo, la metodología del trabajo para seleccionar los floculantes y modificadores reológicos de mejor rendimiento si lo es, por lo que la metodología desarrollada en el presente trabajo se puede replicar en todas las faenas de la industria minera que utilice espesadores para el tratamiento de los relaves.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Reología

De acuerdo con lo expuesto por Gedde y Hedenqvist (2019), la reología es la disciplina que se ocupa de la deformación de los fluidos cuando se le aplican tensiones. Las relaciones matemáticas entre la tensión aplicada y la deformación resultante se denominan ecuaciones constitutivas. Dichas relaciones se basan en ecuaciones de equilibrio, que son enunciadas a partir de las leyes universales de conservación de la masa, el momentum y la energía, representadas por las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3), respectivamente (Gedde & Hedenqvist, 2019).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot v) = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \sigma + \rho \cdot g \quad (2.2)$$

$$\rho \cdot C_v \cdot \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot q - T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v (\nabla \cdot v) + \frac{\sigma}{\nabla v} + \frac{\partial S}{\partial t} \quad (2.3)$$

Donde:

- ρ es la densidad.
- ∇ es el operador del gradiente.
- v es la velocidad del vector en tres componentes.
- $\frac{D}{Dt}$ es la derivada material.
- σ es el tensor de la tensión.
- g es el “body forcé vector”.
- C_v es la capacidad calorífica a un volumen constante.
- T es la temperatura.
- q es el vector de flujo de calor.
- V es el volumen específico.
- $\frac{\partial}{\partial t}$ es la razón de generación de calor desde las reacciones químicas y físicas internas.

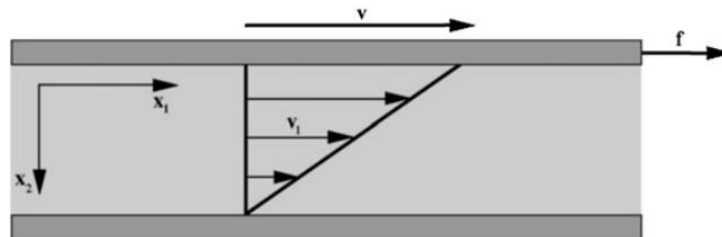


Figura 2.1. Flujo constante de cizallamiento simple (Gedde & Hedenqvist, 2019).

Según la Figura 2.1, la placa superior se mueve a velocidad constante “v”, mientras que la placa inferior está en reposo. La fuerza necesaria para mover la placa superior es denotada por “f” y el área de contacto de la placa superior con el líquido es A. La conservación del momentum de este sistema se expresa en la ecuación (2.4) (Gedde & Hedenqvist, 2019):

$$\frac{d\sigma_{21}}{t_{x_2}} = 0 \quad (2.4)$$

Donde σ_{21} es la tensión de cizallamiento. La tensión de cizallamiento es constante a través de la separación que está dada por la ecuación (2.5):

$$\sigma_{21} = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

La velocidad de los elementos del fluido está dada por la ecuación (2.6):

$$\frac{dv_1}{dx_1} = \frac{\partial \gamma}{\partial t} \left[\frac{1}{s} \right] \quad (2.6)$$

Donde la expresión de la derecha es conocida como velocidad de cizallamiento que es la variación de la deformación de cizallamiento $\left(\gamma = \frac{dx_1}{dx_2} \right)$ por unidad de tiempo.

2.1.1. Comportamiento de los fluidos independiente del tiempo

Según Amoo y Layu Fagbenle (2020) los fluidos en los que la tensión depende de la magnitud de la velocidad de cizallamiento, se consideran fluidos no newtonianos independientes del tiempo. Estos se clasifican en fluidos pseudoplásticos, dilatantes o espesantes y viscoplásticos o plásticos (Figura 2.2).

Los fluidos pseudoplásticos son el tipo más común de comportamiento de fluido no Newtoniano independiente del tiempo que puede observarse. Este tipo de fluido se caracteriza por tener un crecimiento cada vez menor de la tensión de cizallamiento a medida que se incrementa la magnitud de la velocidad de cizallamiento (Amoo & Layi Fagbenle, 2020).

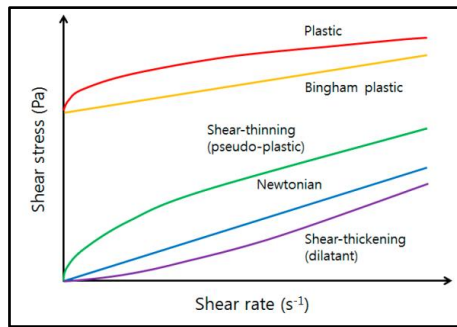


Figura 2.2. Curvas reológicas esquemáticas de materiales Newtonianos y no Newtonianos (Lee et al., 2017).

Por otra parte, la tensión de cizallamiento de los fluidos dilatantes va creciendo cada vez más a medida que se incrementa la velocidad de cizallamiento. En cambio, los fluidos viscoplásticos se caracterizan por tener una magnitud mínima de tensión de cizallamiento para que el fluido comience su flujo. Cabe mencionar que una vez que la magnitud de la tensión de cizallamiento supere su mínimo para que el fluido fluya, la curva de flujo puede ser lineal o no lineal, pero no pasará por el origen. Entre muchos fluidos viscoplásticos, hay una clase especial llamada plásticos de Bingham. Para un fluido plástico de Bingham, la tensión de cizallamiento es linealmente proporcional a la velocidad de corte. Si la

tensión mínima para que el fluido comience a fluir se aproxima a cero, el fluido plástico de Bingham puede tratarse como un fluido newtoniano (Amoo & Layi Fagbenle, 2020).

2.1.2. Viscosidad

La viscosidad es la propiedad de un material que describe su resistencia a la deformación continua. A diferencia de la elasticidad, no está relacionada con la cantidad de deformación, sino con la velocidad de deformación. Por tanto, es una propiedad propia de los materiales que fluyen (Dealy, 2013). En el diagrama de tensión de cizallamiento (shear stress) en función de la velocidad de cizallamiento (shear rate), la viscosidad corresponde a la pendiente de la curva.

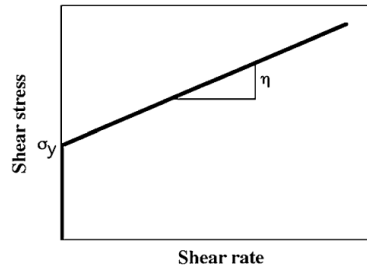


Figura 2.3. Diagrama estándar de la tensión de cizallamiento en función de la velocidad de cizallamiento para los plásticos de Bingham (Gedde & Hedenqvist, 2019).

La expresión de la viscosidad está dada por la ecuación (2.7):

$$\eta = \frac{\sigma_{21}}{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial t}\right)} \quad (2.7)$$

Según Gedde y Hedenqvist (2019), un fluido Newtoniano tiene una viscosidad constante, independiente de la velocidad de cizallamiento. Un fluido pseudoplástico exhibe una viscosidad decreciente a medida que aumenta la velocidad de cizallamiento, en cambio, si la viscosidad aumenta a medida que aumenta la velocidad de cizallamiento, se trata de un fluido dilatante (Figura 2.4).

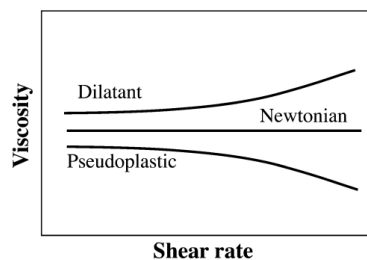


Figura 2.4. Viscosidad de los distintos tipos de fluidos en función de la velocidad de cizallamiento (Gedde & Hedenqvist, 2019).

Hasta el momento, se ha hablado de la viscosidad aparente de un fluido, ya sea suspensión o polímero fundido. A continuación, se presentan algunas definiciones únicamente válidas para polímeros en solución o fundidos.

La viscosidad relativa es la relación entre la viscosidad de la solución de polímero (η) y la viscosidad del disolvente puro (η_0), y está representada por la ecuación (2.8):

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} \quad (2.8)$$

Asimismo, se define la viscosidad específica (η_{sp}) a través de la ecuación (2.9):

$$\eta_{sp} = \frac{\eta - \eta_0}{\eta_0} \quad (2.9)$$

Del mismo modo, se define la viscosidad reducida (η_{red}) mediante la ecuación (2.10):

$$\eta_{red} = \frac{\eta_{sp}}{c} \quad (2.10)$$

Donde “c” es la concentración del polímero en la solución. Por otro lado, se define la viscosidad intrínseca mediante la ecuación (2.11).

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{c} \quad (2.11)$$

La viscosidad intrínseca surge cuando la concentración del polímero es casi nula, es decir, en una dilución infinita (Williams, 2007).

Además, existe una ecuación que relacionar la viscosidad intrínseca con el peso molecular del polímero a través de la relación de Mark-Houwink:

$$[\eta] = k \cdot M^\alpha \quad (2.12)$$

Donde α representa la conformación del polímero en solución. Numéricamente, este parámetro varía entre 0 y 2, donde $\alpha = 0$ representa esfera rígida y $\alpha = 2$ una varilla rígida (Castillo et al., 2023).

2.1.3. Radio de giro

La presente subsección se basa en el trabajo realizado por Teraoka (2002).

Un parámetro de uso frecuente en la reología de polímeros consiste en el radio de giro, que se define como la representación estadística que describe el tamaño promedio de las regiones en las que una cadena polimérica se extiende y adopta diferentes conformaciones tridimensionales. El radio de giro del polímero surge del centro de masa de la cadena polimérica, que se representa por la ecuación (2.13):

$$r_G = \frac{1}{N + 1} \sum_{i=0}^N r_i \quad (2.13)$$

Donde:

- r_G es el centro de masa de la cadena polimérica.
- N es la cantidad de monómeros que contiene el polímero.
- r_i es la posición de cada monómero.

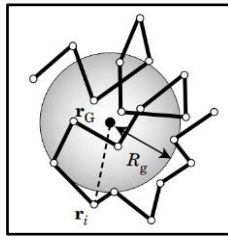


Figura 2.5. Centro de masa r_G y radio de giro R_g en el modelo de varillas-perlas (Teraoka, 2002).

Considerando que todos los monómeros tienen la misma masa y están conectados por enlaces sin masa, entonces el radio de giro está dado por la ecuación (2.14):

$$R_g^2 = \frac{1}{2(N+1)^2} \sum_{i,j=0}^N \langle (r_i - r_j)^2 \rangle \quad (2.14)$$

Donde R_g es el radio de giro.

Esta fórmula indica que se puede usar la distancia cuadrática media entre dos monómeros para obtener R_g en lugar de calcular primero r_G y luego la distancia cuadrática media entre r_G y cada monómero. Como la suma con respecto a i y j es otro promedio, se puede decir que R_g^2 es la mitad de la distancia cuadrada promedio entre dos monómeros en la cadena (Figura 2.6).

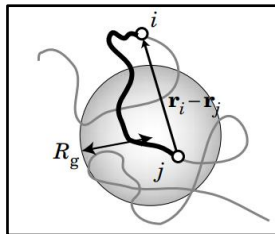


Figura 2.6. La distancia cuadrática media entre dos monómeros i y j es el doble de larga que R_g^2 (Teraoka, 2002).

Cabe mencionar que el radio de giro se puede definir para cadenas lineales, no lineales y ramificadas, siendo una medida universal para la dimensión de la cadena polimérica.

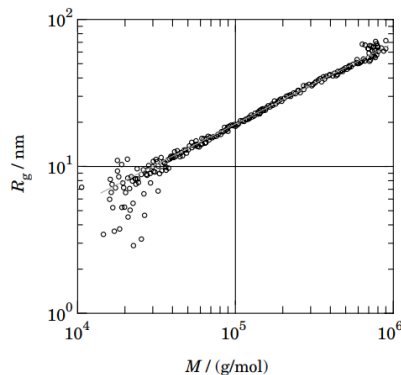


Figura 2.7. El radio de giro R_g del polietileno lineal de alta densidad en triclorobenceno en función del peso molecular M . La línea gris es el ajuste óptimo (Teraoka, 2002).

Como se observa en la Figura 2.7 el radio de giro es proporcional con el peso molecular del polímero.

2.1.4. Radio hidrodinámico

Al igual que en la subsección anterior, la presente subsección se basa en el trabajo realizado por Teraoka (2002).

En primer lugar, para determinar el radio hidrodinámico, se debe definir el coeficiente de difusión (D) para una partícula en una solución en reposo a una temperatura T , el que se determina por la ecuación de Nernst-Einstein:

$$D = \frac{k_B \cdot T}{\zeta} \quad (2.15)$$

Donde:

- ζ es el coeficiente de fricción.
- k_B es la constante de Boltzmann.

En la misma línea, Stokes mostró que el coeficiente de fricción para una esfera está dado por la ecuación (2.16):

$$\zeta = 6 \cdot \pi \cdot \eta_s \cdot R_S \quad (2.16)$$

Donde:

- η_s es la viscosidad del solvente.
- R_S es el radio de la esfera.

De acuerdo con las definiciones anteriores se puede definir el radio hidrodinámico para una suspensión esférica en base a la ecuación (2.17):

$$R_H = \frac{k_B \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \eta_s \cdot D} \quad (2.17)$$

Donde:

- R_H es el radio hidrodinámico.
- D es el coeficiente de difusión del centro de masa de la suspensión.

Según Teraoka (2002), cuando los N monómeros de la cadena polimérica se mueven, cada monómero recibe una fricción del disolvente. En este contexto, se tiene que el movimiento de uno de los monómeros acompaña los movimientos de las moléculas de disolvente adyacentes en la misma dirección, y su efecto se propaga a otro monómero para facilitar su movimiento en la misma dirección en un disolvente (Figura 2.8). Esta interacción se llama interacción hidrodinámica y existe únicamente cuando hay movimiento por parte de las partículas. Cabe destacar que las propiedades estáticas como la presión osmótica no se ven afectadas por las interacciones hidrodinámicas, puesto que solo afectan a las propiedades dinámicas como la difusión.

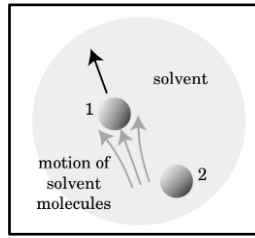


Figura 2.8. Movimiento de la partícula 1 genera el movimiento de las moléculas del solvente, las que facilitan el movimiento de la partícula 2 en la misma dirección. Por lo tanto, la interacción hidrodinámica reduce la fricción (Teraoka, 2002).

Por otra parte, se descubrió que la magnitud de la interacción hidrodinámica entre dos partículas en posiciones r y r' es proporcional a $|r - r'|^{-1}$. Como la interacción decae algebraicamente con un exponente de 1, implica que es de largo alcance. Es por esto que, en un polímero, todos los monómeros se afectan entre sí, ya que están cerca entre ellos. De esta forma, se define el radio hidrodinámico de un polímero, que corresponde al promedio del recíproco de la distancia entre dos monómeros de la cadena:

$$\frac{1}{R_H} = \left\langle \frac{1}{|r_m - r_n|} \right\rangle \quad (2.18)$$

El radio hidrodinámico es una representación estadística que describe el tamaño, en promedio, de las regiones en las que una cadena polimérica se extiende en contacto con un solvente. Este parámetro es de uso frecuente en las soluciones poliméricas.

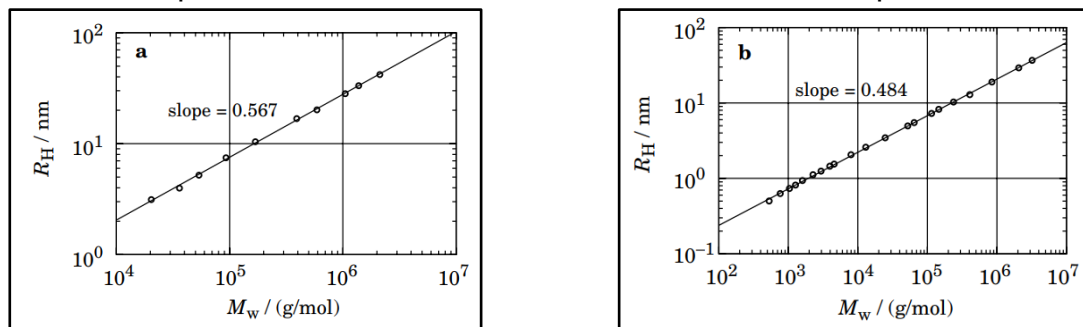


Figura 2.9. Radio hidrodinámico de diferentes pesos moleculares de (a) poliestireno en 2-fluorotolueno a 42,6 °C y (b) Poli(α -metilestireno) en ciclohexano a 30,5 °C (Teraoka, 2002).

Como se observa en la Figura 2.9 el radio hidrodinámico es proporcional con el peso molecular del polímero.

2.1.5. Yield stress

Conforme con Nasser y James (2007) el yield stress puede definirse como la tensión de cizallamiento mínima necesaria para iniciar el flujo de un fluido. En otras palabras, el yield stress es una manifestación macroscópica de la resistencia al cizallamiento de las fuerzas entre partículas en una red de partículas.

De acuerdo con lo expuesto en los trabajos de Gedde y Hedenqvist (2019), en términos matemáticos el yield stress corresponde a la intersección de la curva del diagrama de tensión de cizallamiento en función de la velocidad de cizallamiento con el eje de las

ordenadas, que en la Figura 2.3 se denota como σ_y . Algunos ejemplos de fluidos con yield stress son algunos aceites, polímeros fundidos, mezclas de cemento y la margarina.

Según Wilson (2019) los métodos comúnmente utilizados para calcular el yield stress de un fluido son los que se exhiben en la Tabla 2.1.

Método	Técnica de medición	Herramienta típica
Extrapolación	Medición de la viscosidad aparente y extrapolar la curva reológica a un valor de velocidad de cizallamiento nulo.	Reómetros rotacionales o capilares.
Decaimiento de la tensión	Mide la tensión de cizallamiento después de que el flujo es detenido.	Reómetro capilar o dispositivos de flujo forzado.
Tensión una vez iniciado el flujo	Incrementar la tensión de cizallamiento y determinar cuando la velocidad de cizallamiento es distinta de cero.	Reómetros rotacionales con husillos de paletas.
Velocimetría	Identificar el límite de la región de flujo y relacionarlo con la estimación de la tensión de cizallamiento local.	Imágenes de flujo como velocimetría de imágenes de partículas. Tomografía, por ejemplo, imagen por resonancia magnética.

Tabla 2.1. Métodos comunes para la medición del yield stress de fluidos (Wilson, 2019).

Respecto de los métodos para calcular el yield stress de los fluidos por extrapolación, se debe establecer una recta de tendencia sobre el diagrama de tensión de cizallamiento en función de la velocidad de cizallamiento que puede variar dependiendo del modelo matemático utilizado. Según Shaikh et al. (2017) los modelos matemáticos más usuales son el modelo de ley potencia, de Bingham, de Herschel-Bulkley y de Casson, los que se describen mediante las ecuaciones (2.19), (2.20), (2.21) y (2.22), respectivamente.

$$\sigma = k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.19)$$

Donde:

- σ es la tensión de cizallamiento.
- k la medida del flujo de consistencia en $[Pa \cdot s^n]$.
- n es la medida de la viscosidad efectiva del fluido como función de la velocidad de cizallamiento, conocido como el índice de comportamiento de flujo [-].

$$\sigma = \sigma_y + \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.20)$$

Donde:

- σ_y es el yield stress.
- η es la viscosidad de la suspensión.

$$\sigma = \sigma_y + k \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.21)$$

En el caso de que $n < 1$ indica que es un “shear-thinning” o un fluido pseudoplástico. En cambio, si $n > 1$ entonces se trata de un “shear-thickening” o un fluido dilatante.

$$\sqrt{\sigma} = \sqrt{\sigma_y} + \sqrt{\mu_\infty} \cdot \sqrt{\dot{\gamma}} \quad (2.22)$$

Donde μ_∞ representa la tasa de viscosidad aparente.

Por su parte, los modelos de Herschel-Bulkley y Casson se han utilizado ampliamente para explicar el comportamiento no newtoniano de las suspensiones de arcilla floculada. Según estos modelos, el comportamiento de estos sistemas está determinado por la velocidad de cizallamiento, en la que a bajas magnitudes las suspensiones parecen tener un yield stress, por el contrario, a altas velocidades de cizallamiento, se induce un comportamiento pseudoplástico en las suspensiones (Shaikh et al., 2017).

2.1.6. Módulo de almacenamiento y de pérdida

Para representar la energía contenida en una red de partículas, en primer lugar, se debe definir una variación sinusoidal de deformación de cizallamiento, que se describe por la ecuación (2.23) (Gedde & Hedenqvist, 2019):

$$\gamma = \gamma_0 \cos(\omega t) \quad (2.23)$$

Donde:

- γ_0 es la máxima deformación de cizallamiento.
- ω es la velocidad angular en [rad/s].
- t es el tiempo.

En consecuencia, la tensión de cizallamiento será sinusoidal a la misma frecuencia, pero cambiada de fase en un ángulo δ (Figura 2.10), por ejemplo:

$$\sigma = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \quad (2.24)$$

Donde σ_0 es la máxima tensión de cizallamiento.

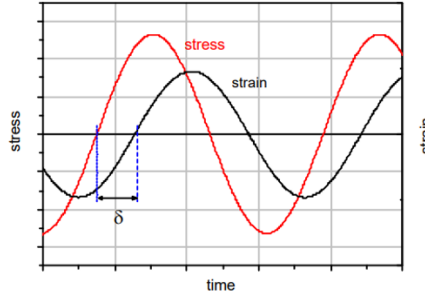


Figura 2.10. Señales de tensión y de deformación durante un experimento oscilatorio (Franck, n.d.).

La tensión y deformación de cizallamiento son comúnmente tratados usando las notaciones complejas (Gedde & Hedenqvist, 2019):

$$\gamma^* = \gamma_0(\cos(\omega t) + i\text{sen}(\omega t)) = \gamma_0 e^{i\omega t} = \gamma' + i\gamma'' \quad (2.25)$$

$$\sigma^* = \sigma_0(\cos(\omega t + \delta) + i\text{sen}(\omega t + \delta)) = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (2.26)$$

En base a lo anterior, se define el módulo complejo de cizallamiento en la ecuación (2.27):

$$G^* = \frac{\sigma^*}{\gamma^*} = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \cos(\delta) + i \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \sin(\delta) = G' + iG'' \quad (2.27)$$

Donde:

- $G'(\omega)$ es el módulo de almacenamiento
- $G''(\omega)$ es el módulo de pérdida.

El módulo de almacenamiento está asociado con la energía almacenada de la estructura y el módulo de pérdida con la disipación viscosa de energía mecánica mediante calor por las deformaciones irreversibles del sistema estructurado.

Según Kokuti et al (2014) la viscosidad compleja es una propiedad utilizada en la teoría de la viscoelasticidad para describir el comportamiento viscoelástico de materiales. Se trata de una medida que incorpora tanto los componentes viscosos como los elásticos de la respuesta de un material frente a un esfuerzo aplicado (Kokuti et al., 2014).

Según la nomenclatura presentada, se define la viscosidad compleja (η^*) en la ecuación (2.28):

$$\eta^* = \frac{\sigma^*}{\dot{\gamma}^*} = \frac{\sigma^*}{i\omega\gamma^*} = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \cdot \sin(\delta) \cdot \frac{1}{\omega} - i \cdot \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\right) \cdot \cos(\delta) \cdot \frac{1}{\omega} = \frac{G''}{\omega} - i \frac{G'}{\omega} = \eta' - i\eta'' \quad (2.28)$$

Donde $\eta'(\omega)$ es la viscosidad dinámica que está asociada con la disipación de energía y $\eta''(\omega)$ está asociado a la energía de almacenamiento (Gedde & Hedenqvist, 2019). La viscosidad compleja se puede calcular con los valores del módulo complejo.

La viscosidad compleja en la práctica se puede medir de varias formas, por ejemplo, mediante métodos constitutivos como el de Maxwell, donde se combinan los elementos elásticos y viscosos, mediante pruebas reológicas específicas o análisis de frecuencia (Kokuti et al., 2014).

Franck establece que el modelo de Maxwell, que se modela mediante las ecuaciones (2.29), (2.30) y (2.31), consiste en un resorte y un amortiguador en serie, en el que la tensión aplicada es la misma para cada elemento, por lo que la deformación es aditiva. Si a este modelo se le realiza un experimento de relajación, es decir, se aplica una deformación constante, la tensión aumenta hasta un valor máximo determinado por el módulo elástico del resorte y luego se relaja exponencialmente hasta cero (Franck, n.d.).



Figura 2.11. El modelo de Maxwell combina un resorte y un amortiguador en serie (Franck, n.d.).

$$\gamma = \gamma_r + \gamma_a = \frac{\sigma}{G} + \int \frac{\sigma}{\eta} dt \quad (2.29)$$

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_a \quad (2.30)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\sigma}{G} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (2.31)$$

Donde el subíndice r y a representa al resorte y al amortiguador, respectivamente.

2.1.7. Dimensión fractal masa-longitud

De acuerdo con Castillo et al. (2023), la dimensión fractal masa-longitud se refiere a la relación entre la masa y la longitud de una estructura fractal, es decir, es una medida de complejidad de una estructura irregular que se utiliza para describir como cambia la viscosidad del fluido en función de la distribución de la masa y longitud de la estructura fractal de las partículas que lo constituyen.

El volumen de una partícula se trata como una esfera que aumenta con el cubo de una longitud característica (L). La masa (m) aumenta a una potencia inferior, en base a la ecuación (2.32).

$$m \propto L^{D_f} \quad (2.32)$$

En la que D_f es la dimensión fractal masa-longitud que toma valores desde 1 a 3. A medida que se incrementa el valor de D_f , se tienen partículas más compactas y regulares, donde $D_f = 3$ representa una esfera sólida.

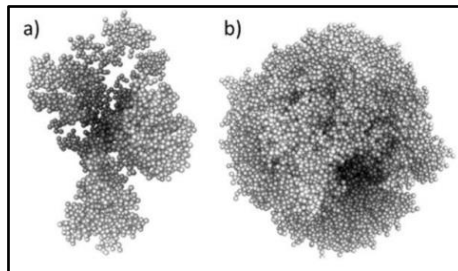


Figura 2.12. Ejemplos de agregados fractales formados a partir de partículas monosized con valores de D_f de (a) 2,05 y (b) 2,51 (Castillo et al., 2023).

2.1.8. Efecto del shear-banding

Según Ovarlez et al. (2009) numerosos trabajos han puesto de manifiesto los efectos del shear-banding en materiales viscoelásticos como polímeros y fluidos complejos. El efecto del shear-banding abarca una amplia gama de fenómenos en los que el perfil de la tensión de cizallamiento presenta una discontinuidad aparente en función de la velocidad de cizallamiento.

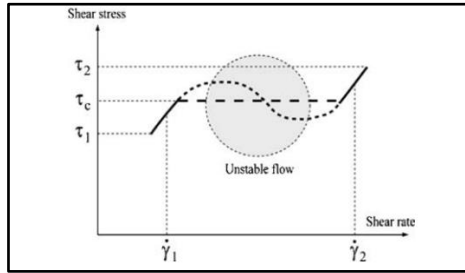


Figura 2.13. Esquema general de la tensión de cizallamiento en función de la velocidad de cizallamiento de materiales que experimentan inestabilidad mecánica o una transición inducida por el cizallamiento (Ovarlez et al., 2009).

En términos de comportamiento reológico, el fenómeno del shear-banding puede resultar en una disminución de la viscosidad aparente en las zonas donde se produce el efecto. Basándose en el trabajo de Divoux et al. (2016), se establece que el shear-banding puede darse por la falta de homogeneidad del fluido, las inestabilidades y efectos transitorios o intermitentes que se introducen en los campos de flujo, por ejemplo, el de velocidad, tensión o de concentración. Adicionalmente, el deslizamiento de la pared, los cambios estructurales y la redistribución de la deformación también pueden potenciar el efecto. Otro factor importante por considerar es el de la localización del cizallamiento, puesto que a velocidades de cizallamiento bajas, el cizallamiento se localiza en una pequeña región con una velocidad de cizallamiento local elevada, mientras que la parte restante del fluido se comporta como un sólido (Møller et al., 2006) (Divoux et al., 2016).

2.2. Factores que afectan la reología de los fluidos

2.2.1. Naturaleza del fluido

Considerando el contexto del trabajo desarrollado, en el que se trabaja en la recuperación de agua de relaves mineros, las partículas que están suspendidas en el agua corresponden a sólidos minerales que interactúan física y químicamente con el fluido portador y las especies disueltas en el mismo. Estas interacciones determinan directamente las propiedades de la suspensión, como la estabilidad de la dispersión de los sólidos, la viscosidad del relave y el yield stress (C. Wang et al., 2014).

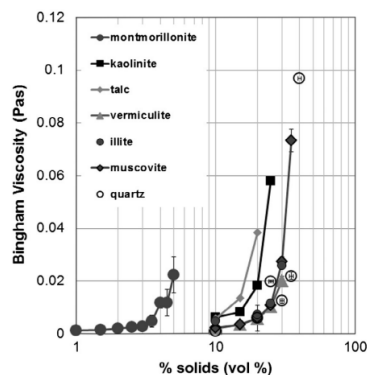


Figura 2.14. Viscosidad de Bingham para diferentes minerales y contenido de sólidos en volumen (Ndlovu et al., 2014).

La Figura 2.14 demuestra que la viscosidad varía en función de la mineralogía de la suspensión.

2.2.2. Tamaño de partícula

De acuerdo con lo expuesto por Hogg (2000), la aplicación de un modelo de equilibrio de población al proceso de crecimiento de flóculos indica que el movimiento browniano es el mecanismo dominante para partículas que tienen un diámetro de $1 \mu m$, aumentando la diferencia de velocidad entre la partícula y el medio, afectando la viscosidad de la suspensión.

2.2.3. Distribución granulométrica

La distribución granulométrica se refiere a la variación del tamaño de las partículas de una muestra. Esta distribución indica la proporción de partículas presentes en diferentes rangos de tamaño.

La Figura 2.15 muestra aumento de la viscosidad y del yield stress en la medida que el P80 de la muestra disminuye.

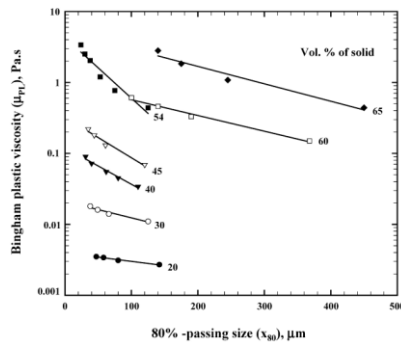


Figura 2.15. Variación de la viscosidad plástica de Bingham en función del P80 (Tangsathitkulchai, 2003).

Si bien el valor del P80 afecta directamente la reología de una suspensión, también lo hace la forma de la curva de la distribución granulométrica. Cuando una muestra posee partículas de diferentes tamaños, las partículas pequeñas tienden a ingresar a los espacios entre las partículas de mayor tamaño, incrementando su viscosidad.

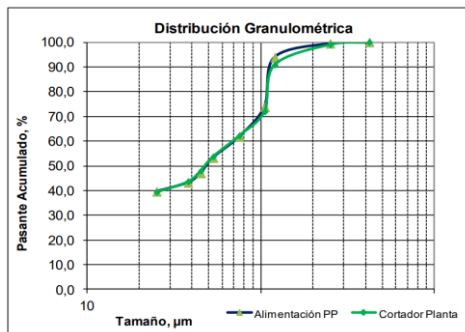


Figura 2.16. Ejemplo de curva de una distribución granulométrica, donde el P80 equivale al valor del eje “x” del punto (x,80) que intercepta con la curva granulométrica.

En la Figura 2.17 se observa un sistema ternario que contiene material fino, medio y grueso donde las líneas de equilibrio representan la viscosidad. Se puede observar que

la viscosidad puede ser reducida manteniendo el mismo volumen de fase o, alternativamente, aumentar el volumen de fase manteniendo la viscosidad. Específicamente se observa que la viscosidad relativa mínima es de 26 para el sistema ternario y 30 para un sistema binario (Barnes et al., 1989).

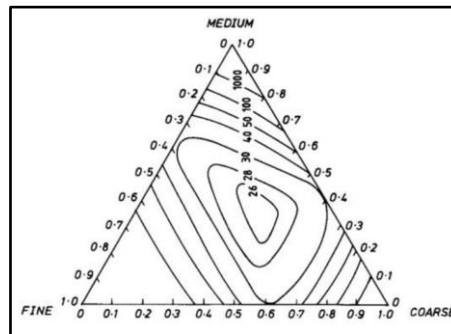


Figura 2.17. Disminución de la viscosidad relativa para tres tamaños de partículas (Barnes et al., 1989).

En los relaves mineros existe una distribución granulométrica con una gran cantidad de tamaños de partícula diferentes, por lo que el efecto no es cuantificable por la fracción presente de cada tamaño de forma tan directa como lo expuesto en la Figura 2.17 (Barnes et al., 1989).

2.2.4. Forma de las partículas

La Figura 2.18 resume de forma conceptual cómo aumenta la viscosidad y el yield stress de las suspensiones en función de la variación de la forma de las partículas.

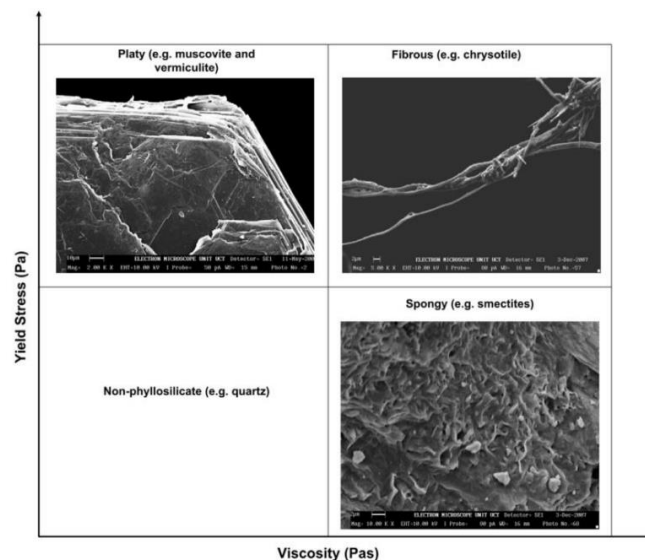


Figura 2.18. Propiedades reológicas en función de la forma de partícula (Ndlovu et al., 2011).

La Figura 2.19 muestra que la viscosidad aumenta si la forma de las partículas difiere de una esfera, sobre todo a contenidos de sólidos en volumen superiores al 20%, lo que se puede asociar a una relación inversamente proporcional entre la viscosidad del fluido con el parámetro de la dimensión fractal masa-longitud. Así, aquellas partículas con forma de

láminas y barras manifiestan una viscosidad mucho mayor a los mismos valores de concentración volumétrica.

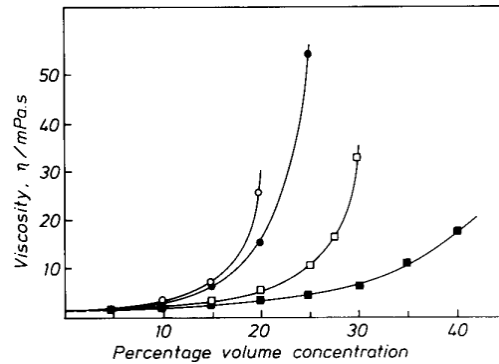


Figura 2.19. Dependencia de la viscosidad de diferentes formas de partículas en agua a una velocidad de cizallamiento de 300 [1/s] (■) cuadrados (□)granos (○)láminas (●)barras (Barnes et al., 1989).

2.3. Composición de los relaves

El relave de Minera Florida, al estar compuesto por alrededor de un 90% de ganga no metálica, se considerará el mineral de la caolinita, ejemplo de una arcilla no expansiva, y la montmorillonita, ejemplar de una arcilla expansiva, como referencias. Su elección se justifica en poder estudiar un ejemplar de cada grupo, considerando su abundancia en yacimientos del país (Bulatovic et al., 1999).

De acuerdo con lo expuesto en el trabajo de C. Wang et al. (2014), la ganga no metálica está compuesta mayoritariamente por los minerales de caolinita y la montmorillonita, los que en la práctica se les conoce como arcillas, que según ISO 2002, tienen un tamaño de partícula menor a 2 [μm], es decir, se concentran en fracciones finas. Estos materiales proceden de la meteorización de minerales y su bloque de construcción básico son las láminas tetraédricas de silicio y oxígeno.

Según Shaikh et al. (2017) los minerales arcillosos son principalmente minerales filosilicatos caracterizados por sus unidades estructurales formadas por una o dos láminas tetraédricas de sílice alrededor de una lámina octaédrica de aluminio. Su clasificación se observa en la Figura 2.20.

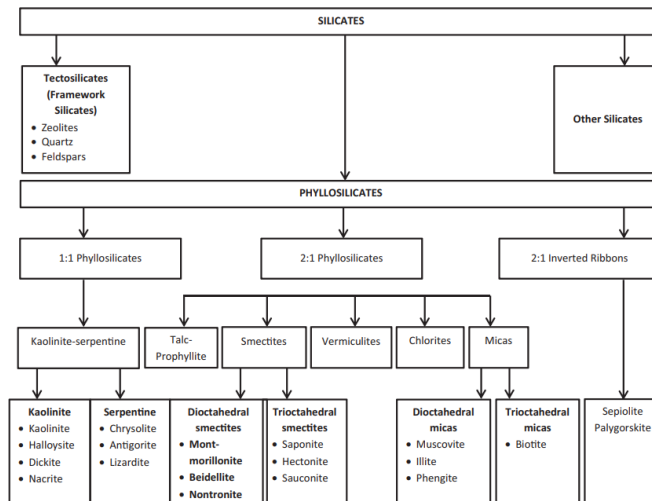


Figura 2.20. Clasificación de los minerales arcillosos (Shaikh et al., 2017).

En relación con la organización estructural de los minerales filosilicatos, conforme a lo expuesto por Shaikh et al. (2017), cada lámina tetraédrica posee una composición $Si_2O_6(OH)_4$ la que se organiza como la Figura 2.21 (b), donde cada átomo de silicio está rodeado por cuatro átomos de oxígenos de hidroxilo. En cambio, una unidad octaédrica se forma por átomos de aluminio, magnesio o fierro rodeados por seis átomos de oxígeno de hidroxilo en una disposición equivalente a la de la Figura 2.21 (a), resultando una composición de, por ejemplo $Al_2(OH)_6$. Continuando, los minerales arcillosos poseen generalmente tres superficies diferentes: la superficie exterior, los bordes y la superficie interior entre las capas. Las superficies externas e intercalares son susceptibles de alteraciones mediante procesos de adsorción e intercambio iónico. La mayoría de los minerales arcillosos presentan una pequeña carga superficial neta negativa resultante de las sustituciones isomórficas. Además, los bordes de las partículas de arcilla pueden desarrollar cargas debido a la rotura de los enlaces del aluminio o silicio con el oxígeno, lo que se denomina un enlace primario roto, roturas que se producen por la disolución química o cambios en las condiciones del medio, ya sea de temperatura o pH.

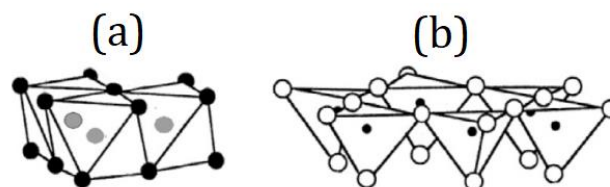


Figura 2.21. Disposición de los átomos en una estructura tetraédrica y octaédrica (a) Los puntos grises corresponden a los átomos metálicos (Al, Mg o Fe) rodeados por grupos hidroxilos. (b) Los puntos negros son los átomos de silicio rodeado por grupos hidroxilos (Shaikh et al., 2017).

Por otro lado, los minerales arcillosos se caracterizan por presentar una amplia distribución granulométrica y una morfología irregular. Cabe mencionar que la estabilidad de los minerales arcillosos en suspensión es influenciada por factores estructurales como el área superficial, la capacidad de intercambio iónico, las cargas superficiales y de borde

además de la flexibilidad de las láminas, así como factores externos como el pH de la suspensión (Shaikh et al., 2017).

Según Shaikh et al. (2017) las arcillas y las reacciones oxidativas y reductoras. En la misma línea, según C. Wang et al (2014) los minerales arcillosos tienen una gran relación superficie/volumen que facilita diversas interacciones consigo mismas y con las especies acuosas del medio.

Cabe mencionar que algunos minerales del grupo de los filosilicatos tienden a expandirse en presencia de agua, en particular las esmectitas y las vermiculitas, las que se denominan como arcillas expansivas. En cambio, también existen filosilicatos no expansivos, como los minerales de la caolinita y la illita, que afectan a la reología de las suspensiones por su granulometría, que suele tener un P80 bajo los 38 $[\mu m]$ (Bulatovic et al., 1999).

Conforme a lo expuesto por Shaikh et al. (2017), la asociación estructural entre las partículas (Figura 2.22) afectan las propiedades viscoelásticas de las suspensiones de arcilla. La asociación de cara a cara suele conformar agregados gruesos de alta densidad, mientras que las otras asociaciones tienden a formar agregados de baja densidad y de alto volumen.

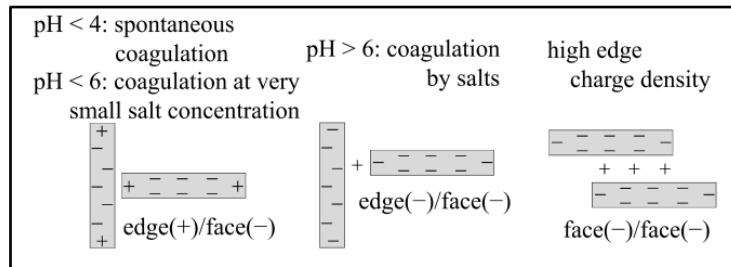


Figura 2.22. Tipos de asociaciones estructurales que pueden adoptar la interacción entre partículas de minerales arcillosos en función del pH (Yoshida et al., 2018).

2.3.1. Caolinita

De acuerdo con lo expuesto por Shaikh et al. (2017), la caolinita, representada químicamente como $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, tiene una estructura caracterizada por una lámina 1:1 formada por capas tetraédricas de SiO_4 y octaédricas de alúmina (Al^{3+}) (Figura 2.23). Los iones Al^{3+} ocupan alrededor de dos tercios de los sitios disponibles en la capa octaédrica, dejando el resto de los sitios vacíos. La presencia de grupos hidroxilo por encima y por debajo de dos centros de aluminio da lugar a una distribución hexagonal central en un plano dentro de la capa octaédrica. En general, la caolinita tiene una carga superficial neutra. Sin embargo, pueden desarrollarse ligeras cargas negativas en los bordes rotos de la estructura que pueden conferir reactividad a la caolinita.

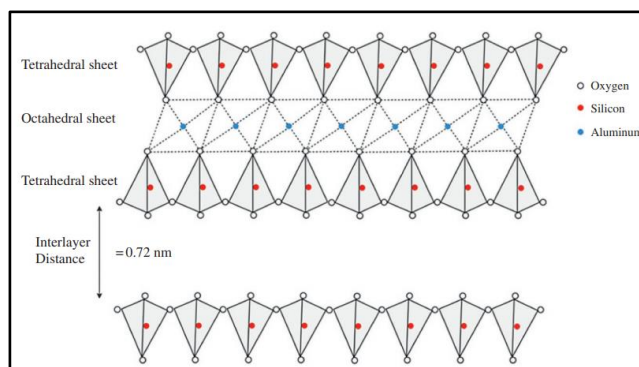


Figura 2.23. Estructura química de la caolinita (Hamza et al., 2023).

Las partículas finas de caolinita son insolubles, por lo que, para removerlas del medio, se requieren técnicas de separación sólido-líquido como la agregación de partículas (Shaikh et al., 2017).

2.3.2. Montmorillonita

De acuerdo con lo expuesto por Shaikh et al. (2017), la montmorillonita, que pertenece a la categoría de las esmectitas, se representa químicamente como $(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Su estructura consta de dos capas tetraédricas de sílice que rodean una capa octaédrica de aluminio en el centro. Las interacciones entre las capas tienen lugar a través de las puntas de la capa tetraédrica y los grupos hidroxilo de la capa octaédrica (Figura 2.24). En la misma línea, las esmectitas se caracterizan por su propiedad extender su red de partículas a causa de la entrada de moléculas polares, mayoritariamente agua, entre sus capas. La separación entre capas puede fluctuar en función de los cationes que se encuentran entre las láminas de silicato. Además, los centros Si^{4+} de las láminas tetraédricas son propensos a la sustitución por Al^{3+} , mientras que los centros octaédricos Al^{3+} pueden ser sustituidos por Mg^{2+} . Estas tendencias isomórficas a la sustitución dan lugar a una carga negativa neta en la montmorillonita que se equilibra mediante cationes intercambiables entre capas como el Na^+ y el Ca^{2+} . Esta característica suele aumentar la viscosidad de la suspensión y está afectada principalmente por la salinidad de la suspensión.

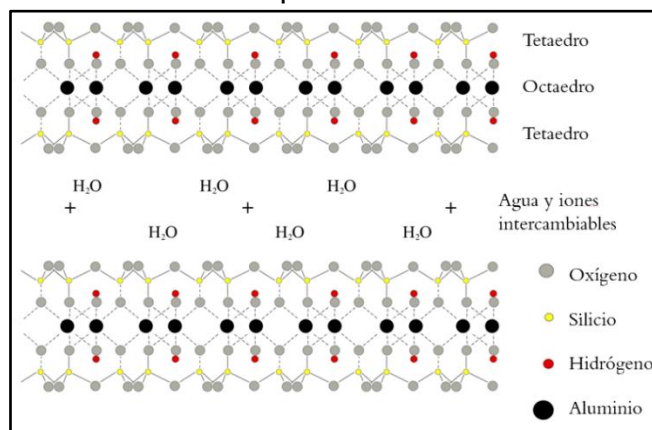


Figura 2.24. Estructura química de la montmorillonita. Imagen adaptada (Hamza et al., 2023).

Cuando la montmorillonita seca es puesta en contacto con el agua, las capas pueden hincharse desde 9,6 a por sobre 12,5 [Å] debido a la absorción de hasta 4 capas de agua entre las capas (externa e interna), lo que se denomina hinchazón intracristalina (Figura 2.25). El grado de hinchazón de la montmorillonita puede ser significativamente limitado por la alta fuerza iónica de la suspensión por la adición de cationes multivalente suprimiendo la doble capa eléctrica (Mpfu et al., 2005).

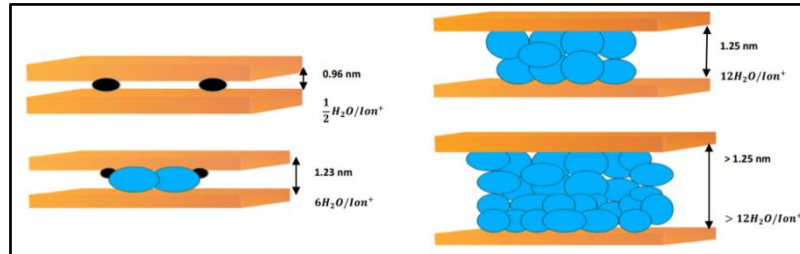


Figura 2.25. Hinchazón en la montmorillonita sódica (Shaikh et al., 2017).

2.4. Potencial zeta

Según C. Wang et al (2014) la estabilidad de la suspensión de minerales arcillosos puede ser descrita por la teoría desarrollada por Derjaguin y Landau e independientemente por Verwey y Overbeek (DLVO), que considera dos fuerzas principales: la de Van der Waals que actúa entre partículas que tienen una distancia mínima entre ellas, permitiendo que dos partículas se unan al entrar en contacto y permanezcan en contacto íntimo. En cambio, a esta fuerza atractiva se le contrapone la fuerza repulsiva causada por la superposición de las capas dobles eléctricas que rodean a las partículas vecinas, fuerza que se denomina repulsión eléctrica de doble capa. A diferencia de la primera fuerza nombrada, esta última depende tanto del material de las partículas como de las características de la solución, como la concentración, el pH, entre otras.

Según Shaikh et al. (2017) el término de doble capa eléctrica se denomina así debido a la presencia de dos capas principales en su estructura: la capa interna de Stern y la capa externa difusa. La capa de Stern es relativamente rígida debido a la alta densidad de iones adsorbidos de la misma carga de la superficie y de contraiones, que tienen cargas opuestas a la superficie de la partícula, lo que genera una alta densidad de iones, restringiendo el movimiento de esta capa. Por otro lado, los iones de la capa difusa se dispersan escasamente a medida que aumenta la distancia de la superficie, dando lugar a variaciones en la densidad de carga en contraposición a la densidad de carga fija de la capa de Stern. La concentración de iones en la capa difusa se reduce a medida que aumenta la distancia a la superficie y el potencial disminuye exponencialmente. En consecuencia, en esta capa los iones experimentan fuerzas eléctricas y movimientos moleculares aleatorios.

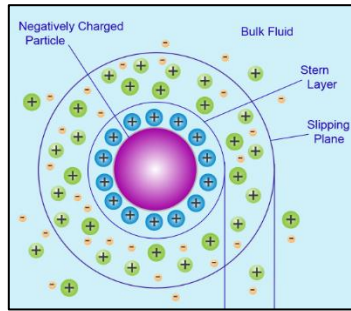


Figura 2.26. Representación de la capa difusa y de Stern, además del plano de deslizamiento (Particle Technology Labs, 2022).

Asimismo, se define el plano de deslizamiento, también denominado superficie de cizallamiento hidrodinámico, que es una interfaz hipotética para el fluido relativamente inmóvil cerca de la superficie de la partícula y el fluido (Shaikh et al., 2017).

El potencial zeta se refiere al potencial del plano de deslizamiento en la capa difusa externa y proporciona una indicación del campo eléctrico que se desarrolla debido a las interacciones de los iones superficiales, así como a la concentración de electrolitos del fluido. El análisis del potencial zeta se emplea esencialmente para analizar la estabilidad de las dispersiones coloidales, además de ser una herramienta útil para comprender la naturaleza de las dispersiones coloidales, las interacciones electrostáticas interfaciales y los mecanismos subyacentes de las interacciones entre las cadenas poliméricas y las partículas del medio. Las suspensiones arcillosas estables se caracterizan generalmente por altos valores de potencial zeta positivos o negativos que representan repulsiones electrostáticas dominantes entre las partículas coloidales (Shaikh et al., 2017).

El potencial zeta se determina indirectamente mediante mediciones microelectroforéticas, en las que se registra el movimiento de las partículas coloidales de un electrodo a otro bajo la aplicación de un campo eléctrico. La ecuación (2.33) o de Henry permite estimar el potencial zeta:

$$U_E = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \psi \cdot F(\kappa a)}{3 \cdot \eta} \quad (2.33)$$

Donde:

- U_E es la movilidad electroforética, en $\left[\frac{m^2}{s \cdot V}\right]$.
- ε es la constante dieléctrica.
- ψ es el potencial zeta, en [V].
- $F(\kappa a)$ es la función de Henry, que se basa en el grosor de la doble capa eléctrica dada por k^{-1} y por el radio de la partícula, ambas variables en [m], y la viscosidad η , en $[Pa \cdot s]$.

2.5. Coagulación

Según Macczak et al. (2020) la coagulación es el proceso en el que las partículas suspendidas en un medio acuoso o no acuoso se agregan y empiezan a formar micro flóculos.

De acuerdo con lo expuesto por Hogg (2000), las suspensiones de partículas finas que se encuentran en el procesamiento de minerales a menudo presentan un grado significativo de estabilidad, tendiendo a resistir la agregación. En la mayoría de los casos, esto se debe a la carga eléctrica adquirida por las partículas dispersas en medios acuosos. La carga adquirida por las partículas minerales en medio acuoso surge por las interacciones electroquímicas entre el sólido y la solución acuosa, además, esta carga puede verse reforzada por efectos de solvatación.

Existen varias formas para agregar las partículas suspendidas en un fluido, una de ellas, según Hogg (2000), consiste en la neutralización de cargas, apantallando las cargas eléctricas de las partículas, disminuyendo en consecuencia el potencial zeta, desestabilizando las partículas y facilitando su agregación.

Los micro flóculos o flóculos desestabilizados pueden crecer como resultado de colisiones entre partículas que se mueven unas respecto a otras debido a (Hogg, 2000):

- el movimiento browniano derivado de la energía térmica del fluido en suspensión.
- gradientes de velocidad en suspensiones agitadas mecánicamente.
- la sedimentación diferencial de partículas individuales o micro flóculos.

La desestabilización de las partículas coloidales en solución se logra mediante el uso de sustancias poliméricas, también conocidos como electrolitos, que se adsorben en la superficie de las partículas por atracción electrostática. Estos polímeros funcionan como especies iónicas altamente cargadas, pero en general se acepta que actúan a través del mecanismo de carga-parche que se explica en la subsección 2.5.1.

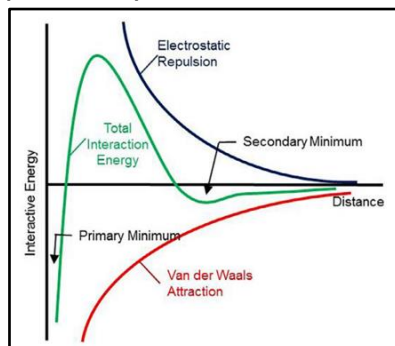


Figura 2.27. Esquema del balance de fuerzas de repulsión electrostáticas y las de Van der Waals de acuerdo con la teoría DLVO (Li et al., 2019).

Notar que cuando las partículas se apantallan, la fuerza de repulsión hidrostática es mínima, siendo la energía potencial dependiente principalmente de las fuerzas de Van der Waals, por lo que las partículas se agregarán con mayor facilidad en una masa sólida única.

Como se observa en la Figura 2.28, cuando las partículas se desestabilizan, el movimiento browniano conduce a la colisión de las partículas formando lotes de partículas cada vez más grandes, lo que se conoce como agregación pericinetica, conformando los denominados agregados, los que en función de su tamaño se les pueden llamar flóculos o micro flóculos, los que suelen precipitar o sedimentar (Maćczak et al., 2020).

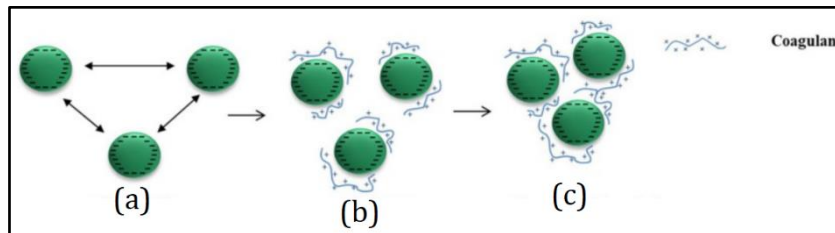


Figura 2.28. Mecanismo de coagulación por neutralización de cargas. (a) Coloides estables, (b) coloides inestabilizados, (c) micro flóculos (Yousefi et al., 2020).

Otra forma de eliminar las cargas de las partículas consiste en modificar el pH de la solución, puesto que las partículas poseen un punto isoeléctrico en el que no tienen carga neta y se vuelven inestables. Sin embargo, llevarlo a cabo en la práctica es complejo, puesto que en general el punto isoeléctrico de las partículas se encuentra en un intervalo de pH inconveniente respecto de la naturaleza del proceso industrial (Hogg, 2000).

En el caso de soluciones con partículas de minerales arcillosos, debido a su gran relación superficie/masa, según Macczak et a. (2020), lo más importante en este tipo de soluciones son las propiedades superficiales y los efectos electrocinéticos, concluyendo que la eficacia de la coagulación depende en gran medida de la minimización del potencial zeta de la solución.

Este proceso usualmente es seguido por la floculación, en la que se forman flóculos o agregados de mayor tamaño, los que debido a su tamaño y peso sedimentan por el efecto de la gravedad. El objetivo principal de la coagulación en conjunto con la floculación consiste en separar las partículas suspendidas del agua para recuperar agua libre de efluentes. Es necesario recalcar que los procesos nombrados están cubiertos por aspectos fundamentales de la química coloidal, adsorción superficial y dinámicas de agregación de crecimiento-rotura.

Así pues, la coagulación se lleva cabo a través de coagulantes inorgánicos, que son principalmente sales a base de aluminio y de hierro, o por coagulantes orgánicos que consisten en polímeros de bajo peso molecular con alta carga catiónica. El proceso de

coagulación puede llevarse a cabo a través de principalmente dos mecanismos distintos, el mecanismo de carga-parche y por el aumento de la concentración de iones en el medio.

2.5.1. Mecanismo de carga-parche

Acorde a lo expuesto por Shaikh et al. (2017), el mecanismo de carga-parche ocurre en presencia de compuestos polímeros de peso molecular no muy elevado que se adsorben en la superficie de carga opuesta de las partículas coloidales en suspensión, de modo que se genera una neutralización incompleta de las cargas superficiales de las partículas, formándose en la superficie fragmentos con carga positiva y negativa, tal como se exhibe en la Figura 2.29.

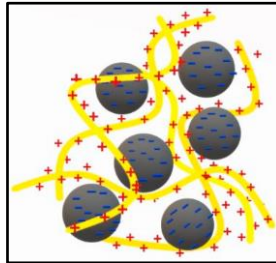


Figura 2.29. Esquema de la neutralización de cargas. Las líneas curvas representan las cadenas de polímeros que se adsorben a las partículas coloidales esféricas (Maćczak et al., 2020).

La Figura 2.29 demuestra que surgen dos regiones en la superficie de las partículas coloidales: la zona neutralizada por el polielectrolito que se presenta como parches y la superficie de la partícula descubierta cargada negativamente.

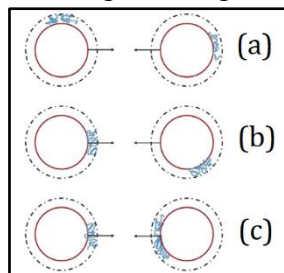


Figura 2.30. Escenarios de colisión entre dos partículas: (a) superficie desnuda-desnuda, (b) superficie cubierta-desnuda y (c) superficie cubierta-cubierta (Shaikh et al., 2017).

Cabe mencionar que, en este mecanismo, la agregación se produce principalmente por la interacción de los parches con las regiones desnudas de la superficie de las otras partículas, que vendría a ser el caso de la Figura 2.30 (b), donde una molécula de polielectrolito puede como máximo, proporcionar un único enlace partícula-partícula. Respecto de la cantidad de colisiones, la agitación provoca que el número de colisiones aumenten por unidad de tiempo, formando una mayor cantidad de uniones entre las partículas (Shaikh et al., 2017).

Según Macczak et al. (2020) la presencia de cargas negativas y positivas en distintos sitios de la superficie de las partículas generan atracción de las partículas vecinas, provocando la agregación (Figura 2.31).

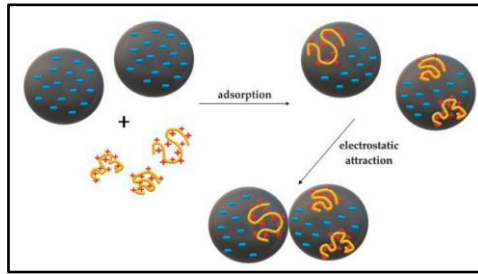


Figura 2.31. Mecanismo del modelo de carga-parche para la coagulación (Maćczak et al., 2020).

Es necesario recalcar que los microflocúlos formados por el mecanismo de carga-parche es sensible al cizallamiento y a las turbulencias del medio, no obstante, la reagrupación se produce fácilmente en condiciones de bajo cizallamiento (Williams, 2007).

2.5.2. Mecanismo por el aumento de la concentración de iones

Conforme a lo expuesto por Shaikh et al. (2017), la doble capa se puede comprimir aumentando la concentración de iones de carga opuesta en solución, lo que reduce la energía repulsiva y, por tanto, desestabiliza la suspensión. Las soluciones minerales tienden a tener partículas de carga negativa, por lo que la desestabilización de las partículas se puede lograr por la adición de iones multivalentes, como sales de aluminio o de hierro. La hidrólisis de estas sales conduce a la formación de hidróxidos coloidales que se adsorben en la superficie de las partículas del medio (Hogg, 2000) (Maćczak et al., 2020).

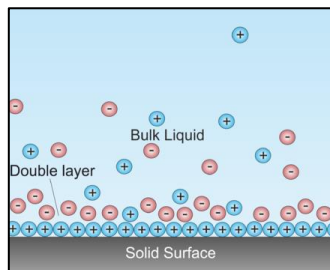


Figura 2.32. Esquema de la doble capa eléctrica en solución acuosa en la interfase con una superficie cargada negativamente de un sólido mineral (Wikipedia, 2011).

2.6. Modificadores reológicos

Un modificador reológico es un compuesto que tiene alta carga catiónica que puede tener forma de sales o de un polímero de bajo peso molecular ($<10^6$ [g/mol]) dependiendo de su naturaleza química. Los objetivos de los modificadores reológicos en la recuperación de agua de los relaves mineros son:

- Desestabilizar las partículas de la suspensión mediante la neutralización parcial de sus cargas superficiales para promover su aglomeración.
- Disminuir la viscosidad del fluido mediante el aumento de la dimensión fractal masa-longitud de los flocúlos formados en el proceso de espesamiento de relaves.

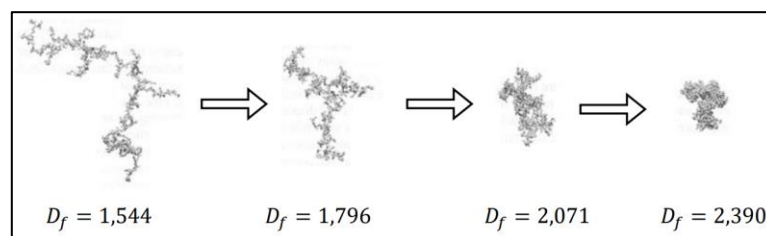


Figura 2.33. Evolución de la estructura de los flóculos en función de la dimensión fractal masa-longitud. Imagen adaptada (Concha, 2014).

En términos de tratamiento de aguas y de residuos, los modificadores reológicos se clasifican en dos tipos, principalmente inorgánicos y orgánicos.

Los modificadores reológicos inorgánicos son principalmente sales a base de aluminio o hierro. Los que son a base de aluminio incluyen cloruro de aluminio, sulfato de aluminio, aluminato de sodio y policloruro de aluminio. En cambio, los que son a base de hierro incluyen cloruro férrico, sulfato férrico y sulfato ferroso (Solenis, 2018).

En cambio, los modificadores reológicos orgánicos suelen ser polímeros solubles en agua originados a partir de diversos compuestos de macromoléculas naturales, como las poliaminas, el cloruro de polidildimetilamonio y la dimetilamina. Los grupos funcionales de hidroxilos, ácidos carboxílicos y aminas se consideran los principales ingredientes que promueven las funciones características de estos productos (Maćczak et al., 2020). En relación con la estructura del polímero, se incluyen monómeros de cloruro de dialil dimetil amonio, etileno imina, comonómeros de epiclorhidrina y dimetilamina, taninos modificados catiónicamente y melamina formaldehído (Solenis, 2018).

Según Hogg (2000) los polímeros de un peso molecular del orden de 10^5 [g/mol] proporcionan una relación adecuada entre el tamaño del parche y la concentración molecular a un nivel de dosis razonable para llevar a cabo el mecanismo de coagulación de carga-parche.

Nombre	Densidad de carga [%]	Peso molecular [g/mol]	Estructura
Poliamina epiclorohidrina	Muy alta	60.000	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{N}^+ \text{---} \text{CH}_2 \text{---} \text{CH} \text{---} \text{CH}_2 \\ \quad \\ \text{CH}_3 \quad \text{OH} \end{array} \right]_n$
Cloruro de polidialildimetilamonio (PolyDADMAC)	Muy alta	100.000	

Tabla 2.2. Algunos modificadores reológicos en función de su densidad de carga, peso molecular y estructura (Yousefi et al., 2020).

Es necesario recalcar que, según Solenis (2018), la aplicación de modificadores reológicos inorgánicos es más económica que la de modificadores reológicos orgánicos.

2.7. Floculación

Según Kurniawan et al (2020) la floculación es un proceso físicoquímico en el que partículas y micro flóculos dispersos en un solvente, por la acción de sustancias químicas poliméricas llamadas floculantes, se agrupan y forman agregados de partículas de mayor tamaño, los que se denominan flóculos y tienden a sedimentar y a separarse del solvente, lo que facilita su posterior eliminación o tratamiento. En consecuencia, la floculación mejora las condiciones del proceso de sedimentación al unir las partículas desestabilizadas aumentando su velocidad de sedimentación.

Normalmente, la floculación se suele confundir con la coagulación, sin embargo, son mecanismos distintos que se complementan de forma sinérgica.

El proceso de floculación se lleva a cabo en presencia de floculantes, que son polímeros que pueden ser catiónicos, aniónicos o no iónicos de alto peso molecular, en particular, conforme a lo expuesto por Castillo et al. (2023), la gran mayoría de los floculantes utilizados en los relaves provenientes de la industria minera se basan en una columna vertebral de poliacrilamida. Los floculantes pueden actuar a través de, principalmente, tres mecanismos distintos, la floculación por puenteo, por enlace salino y por barrido.

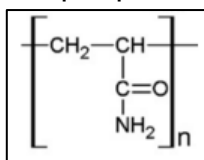


Figura 2.34. Estructura química del monómero de la acrilamida (elaboración propia).

2.7.1. Floculación por puenteo

Conforme a lo expuesto por Macczak et al. (2020), algunos segmentos del floculante se adsorben en la superficie de las partículas coloidales, dando lugar a bucles y colas suspendidos en solución (Figura 2.35), los que pueden unirse a partículas adyacentes para formar agregados cada vez de mayor tamaño. Cabe destacar que el polímero se adsorbe como resultado de las fuerzas de Van der Waals o formación de puentes de hidrógeno con los grupos funcionales de las partículas coloidales.

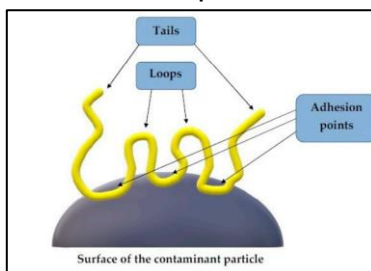


Figura 2.35. Modelo de la cadena polimérica adsorbida en la partícula sólida en suspensión (Maćczak et al., 2020).

Este mecanismo es eficaz para polímeros de alto peso molecular ($>10^6$ [g/mol]) que tienen la misma carga que las partículas coloidales. Estos flocculantes otorgan facilidad para el puenteo debido al entrelazamiento de las largas cadenas en forma de espirales aleatorias que contribuyen al atrapamiento de las partículas en la red física formada y a la posibilidad de cambiar de conformación en la solución en función de su capacidad de flexibilidad, favoreciendo la adaptación de la forma de las cadenas poliméricas a las partículas coloidales unidas (Figura 2.36).

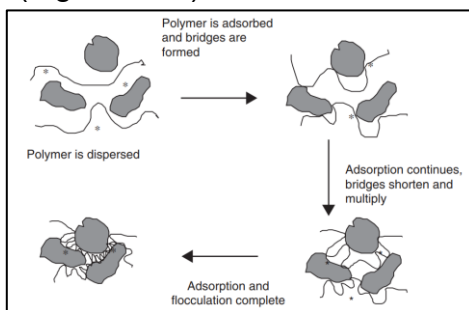


Figura 2.36. Mecanismo de flocculación por puenteo (Williams, 2007).

Cabe mencionar que las macromoléculas adsorbidas pueden sufrir un proceso de relajación, que ocurre cuando se vuelven planas en la superficie de la partícula coloidal, siendo incapaces de unirse con otras partículas, volviéndose el polímero inactivo (Figura 2.37 C). Para evitar la inactivación no deseada del flocculante, se suelen utilizar mezclas de polímeros, donde un polímero proporciona sitios de adsorción para que el otro contribuya a una conformación más alargada de las macromoléculas adsorbidas (Maćczak et al., 2020).

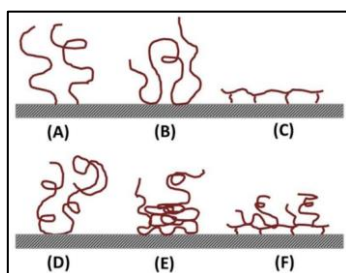


Figura 2.37. Posibles conformaciones del flocculante polimérico tras la adsorción (C. Wang et al., 2014).

Según Williams (2007) los flocculantes que actúan principalmente por el mecanismo de puentes tienen un alto peso molecular y un bajo contenido en cargas eléctricas.

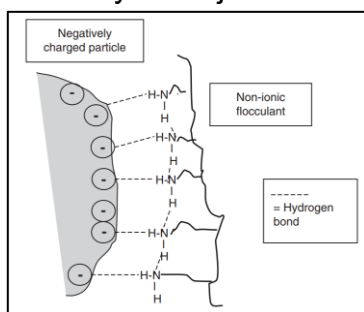


Figura 2.38. Representación esquemática de la adsorción polímero-partícula mediante puentes de hidrógeno (Williams, 2007).

De acuerdo con lo expuesto por Macczak et al. (2020), la eficiencia del mecanismo de floculación por puentes depende del peso molecular del polímero y de sus ramificaciones en solución, sin embargo, la literatura presenta distintos puntos de vista, estableciendo que la ramificación de la cadena polimérica puede ser favorable como desfavorable.

2.7.2. Floculación por enlace salino

De acuerdo con lo expuesto por Williams (2007), la floculación por enlace salino es más frecuente en aplicaciones de la industria minera, donde la carga superficial global de las partículas es desigual, puesto que suelen tener carga superficial negativa con abundante disponibilidad de cationes en la superficie de estas. En consecuencia, suelen formarse enlaces salinos entre los cationes y los grupos colgantes cargados negativamente de los flocculantes aniónicos (Figura 2.39), formando flóculos cada vez de mayor tamaño (Williams, 2007).

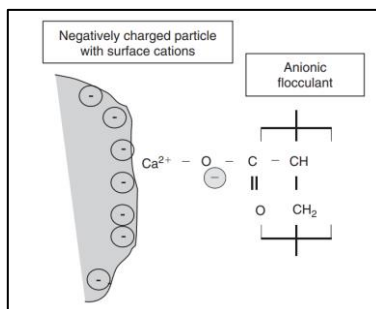


Figura 2.39. Representación esquemática de la adsorción polímero-partícula por enlace salino (Williams, 2007).

2.7.3. Floculación por barrido

Otro mecanismo descrito en la bibliografía es la floculación por barrido. Este tipo de floculación puede ocurrir como consecuencia de todos los mecanismos de floculación y coagulación explicados anteriormente, puesto que una vez que se forman los microfloculos o flóculos, estos pueden tener estrecho contacto con las partículas del medio, arrastrándolas o barriéndolas, formando agregados de mayor tamaño. Cabe mencionar que cuando los agregados formados barren con otras partículas se les denomina flóculos de barrido (Maćczak et al., 2020).

Según Macczak et al. (2020), la floculación por barrido es un proceso que se produce principalmente en la presencia de sales inorgánicas y a pH neutro, además de no ser selectivo, es decir, que también puede atrapar otras impurezas solubles. Por ejemplo, ante la incorporación de sales inorgánicas, ya sean de aluminio o de hierro, a un relave minero, por el mecanismo de aumento de concentración de iones en el medio, las partículas coloidales se desestabilizan, formando flóculos de barrido, los que en su movimiento a través del fluido, van capturando partículas coloidales de carga negativa conduciendo al aumento del tamaño de los flóculos y su sedimentación (Figura 2.40)

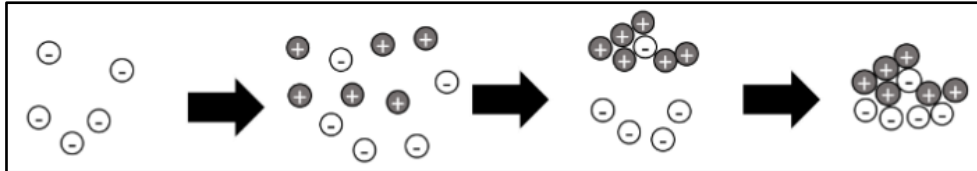


Figura 2.40. Mecanismo de floculación por barrido (Kurniawan et al., 2020).

Los factores principales que afectan la floculación por barrido son la concentración de partículas coloidales y el grado de la agitación.

2.7.4. Aspectos generales de la floculación

Kurniawan et al. (2020) establece que, en la práctica, el proceso de floculación se puede llevar a cabo a través de los tres mecanismos de floculación explicados. No obstante, dependiendo del tipo de polímero que se agregue a la solución para ejercer la floculación, algún mecanismo predominará más que otro.

Por otra parte, Shaikh et al. (2017) establece que, a diferencia de la coagulación, cuando se añade el floculante a la solución a tratar, se debe realizar una mezcla lenta y suave del floculante en esta, para que el floculante pueda expandirse y así aumentar la agregación, creando flóculos que sedimentan con mayor facilidad.

El trabajo realizado por Macczak et al. (2020) establece que existe una dosis óptima de floculante, y la superación de este límite conduce a la re-estabilización de las partículas en suspensión.

Según Yousefi et al. (2020) en las aplicaciones industriales se suele combinar el mecanismo de la coagulación con la floculación para mejorar el rendimiento del tratamiento de residuos.

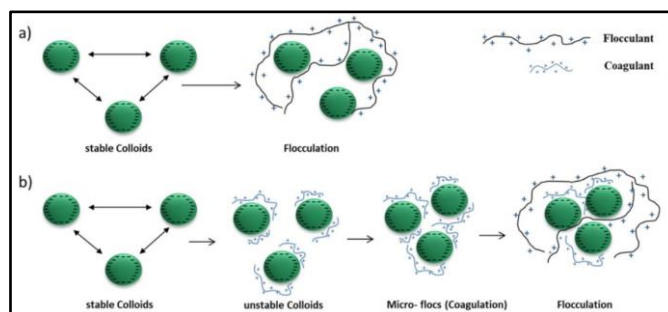


Figura 2.41. Flóculos producidos por (a) únicamente por el mecanismo de floculación y (b) el mecanismo híbrido de coagulación-floculación (Yousefi et al., 2020).

2.7.5. Rotura y reconfiguración de los flóculos

Con respecto a la rotura de los flóculos, basándose en lo expuesto por Hogg (2000), está demostrado que las tasas de rotura de los flóculos formados en la solución aumentan a medida que su tamaño y la intensidad de la agitación incrementan.

Sin embargo, en algunos casos, la reversibilidad de la floculación puede ser un aspecto positivo, puesto que se ha demostrado que la rotura y el nuevo crecimiento de los flóculos dan lugar a un sedimento denso y compacto y a una separación más eficaz, incluso con una dosis reducida de floculante (Maćczak et al., 2020).

2.8. Floculantes

Según Williams (2007) un floculante es un polímero de un peso molecular en un rango de 10^6 a 2×10^7 [g/mol] que agrupa las partículas contaminantes contenidas en una suspensión para provocar su sedimentación y obtener un solvente más puro, generalmente agua.

Un buen floculante se caracteriza por eliminar eficazmente las impurezas en su concentración más baja posible y en el menor tiempo posible. Son especialmente beneficiosos para aumentar la velocidad de sedimentación lenta de los agregados o flóculos, ya que aumentan el tamaño de los flóculos formados (Maćczak et al., 2020).

Los floculantes más utilizados para la concentración de residuos ultrafinos son los polímeros derivados del monómero acrilamida, debido a su bajo precio, buen efecto y rendimiento. La copolimerización de la acrilamida con otros monómeros puede proporcionar grupos cargados que permitan al polímero adoptar una conformación extendida en solución (por ejemplo, carboxilato o sulfonato), sean catiónicos o aniónicos (Owen et al., 2009). En particular, la mayoría de los productos comerciales utilizados en el procesamiento hidrometalúrgico son copolímeros de acrilamida y acrilato de sodio de diferentes composiciones o pesos moleculares (Grabsch et al., 2013).

Los principales monómeros hidrosolubles que se han desarrollado en la fabricación de floculantes se encuentran en la Figura 2.42.

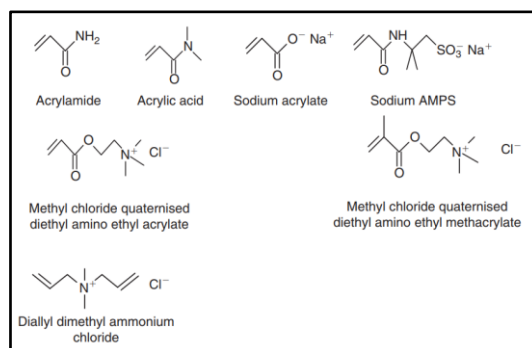


Figura 2.42. Estructura química de los principales monómeros de los polímeros fabricados como floculantes (Williams, 2007).

2.8.1. Floculantes no iónicos

Los polímeros no iónicos pueden estar formados por uno o más monómeros no iónicos etilénicamente insaturados solubles en agua, por ejemplo, la acrilamida, metacrilamida, acrilato de hidroxietilo y N-vinilpirrolidona. Cabe mencionar que estos tipos de polímeros también pueden incluir alcoholes multifuncionales alcoxilados (Solenis, 2018).

2.8.2. Floculantes aniónicos

De acuerdo con lo expuesto por Solenis (2018), los polímeros aniónicos se pueden formar a partir de uno o más monómeros no iónicos y aniónicos etilénicamente insaturados o solo con monómeros aniónicos. Algunos monómeros aniónicos corresponden al ácido acrílico, el ácido metacrílico, el ácido maleico, el ácido crotonico, el ácido itacónico, el ácido vinilsulfónico, el ácido alílico sulfónico, el ácido 2-acrilamido-2-metilpropano sulfónico (AMPS), sus mezclas y sales.

Dependiendo de la copolimerización, la PAM puede tener diversos grados de carga, ya sea aniónica o catiónica. La presencia de carga eléctrica en disolución puede dar lugar a repulsiones y, por tanto, a una conformación de cadena mucho más extendida, que puede favorecer la floculación por el mecanismo de puenteo (Castillo et al., 2023).

En la Tabla 2.3, 2.4 y 2.5 se presentan ejemplos de floculantes utilizados en la floculación de suspensiones minerales.



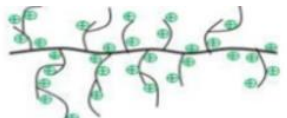
Densidad de carga [%]	Peso molecular [g/mol]	Estructura
40	$7-10 \times 10^6$	Lineal 
40	$7-10 \times 10^6$	Ligeramente ramificada 
40	$4-7 \times 10^6$	Altamente ramificada 

Tabla 2.3. Distintos tipos de poliacrilamidas en función de carga, peso molecular y estructura (Yousefi et al., 2020).

Tipo de poliacrilamida	Peso molecular [g/mol]	Densidad de carga [C/g]	Porcentaje cargado del monómero [%]
Aniónico	$5,5-7 \times 10^6$	-260	30
Catiónico	$6-7 \times 10^6$	+150	19
No iónico	5×10^6	-1,07	0

Tabla 2.4. Tipos de poliacrilamidas en función de su naturaleza iónica, peso molecular, densidad de carga y porcentaje del monómero cargado (Besra et al., 2004).

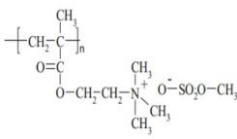
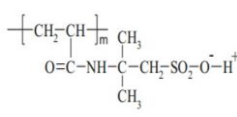
Nombre	Estructura	Peso molecular [g/mol]	Radio de giro [nm]	Radio hidrodinámico [nm]	Densidad de carga del monómero $\left[\frac{mg-equiv}{g}\right]$
Poly-trimethoxyethylmethacryloylammonium methyl sulfate		$1,1 \times 10^6$	80	34	3,53
Poly-2-acrylamido-2-methyl-1-propane sulfonic acid		$2,4 \times 10^6$	107	46	4,83

Tabla 2.5. Características de dos floculantes utilizados en la floculación de una dispersión de caolinita acuosa (S. S. Dryabina et al., 2020).

2.9. Espesamiento de relaves con modificadores reológicos y floculantes

El espesamiento de relaves en espesadores gravitacionales con la ayuda de coagulantes y floculantes es una de las tecnologías más rentables para la recuperación de agua de los relaves producidos por la industria minera (Arjmand et al., 2019).

Según Hogg (2000) el rendimiento de un proceso de floculación debe evaluarse adecuadamente en función de la distribución del tamaño y la estructura de los flóculos. Sin embargo, en la práctica se suelen utilizar medidas indirectas como la velocidad de sedimentación, la turbidez del sobrenadante y la compresibilidad del sedimento. La velocidad de sedimentación y la turbidez vienen determinadas principalmente por la distribución del tamaño de los flóculos, aunque la primera también puede verse afectada por la estructura de los flóculos.

La elección del polímero óptimo tiende a realizarse mediante pruebas empíricas debido a la compleja naturaleza de las interacciones entre el polímero, los sólidos en suspensión y los disueltos en un sustrato (Williams, 2007).

Paralelamente, para evaluar el transporte del relave espesado se suelen cuantificar las variables reológicas del fluido, con el fin de evaluar su fluidez a través de las tuberías hacia el depósito de relaves.

2.9.1. Velocidad de sedimentación

La velocidad de sedimentación corresponde a la velocidad a la que las partículas suspendidas en un líquido se depositan en el fondo debido a la gravedad. Es una medida de eficiencia con la que las partículas se separan del líquido y se asientan en el fondo.

Normalmente, ante la ausencia de floculantes en el proceso de sedimentación, la velocidad de sedimentación es baja y, para aumentarla, debe añadirse una pequeña cantidad de floculante polimérico (Figura 2.43).

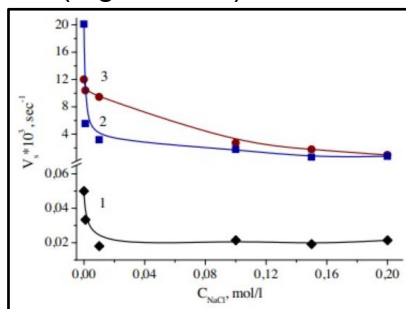


Figura 2.43. Velocidad de sedimentación de un sistema (1) sin floculantes, (3) usando un único floculante y (2) usando una mezcla de dos floculantes en función de la concentración de sales (S. Dryabina et al., 2017).

La velocidad de sedimentación de un proceso batch se puede calcular por distintos métodos, ya sea por el de Coe y Clevenger, el de Kynch, el de Richardson y Zaki u otros que modelan fenómenos particulares (Concha, 2014).

Asimismo, la relación entre la velocidad de sedimentación y el área del espesador están relacionados de manera inversa. Por lo que si la velocidad de sedimentación operativa en el espesador es menor a la de diseño, significa que las partículas sólidas tardan más tiempo en depositarse, lo que puede resultar en una menor concentración de sólidos en a la salida del espesador y una mayor retención de líquido en el equipo, lo que disminuye la capacidad de procesamiento y, en consecuencia, una menor eficiencia de separación. Por el contrario, si la velocidad de sedimentación operativa es mayor a la de diseño, ocurrirá una separación más rápida de los sólidos, lo que conlleva una mayor capacidad de procesamiento. Sin embargo, no hay que sobrepasar en exceso el valor crítico, puesto que se puede generar problemas de filtración o arrastre de sólidos en el overflow.

2.9.2. Claridad del agua recuperada

De acuerdo con Macczak et al. (2020), la turbidez es el parámetro que indica la cantidad de impurezas del medio en el que se está trabajando, generalmente agua.

De acuerdo con lo expuesto por Hogg (2000), hay dos aspectos básicos para la clarificación del agua recuperada en el proceso de sedimentación:

- Para disminuir la turbidez del agua se requiere que todas las partículas en suspensión, en especial las más finas, deben incorporarse a los flóculos.
- Los flóculos deben ser lo suficientemente grandes como para proporcionar tasas de sedimentación adecuada para minimizar las interacciones hidrodinámicas entre los flóculos y el sobrenadante.

Los problemas de clarificación encontrados en aplicaciones industriales probablemente surjan de una desestabilización inadecuada. La desestabilización de las partículas disueltas es sensible a la química del agua, pH y especies iónicas disueltas, de modo que fluctuaciones relativamente menores pueden afectar drásticamente la clarificación (Hogg, 2000).

El principal problema de la recuperación de agua es la recirculación de contaminantes a la planta de procesamiento, puesto que un agua muy turbia puede obstruir los medios de filtración, aumentar las pérdidas de carga en las cañerías, provocar incrustaciones, reducir la transferencia de calor, afectando la eficiencia energética del proceso y daños o desgastes prematuros en bombas y válvulas, reduciendo así la vida útil de los equipos y aumentando el CAPEX y OPEX del proceso. Por lo que la optimización de los sistemas de deshidratación es de vital importancia, sobre todo en las zonas mineras que sufren escasez de agua (Arjmand et al., 2019).

De acuerdo con Macczak et al. (2020), el principio de la medición de la turbidez del agua se basa en el supuesto de que la luz penetra sin perturbaciones en una capa de agua pura, mientras que la presencia de partículas en suspensión provoca su dispersión o absorción. De modo que el efecto Tyndall, es decir, la dispersión de la luz por las

partículas coloidales, varía en función del tamaño, la forma, la concentración, la composición química y el índice de refracción de las partículas.

La medición de la intensidad de la luz dispersa o transmitancia es la base de los métodos utilizados tanto en las plantas de tratamiento de aguas como en las pruebas de laboratorio. Actualmente, el método estándar consiste en medir la luz difusa con un ángulo de 90°. Los instrumentos que utilizan este método son los nefelómetros o turbidímetros y el resultado de la medición suele expresarse en unidades nefelométricas de turbidez (NTU), así como en unidades de turbidez de formazina (FTU) o unidades de atenuación de formazina (FAU), dependiendo de la tecnología del método utilizado (Maćczak et al., 2020).

2.9.3. Concentración de sólidos del relave

De acuerdo con el trabajo de Hogg (2000), la concentración de sólidos de una suspensión hace referencia a la proporción entre los componentes sólidos contenidos en el medio y la masa total del fluido. Dicha concentración se suele expresar como un valor porcentual en masa, que representa la masa de los sólidos en relación con la masa total del fluido.

Considerando la concentración de sólidos de relave espesado, también denominada compactación, se tiene que mientras mayor concentración de sólidos alcance el relave procesado, por balances de masa se puede asociar a una mayor recuperación de agua, por lo que la compactación del relave a la salida del espesador es proporcional con la recuperación de agua del proceso.

De acuerdo con lo expuesto por Nasser y James (2007), la red de flóculos precipitados en una suspensión permanecerá en su forma original hasta que una presión aplicada sobre la red supere su tensión. En caso de que la tensión de la red sea superada, entonces se formarán nuevos y más enlaces hasta que la red sea lo suficientemente fuerte como para oponerse de nuevo a la compresión (Nasser & James, 2007).

Según Hogg (2000) la estructura de los flóculos formados está directamente relacionada con la recuperación de agua de los relaves, de modo que se produce una mayor compactación cuando el peso del conjunto de flóculos o sedimento supera la tensión existente en la estructura de los flóculos. Asimismo, cuando las estructuras de los flóculos grandes son sometidas a altas velocidades de cizallamiento estos se suelen romper, permitiendo que el agua pueda egresar a través de los poros de los flóculos con facilidad.

Antes de explicar los métodos de medición de la compactación o concentración de sólidos del relave se debe definir el concepto de gravedad específica.

La gravedad específica, también conocida como densidad relativa, es una medida que compara la densidad de una sustancia con respecto a la densidad de otra sustancia de

referencia. Usualmente, la sustancia de referencia utilizada es el agua a una temperatura y presión determinadas. Matemáticamente, se expresa en la ecuación (2.34).

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2.34)$$

Donde:

- ρ_r es la gravedad específica o densidad relativa, en $[\frac{kg}{m^3}]$.
- ρ es la densidad de la sustancia a medir, en $[\frac{kg}{m^3}]$.
- ρ_0 es la densidad de la sustancia de referencia, en $[\frac{kg}{m^3}]$.

La densidad de la sustancia, en este caso el relave, se suele medir con un densímetro, densímetro digital o un picnómetro.

En cuanto a la medición de la compactación, esta se puede realizar de tres formas distintas: el primer método consiste en masar y situar la muestra de relave en un horno a alta temperatura, para que luego de un tiempo estimado se vuelva a masar el contenido resultante, obtenido la masa neta del sólido, de esta forma, mediante balances de masa y proporciones se determina la compactación de la muestra de relave analizada. El segundo método consiste en medir la densidad del sólido del relave utilizando un picnómetro, para luego calcular la gravedad específica e ingresar la muestra a la balanza Marcy, la que, en función de la gravedad específica del sólido, entrega directamente el valor de la compactación. Por último, en el tercer método, al igual que en el segundo, se debe registrar la densidad del sólido del relave, luego se registra la masa de la muestra, su volumen con un recipiente aforado y mediante la fórmula (10.52) se determina la compactación.

2.10. Factores que afectan la coagulación y floculación:

Según Kurniawan et al. (2020) existen diversos factores que afectan a la coagulación y floculación en el proceso de recuperación de agua desde los relaves mineros en los espesadores industriales, como el tipo de modificador reológico y floculante utilizado, su dosis respectiva, el proceso de mezclado y las características del relave. A continuación, se presentan los factores más importantes.

2.10.1. pH

Macczak et al. (2020) establece que la coagulación y floculación son procesos que dependen en gran medida de los cambios de pH, ya que esta variable afecta las afinidades y la conformación de los modificadores reológicos y floculantes de la adsorción sobre las partículas de la suspensión. Al mismo tiempo, el pH afecta la superficie de las especies disueltas en el solvente, afectando la adsorción de cationes. En caso de que el pH aumente considerablemente, puede ocurrir la precipitación de cationes multivalentes, añadiendo fases sólidas adicionales al sistema, inhibiendo la floculación (Castillo et al., 2023).

De acuerdo con lo expuesto por Castillo et al. (2023), en particular, el monómero del ácido acrílico tiene un pKa de 4,7 aproximadamente. Por lo tanto, será totalmente protonado a un pH menor a 3 y la HPAM, a un pH bajo, puede tener un comportamiento no iónico debido a la protonación de los grupos funcionales, inhibiendo su carga. Es por esto que, según Macczak et al. (2020), existe un pH óptimo para que cada floculante pueda llevar a cabo una floculación eficaz.

De acuerdo con el trabajo expuesto por Besra et al. (2004), se espera que el floculante, en una suspensión mineral alcalina, tenga una conformación expandida que cubra más superficie debido a que la superficie de los minerales arcillosos está cargada negativamente, lo que sumado a la carga negativa de los grupos carboxilo de los monómeros aniónicos, se genera una repulsión de modo que la adsorción del polímero aniónico sobre las partículas en suspensión sea baja, produciendo una floculación poco eficaz. En el caso de que el medio se vaya tornando ácido, las repulsiones cada vez se aminorarán, lo que generará que haya una mayor adsorción por parte del polímero sobre la superficie de las partículas (Figura 2.44).

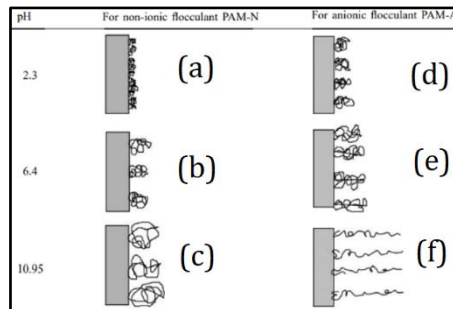


Figura 2.44. Ilustración esquemática del estado de la conformación del polímero adsorbido sobre las partículas de minerales arcillosos a diferentes pH (Besra et al., 2004).

En cambio, en el caso del floculante de poliacrilamida no iónica, se reporta que la variación de pH no influye significativamente en la densidad de adsorción del floculante sobre las partículas minerales del medio.

Además, la Tabla 2.6 obtenida del trabajo de Besra et al. (2004), establece que a pesar de que el pH no influye en la adsorción de partículas sobre la PAM no iónica, la velocidad de sedimentación se ve afectada notablemente, obteniendo valores mayores en medios alcalinos, en cambio, en el caso de la PAM aniónica se reporta que la velocidad de sedimentación no varía considerablemente en función del pH independiente de su adsorción sobre las partículas.

pH	For anionic flocculant PAM-A		For non-ionic flocculant PAM-N	
	Amount adsorbed (mg/g)	Settling rate (cm/s)	Amount adsorbed (mg/g)	Settling rate (cm/s)
2.3	1.87	0.27	2.0	0.38
6.4	0.08	0.14	1.71	0.60
10.95	0.099	0.02	1.98	1.356

Tabla 2.6. Efecto del pH en la adsorción del floculante sobre la superficie de las partículas minerales en suspensión con una dosis de floculante de 2 [mg de polímero/g seco de mineral] (Besra et al., 2004).

La Figura 2.45 indica que a medida que aumenta el pH, más negativa es la superficie de la caolinita.

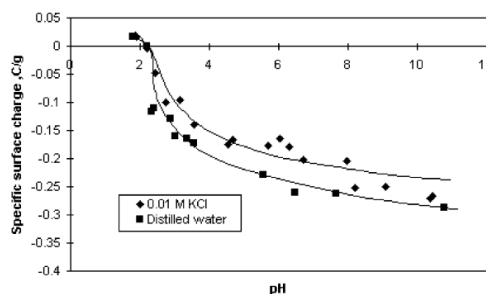


Figura 2.45. Efecto del pH en la carga de la superficie de suspensiones de caolinita (Besra et al., 2004).

2.10.2. Peso molecular del floculante

El peso molecular del floculante es clave para medir su eficiencia, puesto que es proporcional con su capacidad de ejercer la floculación por puenteo. Más peso molecular implica un mayor radio de giro del polímero y un mayor radio hidrodinámico de este en solución (Castillo et al., 2023).

En el trabajo expuesto por Shaikh et al. (2017) se establece que la capacidad de adsorción de las cadenas poliméricas de la poliácridamida no iónica sobre partículas de caolinita depende del peso molecular del polímero. Específicamente, las poliácridamidas tienen una alta capacidad de adsorción sobre la caolinita cuando el polímero tiene un peso molecular entre 10^6 y 10^7 [g/mol], disminuyendo considerablemente su capacidad cuando superan el límite superior de este intervalo, puesto que las cadenas poliméricas de sufren el entrelazamiento de las cadenas, bajando considerablemente el rendimiento de la floculación (Figura 2.46). Lo anterior se debe que en este rango de pesos moleculares se los polímeros extienden las cadenas poliméricas para ejercer la floculación mediante el mecanismo de puenteo, mostrando una floculación eficaz.

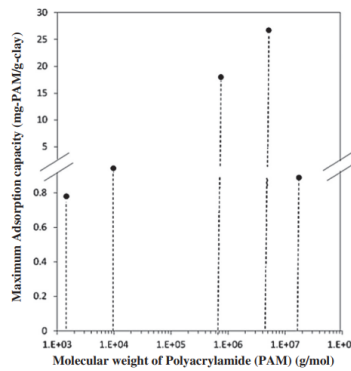


Figura 2.46. Efecto del peso molecular de una poliacrilamida no iónica en la capacidad de adsorción sobre partículas minerales de caolinita (Shaikh et al., 2017).

Además, según Hogg (2000) el peso molecular de los floculantes poliméricos influye proporcionalmente sobre la velocidad de sedimentación de la suspensión

2.10.3. Sales disueltas en el medio

Como ya se ha mencionado, la adición de sales inorgánicas provoca una reducción de la doble capa eléctrica por el cambio de la fuerza iónica de la solución, lo que promueve la formación y asentamiento de flóculos. Así pues, está demostrado que la velocidad de sedimentación de los flóculos suele aumentar a medida que aumenta la concentración de sales, no obstante, un exceso de sales puede provocar el efecto contrario (Maćczak et al., 2020).

2.10.4. Velocidad de cizallamiento o de corte

De acuerdo con Kurniawan et al. (2020), la mezcla es crucial en los procesos de coagulación y floculación. La base de la mezcla en la coagulación suele comprender un mezclado rápido para promover la formación de microfloculos para que al momento de agregar los floculantes, la intensidad de la agitación disminuya para fomentar la formación de flóculos de mayor tamaño. Es necesario recalcar que una velocidad de mezclado excesivamente baja y un tiempo de mezclado considerablemente corto pueden disminuir la velocidad de formación de flóculos, mientras que una velocidad de mezclado excesivamente rápida y un tiempo de mezclado considerablemente largo pueden favorecer la ruptura de los flóculos, causando una baja eficacia de sedimentación.

Respecto de la estabilidad de los flóculos en su asentamiento en la base de la suspensión, esta es afectada por la fuerza y el número de interacciones interfaciales entre las partículas aglomeradas. En caso de que solo haya puntos de contacto débiles y escasos, los flóculos pueden romperse fácilmente en partes más pequeñas y separadas (Maćczak et al., 2020).

De acuerdo con lo expuesto en el trabajo de Macczak et al. (2020), se ha observado que el aumento de la velocidad de cizallamiento provoca una fragmentación y erosión eficaces de los flóculos. Además, está demostrado que la velocidad de cizallamiento en

el mezclado de la suspensión afecta la fuerza de los flóculos precipitados, afectando en la eficiencia de la floculación.

Como se ha mencionado, el movimiento browniano es el mecanismo dominante para partículas de diámetros del orden de 1 [μm], es decir, de las partículas en la formación inicial de micro flóculos tras la desestabilización. Los efectos de la agitación empiezan a dominar en las etapas posteriores del crecimiento, cuando los flóculos existentes se agregan para formar unidades mayores (Hogg, 2000).

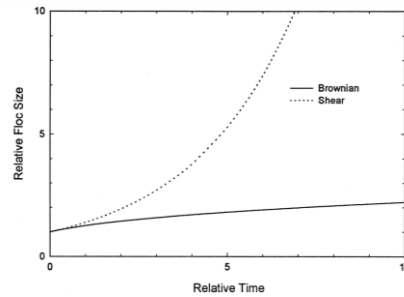


Figura 2.47. Crecimiento de los flóculos en función del tiempo ante la coagulación sin agitación y con agitación por cizallamiento a una velocidad constante (Hogg, 2000).

La Figura 2.47 exhibe que la agitación puede causar una gran diferencia en el tamaño de los flóculos formados.

2.10.5. Dosis de los modificadores reológicos y floculantes

De acuerdo con Macczak et al. (2020), un factor importante que influye significativamente en el proceso de floculación es la dosis de floculante. Tanto una dosis baja como una demasiado alta hacen que el proceso sea ineficaz. (Maćczak et al., 2020).

Por otra parte, se tiene que la dosis de floculante no responde de manera lineal ante los cambios de algunas variables como la velocidad de sedimentación (Figura 2.48) y difiere en función del peso molecular del floculante.

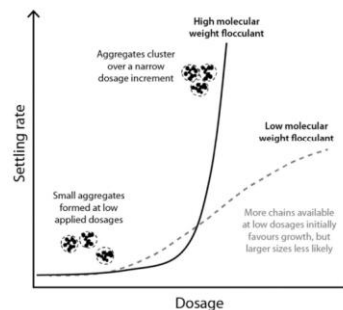


Figura 2.48. Velocidad de sedimentación en función de la dosis de floculantes de alto y bajo peso molecular (Castillo et al., 2023).

El trabajo de Arjmand et al. (2019) demuestra que la velocidad de sedimentación del relave aumenta con la dosis de floculante y disminuye a medida que se disminuye el pH, esto se debe a que en esas condiciones se ioniza en mayor grado los grupos carboxilos y en consecuencia hay una mayor repulsión electrostática que extiende en mayor grado

las cadenas poliméricas. En cambio, a medida que disminuye el pH, los polímeros aniónicos comienzan a enrollarse, disminuyendo su actividad (Figura 2.44).

Además, según Yousefi et al. (2020) se tiene que la turbidez del agua recuperada en el proceso de sedimentación a través de floculación se logra a una dosis óptima de floculante.

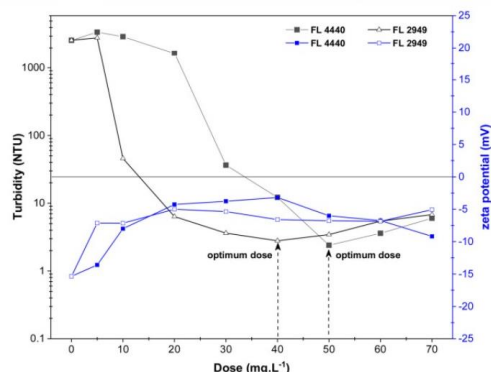


Figura 2.49. Variación en la turbidez y potencial zeta de un lodo acondicionado en un biorreactor de membrana con modificadores reológicos FL 4440 (PolyDADMAC) y FL 2949 (Poliamina) (Yousefi et al., 2020).

Asimismo, según Kurniawan et al. (2020) el exceso de dosis sobre la dosis óptima del floculante produce un aumento en la turbidez del agua recuperada porque dicho exceso conduce a una re-estabilización de las partículas en suspensión.

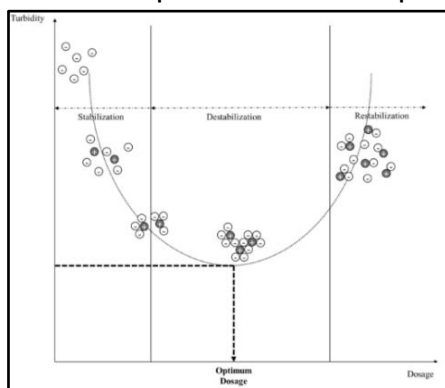


Figura 2.50. Fases del proceso de coagulación y floculación (Kurniawan et al., 2020).

Por otra parte, el trabajo de Mattew et al. (2002) concluyó que la tasa y capacidad de adsorción de los compuestos poliméricos sobre las partículas coloidales es proporcional a la cantidad de superficie disponible en el sistema, además que la resistencia del flóculo aumenta hasta cierto punto con la dosis de floculante (Taylor et al., 2002).

2.10.6. Concentración inicial de sólidos suspendidos (C_p)

Macczak et al. (2020) establece que la concentración de sólidos suspendidos puede afectar la eficacia de la purificación del agua. A veces, una mayor concentración de sólidos en la suspensión es más fácil de eliminar incluso con una pequeña dosis de floculante, debido a la alta probabilidad de colisión de las partículas, mientras que la

separación sólido-líquido en suspensiones con partículas pequeñas o diluidas puede ser más complejo tener una buena eficacia.

Según Castillo (2023), en las aplicaciones mineras, la dilución de sólidos busca compensar las limitaciones en los tamaños formados por la elevada fracción volumétrica efectiva de los relaves. La dilución puede ser excesiva, reduciendo el número de colisiones significativamente. Por lo tanto, la fracción de sólidos variará para diferentes alimentaciones y floculantes.

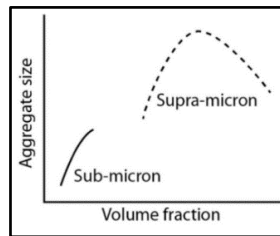


Figura 2.51. Como afecta la agregación de partículas en función del tamaño de partícula para el efecto de la fracción volumétrica de sólidos (Castillo et al., 2023).

2.10.7. Temperatura

De acuerdo con lo expuesto por Macczak et al. (2020), las diferencias de temperaturas influyen sobre el rendimiento de la floculación dependiendo de la resistencia térmica de los floculantes, que pueden ser termorresistentes o termosensibles, donde en el primer caso se tienen que presentar grandes diferencias de temperatura para observar cambios significativos en el rendimiento de la floculación. En cambio, ante cambios significativos de temperatura, las cadenas poliméricas de los floculantes termosensibles tienden a sufrir una reconformación, además de que su naturaleza hidrofílica suele cambiar a hidrofóbica.

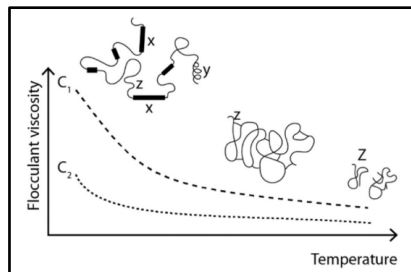


Figura 2.52. Representación esquemática de los cambios de una solución de floculantes debido a la temperatura, bajo un modelo de cambios conformacionales, donde "X" representa la estructura extendida, "Y" las estructuras helicoidales, "Z" los puentes de hidrógeno y C_1 una concentración de floculante más alta que C_2 (Castillo et al., 2023).

De acuerdo con lo expuesto por Castillo et al. (2023), los cambios de temperatura de la solución afectan principalmente al proceso de agregación de partículas.

Por otro lado, se ha demostrado que un aumento de temperatura en el rango de 10 °C a 80°C genera una disminución en la viscosidad de la solución polimérica a bajas concentraciones. Además, a temperaturas elevadas se puede alterar la conformación del polímero debido a la ruptura de las cadenas poliméricas y de los puentes de hidrógeno

entre los floculantes y el agua, formando estructuras enrolladas por las abundantes interacciones polímero-polímero (Figura 2.52) (Castillo et al., 2023).

2.10.8. Tamaño de partícula

El efecto de la fuerza electrostática que ejerce la doble capa de las partículas se considera despreciable para partículas que tienen un diámetro sobre 10 $[\mu m]$, por lo que la desestabilización de partículas va esencialmente dirigido a las partículas de menor tamaño (Castillo et al., 2023).

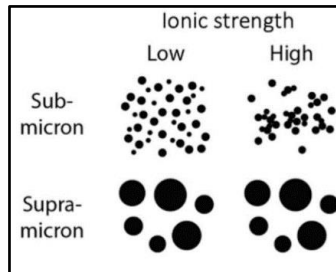


Figura 2.53. Como afecta la agregación de partículas en función del tamaño de partícula para el efecto de la fuerza iónica (Castillo et al., 2023).

Para formar un puente polimérico entre las partículas, se requiere de una cadena polimérica adsorbida sobre una partícula en suspensión que interactúa con la superficie desnuda de otra. En particular, según Castillo et al. (2023), la eficiencia de la colisión se relaciona con el grado de la superficie cubierta y se espera que sea óptimo con un 50% de cobertura para la aceleración cinética de la agregación. Por el contrario, leves dosis de polímero y poca efectividad en la cobertura de la superficie puede ser adecuada para agregar partículas de diámetro mayor a 20 $[\mu m]$, mejorando la eficiencia de la sedimentación.

Al mismo tiempo, de la Figura 2.54 se tiene que cuando se aumenta mucho la dosis de polímero, la superficie cubierta es mucha y empeorará la agregación cinética.

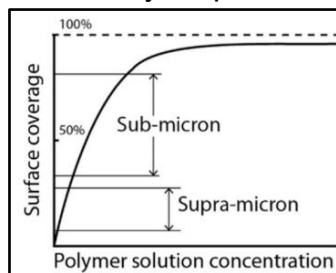


Figura 2.54. Como afecta la agregación de partículas en función del tamaño de partícula para el efecto de la cobertura superficial de las partículas (Castillo et al., 2023).

Conforme a lo expuesto por Castillo et al. (2023) la floculación por puenteo puede ser aplicada sobre partículas de diámetro del orden de 1 $[\mu m]$, sin embargo, no es viable como proceso autónomo. Considerando el caso de que un floculante de peso molecular 20×10^6 a una dosis de 25 $[g/t]$, se estima que solo el 20% de la estructura del polímero se adsorba sobre partículas de un diámetro promedio de 1 $[\mu m]$, en cambio, cuando el diámetro promedio de las partículas se reduce a 0,5 $[\mu m]$, solo se adsorbe un 10% de la

estructura del polímero sobre estas. En consecuencia, para aumentar la probabilidad de contacto se requieren dosis considerablemente altas.

2.11. Preparación de polímeros

Según Castillo et al. (2023), la forma física de los productos poliméricos puede presentarse en distintas formas, por ejemplo, como dispersiones acuosas, emulsiones, perlas o polvos, lo que influye en su manipulación y en la composición de la solución.

Los floculantes sólidos en polvo deben tener un 100% de polímero activo, pero son higroscópicos, por lo que los envases deben mantenerse cerrados para evitar la entrada de humedad, que puede formar grumos difíciles de dispersar. Respecto de su aspecto físico son granos irregulares de hasta varios milímetros, pero también pueden contener partículas menores a un diámetro de 0,1 [mm]. En relación con su duración, si se logra un almacenamiento adecuado deberían tener una larga vida útil (Castillo et al., 2023).

Por otra parte, según Castillo et al. (2023) los floculantes en emulsión tienen un contenido activo del polímero de hasta el 50% en peso, pero suele ser del 25% al 35% en peso para los pesos moleculares más altos. Pueden diluirse directamente y los problemas de estabilidad que posee hacen que su vida útil sea relativamente corta, del orden de seis meses.

Respecto de la preparación de las soluciones acuosas para su aplicación al proceso, los polímeros de bajo peso molecular pueden tener un contenido polimérico hasta una concentración del 50% en masa, en cambio, los de alto peso molecular hasta un contenido de polímero hasta un 1% en masa, puesto que a una concentración mayor la solución será muy viscosa y no se podría aplicar con eficiencia en la práctica (Castillo et al., 2023). De acuerdo con lo expuesto por Arjmand et al. (2019), los polímeros se preparan en dos pasos sucesivos, el primero consiste en preparar la solución madre, que consiste en una solución de mayor concentración para luego preparar la solución de trabajo, que sería la solución que se adicionaría al proceso en la práctica.

Las concentraciones de la solución madre y de trabajo suelen variar dependiendo del protocolo experimental. Según Arjmand et al. (2023), las concentraciones típicas de laboratorio para las emulsiones son con un contenido de polímero del 1% al 1,5% en masa y para los polvos con un contenido de polímero del 0,1% al 0,25% en masa.

2.11.1. Envejecimiento de la solución

Es necesario mencionar que los polímeros en solución suelen tener una vida limitada, es decir, tanto las emulsiones como los polvos una vez colocados en el agua sufren degradación, y el rendimiento del polímero se ve afectado negativamente (Arjmand et al., 2019). Según Castillo et al. (2023) las propiedades de las soluciones poliméricas en función del tiempo se han estudiado ampliamente, a menudo con conclusiones opuestas.

En el trabajo de Castillo et al. (2023), mediante la Figura 2.55 se describe esquemáticamente las cuatro etapas del envejecimiento de las soluciones poliméricas

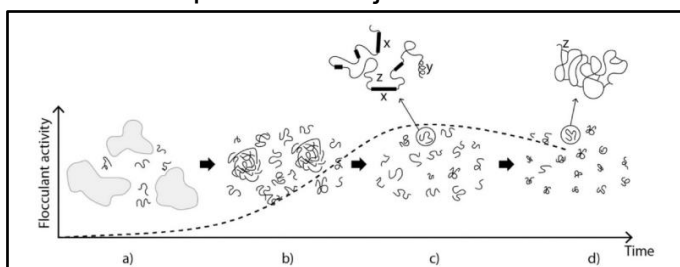


Figura 2.55. Etapas del envejecimiento de un floculante en solución, (a) formación de estructuras de gel: (b) dispersión del gel: (c) dispersión óptima de las cadenas poliméricas: (d) reconfiguración a largo plazo. Donde “X” representa la estructura extendida, “Y” las estructuras helicoidales y “Z” los puentes de hidrógeno (Castillo et al., 2023).

Según Castillo et al. (2023) la formación de las estructuras gelatinosas tiene una duración de una hora, luego de varias horas estas estructuras se dispersan, creándose aglomerados de floculante que coexisten con enredos pequeños entre las cadenas poliméricas y las cadenas libres. Luego de uno a tres días se establece un equilibrio en las cadenas libres del polímero, siendo la actividad del floculante óptima. Por último, después de varios días, las cadenas poliméricas se reconfiguran en espirales, siendo más compactas y estables. En resumen, los cambios en la viscosidad y la actividad floculante con el tiempo se han atribuido a la ruptura de la cadena o a la reconfiguración de las moléculas del polímero en solución.

En la misma línea, Castillo et al. (2023) establece que, a pesar de que siempre se encontrarán problemas con las soluciones de floculante polimérico con sus propiedades en función del tiempo en operaciones a gran escala, no debería haber problemas con las pruebas de laboratorio, no obstante, los estudios publicados no proporcionan detalles suficientes para confirmarlo

Cabe mencionar que la concentración de trabajo de la solución polimérica variará en función del tipo de floculante que se trate y las características del proceso en el que se utilice, características basadas en las variables que afectan la coagulación y la floculación descritas en la sección 2.10 (Castillo et al., 2023).

2.12. Pruebas de sedimentación

Las pruebas de sedimentación son ensayos de laboratorio que se realizan para evaluar el rendimiento de los modificadores reológicos y floculantes en los procesos de separación sólido-líquido de los lodos en procesos minerales o metálicos en términos de velocidad de sedimentación, compactación y claridad.

De acuerdo con lo expuesto por Amarjargal y Tasdemir (2023), los procedimientos de laboratorio típicos para evaluar las características de la floculación y la sedimentación de

suspensiones son la prueba de la probeta graduada y la prueba de jarras, sin embargo, estas pruebas tienen diferentes ventajas y desventajas entre sí. Respecto de las pruebas con el método de la probeta graduada, se coloca una muestra de relave en una probeta graduada y se agrega una cantidad de polímero determinada. Luego, la probeta se agita de forma manual para simular el proceso de floculación. Posteriormente, la suspensión flocula, formándose la interfase entre el agua clara y los flóculos que precipitan, en la que se mide la altura de la interfase para calcular la velocidad de sedimentación, luego, después de un tiempo determinado, se registra la altura de la interfase para evaluar la compactación del sedimento y se mide la turbidez residual del agua recuperada. La ventaja de este método es que se puede realizar de manera rápida y con facilidad. Dentro de las desventajas del método es que proporciona menos control de la velocidad de la mezcla y de agitación en comparación con la prueba de jarras, sumado a que la reproducibilidad de los experimentos en las mismas condiciones es más compleja.

Las pruebas de sedimentación intentan simular la separación líquido-sólido en términos relativos: es decir, la aplicación de modificadores reológicos en conjunto con floculantes que obtengan los mejores resultados debería tener la eficacia equivalente en el espesador dinámico industrial, sin embargo, esto solamente se puede corroborar en la prueba industrial.

2.13.Reometría

La reometría es la parte de la reología que proporciona métodos experimentales para determinar parámetros reológicos como la viscosidad y el yield stress (Concha, 2014).

Según Concha (2014) una velocidad de cizallamiento unidireccional produce flujos de cizallamiento simple, que pueden fluir en un tubo circular, en un espacio de cilindros concéntricos, entre dos placas planas, entre otros. Estos flujos son de interés para el procesamiento de minerales porque proporcionan las herramientas para diseñar tuberías, bombas y métodos experimentales para determinar las propiedades reológicas mediante gráficas de viscosidad o tensión en función de la velocidad de cizallamiento.

Asimismo, para caracterizar los relaves mineros se suelen usar dos tipos de viscosímetros, los rotatorios y los capilares. En particular, la medición de las propiedades reológicas de las pulpas minerales a velocidades de cizallamiento muy bajas con viscosímetros rotativos presenta el problema del deslizamiento de las partículas en el cilindro giratorio. Para evitar este problema, se utiliza el método del husillo de paleta o vane spindle por su traducción al inglés. Este método consiste en utilizar una paleta giratoria, como se muestra en la Figura 2.56, para medir el cuantificar la reología en condiciones estáticas. La paleta se sumerge en el relave y se hace girar a una velocidad inferior a 10 [rpm] aumentando el valor del torque en el tiempo.

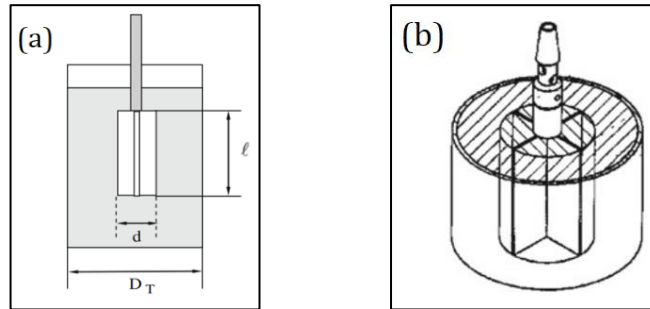


Figura 2.56. (a) Representación de las dimensiones del husillo de paletas que está contenido en un envase cilíndrico de diámetro D_T , (b) vista tridimensional del husillo de paletas (Concha, 2014).

Los husillos de paletas cuando se sumergen en un material, atrapan una parte de la muestra de ensayo entre las paletas sin crear perturbación en el fluido, formando un cilindro de muestra se moverá al girar el husillo de paletas a velocidades de rotación definidas, proporcionando datos exactos para calcular el esfuerzo de cizallamiento y la velocidad de cizallamiento (Brookfield, 2019).

2.14. Espesadores

De acuerdo con lo expuesto por Williams (2007), el objetivo de los espesadores es eliminar la mayor cantidad de agua a través de su salida en la superficie superior, denominada overflow, por lo que el material sólido se dirige a la salida inferior o underflow debido a su mayor densidad. Esta operación continua, con la acción de modificadores reológicos y floculantes, da como resultado un aumento de varias veces en la concentración de sólidos desde la alimentación hasta el flujo inferior. Así pues, el límite del rendimiento operativo está relacionado con la velocidad de sedimentación de los sólidos floculados mediante la relación establecida por Coe y Clevenger.

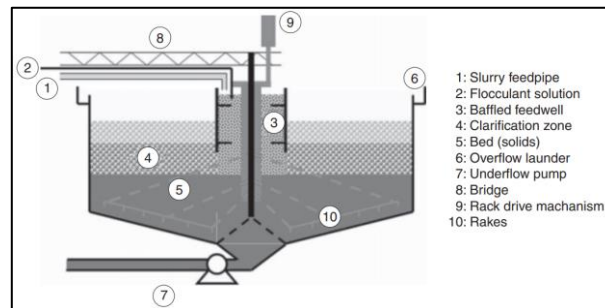


Figura 2.57. Esquema típico de un espesador (Williams, 2007).

De acuerdo con lo expuesto por Concha (2014), el espesador industrial, como el que se exhibe en la Figura 2.57, se compone de diez componentes, en el que el flujo de alimentación y de floculante ingresan por la parte superior del equipo, mezclándose en el “baffled feedwell”, que tiene por objetivo generar una mezcla homogénea en el espesador y diluir la muestra para llegar a la concentración de sólidos establecida por diseño del equipo. Luego, por el efecto de la floculación, los sedimentos precipitarán por el efecto de la gravedad hacia el underflow y el agua emergerá a través del sólido dirigiéndose al

overflow. El espesador también cuenta con rastrillos que giran a determinadas revoluciones por hora, el objetivo de estos consiste en arrastrar el sedimento floculado hacia el underflow para que no se produzca el efecto del embancamiento y forme canales para que el agua pueda ascender Figura 2.58 (a).

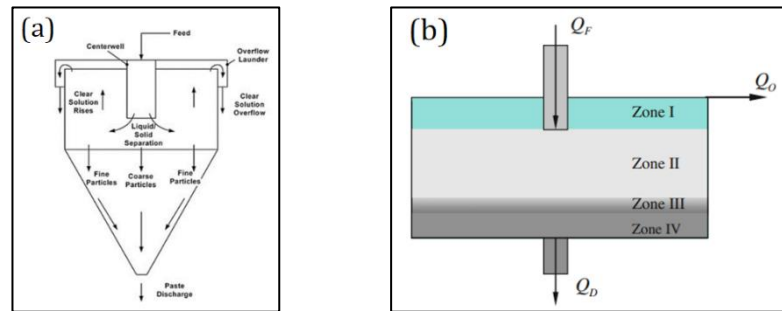


Figura 2.58. (a) Vista esquemática de un espesador de pasta con su modo de operación convencional y (b) espesador continuo ideal (Concha, 2014).

De acuerdo con la Figura 2.58 (b) existen cuatro zonas en un espesador continuo ideal:

- La zona I corresponde al agua clara recuperada, que se encuentra sobre la descarga de la alimentación.
- Por debajo de la zona I se forma una región de concentración constante correspondiente a la zona II.
- La zona III corresponde a la transición de la concentración constante de la zona II a la concentración final del sedimento.
- La zona IV representa la región de sedimentación, en la que se tiene la máxima concentración alcanzada por el sedimento, la que se mantiene constante hasta su salida del equipo.

Por último, existen diferentes tipos de espesadores, los que se categorizan en función de la concentración de sólidos que se alcance en el underflow. Cabe mencionar que todos los espesadores, independiente de las características operacionales, operan bajo el mismo principio (Schoenbrunn & Bach, 2015).

La Figura 2.59 muestra bocetos esquemáticos de los tipos de espesadores en función de la concentración de sólidos alcanzada en el underflow. Las principales diferencias entre estos tipos de espesadores son la ubicación del “baffled feedwell”, las dimensiones del equipo y su pendiente de inclinación. Si el espesador contiene una mayor altura y pendiente de inclinación, indica que es capaz de procesar un fluido a una mayor concentración de sólidos en el underflow. En relación con la concentración de sólidos alcanzada, la concentración de los espesadores convencionales en el underflow suele ser desde un 30 a un 50% en masa, en cambio, en espesadores de pasta se pueden alcanzar concentraciones desde un 69 hasta un 75% en masa.

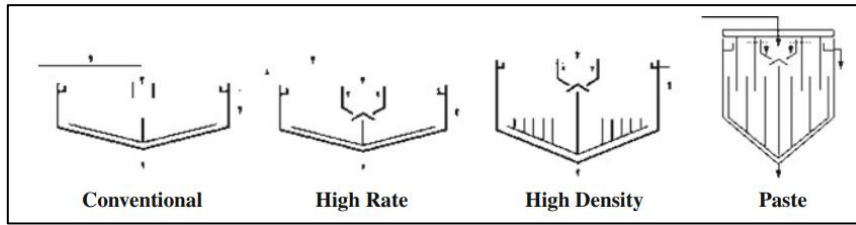


Figura 2.59. Bocetos esquemáticos de los diferentes tipos de espesadores (Concha, 2014).

2.15. Transporte de relaves a través de tuberías

De acuerdo con lo expuesto por Concha (2014), los patrones de flujo de las suspensiones en tubos dependen de la velocidad de transporte. En concreto, a bajas velocidades las partículas forman un lecho en el fondo del tubo, sufriendo el fenómeno del embanque del fluido en las cañerías (Figura 2.60 a). A medida que aumenta la velocidad, las partículas de la superficie del lecho comienzan a moverse (Figura 2.60 b). A velocidades más altas, las partículas del fluido se mueven en movimiento aleatorio, y algunas partículas quedan suspendidas y son arrastradas por el fluido (Figura 2.60 c). Si la velocidad aumenta, la mayoría de las partículas quedan suspendidas, pero algunas se sedimentan, en este caso, la suspensión se denomina suspensión de sedimentación y el régimen de flujo es heterogéneo (Figura 2.60 d). Aumentando aún más la velocidad, todas las partículas están suspendidas y las partículas y el fluido se comportan como una mezcla homogénea, la suspensión no se sedimenta y el régimen de flujo es homogéneo (Figura 2.60 e). Cada uno de estos comportamientos corresponde a una caída de presión y el tipo de movimiento puede controlarse mediante el gradiente de presión.

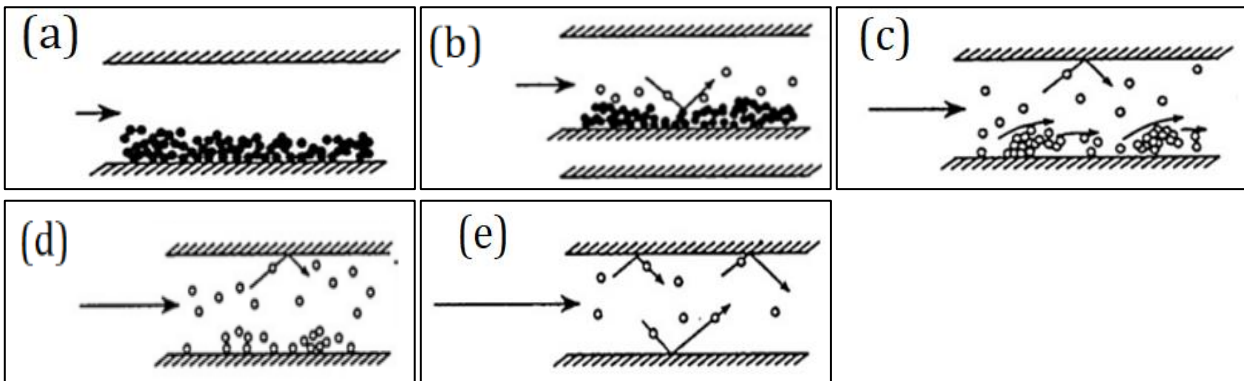


Figura 2.60. Ilustraciones representativas del comportamiento de las partículas de un fluido dentro de una tubería en función de su velocidad, donde ● representa a las partículas estacionarias y ○ las que están en movimiento. Imagen adaptada (Concha, 2014).

Según Concha (2014) el régimen más común que se da en la práctica es el de las suspensiones heterogéneas, en las que las partículas más grandes de la suspensión sedimentan, pero esto no cambia las características reológicas de la pulpa, aunque se produce un gradiente de concentración en la tubería.

Por otra parte, para evitar que las partículas sedimenten en la tubería en una suspensión heterogénea es asegurarse de que haya un régimen turbulento en la tubería. La forma más sencilla de que las partículas no sedimenten en un régimen heterogéneo es asegurarse de que el régimen sea turbulento y de que el número de Reynolds cumpla la condición expresada en la ecuación (2.35).

$$Re = \frac{D \cdot \bar{v}_z}{\nu} > 4000 \quad (2.35)$$

Donde:

- Re es el número de Reynolds.
- D es el diámetro de la tubería.
- \bar{v}_z es la velocidad promedio del fluido.
- ν es la viscosidad cinemática del fluido.

2.16. Validación estadística de resultados

2.16.1. Coeficiente de determinación

El coeficiente de determinación (R^2) o también llamado coeficiente de correlación múltiple al cuadrado, se define como la correlación al cuadrado de la variable dependiente y los valores ajustados. Asimismo, se utiliza como medida aproximada de la fuerza de una relación que se ha ajustado por mínimos cuadrados (Rice, 2007).

2.16.2. Test de hipótesis

De acuerdo con el trabajo de Privitera (2016), la prueba de contraste de hipótesis es un método en el área de la estadística que se utiliza para evaluar la certeza con la que se puede rechazar o no una hipótesis.

En la prueba de hipótesis se utilizan los siguientes conceptos (Privitera, 2016):

- Hipótesis nula (H_0). Esta hipótesis supone un punto de partida y afirma un estado de la población que desea ser evaluado. Usualmente impone un valor a cierta condición, por ejemplo, el valor de media de la población A es igual a μ_0 .
- Hipótesis alternativa (H_1). Esta hipótesis contradice la hipótesis nula y se formula proponiendo que el parámetro que se suponía en la hipótesis nula es mayor, menor o distinto al valor impuesto.

Una vez establecida la hipótesis nula y alternativa, se debe definir el nivel de significancia, representado por el símbolo α , que corresponde al criterio de juicio sobre el que se tomará una decisión respecto del valor establecido en la hipótesis nula, del mismo modo, el nivel de significancia es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando esta es verdadera. Es necesario recalcar que $(1 - \alpha)$ corresponde al nivel confianza de la prueba estadística realizada (Privitera, 2016).

2.16.3. Prueba t de Student

Para evaluar la validez estadística se utilizará la prueba t de Student de contraste de medias, que es una prueba de hipótesis que determina si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de dos grupos de datos independientes.

Para esto se plantea como hipótesis nula que los grupos de datos de dos poblaciones distintas, X e Y, poseen la misma media, mientras que la hipótesis alternativa puede establecer que la media de X sea mayor, menor o distinta de la de Y (Rice, 2007).

Según Rice (2007) el estadístico que se utiliza para realizar el análisis es el estadístico t, que se calcula mediante la ecuación (2.36) y sigue una distribución t de Student con $m+n-2$ grados de libertad, donde m y n son el tamaño muestra de cada grupo de datos.

$$t = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{\sigma_{\bar{X}-\bar{Y}}} \approx t_{m+n-2} \quad (2.36)$$

Donde el denominador de la expresión representa la desviación estándar de la resta de los promedios.

Una vez que se calcula el estadístico, se debe fijar el nivel de significancia α . La prueba t de Student consiste en comparar el estadístico obtenido con un valor crítico que se deriva de α establecido. En función de la hipótesis alternativa del experimento estadístico, la prueba puede conllevar distintos nombres, por ejemplo, si se tiene que $H_1: \mu_X \neq \mu_Y$, se le denomina como prueba de dos colas, entonces se utiliza la inecuación (2.37), donde el valor crítico se calcula por la ecuación (2.38). En caso de que el estadístico cumpla la condición, entonces se rechaza la hipótesis nula y se concluye que las medias de los grupos son diferentes.

$$|t| > c \quad (2.37)$$

$$c = t_{m+n-2} \left(\frac{\alpha}{2} \right) \quad (2.38)$$

Por otro lado, el p-valor es el nivel de significancia mínimo que conduce al rechazo de la hipótesis nula, y su valor está determinado por la probabilidad asociada al estadístico t. De esta forma, en el caso de que se elija un nivel de significancia menor al p-valor, el valor crítico derivado no cumplirá la condición de la inecuación (2.37) y entonces se cometería un error en rechazar la hipótesis nula (Rice, 2007).

Es necesario recalcar que para implementar esta prueba se requiere de tres supuestos que deben cumplir los grupos en análisis:

- Que sean independientes.
- Que sigan una distribución normal.
- Que tengan igual varianza (homocedasticidad).

De acuerdo con Rice (2007), para verificar que los supuestos se cumplan, se pueden aplicar otras pruebas de hipótesis, como la prueba de contraste de normalidad Shapiro-Wilks y la prueba de Levene. En caso de que las varianzas no sean similares, la prueba se puede realizar igualmente, sin embargo, cambian los valores de la desviación estándar y del estadístico t.

3. DATOS OPERACIONALES DE MINERA FLORIDA

Cabe destacar que toda la información expuesta en la presente sección es información otorgada por documentos internos de Minera Florida.

3.1. Flujo másico de relave al espesador de pasta

De acuerdo con la planilla de control de relaves de 2023 de Minera Florida, el flujo másico entrante promedio al espesador de relaves en pasta desde enero hasta noviembre del año 2023 es de 2725 [TMS/día], magnitud equivalente a 114 [TMS/h].

Respecto de la concentración de los sólidos del relave a la entrada del espesador, el valor de diseño es del 28% en peso, sin embargo, por problemas hidráulicos en la planta de procesos debido a problemas mecánicos en las bombas hidráulicas que transportan el agua recuperada, la concentración de sólidos del relave a la entrada del espesador desde enero hasta el noviembre del año 2023 varió desde un 30 a un 40% en peso.

3.2. Granulometría de los relaves

Las granulometrías de las muestras de relaves se obtienen a partir del tamizado del material por mallas estandarizadas según la norma ASTM C-136, hasta un tamaño de 25 [μm] (malla #500).

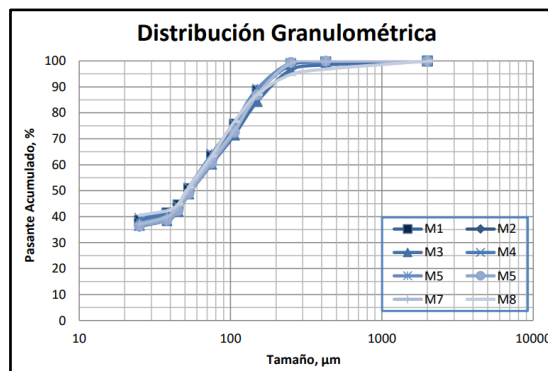


Figura 3.1. Granulometría de ocho muestras de relave en pasta realizada en 2018 (Minera Florida, 2023).

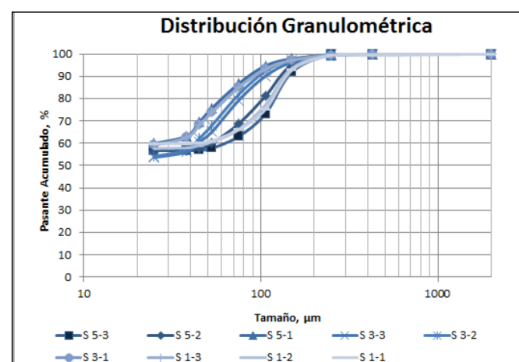


Figura 3.2. Granulometría de ocho muestras de relave en pasta realizada en 2016 (Minera Florida, 2023).

En relación con lo expuesto en la Figura 3.1, 3.2 y el Anexo D se puede deducir que el P80 del relave en pasta varía aproximadamente entre 81 y 118 [μm].

3.3.Gravedad específica del sólido

En Minera Florida, la gravedad específica del mineral, en promedio, tiene un valor de 2,75.

3.4.Coagulante utilizado por Minera Florida

Minera Florida adiciona un coagulante que tiene un bajo peso molecular con alta carga catiónica a los relaves en pasta después del proceso DETOX, 2,5 [km] antes de su entrada al espesador en pasta en una dosis de 36,6 [g/TMS], en base a los cálculos realizados en el Anexo E.

Cabe mencionar que, de ahora en adelante, se referirá al coagulante que utiliza Minera Florida en su proceso productivo con el nombre de SNF.

3.5.Floculantes utilizados por Minera Florida

Minera Florida en su proceso productivo aplica una mezcla de dos floculantes en polvo que se describen en la Tabla 3.1.

Nomenclatura	Aspecto físico	Carga eléctrica	Peso molecular relativo	Química	Estructura
MFL1	Polvo	No iónico	Medio	Copolímero de acrilamida con acrilato	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_m$
MFL2	Polvo	Aniónico	Medio	Homopolímero de acrilamida	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n$

Tabla 3.1. Floculantes que utiliza Minera Florida para el espesamiento de relaves del proceso productivo (Minera Florida, 2023).

Normalmente, Minera Florida aplica la mezcla de los floculantes MFL1 y MFL2 en una razón másica de 1:1, la que varía ante comportamientos anómalos del proceso. Según la planilla de control de relaves en pasta de Minera Florida, el promedio de la dosis de floculante desde enero a finales de octubre del 2023 fue de a una dosis total de 22 [g/TMS].

3.6. Mineralogía

Una aproximación de la composición mineralógica del material a procesar se exhibe en la Tabla 3.2 y en las tablas expuestas en el Anexo B.

Composición mineralógica 100% base mineral							
Especies	Fórmula química	% en peso	Cu	Fe	S	Zn	Pb
Oro	Au ^o	Tz					
Electrum	Au/Ag	Tz					
Calcopirita	CuFeS ₂	0,34	0,12	0,1	0,12		
Calcosina	Cu ₂ S	Tz					
Covelina	CuS	Tz					
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	Tz					
Cobre	Cu ^o	Tz					
Galena	PbS	2,13			0,29		1,843
Blenda	ZnS	1,63			0,54	1,095	
Rutilo	TiO ₂	0,67					
Pirita	FeS ₂	1,43		0,67	0,76		
Hematita	Fe ₂ O ₃	2,29		1,6			
Magnetita	Fe ₂ O ₃	3,12		2,26			
Limonita	Fe ₂ O ₃ *nH ₂ O	1,03		0,65			
Ganga no metálica		87,37					
Total		100	0,12	5,27	1,7	1,095	1,843

Tabla 3.2. Composición mineralógica en base mineral de la alimentación a la planta de procesos de Minera Florida en 2022 (Minera Florida, 2023).

Debido a las bajas leyes del mineral deseado, se puede aproximar que la composición del relave es equivalente al del material de la alimentación a la planta de procesos. En promedio, el 90,79% de la masa del relave corresponde a ganga no metálica.

3.7. Torque del espesador

En relación con los parámetros operativos del control del espesador de pasta de Minera Florida, el torque del espesador se mide en términos porcentuales respecto del máximo torque que puede ejercer el equipo. Según lo anterior, el rango operacional del torque se encuentra entre un 15 y 25%, siendo el esperado un 20%.

Con respecto a la planilla de control de relaves en pasta de Minera Florida, el promedio del torque del espesador de pasta desde enero a finales de octubre del 2023 fue de 22,53%.

3.8. Velocidad angular de las rastras del espesador

Las rastras del espesador giran a 0,11 [RPM] o 0,0185 [RPS].

4. CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS A ESTUDIAR

4.1. Floculantes

La Tabla 4.1 muestra las características de los floculantes que obtuvieron el mejor rendimiento en el proceso de espesamiento de relaves.

Cabe mencionar que los dos primeros números de la nomenclatura representa el porcentaje de la carga aniónica del polímero, luego la letra “F” representa la inicial de floculante y la última letra representa la inicial del peso molecular relativo, ya sea, bajo, medio o alto. En el caso de que se exhiba “mA”, indica que el peso molecular relativo es muy alto.

Nomenclatura	Peso molecular relativo	Carga relativa	Aspecto físico	Química	Estructura
00FM	Medio	No iónico	Polvo	Homopolímero de acrilamida	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C} = \text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n$
10FM	Medio	Aniónico 10%	Polvo	Terpolímero de acrilamida con acrilato y urea (2,5%) como aditivo	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C} = \text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{NH} - \text{C} - \text{NH} \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_0 \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C} = \text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_m$
40FA	Alto	Aniónico 40%	Polvo	Copolímero de acrilamida con acrilato	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C} = \text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{C} = \text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_m$

Tabla 4.1. Caracterización de los floculantes ensayados en función de su peso molecular relativo, carga, aspecto físico y estructura química.

Cabe destacar que la caracterización de la totalidad de los floculantes ensayados se encuentra en el Anexo F.

4.2. Modificadores reológicos

Los modificadores reológicos ensayados se caracterizan por tener un bajo peso molecular, del orden de 10^5 [g/mol] y una alta carga catiónica. Además, el modificador reológico inorgánico corresponde a una sal. Cabe mencionar que, por la confidencialidad del trabajo, no se puede exhibir la estructura química de los modificadores reológicos. En la Tabla 4.2 muestra las características los modificadores reológicos que obtuvieron el mejor rendimiento en el proceso de espesamiento de relaves.

Nomenclatura del Modificador Reológico	Orgánico / Inorgánico	Aspecto físico
MRinorg	Inorgánico	Líquido
MRorg2	Orgánico	Líquido

Tabla 4.2. Caracterización de los modificadores reológicos ensayados en función de su naturaleza química y su aspecto físico.

Cabe destacar que la caracterización de la totalidad de los modificadores reológicos ensayados se encuentra en el Anexo F.

5. METODOLOGÍA

5.1. Diseño experimental

En primer lugar, se realizan ensayos de sedimentación mediante el método de la probeta graduada utilizando los floculantes exhibidos en la Tabla 4.1, para determinar el floculante y su dosis con mejor rendimiento en términos de las variables de velocidad de sedimentación, concentración de sólidos del relave espesado, turbidez del agua recuperada, viscosidad del régimen elástico del relave espesado.

Una vez determinado el floculante y su dosis que otorga el mejor rendimiento en el proceso de espesamiento de relaves, se procede a ensayar con los modificadores reológicos de la Tabla 4.2 para determinar aquel que, en su aplicación con el floculante escogido en la primera etapa, en comparación con la aplicación únicamente del floculante escogido, mejore en mayor grado el rendimiento de las variables en estudio.

Una vez determinado el modificador reológico y su dosis óptima, se comienza con los ensayos de reproducibilidad, comparando la calidad del espesamiento de las mejores combinaciones obtenidas con la aplicación del coagulante SNF y el floculante MFL a sus respectivas dosis, que son los productos que se agregan actualmente en la planta de procesos. A esta dupla de productos considerando sus respectivas dosis se le denominará “blanco”.

5.2. Materiales y métodos

En primer lugar, previo a las pruebas de sedimentación, se deben preparar las soluciones madres y de trabajo de los polímeros en forma de polvo y en emulsión. Los reactivos, materiales a utilizar, además del método y la memoria de cálculo se especifica en el Anexo G.2 y G.3, respectivamente.

Posteriormente, en base a lo explicado en el Anexo K.1, se debe diluir la muestra de relave para alcanzar una concentración de sólidos del 30% en peso, para trabajar a una única concentración de sólidos para discutir en base a una menor cantidad de variables. Los reactivos, materiales a utilizar, además del método y la memoria de cálculo se especifica en el Anexo G.5.

5.2.1. Preparación de las probetas

Los reactivos, materiales y equipamiento utilizado, además del método en detalle para la preparación de las probetas para las pruebas de sedimentación por el método de la probeta graduada se encuentra en el Anexo G.6.

Considerando que son N probetas de 1000 [mL] de capacidad, se les agrega muestra de relave hasta 500 [mL] a todas las probetas en orden, desde la probeta n°1 hasta la n°N. Tal como se observa en la Figura 5.1. El objetivo del método consiste en obtener una muestra homogénea en todas las probetas a ensayar.

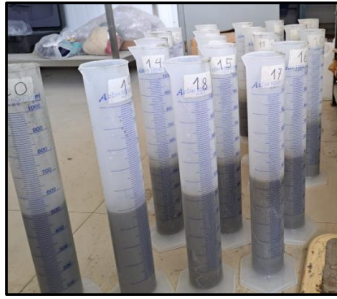


Figura 5.1. Considerando el caso de $N=20$, se agrega pulpa hasta los 500 [mL] de la probeta desde la probeta n°1 hasta la n°20 en orden.

Luego, se procede a completar los 1000 [mL] de capacidad desde la probeta n°N hasta la n°1 en orden.



Figura 5.2. Considerando el caso de $N=20$, se agrega pulpa hasta los 1000 [mL] de la probeta desde la probeta n°20 hasta la n°1 en orden.

Posteriormente, se procede a colocar papel Parafilm en la parte superior de la probeta, tal como se exhibe en la Figura 5.3.



Figura 5.3. Se coloca papel Parafilm en la parte superior de la probeta, de modo que cuando se invierta la probeta no se derrame el contenido de esta.

5.2.2. Prueba de sedimentación

En el presente trabajo las pruebas de sedimentación se llevarán a cabo utilizando el método de la probeta graduada, que estudia la eficacia de la floculación en términos de velocidad de sedimentación, concentración de sólidos final del relave y la turbidez del agua recuperada.

Los reactivos, materiales y equipamiento utilizado en las pruebas de sedimentación, además de la memoria de cálculo se encuentran en el Anexo G.7.

Cabe mencionar que antes de la experimentación se debe calcular la dosis de modificador reológico y de floculante a añadir a la probeta de ensayo en base a la ecuación (10.46).

En esta etapa se comienza la prueba de sedimentación invirtiendo la probeta hasta que el contenido de la probeta se homogenice, luego, mediante una jeringa se añade la totalidad de la dosis de modificador reológico calculada y se agita fuertemente la probeta mediante inversión 4 veces, seguidamente se agrega la mitad de la dosis del floculante mediante una jeringa en la probeta para luego realizar dos inversiones relativamente suaves para dispersar el polímero. Seguidamente, la segunda mitad de la dosis se inyecta con la jeringa a la probeta y se hacen dos inversiones suaves para promover el crecimiento del flóculo.

5.2.3. Cálculo de la velocidad de sedimentación

La memoria de cálculo para el cálculo de la velocidad de sedimentación se encuentra en detalle en el Anexo G.8.

Una vez que la interfaz sólido-líquido alcance los 900 [mL] de la probeta se inicia el cronómetro y se detiene en los 700 [mL] para calcular la velocidad de sedimentación mediante la ecuación (10.51).

5.2.4. Cálculo de la concentración de sólidos a las 2 horas

La memoria de cálculo de la presente subsección se encuentra en detalle en el Anexo G.9.

Después de 120 minutos de iniciada la sedimentación, se registra el volumen utilizado por el relave espesado para calcular la compactación mediante la ecuación (10.52).



Figura 5.4. A las dos horas se registra el volumen de la pulpa compacta.

5.2.5. Registro de turbidez a las 2 horas

En esta etapa se toma una muestra de sobrenadante de 10 [mL] mediante una jeringa para agregar su contenido al recipiente especial del colorímetro para ingresarlo al colorímetro y registrar la turbidez en unidades de [FAU].



Figura 5.5. Procedimiento para la medición de turbidez en el colorímetro.

5.2.6. Registro de pH del sobrenadante

Inmediatamente, se mide el pH del sobrenadante con un pH-metro.



Figura 5.6. Medición del pH del sobrenadante.

5.2.7. Descarte de sobrenadante y pretratamiento reológico

Seguidamente, se descarta el sobrenadante para agregar aproximadamente 200 [mL] de la pulpa compacta en un vaso de plástico transparente de 300 [mL] de capacidad. Posteriormente, se anota la masa del relave compacto y se deja en una superficie plana desde 14 a 20 horas.



Figura 5.7. Procedimiento de descarte de sobrenadante y pretratamiento reológico.

5.2.8. Análisis reológico

El reómetro utilizado corresponde a un Brookfield DVNext modelo DVN XRVTJG que, entre otras posibilidades, permite el uso de husillos de paletas. Las especificaciones del equipo se muestran en la Tabla 5.1.

Parámetro	Rango de medición	Error
Torque	0-0,7187 [mN*m]	No se especifica
Velocidad de giro	0,01-250 [RPM]	No se especifica
Temperatura	-100°C-300°C	±1%
Viscosidad	100-40.000.000 [mPa*s]	±1%
Tensión de cizallamiento	3,6x10 ⁻⁴ -226.250 [Pa]	No se especifica

Tabla 5.1. Especificaciones del reómetro Brookfield DVNext modelo DVN XRVTJG (Brookfield, 2019).

Los reactivos, materiales y equipamiento utilizado, además del método en detalle del análisis reológico se encuentra en el Anexo G.10.

Una vez transcurridas entre 14 y 20 horas desde que se depositó el relave espesado en el vaso plástico, se procede a retirar el sobrenadante del vaso con la ayuda de una jeringa para comenzar su análisis reológico en el reómetro.

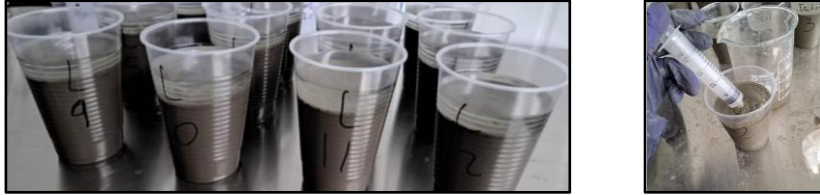


Figura 5.8. Relave espesado luego de 15 horas y la extracción del sobrenadante del relave espesado.



Figura 5.9. Exhibición de la realización de las pruebas reológicas en el reómetro.

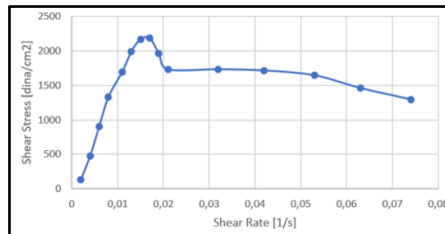


Figura 5.10. Ejemplo de diagrama de tensión de cizallamiento en función de la velocidad de cizallamiento otorgado por el reómetro.

5.2.9. Cálculo de viscosidad

De acuerdo con lo expuesto en la sección 7 se obtiene que el régimen elástico en todas las muestras de relaves espesados se encuentra entre valores de velocidad de cizallamiento definidos, por lo que para calcular la viscosidad de la muestra de su régimen elástico se realizará un ajuste de la curva mediante una regresión lineal, obteniendo una ecuación de la recta donde la pendiente corresponde al valor de la viscosidad (sección 2.1.2). Un ejemplo del cálculo de la viscosidad del régimen elástico a partir del diagrama reológico se encuentra en el Anexo G.11.

5.3. Validación estadística de los resultados

En el presente trabajo se evaluará la validez estadística de los resultados de acuerdo con la prueba t de Student de contraste de medias de una cola, puesto que, considerando que el grupo de datos obtenido por el blanco es "X" y el grupo de datos por los productos ensayados "Y", las hipótesis alternativas propuestas estarían gobernadas por las ecuaciones (5.1) y (5.2) dependiendo del tipo de variable que se analice.

$$H_1: \mu_X < \mu_Y \quad (5.1)$$

$$H_1: \mu_X > \mu_Y \quad (5.2)$$

En consecuencia, la hipótesis alternativa para las variables de la velocidad de sedimentación y compactación del relave estará dada por la ecuación (5.2) y las variables de la turbidez y viscosidad tendrá la hipótesis alternativa de la ecuación (5.1).

En cuanto al ajuste de la curva del régimen elástico mediante una regresión lineal, para efectos del presente trabajo, el valor de la viscosidad derivado de esta regresión se considerará representativo si $R^2 > 0,95$.

5.4. Análisis de resultados

Las pruebas de sedimentación se realizarán conforme con el método de la probeta graduada que entrega la magnitud de tres variables: la velocidad de sedimentación, la compactación del relave y la turbidez del agua recuperada. Asimismo, el análisis reológico otorgará la magnitud de la variable de la viscosidad.

En cuanto a las variables que se consideran constantes al momento de analizar los resultados son:

- Concentración inicial de sólidos de la muestra de relave (30% en peso).
- Velocidad de cizallamiento ejercida durante las pruebas de sedimentación.
- Temperatura.
- Envejecimiento de las soluciones poliméricas.

En cambio, las variables que cambian y no se pueden controlar debido a la naturaleza del proceso productivo son:

- La distribución granulométrica del relave.
- La mineralogía del relave.
- La forma de las partículas del relave.
- El pH del relave.

Por otra parte, la Figura 5.11 indica como se deben comportar las variables en el método de la probeta graduada para mejorar la eficacia del espesamiento de relaves.

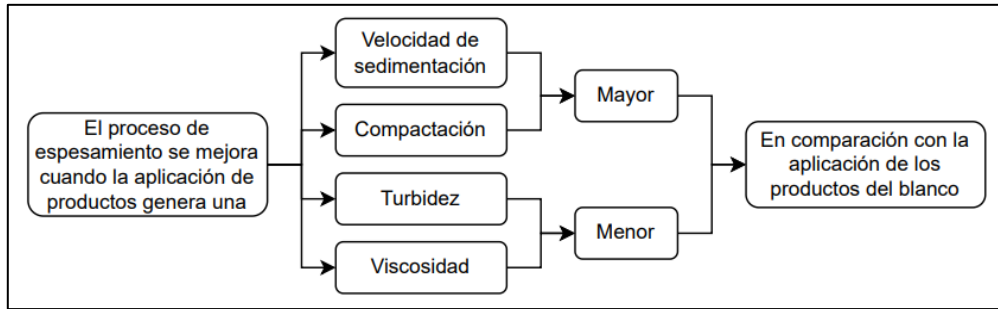


Figura 5.11. Diagrama que ilustra la condición que debe cumplir cada variable en estudio para que los productos ensayados mejoren el proceso de espesamiento respecto del blanco (elaboración propia).

Para efectos del presente trabajo, al considerar cuatro variables en los análisis, los resultados se analizarán conforme con la Figura 5.12

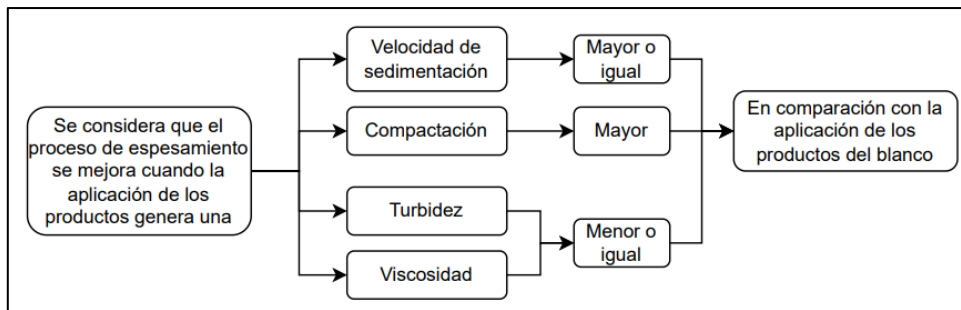


Figura 5.12. Diagrama que ilustra las condiciones que se deben cumplir en conjunto sobre las variables en estudio para que los productos ensayados mejoren el proceso de espesamiento respecto del blanco (elaboración propia).

6. OBJETIVO

6.1.Objetivo general

Determinar un floculante en conjunto con un modificador reológico que mejoren el espesamiento de relaves a nivel de laboratorio respecto de los productos que se utilizan actualmente en el espesador de pasta de Minera Florida, variando la combinación de modificadores reológicos con floculantes y sus dosis respectivas en términos de:

- Velocidad de sedimentación.
- Recuperación de agua o compactación del relave espesado.
- Claridad del agua recuperada.
- Viscosidad del relave espesado.

6.2.Objetivos específicos

- Generar diagramas de velocidad de sedimentación y compactación del relave, turbidez del agua recuperada y viscosidad del relave espesado en función de las dosis de los productos ensayados.
- Caracterizar reológicamente el relave espesado a través del diagrama de tensión en función de velocidad de cizallamiento.
- Determinar el floculante en conjunto con el modificador reológico que mejora en mayor grado el espesamiento de relaves para evaluar su rendimiento en una prueba industrial.
- Calcular la ganancia de recuperación de agua que obtendría la utilización del producto o pareja de productos seleccionada del proceso industrial.

7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En primer lugar, es necesario mencionar que se realizaron diferentes ensayos con los mismos productos para evaluar su reproducibilidad, ya que los productos aplicados deben optimizar el proceso de manera consistente, independiente de la condición del relave minero. Dichos ensayos se realizaron en 4 muestras de relaves que se tomaron en días distintos, lo que asegura el cambio de sus propiedades, debido a la variabilidad del proceso.

En la presente sección se exhibirán los mejores resultados obtenidos de los ensayos de reproducibilidad. Dichos resultados corresponden a los ensayos con:

1. El floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] y 30 [g/t] por sí solo, y en conjunto con el modificador reológico orgánico (MRorg2).
2. La mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] en conjunto con el modificador reológico inorgánico (MRinorg).

Se estudia el floculante 10FM porque los resultados expuestos en el Anexo K.2 indican que alcanza una mayor compactación, además de otorgar bajas propiedades reológicas al relave en comparación con el resto de los floculantes ensayados, además de una mayor velocidad de sedimentación que los productos blanco. En la misma línea, la mezcla de floculantes (00FM+40FA) se estudió debido a que posee una velocidad de sedimentación, compactación y propiedades reológicas similares a las del floculante 10FM, pero disminuye su turbidez, lo que es beneficioso para el proceso de espesamiento.

El floculante 10FM se ensayó con el modificador reológico orgánico (MRorg2) porque, según los resultados que se exponen en el Anexo K.3, fue el modificador reológico que mejor rendimiento general obtuvo en comparación con el resto de los modificadores reológicos ensayados sobre este floculante en particular. Asimismo, el modificador reológico que tiene un mejor rendimiento sobre la mezcla de floculantes (00FM+40FA) es el inorgánico (MRinorg).

Es necesario destacar que, al ensayar los mismos productos en diferentes muestras, por cada muestra se extrae un gráfico por cada variable que se analiza. Por ejemplo, si el floculante 10FM se aplica a 4 muestras distintas, se obtendrán 4 gráficos de velocidad de sedimentación, 4 de compactación, etc.

Posteriormente, se realiza un análisis estadístico con la prueba de t de Student de contraste de medias con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, es decir, con un nivel de confianza del 95%. Esta herramienta permite validar estadísticamente si una variable de los productos ensayados es mayor, menor o igual que la misma variable de los productos blanco, que son los utilizados por Minera Florida en su proceso productivo.

Para realizar una lectura comprensible de los resultados y discusiones, se realizarán las siguientes aclaraciones cuando se refiera:

- A la variable de la velocidad de sedimentación (V_{sed}), se referirá a la velocidad de sedimentación del relave.
- A la variable de la compactación (C_p), se referirá a la concentración de sólidos, expresada como un valor porcentual en masa del sólido respecto de la masa total del fluido, alcanzada del relave luego de dos horas de iniciada la sedimentación.
- A la variable de la turbidez, se referirá a la turbidez del agua recuperada después de dos horas de iniciada la sedimentación.
- A la variable de la viscosidad, se referirá a la viscosidad del régimen elástico del relave espesado.
- A (00FM+40FA), hace referencia a la mezcla de floculantes 00FM y 40FA en una proporción másica de 1:1.
- Al aumento de las propiedades reológicas, significa el aumento del valor de la viscosidad del relave y de las magnitudes de las tensiones de cizallamiento a lo largo del régimen viscoelástico.
- A (00FM+40FA) 30 [g/t] significa que se está hablando de la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 30 [g/t].
- A MRorg2(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] significa que se está hablando de la aplicación, en primer lugar, del modificador reológico MRorg2 a una dosis equivalente al 50% de la dosis de la aplicación de la mezcla de floculantes (15 [g/t]), seguido de la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 30 [g/t].
- Al blanco, se refiere a los productos que utiliza actualmente Minera Florida en su proceso productivo, corresponde al uso de un coagulante (SNF) en una dosis aproximada de 36,6 [g/t] para posteriormente agregar una mezcla de un floculante aniónico y otro no iónico en una razón másica de 1:1 (MFL). Los productos blanco se denotan como SNF(166%)+MFL 22 [g/t].

Antes de exhibir resultados se debe aclarar que:

- En el Anexo J se indica en detalle como leer los gráficos de las variables de estudio en función de la dosis relativa de modificador reológico.
- En el Anexo K.1 se muestran los resultados en los que se varía la concentración inicial de sólidos para determinar la concentración de sólidos inicial adecuada para la realización de las pruebas de sedimentación.
- El Anexo K.2 detalla los resultados de los ensayos realizados únicamente con los floculantes.
- El Anexo K.3 muestra los resultados del efecto de los modificadores reológicos sobre los floculantes que mejoraron en mayor grado el rendimiento del espesamiento de relaves.

- En el Anexo L se exhiben todas las curvas reológicas por separado de los ensayos de reproducibilidad en conjunto con su respectivo régimen lineal con su respectiva regresión lineal, en la que todas tienen un $R^2 > 0,97$, por lo que todos los valores de viscosidad expuestos en la presente sección son representativos.
- En el Anexo N se presentan todos los ensayos de reproducibilidad.

7.1. Ensayos con el floculante 10FM a diferentes dosis

Velocidad de sedimentación del floculante 10FM a 20 [g/t]

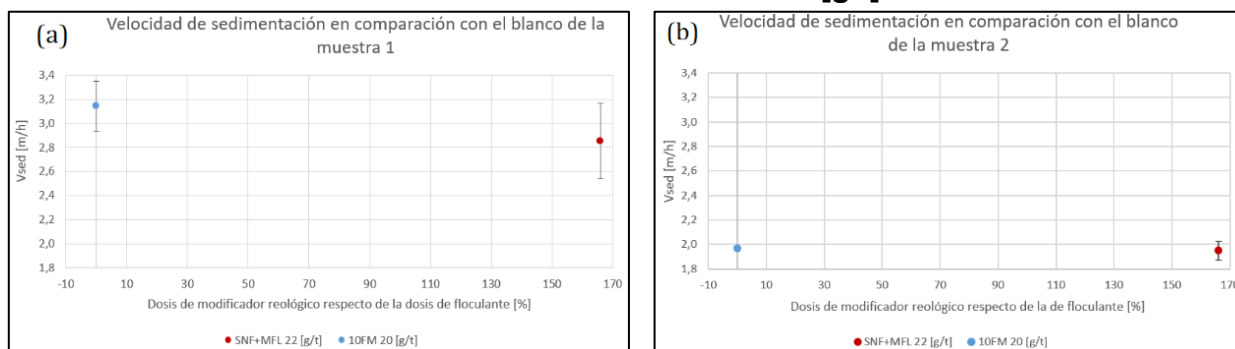


Figura 7.1. Velocidad de sedimentación del relave de la muestra (a) 1 y (b) 2 cuando se adiciona únicamente el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t].

La Figura 7.1 (a) muestra que la velocidad de sedimentación del floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] es mayor que la del blanco en un 10,7%, sin embargo, este aumento no es significativo estadísticamente con un nivel de confianza del 95%, por lo que la velocidad de sedimentación se mantiene ante la aplicación del floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] (Tabla 10.15). En la misma línea, la Figura 7.1 (b) muestra que la velocidad de sedimentación aumenta en un 0,9% respecto del blanco. Al igual que en el caso anterior, el análisis estadístico indica que la velocidad de sedimentación se mantiene (Tabla 10.16).

Efecto del modificador reológico sobre la velocidad de sedimentación

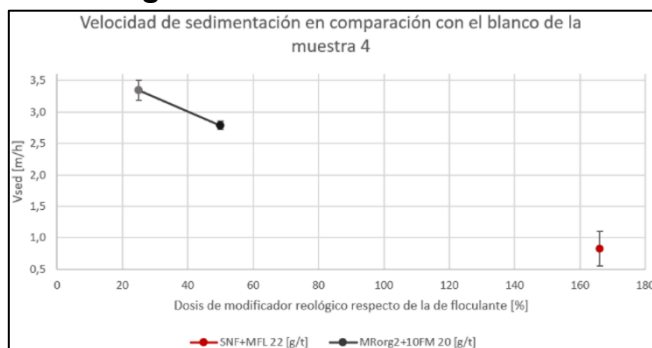


Figura 7.2. Efecto del modificador reológico en la velocidad de sedimentación.

La Figura 7.2 muestra que cuando se aplica el modificador reológico MRorg2 al floculante 10FM a una dosis de 10 y 20 [g/t], respectivamente, disminuye la velocidad de sedimentación en un 16,8% respecto de la adición de 5 [g/t] de modificador reológico

(Tabla 10.21), sin embargo, el análisis estadístico indica que esta disminución no es significativa, por lo que su aplicación tiende a mantener la velocidad de sedimentación. Comparando los resultados con el blanco, se deduce que la aplicación del floculante 10FM a 20 [g/t] con el modificador reológico tiende a aumentar la velocidad de sedimentación desde un 238% (Tabla 10.23) hasta un 300% (Tabla 10.22), siendo significativo, es decir, la adición de modificador reológico aumenta la velocidad de sedimentación del relave en el proceso.

Compactación del floculante 10FM a 20 [g/t]

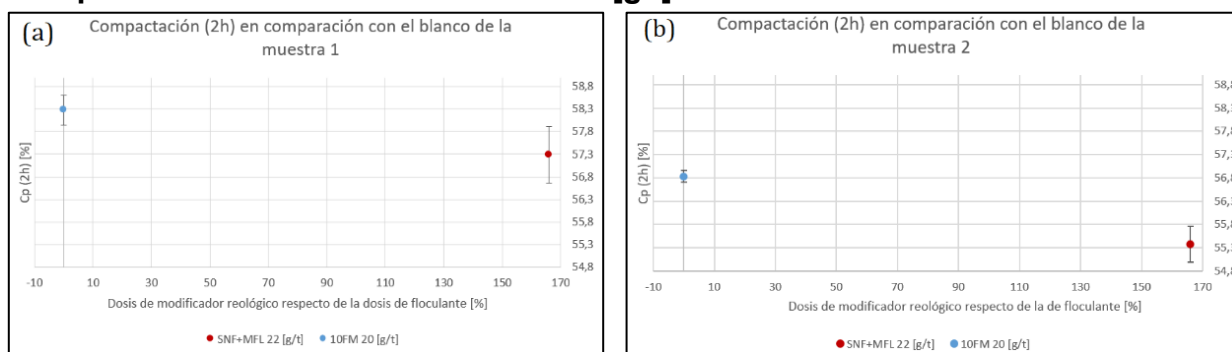


Figura 7.3. Compactación del relave de la muestra (a) 1 y (b) 2 cuando se adiciona únicamente el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t].

La Figura 7.3 (a) muestra que la compactación cuando se aplica del floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] es mayor que la del blanco en un 1,7 % (Tabla 10.15). En la misma línea, la Figura 7.3 (b) muestra que la compactación aumenta en un 2,6% respecto del blanco (Tabla 10.16). En ambos casos, el análisis estadístico indica que la compactación aumenta respecto del uso de los productos blanco, por lo que hay consistencia en el aumento de la compactación.

Efecto del modificador reológico sobre la compactación

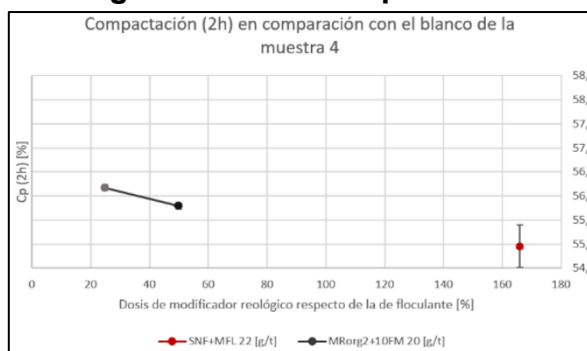


Figura 7.4. Efecto del modificador reológico en la compactación.

La Figura 7.4 muestra que cuando se aplica el modificador reológico MRorg2 al floculante 10FM a una dosis de 10 y 20 [g/t], respectivamente, disminuye la compactación en un 0,7% respecto de la adición de 5 [g/t] de modificador reológico (Tabla 10.21), sin embargo, el análisis estadístico indica que esta disminución no es significativa, por lo que su aplicación tiende a mantener la compactación. Comparando los resultados con el blanco, se deduce que la aplicación del floculante 10FM a 20 [g/t] con el modificador reológico

tiende a aumentar la compactación desde un 1,5% (Tabla 10.23) hasta un 2,2% (Tabla 10.22), siendo significativo, es decir, la adición de modificador reológico mantiene el aumento de la compactación.

Turbidez del floculante 10FM a 20 [g/t]

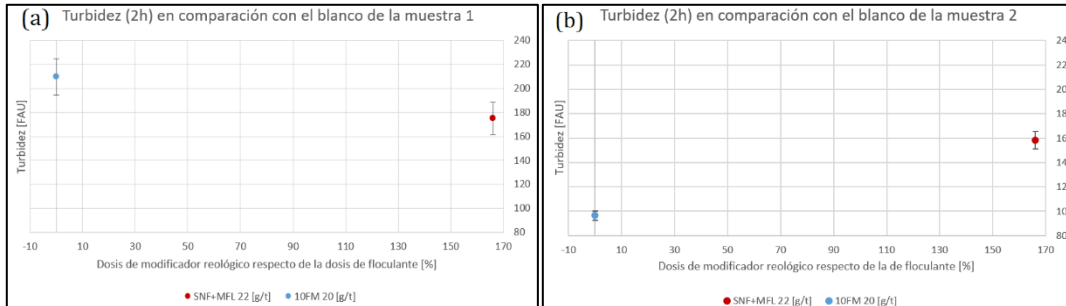


Figura 7.5. Turbidez de la muestra (a) 1 y (b) 2 cuando se adiciona únicamente el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t].

La Figura 7.5 (a) muestra que la turbidez cuando se aplica del floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] es mayor que la del blanco en un 19,9 % (Tabla 10.15). En la misma línea, la Figura 7.5 (b) muestra que la turbidez disminuye en un 39,1% respecto del blanco (Tabla 10.16). El análisis estadístico indica que la turbidez aumenta y disminuye respecto del uso de los productos blanco, respectivamente, por lo que no se observa consistencia en la variable de la turbidez.

Efecto del modificador reológico sobre la turbidez

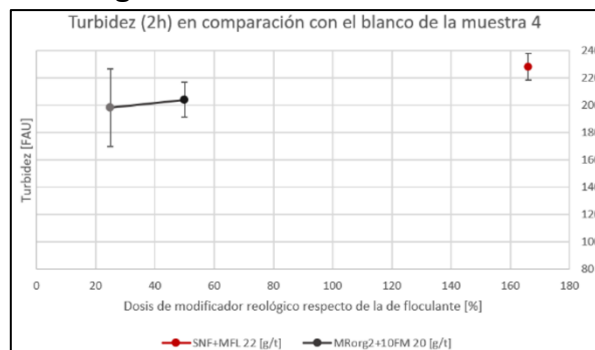


Figura 7.6. Efecto del modificador reológico en la turbidez.

La Figura 7.6 muestra que cuando se aplica el modificador reológico MRorg2 al floculante 10FM a una dosis de 10 y 20 [g/t], respectivamente, aumenta la turbidez en un 3% respecto de la adición de 5 [g/t] de modificador reológico (Tabla 10.21), sin embargo, el análisis estadístico indica que esta disminución no es significativa, por lo que su aplicación tiende a mantener la turbidez. Comparando los resultados con el blanco, se deduce que la aplicación del floculante 10FM a 20 [g/t] con el modificador reológico tiende disminuir la turbidez desde un 11% (Tabla 10.23) hasta un 13% (Tabla 10.22), siendo significativo, es decir, la adición de modificador reológico implica una reducción de la turbidez del agua recuperada al proceso.

Propiedades reológicas del floculante 10FM a 20 [g/t]

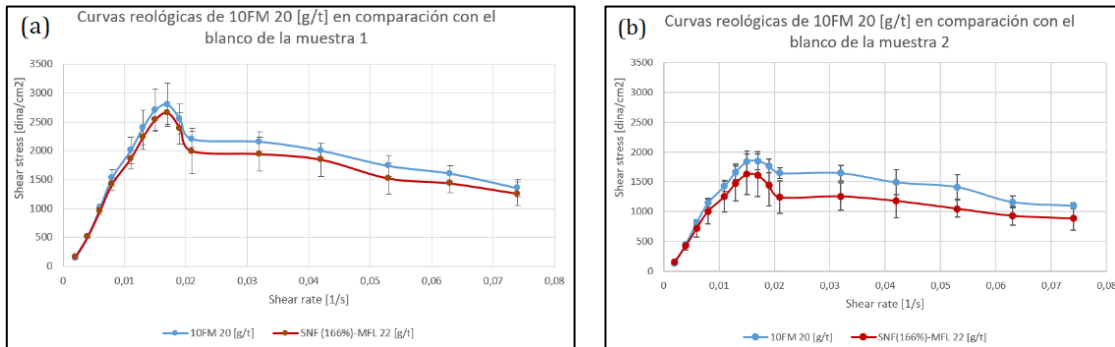


Figura 7.7. Curvas reológicas del relave espesado de la muestra (a) 1 y (b) 2 cuando se adiciona únicamente el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t].

La Figura 7.7 muestra que cuando se aplica del floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] las propiedades reológicas son mayores que las del blanco en el régimen elástico y viscoelástico.

Efecto del modificador reológico sobre las propiedades reológicas

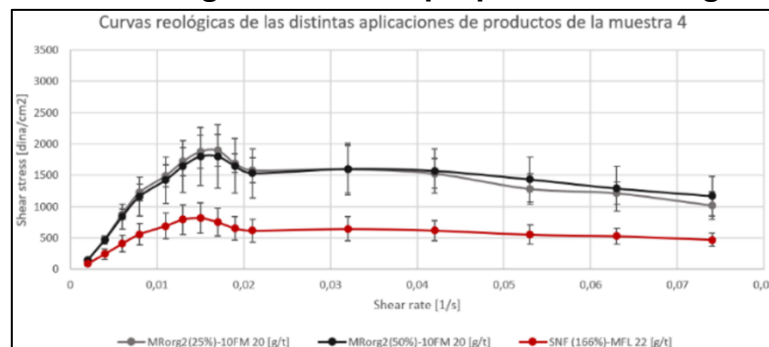


Figura 7.8. Efecto del modificador reológico en las propiedades reológicas.

La Figura 7.8 muestra que cuando se aplica el modificador reológico MRorg2 al floculante 10 FM a una dosis de 20 [g/t], aumentan las propiedades reológicas del relave considerablemente en comparación con el blanco, sin embargo, la variación de dosis del modificador reológico desde 5 a 10 [g/t] no influye sobre las propiedades reológicas.

Viscosidad del floculante 10FM a 20 [g/t]

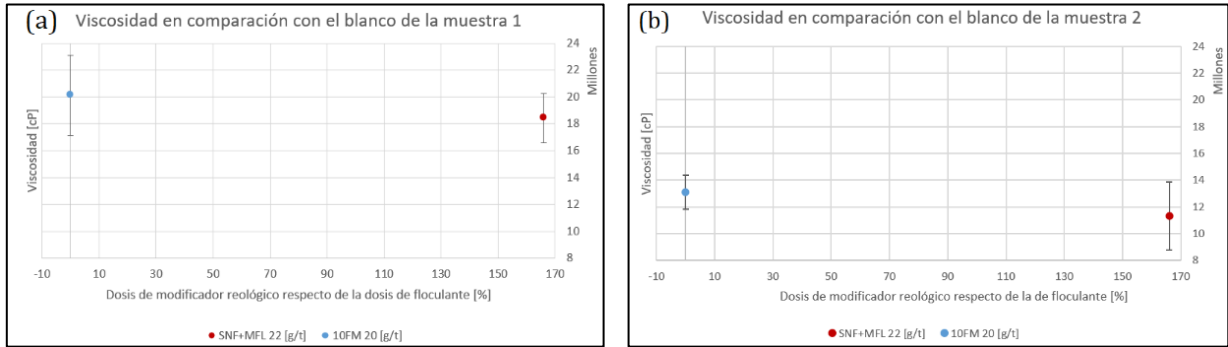


Figura 7.9. Viscosidad de la muestra (a) 1 y (b) 2 cuando se adiciona únicamente el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t].

La Figura 7.9 (a) muestra que la viscosidad cuando se aplica del floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] es mayor que la del blanco en un 9,1 % (Tabla 10.15). En la misma línea, la Figura 7.9 (b) muestra que la viscosidad aumenta en un 15,7% respecto del blanco (Tabla 10.16). En ambos casos, el análisis estadístico indica que la viscosidad aumenta respecto del uso de los productos blanco, por lo que existe consistencia en el aumento de la viscosidad.

Efecto del modificador reológico sobre la viscosidad

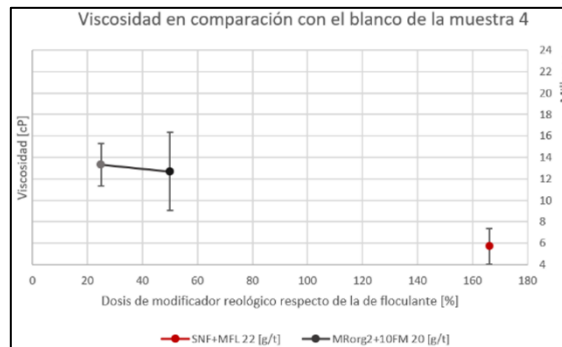


Figura 7.10. Efecto del modificador reológico en la viscosidad del relave.

La Figura 7.10 muestra que cuando se aplica el modificador reológico MRorg2 al floculante 10 FM a una dosis de 10 y 20 [g/t], respectivamente, disminuye la viscosidad en un 4,7% respecto de la adición de 5 [g/t] de modificador reológico (Tabla 10.21), sin embargo, el análisis estadístico indica que esta disminución no es significativa, por lo que su aplicación tiende a mantener la viscosidad. Comparando los resultados con el blanco, se deduce que la aplicación del floculante 10FM a 20 [g/t] con el modificador reológico tiende a aumentar la viscosidad desde un 121% (Tabla 10.23) hasta un 132% (Tabla 10.22).

Discusiones del floculante 10FM a 20 [g/t]

En cuanto a la aplicación del floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] se observa consistencia en la mantención de la velocidad de sedimentación y aumento de la compactación y viscosidad respecto del uso de los productos blanco. El aumento de la compactación se puede explicar porque la aplicación del floculante 10FM en la dosis respectiva genera que los flóculos formados sean más porosos y deformables, lo anterior puede deberse al hecho de la leve carga aniónica que posee el polímero, otorgando repulsiones electrostáticas con la superficie negativa de las partículas, en conjunto con su medio peso molecular y el aditivo de la urea que está presente en la cadena polimérica. Respecto de la turbidez, su variación se podría explicar por la variación de la condición de la muestra. Según la sección 2.10.8 la disminución de la turbidez del agua se puede explicar porque se logra una coordinación entre el tamaño de la partícula y la dosis de polímero de modo que se logra una cobertura de la superficie de las partículas apta que favorece la agregación cinética de las partículas, dejando una menor cantidad de partículas en suspensión. Asimismo, las mayores propiedades reológicas se explican porque se forman flóculos más resistentes, a los que hay que aplicar una mayor cantidad de tensión para ejercer la misma deformación.

En relación con la adición de modificador reológico, el uso de MRorg2 no genera diferencias significativas en las variables de estudio. Lo anterior se podría explicar porque la desestabilización de partículas mediante el mecanismo de carga-parche previo a la adición de floculante no ejerce un efecto significativo en el rendimiento de la floculación, esto se puede explicar porque la fuerza iónica de la solución es baja, generando que la adición del modificador reológico no cambie la magnitud del potencial zeta significativamente.

En resumen, si bien la aplicación del floculante 10FM a 20 [g/t] genera un aumento significativo de recuperación de agua del proceso, se puede obtener más clara o turbia en comparación con el uso de los productos del blanco dependiendo de las condiciones de la muestra de relave, por lo que se descarta su aplicación en el proceso industrial. Asimismo, a pesar de que la aplicación de MRorg2 con el floculante 10FM aumenta la recuperación de agua del proceso significativamente, su uso es inviable porque aumenta considerablemente la viscosidad del relave espesado, pudiendo provocar el embancamiento del espesador o la obstrucción de las tuberías hacia el depósito de relaves.

Velocidad de sedimentación del floculante 10FM a 30 [g/t]

Los gráficos (a) y (b) exhiben el comportamiento del floculante 10FM individual a 30 [g/t] y el efecto el modificador reológico. Por su parte, los gráficos (c) y (d) exhiben los resultados del floculante en conjunto con el modificador reológico.

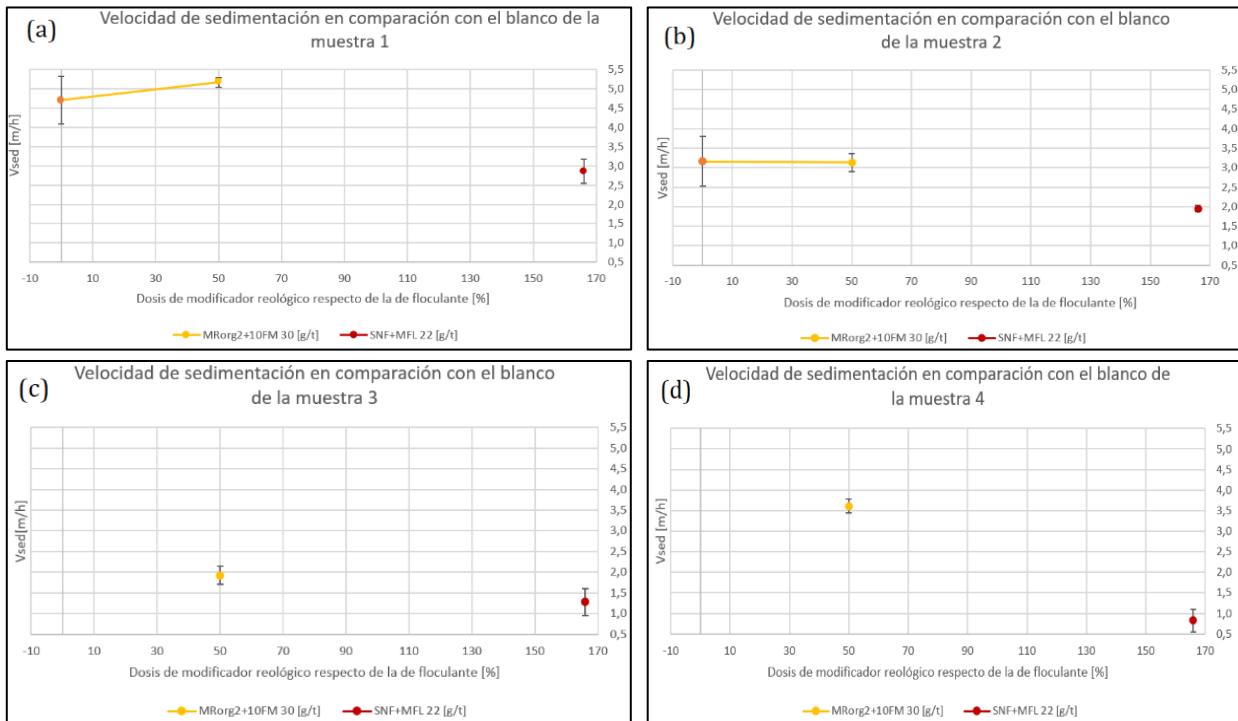


Figura 7.11. Velocidad de sedimentación de la muestra (a) 1, (b) 2, (c) 3 y (d) 4 en comparación con los blancos respectivos.

La Figura 7.11 (a) y (b) muestran que la velocidad de sedimentación del floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] es mayor que la del blanco en un 63% con significancia estadística (Tabla 10.17 y 10.18). Asimismo, la Figura 7.11 (a) y (b) indican que la aplicación del modificador reológico MRorg2 a una dosis de 15 [g/t] no influye sobre la velocidad de sedimentación (Tabla 10.24 y 10.25). En cuanto a la aplicación del floculante y el modificador reológico, en comparación con el blanco, la velocidad de sedimentación aumenta en todos los ensayos realizados con significancia estadística desde un 50% hasta en un 330% (Tabla 10.26, 10.27, 10.28 y 10.29).

Compactación del floculante 10FM a 30 [g/t]

Los gráficos (a) y (b) exhiben el comportamiento del floculante 10FM individual a 30 [g/t] y el efecto el modificador reológico. Por su parte, los gráficos (c) y (d) exhiben los resultados del floculante en conjunto con el modificador reológico.

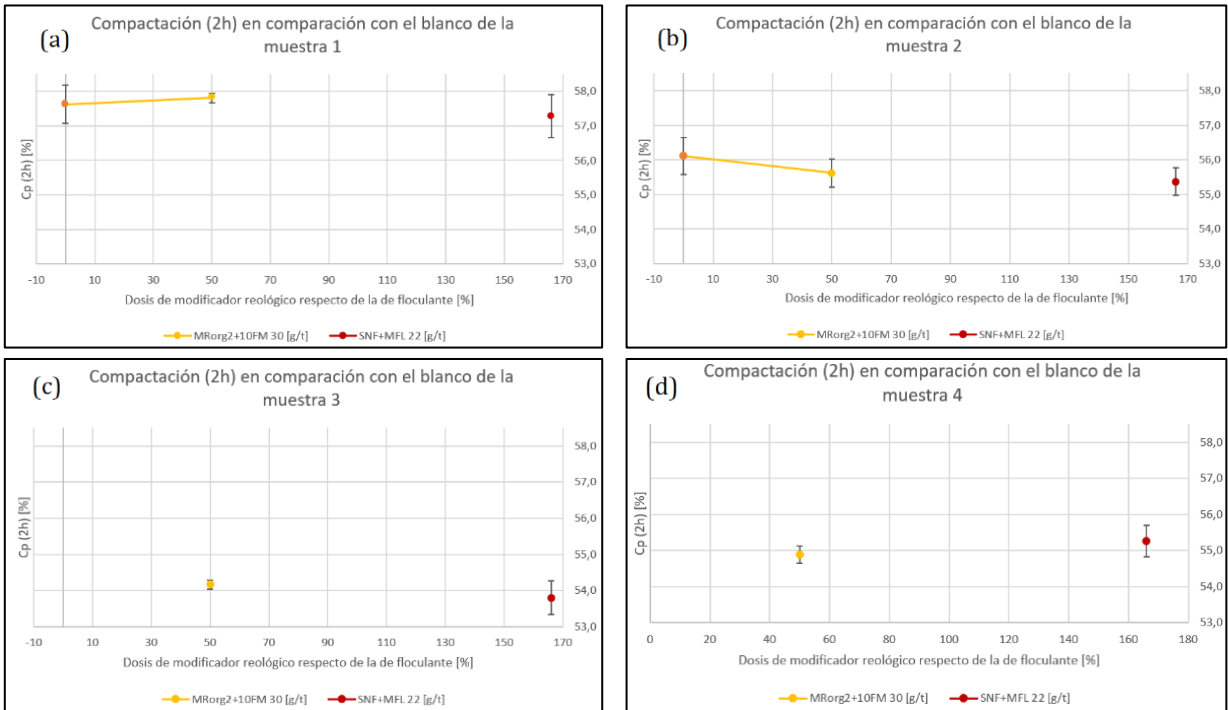


Figura 7.12. Compactación de la muestra (a) 1 y (b) 2 (c) 3 y (d) 4 en comparación con los blancos respectivos.

La Figura 7.12 (a) y (b) muestra que la aplicación del floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t], en comparación con el blanco, puede mantener (Tabla 10.17) o aumentar en un 1,3% la compactación (Tabla 10.18). Asimismo, la Figura 7.12 (a) y (b) indican que la aplicación del modificador reológico MRorg2 a una dosis de 15 [g/t] mantiene la compactación (Tabla 10.24 y 10.25). En cuanto a la aplicación del floculante y el modificador reológico, en comparación con el blanco, la compactación se mantiene en todos los ensayos realizados con significancia estadística (Tabla 10.26, 10.27, 10.28 y 10.29).

Turbidez del floculante 10FM a 30 [g/t]

Los gráficos (a) y (b) exhiben el comportamiento del floculante 10FM individual a 30 [g/t] y el efecto el modificador reológico. Por su parte, los gráficos (c) y (d) exhiben los resultados del floculante en conjunto con el modificador reológico.

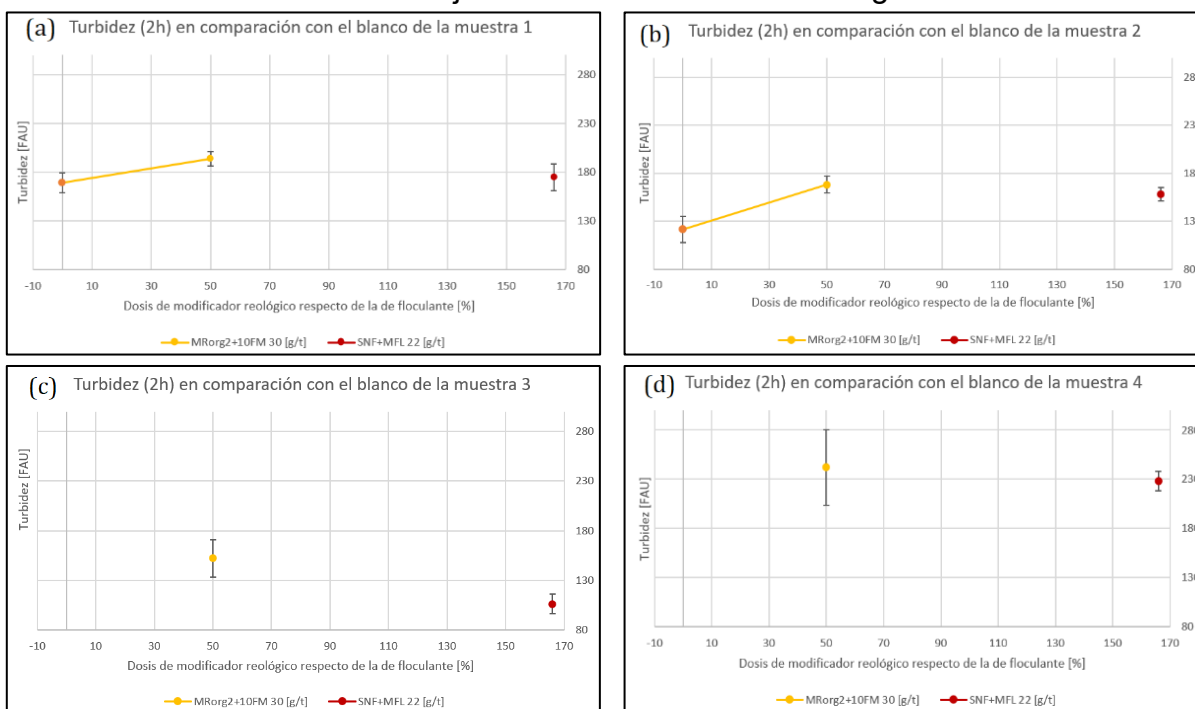


Figura 7.13. Turbidez de la muestra (a) 1 y (b) 2 (c) 3 y (d) 4 en comparación con los blancos respectivos

La Figura 7.13 (a) y (b) muestra que la aplicación del floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t], en comparación con el blanco, mantiene la turbidez (Tabla 10.17 y 10.18). Asimismo, la Figura 7.13 (a) y (b) indican que la aplicación del modificador reológico MRorg2 a una dosis de 15 [g/t] puede aumentar la turbidez desde un 15% (Tabla 10.24) hasta un 40% (Tabla 10.25). En cuanto a la aplicación del floculante y el modificador reológico, en comparación con el blanco, la turbidez se puede mantener (Tabla 10.27 y 10.29) o aumentar desde un 11% (Tabla 10.26) hasta un 43% (Tabla 10.28) en la mitad de los casos.

Propiedades reológicas del floculante 10FM a 30 [g/t]

Los gráficos (a) y (b) exhiben el comportamiento del floculante 10FM individual a 30 [g/t] y el efecto el modificador reológico. Por su parte, los gráficos (c) y (d) exhiben los resultados del floculante en conjunto con el modificador reológico.

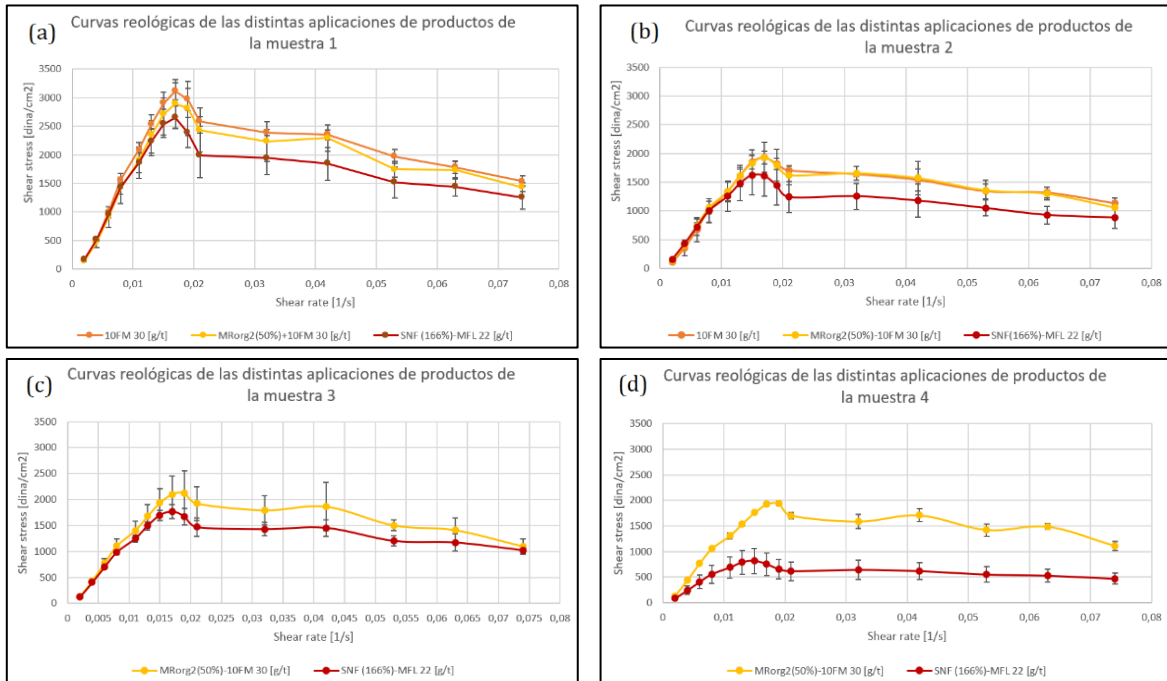


Figura 7.14. Curvas reológicas del relave espesado de la muestra (a) 1 y (b) 2 (c) 3 y (d) 4 en comparación con los blancos respectivos.

La Figura 7.14 (a) y (b) muestra que el efecto del modificador reológico disminuye levemente las propiedades reológicas en comparación con la aplicación única del floculante. Sin embargo, como se observa en todos los gráficos de la Figura 7.14, las propiedades reológicas de la aplicación del floculante con el modificador reológico son mayores en comparación con los productos blanco.

Viscosidad del floculante 10FM a 30 [g/t]

Los gráficos (a) y (b) exhiben el comportamiento del floculante 10FM individual a 30 [g/t] y el efecto el modificador reológico. Por su parte, los gráficos (c) y (d) exhiben los resultados del floculante en conjunto con el modificador reológico.

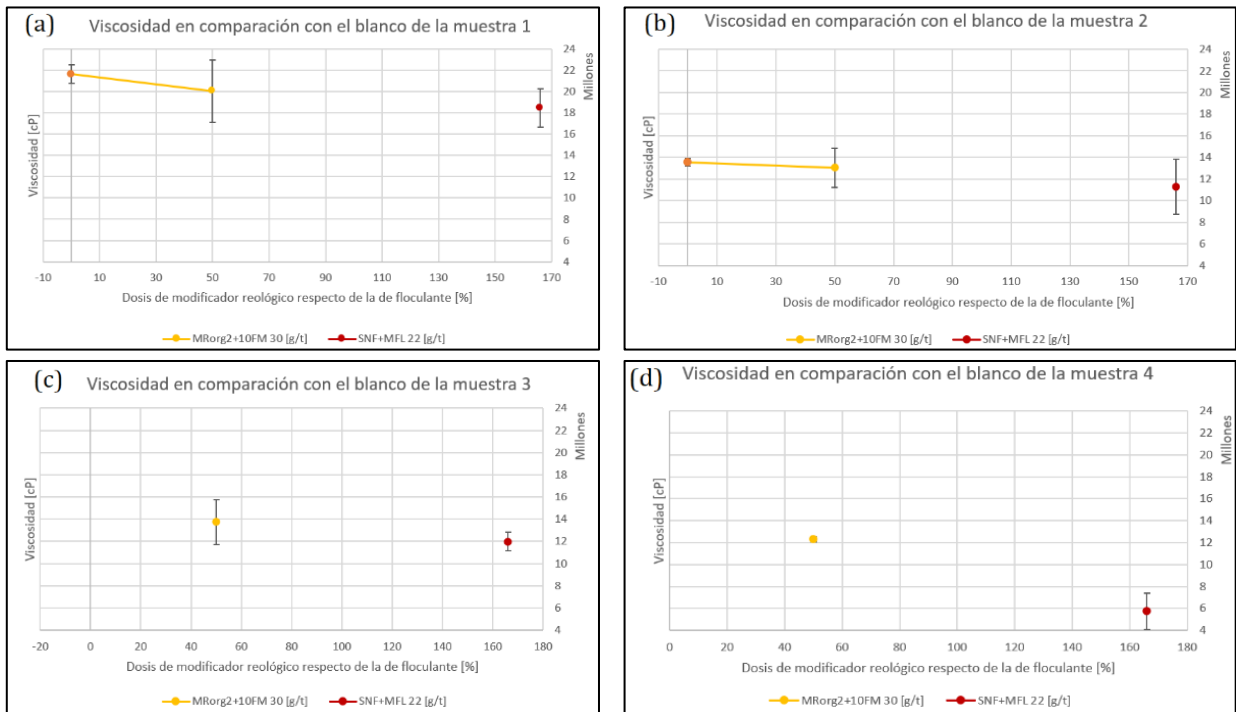


Figura 7.15. Viscosidad del relave espesado de la muestra (a) 1 y (b) 2 (c) 3 y (d) 4 en comparación con los blancos respectivos.

La Figura 7.15 (a) y (b) muestran que la aplicación del floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t], en comparación con el blanco, puede mantener (Tabla 10.18) o aumentar en un 17% la viscosidad (Tabla 10.17). Asimismo, la Figura 7.15 (a) y (b) indican que la aplicación del modificador reológico MRorg2 a una dosis de 15 [g/t] mantiene la viscosidad (Tabla 10.24 y 10.25). En cuanto a la aplicación del floculante y el modificador reológico, en comparación con el blanco, la viscosidad se mantiene en el 75% de los ensayos (Tabla 10.26, 10.27 y 10.28) y puede aumentar hasta en un 114% (Tabla 10.29).

Discusiones del floculante 10FM a 30 [g/t]

En cuanto a la aplicación del floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] se observa consistencia en el aumento de la velocidad de sedimentación y en la mantención de la turbidez respecto del uso de los productos blanco. El aumento de la velocidad de sedimentación se puede explicar por una mayor capacidad de absorción de las partículas coloidales al polímero, lo que se traduce en una mejor afinidad polímero-partícula en solución. Respecto de la compactación y la viscosidad, estas variables se pueden mantener o aumentar respecto del uso de los productos del blanco, lo que es desfavorable desde el punto de vista de las propiedades reológicas, pero favorables para la compactación, ya que indican una mayor recuperación de agua al proceso.

En relación con la adición de modificador reológico, el uso de MRorg2 no genera diferencias significativas en las variables de estudio, exceptuando el caso de la turbidez. Considerando que la turbidez depende en gran medida por la desestabilización de las partículas de la suspensión, el hecho de que la adición del modificador reológico MRorg2 aumente la turbidez se puede explicar por dos posibles razones:

1. La adición de MRorg2 desestabiliza las partículas de la suspensión, sin embargo, ante la leve carga aniónica del floculante MRorg2 la desestabilización es perjudicial para la adsorción de las partículas en el polímero.
2. Debido al tamaño de las partículas de la suspensión, mineralogía y distribución granulométrica, la desestabilización de las partículas ejercida por MRorg2 es ineficaz, empeorando la adsorción de las partículas sobre el floculante.

En resumen, si bien la aplicación del floculante 10FM a 30 [g/t] puede mejorar el rendimiento del espesamiento de relaves en ciertas condiciones, no lo realiza en la totalidad de los casos, lo que significa que no siempre aumenta el rendimiento en comparación con los productos blanco, lo que es desfavorable para el proceso. En la misma línea, la aplicación de MRorg2 con el floculante 10FM no es favorable para el proceso, puesto que aumenta la turbidez del agua recuperada manteniendo constante el resto de las variables en estudio.

Comparación en la aplicación del floculante 10FM a 20 y 30 [g/t]

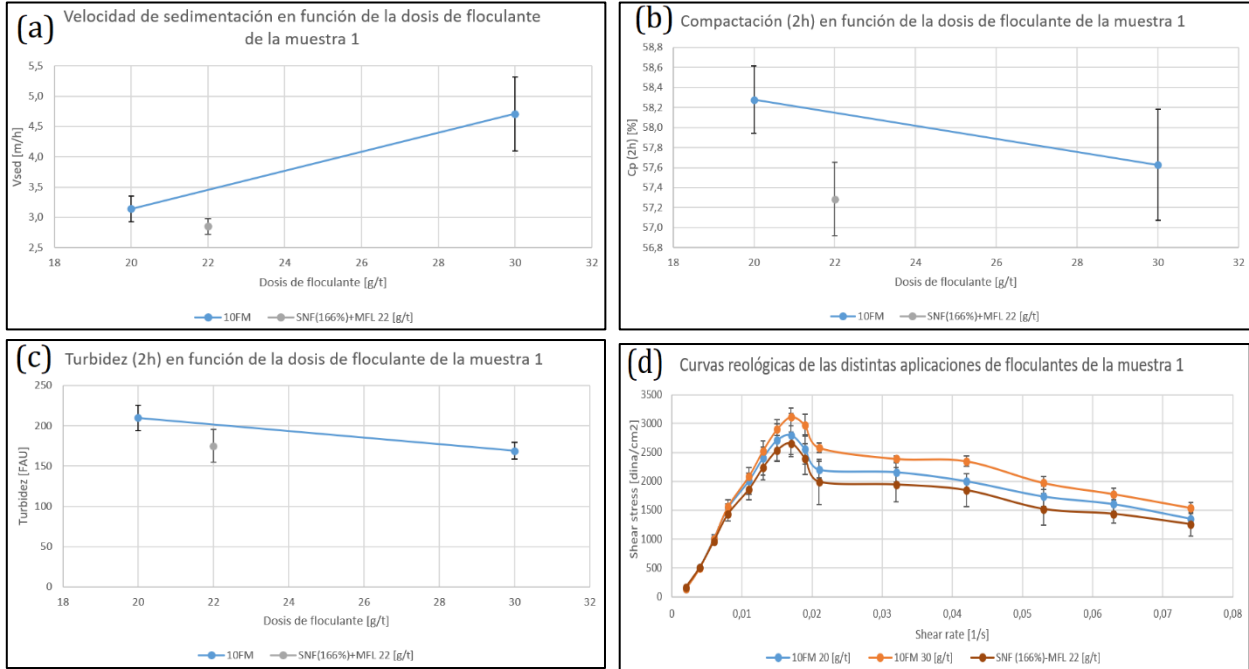


Figura 7.16. (a) Velocidad de sedimentación, (b) compactación, (c) turbidez y (d) propiedades reológicas en función de la dosis de floculante.

La Figura 7.16 muestra que, cuando se aumenta la dosis desde 20 a 30 [g/t], la velocidad de sedimentación aumenta en un 50%, la turbidez disminuye en un 20%, la compactación se mantiene y la viscosidad aumenta en un 7,4% (Tabla 10.100). En comparación con los productos blanco, se observa que velocidad de sedimentación y las propiedades reológicas cuando se aplica el floculante 10FM son mayores, independiente de la dosis ensayada, en cambio, la turbidez suele ser levemente mayor en el caso del floculante 10FM y la compactación es mayor solo a 20 [g/t], ya que a 30 [g/t] se mantiene.

El aumento de la velocidad de sedimentación a medida que aumenta la dosis se puede explicar porque aumentan las interacciones polímero-partícula mediante los puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilos que rodean a los átomos de aluminio o silicio y el grupo amina de la poliacrilamida y el monómero de la urea presente en el floculante, generando flóculos de mayor tamaño que sedimentan con mayor velocidad por el efecto de la gravedad. En cuanto a la turbidez, su disminución en función del aumento de la dosis se podría explicar por el hecho de que el monómero del poliacrilato del floculante genera puentes salinos con las moléculas con carga positiva de la superficie de las partículas, disminuyendo la cantidad de partículas suspendidas en el medio. En la misma línea, las propiedades reológicas aumentan en función del incremento de la dosis debido a que, al haber más interacciones polímero-partícula, los flóculos formados son más resistentes, teniendo que ejercer un mayor esfuerzo para causar la misma deformación a los flóculos.

7.2. Ensayos con la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a 20 [g/t]

Velocidad de sedimentación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a 20 [g/t]

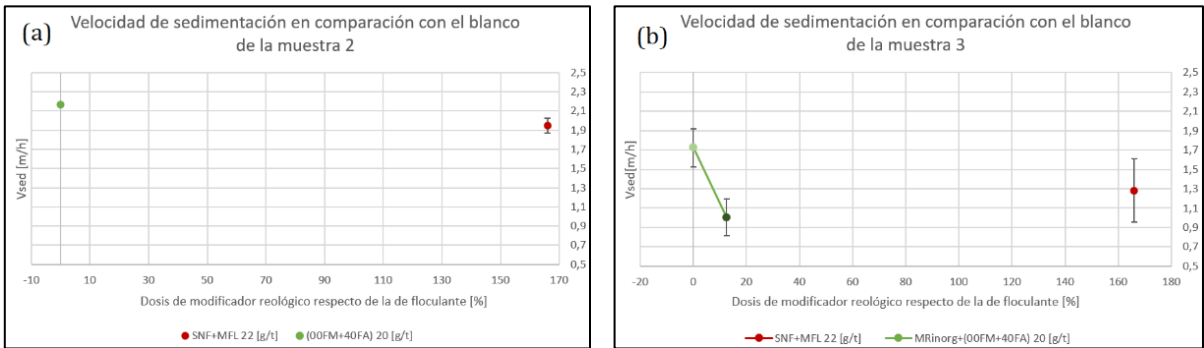


Figura 7.17. Velocidad de sedimentación del relave (a) de la muestra 2 y (b) 3 en comparación con los blancos respectivos.

La Figura 7.17 muestra que la velocidad de sedimentación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t], en comparación con el blanco, se mantiene (Tabla 10.19) y aumenta hasta en un 11% (Tabla 10.20). Asimismo, se deduce que la aplicación del modificador reológico inorgánico (MRinorg) en una dosis de 2,5 [g/t] reduce la velocidad de sedimentación en un 42% (Tabla 10.30). En cuanto a la velocidad de sedimentación de la mezcla de floculantes con el modificador reológico, se determina que esta se mantiene en comparación con la aplicación de los productos del blanco (Tabla 10.31).

Compactación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a 20 [g/t]

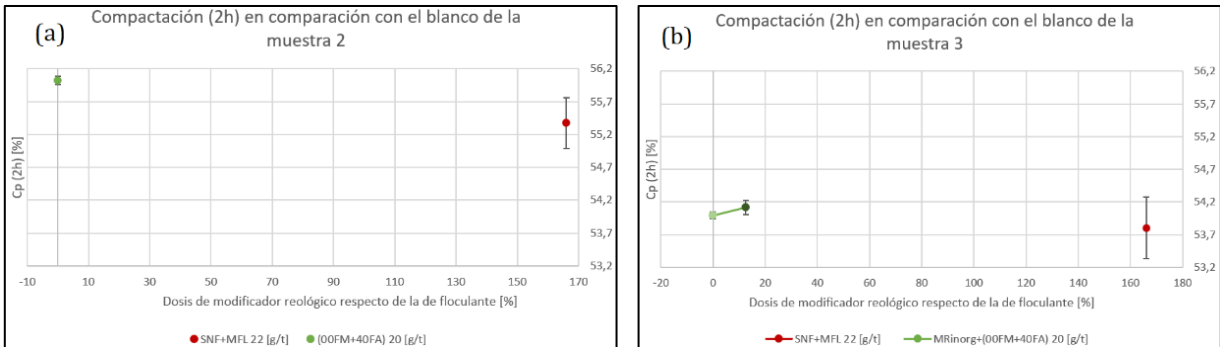


Figura 7.18. Compactación del relave (a) de la muestra 2 y (b) 3 en comparación con los blancos respectivos.

La Figura 7.18 muestra que la compactación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t], en comparación con el blanco, se puede mantener (Tabla 10.20) o aumentar hasta en un 1,2% (Tabla 10.19). Asimismo, se deduce que la aplicación del modificador reológico inorgánico (MRinorg) en una dosis de 2,5 [g/t] mantiene la compactación (Tabla 10.30). En cuanto a la compactación de la mezcla de floculantes con el modificador reológico, se determina que se mantiene en comparación con la aplicación de los productos del blanco (Tabla 10.31).

Turbidez de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a 20 [g/t]

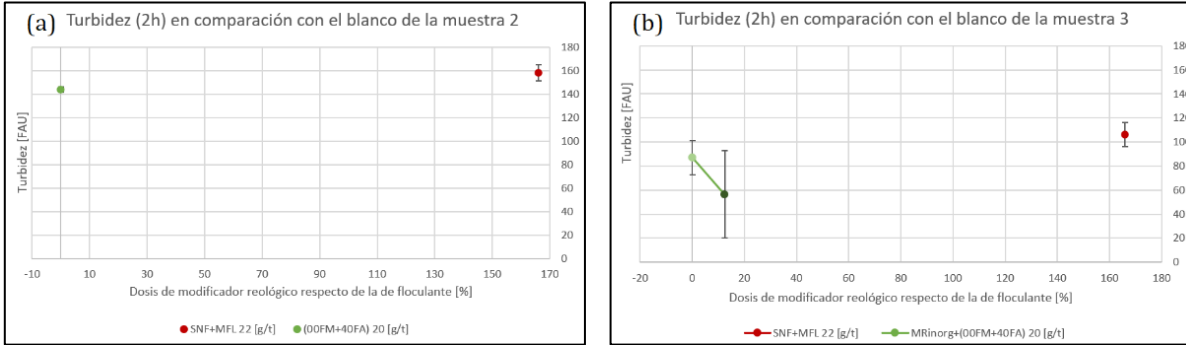


Figura 7.19. Turbidez (a) de la muestra 2 y (b) 3 en comparación con los blancos respectivos.

La Figura 7.19 muestra que la turbidez de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t], en comparación con el blanco, se puede mantener (Tabla 10.20) o disminuir hasta en un 9% (Tabla 10.19). Asimismo, se deduce que la aplicación del modificador reológico inorgánico (MRinorg) en una dosis de 2,5 [g/t] mantiene la turbidez (Tabla 10.30). En cuanto a la turbidez de la mezcla de floculantes con el modificador reológico, se determina que disminuye en comparación con la aplicación de los productos del blanco hasta en un 47% (Tabla 10.31).

Propiedades reológicas de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a 20 [g/t]

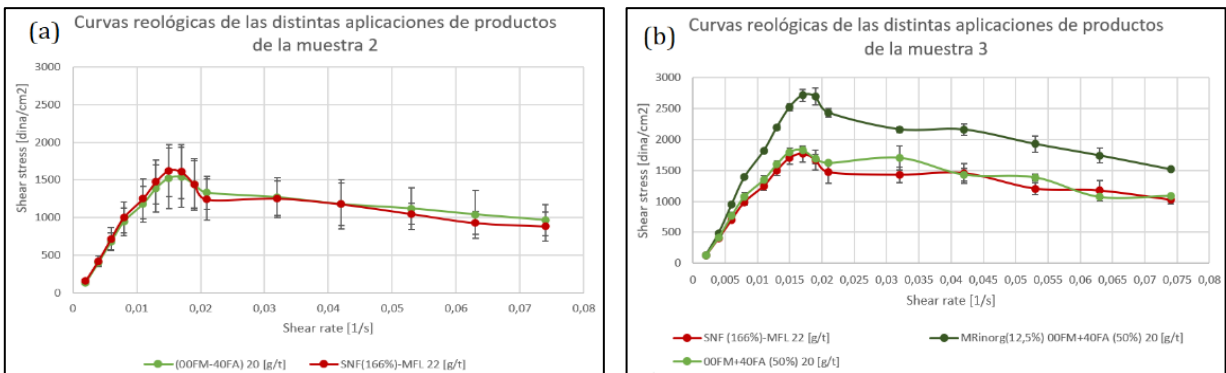


Figura 7.20. Curvas reológicas del relave espesado (a) de la muestra 2 y (b) 3 en comparación con los blancos respectivos.

La Figura 7.20 (a) muestra que las propiedades reológicas del relave cuando se aplica la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] son similares a las del relave cuando se aplica los productos blanco, en cambio, la Figura 7.20 (b) indica que la adición de modificador reológico aumentan las propiedades reológicas considerablemente.

Viscosidad de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a 20 [g/t]

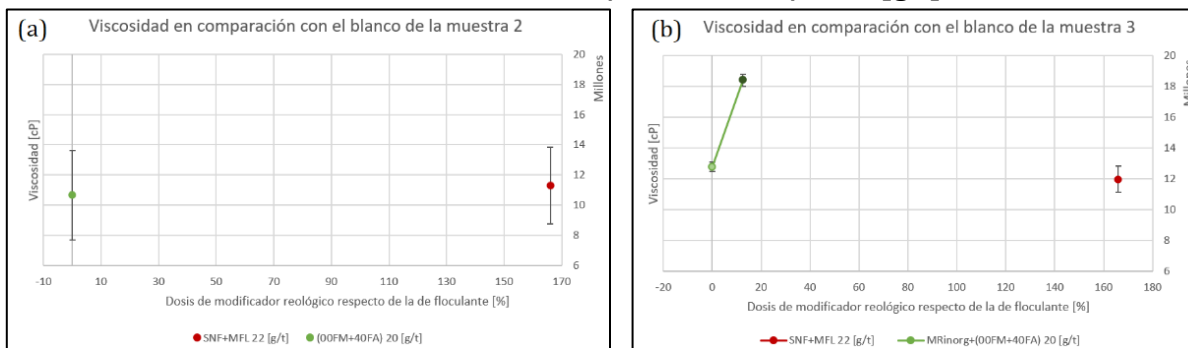


Figura 7.21. Viscosidad del relave espesado (a) de la muestra 2 y (b) 3 en comparación con los blancos respectivos.

La Figura 7.21 muestra que la viscosidad de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t], en comparación con el blanco, se mantiene (Tabla 10.19 y 10.20). Asimismo, se deduce que la aplicación del modificador reológico inorgánico (MRinorg) en una dosis de 2,5 [g/t] aumenta la viscosidad hasta en un 44% (Tabla 10.30). En cuanto a la viscosidad del relave cuando se aplica la mezcla de floculantes con el modificador reológico, se determina que aumenta en comparación con la aplicación de los productos del blanco hasta en un 54% (Tabla 10.31).

Discusiones de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a 20 [g/t]

En cuanto a la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] se observa consistencia en la mantención de las propiedades reológicas, en cambio, el resto de las variables se mantienen o alcanzan magnitudes favorables para el rendimiento de la floculación. Los cambios relativos en las variables ante la aplicación de la misma mezcla de floculantes a equivalentes dosis sobre una muestra de relave diferente es probable que se explique por la variabilidad de la condición del relave en términos de tamaño de partícula, distribución granulométrica y mineralogía. En consecuencia, la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] puede mejorar o mantener el rendimiento del espesamiento en comparación con el uso de los productos del blanco, por lo que es una combinación de productos adecuada para una prueba industrial.

En relación con la adición de modificador reológico, el uso del modificador reológico inorgánico disminuye la velocidad de sedimentación y aumenta la viscosidad, lo que es desfavorable para el espesamiento. A modo de discusión, el hecho de que la adición del modificador reológico disminuya la velocidad de sedimentación se puede explicar porque al aumentar la salinidad de la solución se reducen las repulsiones electrostáticas entre polímero-partículas, lo que genera una conformación de adsorción más comprimida y la formación de puentes disminuye su eficiencia, obteniendo flóculos de menor tamaño, sedimentando más lento. Además, se observa un aumento significativo de la viscosidad y de las propiedades reológicas porque el modificador reológico genera un ambiente en

el que ante la presencia de la mezcla de floculantes se formen flóculos más compactos y resistentes.

En resumen, la aplicación de la mezcla de floculantes a una dosis de 20 [g/t] demuestra que mejorar el proceso de espesamiento respecto del blanco. En cuanto a la aplicación del modificador reológico inorgánico a una dosis de 2,5 [g/t] sobre la mezcla de floculantes no genera una recuperación significativa de agua, además de aumentar las propiedades reológicas, por lo que se descarta esta última aplicación a nivel industrial.

Comparación en la aplicación del floculante 10FM con la mezcla de floculantes

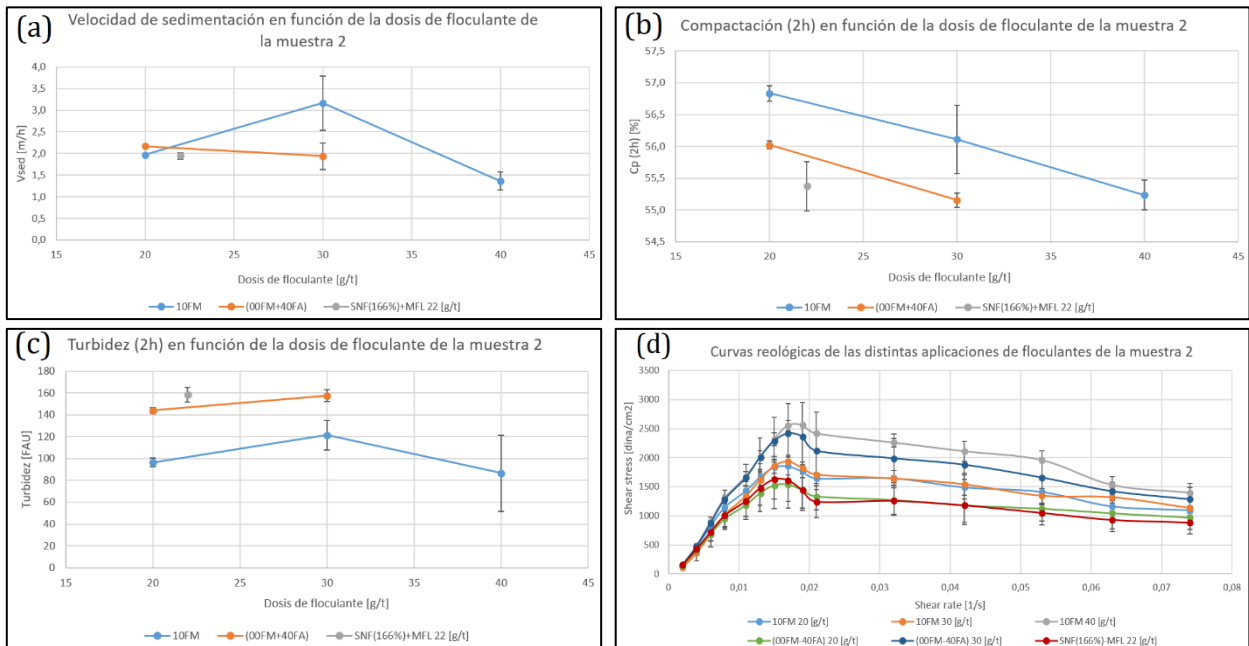


Figura 7.22. (a) Velocidad de sedimentación, (b) compactación, (c) turbidez y (d) propiedades reológicas en función de la dosis de floculante.

La Figura 7.22 muestra que se observa un mejor rendimiento general para el floculante 10FM en comparación con la mezcla (00FM+40FA), sin embargo, el floculante 10FM tiene propiedades reológicas más elevadas respecto de la aplicación de los productos blanco, por lo que se descarta su aplicación a nivel industrial, en cambio, la mezcla de floculantes a 20 [g/t] indica un rendimiento similar o mejor que el blanco en todas las variables. Cabe destacar que de la Figura 7.22 (d) se puede deducir que las propiedades reológicas tienden a aumentar con el aumento de dosis, puesto que hay más interacciones en la adsorción polímero-partícula generando un flóculo más resistente. Paralelamente, en la Figura 7.22 (b) se observa que a medida que aumenta la dosis de floculante, la compactación disminuye y en cambio, respecto de la velocidad de sedimentación y turbidez no se puede llegar a tendencias claras, por lo que para observar dichas tendencias hay que estudiar los floculantes en un rango de dosis más amplio. A pesar de lo anterior, contrastando estos resultados con los de la Figura 7.16, se observa consistencia en las variables de velocidad de sedimentación, de las propiedades

reológicas y de la compactación, sin embargo, la turbidez suele variar, lo que se podría explicar por los cambios de la condición de la muestra.

Discusiones generales

Si bien las explicaciones dadas en la presente sección que justifican los resultados se basan en literatura científica, ante la existencia de diversos factores de la fenomenología que no se cuantificaron, como la distribución granulométrica de la muestra, la mineralogía específica, la forma de las partículas antes y después de la aplicación del floculante, la velocidad de cizallamiento, entre otros, no se descarta que la combinación del cambio de dichas variables pueda conducir a explicaciones más complejas que puedan explicar con mayor profundidad los resultados.

Respecto de totalidad de las curvas reológicas obtenidas del estudio, en la mayoría de los casos se observa una región lineal inicial seguida de una región no lineal, un máximo de tensión y una zona de decaimiento de la tensión. La región lineal representa una deformación elástica por parte de la suspensión con un yield stress cercano a cero, lo que indica un comportamiento de un fluido newtoniano en el rango de velocidad de cizallamiento desde 0,002 a 0,015 [1/s] donde, en el rango de 0,015 a 0,019 [1/s] sufre el efecto del shear banding, pasando al régimen elástico al viscoelástico, que representa el flujo viscoelástico de la suspensión, en él que se sufren deformaciones irreversibles generando pérdidas de energía por disipación viscosa.

7.3. Recuperación de agua

Las tablas de la presente subsección detallan la ganancia de recuperación de agua en promedio que se obtendría a nivel industrial en función del aumento de compactación, la concentración de sólidos a la entrada y a la salida del espesador de pasta con la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] respecto del uso de los productos del blanco.

Además, $C_{p,UF}$ representa la concentración de sólidos del relave a la salida inferior del espesador de pasta industrial.

	$C_{p,UF}$ [%]	Recuperación de agua [m ³ /h]	Ganancia de recuperación de agua [m ³ /h]	Porcentaje de aumento en la recuperación de agua [%]
Blanco	69	214,78	1,96	0,91
Productos	69,8	216,74		
Blanco	72	221,67	1,87	0,84
Productos	72,9	223,54		

Tabla 7.1. Ganancia de recuperación de agua neta y porcentual de la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] respecto del uso de los productos del blanco considerando una concentración de sólidos del 30% en masa, a un flujo másico neto de 380 [t/h] y un aumento de compactación en un 1,2%.

	$C_{p,UF}$ [%]	Recuperación de agua [m ³ /h]	Ganancia de recuperación de agua [m ³ /h]	Porcentaje de aumento en la recuperación de agua [%]
Blanco	69	160,14	1,96	1,22
Productos	69,8	162,10		
Blanco	72	167,01	1,88	1,13
Productos	72,9	168,89		

Tabla 7.2. Ganancia de recuperación de agua neta y porcentual de la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] respecto del uso de los productos del blanco considerando una concentración de sólidos del 35% en masa, a un flujo másico neto de 325 [t/h] y un aumento de compactación en un 1,2%.

	$C_{p,UF}$ [%]	Recuperación de agua [m ³ /h]	Ganancia de recuperación de agua [m ³ /h]	Porcentaje de aumento en la recuperación de agua [%]
Blanco	69	119,78	1,96	1,64
Productos	69,8	121,74		
Blanco	72	126,67	1,87	1,48
Productos	72,9	128,64		

Tabla 7.3. Ganancia de recuperación de agua neta y porcentual de la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] respecto del uso de los productos del blanco considerando una concentración de sólidos del 40% en masa, a un flujo másico neto de 285 [t/h] y un aumento de compactación en un 1,2%.

Es necesario recalcar que las tres tablas anteriores consideran un procesamiento de 114 [TMS de relave/h], es decir, una masa constante de sólido a procesar, variando el flujo másico por la cantidad de agua que posee.

A modo de discusión, a pesar de que la recuperación neta de agua aumenta a medida que aumenta la diferencia entre la concentración de sólidos a la entrada y a la salida del espesador, la ganancia de recuperación de agua es mayor cuando el relave egresa a una menor concentración de sólidos independiente de la concentración de sólido a la entrada del espesador. Además, se tiene que cuando se procesa la misma cantidad de relave seco, la recuperación neta de agua es equivalente independiente de la concentración de sólidos a la entrada y a la salida del espesador.

8. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió entender la relación de la estructura química y las propiedades del peso molecular y carga iónica de los floculantes con el rendimiento del proceso de espesamiento del proceso productivo del oro y plata, específicamente en Minera Florida, además del efecto de la adición de modificadores reológicos al proceso. Esto permitió profundizar el conocimiento de los mecanismos de floculación y el efecto de los modificadores reológicos en la sedimentación de los relaves mineros, lo que contribuye al avance de la ciencia y tecnología en el campo de la minería. Además, el estudio proporciona información sobre cómo mejorar la eficiencia del proceso de espesamiento, lo que puede tener un impacto significativo en la rentabilidad de las operaciones mineras.

En relación con los floculantes ensayados, ninguno de los siete mejoró el proceso de espesamiento en todas las variables estudiadas simultáneamente. A pesar de lo anterior se concluye que el floculante 10FM es aquel que otorga un mejor rendimiento al tratamiento de los relaves, puesto que, en comparación con los productos aplicados al proceso por Minera Florida, aumenta la velocidad de sedimentación hasta en un 63% y la compactación hasta un 2,6%, reduce la turbidez hasta en un 39%, sin embargo, aumenta la viscosidad hasta en un 16%. En cuanto a las pruebas realizadas con las mezclas de floculantes, se concluye que la mezcla del floculante 00FM con el 40FA en una razón másica de 1:1 fue la que obtuvo mejores resultados de las mezclas ensayadas.

Respecto a la variación de la dosis de floculante, se concluye que a medida que aumenta la dosis en el intervalo de 20 a 40 [g/t], no hay una tendencia consistente en las variables de velocidad de sedimentación, compactación ni turbidez, pero las propiedades reológicas del relave espesado aumentan. Específicamente, el floculante 10FM cuando se dosifica a 30 y 40 [g/t] obtiene una mayor viscosidad en un 3,5% y 27% respecto de su administración a 20 [g/t], respectivamente. En la misma línea, la mezcla de floculantes 00FM y 40FA cuando se dosifica a 30 [g/t] logra una mayor viscosidad en un 54% respecto de su dosificación a 20 [g/t].

Se concluye que las características de los floculantes que optimizan el proceso de espesamiento de relaves en Minera Florida deben tener una carga aniónica molar entre el 10 y 20%, además de un peso molecular medio.

En cuanto al uso de modificadores reológicos se concluye que, de los cuatro ensayados, ninguno en particular logró mejorar el rendimiento del proceso de espesamiento de relaves logrado por los floculantes previamente estudiados, puesto que, específicamente el modificador reológico orgánico (MRorg2), en comparación con la aplicación del floculante 10FM, si bien aumenta la velocidad de sedimentación hasta en un 63%, también aumenta la turbidez hasta en un 40%, manteniendo la compactación y las propiedades reológicas. En cambio, el modificador reológico inorgánico (MRinorg), en

comparación con la aplicación de la mezcla de floculantes 00FM y 40FA, si bien mantiene la compactación y la turbidez, disminuye la velocidad de sedimentación hasta en un 42% y aumenta la viscosidad hasta en un 44%. Lo anterior se puede explicar porque la desestabilización de las partículas previa a la adición del floculante fue desfavorable para la adsorción de las partículas coloidales sobre este, lo que se puede explicar por la reducción de las repulsiones electrostáticas polímero-partícula.

Se concluye que la mezcla de floculantes 00FM y 40FA en una razón másica de 1:1 a una dosis de 20 [g/t], en comparación con el uso de los productos utilizados por Minera Florida en el proceso, con un nivel de confianza del 95%, aumenta la velocidad de sedimentación hasta en un 11% y la recuperación de agua desde un 0,84% al 1,64%, lo que equivale a una recuperación desde 1,87 hasta 1,96 $\left[\frac{\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{h}}\right]$, aproximadamente, además de disminuir la turbidez del agua recuperada en un 9% y mantener las propiedades reológicas del relave espesado, aumentando la sustentabilidad y sostenibilidad en Minera Florida, minimizando el consumo del recurso del agua.

Por último, para futuros trabajos se recomienda caracterizar granulométrica y mineralógicamente el relave a ensayar, caracterizar estructural y topológicamente los floculantes, además de cuantificar el tamaño y porosidad de los flóculos resultantes y el potencial zeta del medio, ya que la correlación de dichas variables permitiría dirigir los trabajos y la correcta elección de los floculantes, reduciendo el tiempo de los trabajos.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S. & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: Disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1050–1062. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.139>
- Aitken, D., Rivera, D., Godoy-Faúndez, A. & Holzapfel, E. (2016). Water scarcity and the impact of the mining and agricultural sectors in Chile. *Sustainability (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/su8020128>
- Amoo, L. M. & Layi Fagbenle, R. (2020). Overview of non-Newtonian boundary layer flows and heat transfer. In *Applications of Heat, Mass and Fluid Boundary Layers* (pp. 413–435). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817949-9.00022-0>
- Arjmand, R., Massinaei, M. & Behnamfard, A. (2019). Improving flocculation and dewatering performance of iron tailings thickeners. *Journal of Water Process Engineering*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100873>
- Barnes, H. A., Hutton, J. F. & Walters, K. (1989). An Introduction to Rheology. *Rheology Series*, 3.
- Besra, L., Sengupta, D. K., Roy, S. K. & Ay, P. (2004). Influence of polymer adsorption and conformation on flocculation and dewatering of kaolin suspension. *Separation and Purification Technology*, 37(3), 231–246. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.10.001>
- Bourgès-Gastaud, S., Dolez, P., Blond, E. & Touze-Foltz, N. (2017). Dewatering of oil sands tailings with an electrokinetic geocomposite. *Minerals Engineering*, 100, 177–186. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2016.11.002>
- Brookfield, A. (2019). *DVNext™ RHEOMETER Operating Instructions*.
- Bulatovic, S., Wyslouzil, D. & Kant, C. (1999). *Effect of clay slimes on copper, molybdenum flotation from porphyry ores. Proceedings of Copper*. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Effect+of+clay+slimes+on+copper,+molybdenum+flotation+from+porphyry+ores#0>.
- Cacciuttolo, C., Cano, D. & Custodio, M. (2023). Socio-Environmental Risks Linked with Mine Tailings Chemical Composition: Promoting Responsible and Safe Mine Tailings Management Considering Copper and Gold Mining Experiences from Chile and Peru. *Toxics*, 11(5), 462. <https://doi.org/10.3390/toxics11050462>
- Castillo, C., Fawell, P. & Costine, A. (2023). Optimising the activity of acrylamide-based polymer solutions used to flocculate mineral processing tailings suspensions – A review. In *Chemical Engineering Research and Design* (Vol. 199, pp. 214–237). Institution of Chemical Engineers. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.10.001>
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico* (3ra ed.). McGraw-Hill.
- Concha, F. (2014). *Fluid Mechanics and Its Applications Solid-Liquid Separation in the Mining Industry* (Vol. 105). Springer. <http://www.springer.com/series/5980>
- Consejo Minero. (2020). *Minería en números* (4ta ed.).

- Dealy, J. M. (2013). *Melt Rheology and its Applications in the Plastics Industry* (Jian. Wang, Ed.; 2nd ed. 2013.) [Book]. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6395-1>
- Divoux, T., Fardin, M. A., Manneville, S. & Lerouge, S. (2016). Shear Banding of Complex Fluids. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 48, 81–103. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-122414-034416>
- Dryabina, S., Fotina, K., Navrotskii, A. & Novakov, I. (2017). The flocculation of kaolin aqueous dispersion by two cationic polyelectrolytes. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 515, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.11.055>
- Dryabina, S. S., Rudenko, M. S., Shulevich, Y. V., Navrotskii, A. V. & Novakov, I. A. (2020). Specifics of kaolin dispersion flocculation due to a polyelectrolyte complex formation on particle surface. *Colloid and Polymer Science*, 298(6), 519–533. <https://doi.org/10.1007/s00396-020-04623-6>
- Franck, A. (n.d.). *Viscoelasticity and dynamic mechanical testing A. Franck, TA Instruments Germany*.
- FUNDACIÓN CHILE. (2018). *Radiografía del agua. Brecha y riesgo hídrico en Chile*.
- Gedde, U. W. & Hedenqvist, M. S. (2019). *The Molten State* (pp. 201–250). Fundamental Polymer Science. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29794-7_6
- Grabsch, A. F., Fawell, P. D., Adkins, S. J. & Beveridge, A. (2013). The impact of achieving a higher aggregate density on polymer-bridging flocculation. *International Journal of Mineral Processing*, 124, 83–94. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.04.011>
- Hamza, A., Hussein, I. A. & Mahmoud, M. (2023). Introduction to reservoir fluids and rock properties. In *Developments in Petroleum Science* (Vol. 78, pp. 1–19). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99285-5.00003-X>
- Hogan, R. (2006). *How to combine errors*.
- Hogg, R. (2000). Flocculation and dewatering. In *Int. J. Miner. Process* (Vol. 58). www.elsevier.nl/locate/ijminpro
- Jimenez, Y. P. & Ulbricht, M. (2019). Recovery of Water from Concentration of Copper Mining Effluents Using Direct Contact Membrane Distillation. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(42), 19599–19610. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b02499>
- Klug, R. & Schwarz, N. (2019). Dewatering tailings: rapid water recovery by use of centrifuges. *Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*, 369–383. https://doi.org/10.36487/acg_rep/1910_26_klug
- Kokuti, Z., van Gruijthuisen, K., Jenei, M., Tóth-Molnár, G., Czirják, A., Kokavec, J., Ailer, P., Palkovics, L., Völker, A. C. & Szabó, G. (2014). High-frequency rheology of a high viscosity silicone oil using diffusing wave spectroscopy. *Applied Rheology*, 24(6). <https://doi.org/10.3933/APPLRHEOL-24-63984>
- Kurniawan, S. B., Abdullah, S. R. S., Imron, M. F., Said, N. S. M., Ismail, N. 'Izzati, Hasan, H. A., Othman, A. R. & Purwanti, I. F. (2020). Challenges and opportunities of

- biocoagulant/bioflocculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 17, Issue 24, pp. 1–33). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ijerph17249312>
- Lee, J. K., Ko, J. & Kim, Y. S. (2017). Rheology of fly ash mixed tailings slurries and applicability of prediction models. *Minerals*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/min7090165>
- Leiva, W., Toro, N., Robles, P., Gálvez, E. & Jeldres, R. I. (2021). Use of multi-anionic sodium tripolyphosphate to enhance dispersion of concentrated kaolin slurries in seawater. *Metals*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/met11071085>
- Lewhinson, J. (2017). *Estado del arte de las estadísticas mineras del uso de agua y energía en los países andinos* (Naciones Unidas, Ed.).
- Li, J., Cheng, Y., Chen, X. & Zheng, S. (2019). Impact of electroviscous effect on viscosity in developing highly concentrated protein formulations: Lessons from non-protein charged colloids. *International Journal of Pharmaceutics: X*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2018.100002>
- Maćczak, P., Kaczmarek, H. & Ziegler-Borowska, M. (2020). Recent achievements in polymer bio-based flocculants for water treatment. In *Materials* (Vol. 13, Issue 18). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma13183951>
- Madin, C. (2007). Innovative treatment of gold mine water for sustainable benefit - Processes and case studies. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series*, 109–116.
- Mamghaderi, H., Gharabaghi, M. & Noaparast, M. (2018). Optimization of role of physical parameters in the filtration processing with focus on the fluid flow from pore. *Minerals Engineering*, 122, 220–226. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2018.03.041>
- McMahon, J. (2014). Optimizing: Tailings disposal and water recovery. *Pollution Engineering*, 46(8), 20–24.
- Minera Florida. (2023). *Documentos internos de Minera Florida*.
- Møller, P. C. F., Mewis, J. & Bonn, D. (2006). Yield stress and thixotropy: On the difficulty of measuring yield stresses in practice. *Soft Matter*, 2(4), 274–283. <https://doi.org/10.1039/b517840a>
- Mpofu, P., Addai-Mensah, J. & Ralston, J. (2005). Interfacial chemistry, particle interactions and improved dewatering behaviour of smectite clay dispersions. *International Journal of Mineral Processing*, 75(3–4), 155–171. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.01.008>
- Nasser, M. S. & James, A. E. (2007). Effect of polyacrylamide polymers on floc size and rheological behaviour of kaolinite suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 301(1–3), 311–322. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.12.080>
- Ndlovu, B., Becker, M., Forbes, E., Deglon, D. & Franzidis, J. P. (2011). The influence of phyllosilicate mineralogy on the rheology of mineral slurries. *Minerals Engineering*, 24(12), 1314–1322. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.05.008>

- Ndlovu, B., Forbes, E., Farrokhpay, S., Becker, M., Bradshaw, D. & Deglon, D. (2014). A preliminary rheological classification of phyllosilicate group minerals. *Minerals Engineering*, 55, 383–389. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.06.004>
- Ovarlez, G., Rodts, S., Chateau, X. & Coussot, P. (2009). Phenomenology and physical origin of shear localization and shear banding in complex fluids. *Rheologica Acta*, 48(8), 831–844. <https://doi.org/10.1007/s00397-008-0344-6>
- Owen, A. T., Nguyen, T. V. & Fawell, P. D. (2009). The effect of flocculant solution transport and addition conditions on feedwell performance in gravity thickeners. *International Journal of Mineral Processing*, 93(2), 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.07.001>
- Particle Technology Labs. (2022). *Demystifying Zeta Potential*. <https://particletechlabs.com/ptl-press/demystifying-zeta-potential-7/#:~:text=Zeta%20potential%20per%20ISO%2013099,is%20called%20the%20Slipping%20plane.>
- Peltier, J., Bluemle, M., Andermann, L. & Broecher, M. (2018). *Process for improving the rheological properties of an aqueous dispersion* (Patent No. US10066107B2).
- Privitera, G. (2016). Introduction to Hypothesis Testing. In *Statistics for the Behavioral Sciences*. https://www.sagepub.com/sites/default/files/upm-binaries/40007_Chapter8.pdf
- Quist-Jensen, C. A., Ali, A., Drioli, E. & Macedonio, F. (2019). Perspectives on mining from sea and other alternative strategies for minerals and water recovery – The development of novel membrane operations. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 94, 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.02.002>
- Rice, J. A. (2007). *Mathematical statistics and data analysis*. Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Rumbo Minero. (2017, 11. Diciembre). *Relaves Mineros: Optimizando la Gestión para una industria ecoamigable*. <https://www.rumbominero.com/revista/relaves-mineros-optimizando-la-gestion-para-una-iindustria-ecoamigable/#:~:text=%E2%80%9CDependiendo%20de%20la%20cantidad%20de,espesados%2C%20en%20pasta%20y%20filtrado.>
- Santibáñez, F. (2018). *El cambio climático y los recursos hídricos de Chile*.
- Schoenbrunn, F. & Bach, M. (2015). The Development of Paste Thickening and Its Application to the Minerals Industry; An Industry Review. *BHM Berg- Und Hüttenmännische Monatshefte*, 160(6), 257–263. <https://doi.org/10.1007/s00501-015-0377-y>
- SERNAGEOMIN. (2023). *Preguntas frecuentes sobre relaves*. <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>
- Shafaei, F., Doulati Ardejani, F., Bahroudi, A., Hoseini, M. & Khakpour, M. (2022). Mechanical-Electrical dewatering (EDW) of mine Tailings: Influence of voltage level on water recovery and moisture reduction. *Minerals Engineering*, 175. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107303>

- Shaikh, S. M. R., Nasser, M. S., Hussein, I., Benamor, A., Onaizi, S. A. & Qiblawey, H. (2017). Influence of polyelectrolytes and other polymer complexes on the flocculation and rheological behaviors of clay minerals: A comprehensive review. In *Separation and Purification Technology* (Vol. 187, pp. 137–161). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.06.050>
- Tangsathitkulchai, C. (2003). *The effect of slurry rheology on fine grinding in a laboratory ball mill*. www.elsevier.com/locate/ijminpro
- Taylor, M. L., Morris, G. E., Self, P. G. & Smart, R. S. C. (2002). Kinetics of adsorption of high molecular weight anionic polyacrylamide onto kaolinite: The flocculation process. *Journal of Colloid and Interface Science*, 250(1), 28–36. <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8341>
- Tecsup. (2022). *Recuperación de oro con carbón activado*. <https://www.youtube.com/watch?v=SGqo77LNSaM>
- Teraoka, Iwao. (2002). *Polymer solutions : an introduction to physical properties*. Wiley.
- Valencia Camilo, Collado Andrés & Acuña Claudio. (2018). *Recuperación de agua en relaves mineros mediante el uso de drenaje electro osmótico*.
- Wang, C., Harbottle, D., Liu, Q. & Xu, Z. (2014). Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. In *Minerals Engineering* (Vol. 58, pp. 113–131). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.018>
- Wikipedia. (2011). *Double layer (surface science)*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_\(surface_science\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Double_layer_(surface_science))
- Williams, P. A. (2007). *Handbook of industrial water soluble polymers*. Blackwell Pub.
- Wilson, D. I. (2019). Industrial applications of yield stress fluids. In *CISM International Centre for Mechanical Sciences, Courses and Lectures* (Vol. 583, pp. 195–259). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-89438-6_6
- Yoshida, T., Tasaka, Y., Tanaka, S., Park, H. J. & Murai, Y. (2018). Rheological properties of montmorillonite dispersions in dilute NaCl concentration investigated by ultrasonic spinning rheometry. *Applied Clay Science*, 513–523.
- Yousefi, S. A., Nasser, M. S., Hussein, I. A. & Benamor, A. (2020). Enhancement of flocculation and dewaterability of a highly stable activated sludge using a hybrid system of organic coagulants and polyelectrolytes. *Journal of Water Process Engineering*, 35, 101237. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2020.101237>

ANEXO

Anexo A. Tecnología TTD

La tecnología Thickened Tailings Disposal (TTD), fue desarrollada exitosamente el año 1975 por el doctor Eli Robinsky en Canadá, para el manejo sustentable de residuos mineros (Minera Florida, 2023).

Los objetivos principales de esta tecnología son los siguientes:

1. Aumentar la concentración de sólidos del relave en la descarga, de modo de eliminar las lagunas de agua (Figura 1.1) que se producen en el tranque y mejorar la estabilidad de este ante sismos severos.
2. Desarrollar un depósito auto soportado en pendientes suaves y capas delgadas, beneficiando la consolidación.
3. Lograr el mínimo impacto con el medio ambiente, evitando las infiltraciones, maximizando la recuperación de agua para el proceso y eliminando sustancialmente la emisión del material particulado.

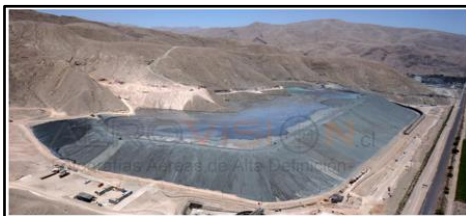


Figura 10.1. Tranque de relaves convencional (Minera Florida, 2023).



Figura 10.2. (a) Efecto eólico erosivo en tranques de relaves. (b) Daños a la vegetación aledaña. (c) Fallas de tranques ante sismos severos (Minera Florida, 2023).

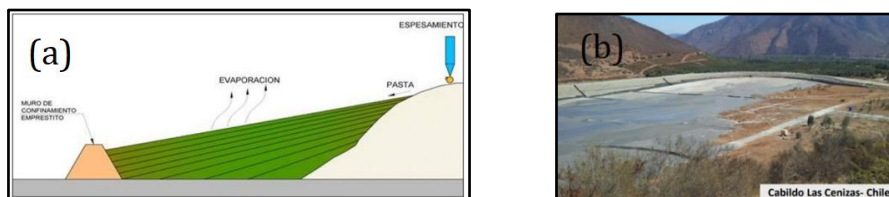


Figura 10.3. (a) Diagrama de la estructura de un tranque de relaves en pasta. (b) Imagen de un tranque de relaves en pasta (Minera Florida, 2023).

En consecuencia, el objetivo consiste en espesar a una concentración de sólidos tal que no se permita la segregabilidad en la descarga con una depositación con baja energía. Cabe destacar que lo anterior se puede lograr considerando una concentración de sólidos de 60-75% en peso, de modo que el transporte y la descarga sea laminar simulando una pasta (Minera Florida, 2023).

Una vez que el relave se descarga en el tranque de relaves, este comienza con su consolidación inicial, en la que el agua se evapora hasta que el relave alcanza una concentración de sólidos en un rango de 78-80% p/p, en la que no hay exudación y adquiere pendiente, simulando un suelo blando. Transcurrido un tiempo, se logra el límite de contracción, etapa en que se logra:

1. Alta succión capilar y tensión superficial.
2. La máxima densidad con una concentración de sólidos en un rango de 82-85% p/p, simulando un suelo denso y menos permeable.
3. Relaves homogéneos y auto soportados, no licuables ante eventos sísmicos severos.
4. Resistencia a la erosión eólica.

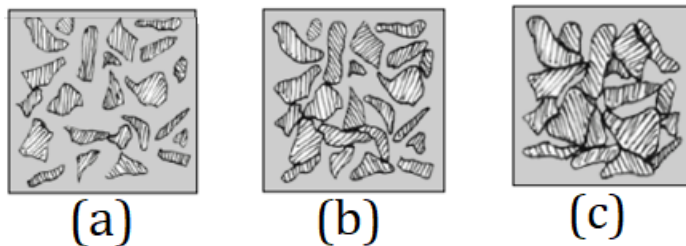


Figura 10.4. Representación de la consolidación y densificación del relave en pasta. Estructura del relave en (a) la descarga (b) consolidación inicial (c) límite de contracción (Minera Florida, 2023).

Es necesario recalcar que los relaves convencionales sometidos a condiciones idénticas de corriente de aire forzado (90 km/h) se erosionan sobre 60 veces más que los relaves en pasta (Minera Florida, 2023).

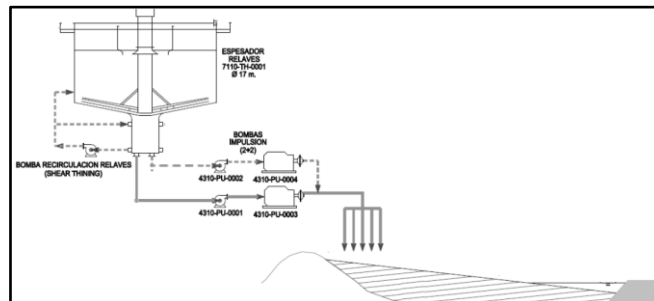


Figura 10.5. Descripción del sistema hidráulico de depositación de los relaves (Minera Florida, 2023).

En resumen, el flujo inferior del espesador considerando una tecnología TTD puede alcanzar concentraciones de sólidos superiores al 70% en peso, con lo que se consiguen atractivas tasas de recuperación de agua. Sin embargo, el transporte de estas pulpas puede resultar caro, teniendo en cuenta que los parámetros reológicos aumentan exponencialmente con la densidad de la pulpa (Leiva et al., 2021).

Anexo B. Composición mineralógica del material a procesar

La composición mineralógica del material a procesar se exhibe en la Tabla 10.1, 10.2, 10.3 y 10.4.

Composición mineralógica 100% base mineral							
Especies	Fórmula química	% en peso	Cu	Fe	S	Zn	Pb
Oro	Au°	Tz					
Electrum	Au/Ag	Tz					
Calcopirita	CuFeS ₂	0,34	0,12	0,1	0,12		
Calcosina	Cu ₂ S	Tz					
Covelina	CuS	Tz					
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	Tz					
Cobre	Cu°	Tz					
Galena	PbS	2,13			0,29		1,843
Blenda	ZnS	1,63			0,54	1,095	
Rutilo	TiO ₂	0,67					
Pirita	FeS ₂	1,43		0,67	0,76		
Hematita	Fe ₂ O ₃	2,29		1,6			
Magnetita	Fe ₂ O ₃	3,12		2,26			
Limonita	Fe ₂ O ₃ *nH ₂ O	1,03		0,65			
Ganga no metálica		87,37					
Total		100	0,12	5,27	1,7	1,095	1,843

Tabla 10.1. Composición mineralógica en base mineral de la alimentación a la planta de procesos de (Minera Florida, 2023).

1. COMPOSICION MINERALOGICA 100% BASE MINERAL				
Especies	% EN PESO	Cu	Fe	S
Calcopirita	0,54	0,19	0,16	0,19
Calcosina	tz			
Covelina	tz			
Bornita	tz			
Galena	tz			
Blenda	1,04			0,34
Rutilo	0,27			
Pirita	1,62		0,76	0,87
Hematita	2,65		1,85	
Magnetita	0,33		0,24	
Limonita	0,82		0,52	
Ganga	92,73			
TOTAL	100,00	0,19	3,53	1,40

Tabla 10.2. Composición mineralógica en base mineral de la alimentación a la planta de procesos de beta de Leopoldo en 2017 (Minera Florida, 2023).

1. COMPOSICION MINERALOGICA 100% BASE MINERAL				
Especies	% EN PESO	Cu	Fe	S
Calcopirita	0,25	0,09	0,08	0,09
Calcosina	tz			
Covelina	tz			
Galena	0,92			0,12
Blenda	2,22			0,73
Rutilo	0,25			
Pirita	2,16		1,01	1,15
Hematita	2,52		1,76	
Magnetita	0,31		0,23	
Limonita	0,26		0,16	
Ganga	91,09			
TOTAL	100,00	0,09	3,24	2,10

Tabla 10.3. Composición mineralógica en base mineral de la alimentación a la planta de procesos de beta La Patagua en 2017 (Minera Florida, 2023).

1. COMPOSICION MINERALOGICA 100% BASE MINERAL				
Especies	% EN PESO	Cu	Fe	S
Calcopirita	0,27	0,09	0,08	0,09
Calcosina	tz			
Covelina	tz			
Bornita	tz			
Galena	1,45			0,19
Blenda	2,85			0,94
Rutilo	0,53			
Pirita	1,94		0,91	1,04
Hematita	0,33		0,23	
Magnetita	0,66		0,48	
Ganga	91,96			
TOTAL	100,00	0,09	1,70	2,26

Tabla 10.4. Composición mineralógica en base mineral de la alimentación a la planta de procesos de beta Stock en 2017 (Minera Florida, 2023).

Anexo C. Composición elemental del relave a procesar

La elección entre caracterización en área seca y área húmeda depende de las condiciones específicas de la operación minera y el propósito del análisis. En muchas etapas de la minería, se emplea la caracterización en área húmeda, ya que permite obtener datos más representativos de las condiciones de procesamiento. Sin embargo, en la etapa de exploración y en situaciones donde el material se encuentra en estado seco, la caracterización en área seca puede ser más adecuada.

Identificación		Au	Ag	Pb	Zn
Florida	Geomet	(gr/ton)	(gr/ton)	(%)	(%)
Don Leopoldo	MFS-1	3,02	10,67	0,06	0,29
La Patagua	MFS-2	3,86	8,76	0,31	1,35
Stock	MFS-3	1,98	66,25	0,54	1,40

Tabla 10.5. Caracterización química área seca en 2017 (Minera Florida, 2023).

ID Muestra Geomet	N° Set Área Hú.	ID Muestra Florida	Au (g/t)	Ag (g/t)	Pb (%)	Zn (%)
MFH-1	1	Don Leopoldo	3,30	24,87	0,05	0,31
MFH-2		Don Leopoldo	6,63	14,78	0,11	0,61
MFH-3		Don Leopoldo	4,15	8,42	0,27	2,40
MFH-4	2	Las Pataguas	10,60	27,28	0,16	0,78
MFH-5		Las Pataguas	7,48	64,15	0,52	2,41
MFH-6	3	CT-13 Agosto 16	3,70	19,48	0,53	1,49
MFH-7	4	CT-13 Sep. 16	3,34	19,73	0,39	1,24

Tabla 10.6. Caracterización química área húmeda en 2017 (Minera Florida, 2023).

Elemento	Unidad	Don Leopoldo			La Patagua		CT-13 Ago-Sep.	
		MFH-1	MFH-2	MFH-3	MFH-4	MFH-5	MFH-6	MFH-7
Fe	%	4,07	6,10	4,93	3,25	2,29	3,90	4,24
Al	%	2,73	2,79	1,86	3,31	2,30	5,49	4,85
Ca	%	2,48	5,46	3,19	5,27	3,92	2,38	2,44
K	%	1,81	1,10	0,69	1,40	0,83	3,20	2,89
S	%	0,76	1,55	2,35	0,90	1,81	1,38	1,46
Mg	%	0,52	0,49	0,27	0,54	0,29	1,07	1,08
Zn	%	0,33	0,60	2,63	0,73	2,51	1,53	1,18
Mn	%	0,25	0,46	0,25	0,45	0,31	0,44	0,50
Ti	%	0,13	0,13	0,06	0,17	0,08	0,26	0,23
Cu	%	0,07	0,06	0,05	0,07	0,06	0,07	0,10
Na	%	0,07	0,09	0,07	0,35	0,26	0,88	0,66
Pb	%	0,05	0,12	0,28	0,17	0,60	0,69	0,47
Ba	ppm	380,0	240,0	110,0	370,0	240,0	660,0	520,0
P	ppm	300,0	330,0	140,0	410,0	180,0	570,0	520,0

Rb	ppm	81,8	49,3	50,3	51,8	33,4	117,0	117,5
Sr	ppm	69,8	117,5	25,4	116,0	108,5	180,0	164,5
Cr	ppm	69,0	59,0	50,0	51,0	50,0	37,0	40,0
As	ppm	62,3	138,5	72,5	60,6	23,5	28,6	30,9
V	ppm	60,0	58,0	30,0	60,0	39,0	91,0	85,0
Li	ppm	41,9	39,1	39,6	36,2	35,6	22,4	24,1
Ni	ppm	35,1	32,4	28,2	31,5	32,3	29,2	35,0
Zr	ppm	28,8	20,9	14,8	28,5	21,0	45,7	38,7
Co	ppm	16,8	9,9	20,4	7,4	5,4	10,7	16,1
W	ppm	15,1	8,6	5,9	3,2	1,6	5,2	11,0
Sb	ppm	13,9	15,8	15,2	10,3	13,9	7,0	7,1
Ag	ppm	13,7	14,8	9,7	6,4	7,5	9,4	14,8
Cd	ppm	12,9	25,0	96,2	23,0	107,0	73,8	56,5
Ce	ppm	12,0	11,5	8,5	20,7	11,7	29,6	25,4
Ga	ppm	9,1	13,4	9,0	11,4	12,8	14,0	13,5
Y	ppm	7,0	6,6	5,0	11,8	7,6	13,9	12,2
Sc	ppm	6,5	5,3	2,7	6,6	3,9	10,7	11,3
Mo	ppm	5,5	6,0	5,2	3,5	3,2	2,9	2,8
La	ppm	5,1	5,0	3,9	9,0	5,0	13,2	11,1
Cs	ppm	2,3	1,1	2,3	1,5	0,8	2,9	3,4
Sn	ppm	1,9	0,9	1,3	0,9	0,8	1,5	1,4
Th	ppm	1,8	1,4	1,4	2,4	1,6	4,9	3,7
Nb	ppm	1,5	1,3	0,9	2,2	1,2	3,4	2,7
Be	ppm	1,1	1,3	1,3	1,0	0,7	1,3	1,4
Se	ppm	1,0	2,0	4,0	1,0	4,0	2,0	3,0
Bi	ppm	0,8	1,0	1,3	0,3	1,0	0,6	0,8
Hf	ppm	0,8	0,7	0,5	0,8	0,6	1,4	1,1
Tl	ppm	0,7	0,4	0,4	0,3	0,3	0,9	0,9
U	ppm	0,5	0,5	0,4	0,8	0,5	1,2	1,0
Ta	ppm	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,2
Ge	ppm	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Te	ppm	0,1	0,1	0,4	0,1	0,1	<0.05	0,1
In	ppm	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
Re	ppm	0,0	0,0	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002

Tabla 10.7. Caracterización química de cabeza área húmeda en 2017 (Minera Florida, 2023).

Anexo D. Granulometría del relave en pasta

Cabe destacar que el origen de toda la información expuesta en esta subsección se basa en documentos internos de Minera Florida.

Spigot 3/1		Peso Tamizado		253		
Muro		Superficial (Entre 20 cm)		Zona cercana a Muro		
P.Húmedo	0,77	P.Seco	0,59	Húmedad	22,95	
Muestra :						
Malla	Abertura, μm	P 80	Peso, g	Retenido, %		Pasante
				Parcial	Acumulado	
70	212	0	0,9	0,4	0,4	99,6
100	150	0	5,8	2,3	2,6	97,4
150	106	81	17,3	6,8	9,5	90,5
200	75	0	33,9	13,4	22,9	77,1
270	53	0	30,6	12,1	35,0	65,0
400	38	0	24,6	9,7	44,7	55,3
-400	38	0	139,9	55,3	100,0	0,0
Total			253			
D ₈₀ , μm						81
% -200 #Ty						65,0

Spigot 3/2		Peso Tamizado		256		
Muro		Superficial (Entre 40 cm)		Zona cercana a Muro		
P.Húmedo	0,95	P.Seco	0,73	Húmedad	22,66	
Muestra :						
Malla	Abertura, μm	P 80	Peso, g	Retenido, %		Pasante
				Parcial	Acumulado	
70	212	0	0,7	0,3	0,3	99,7
100	150	0	5,6	2,2	2,5	97,5
150	106	82	17,4	6,8	9,3	90,7
200	75	0	35,5	13,9	23,1	76,9
270	53	0	40,7	15,9	39,0	61,0
400	38	0	17,6	6,9	45,9	54,1
-400	38	0	138,5	54,1	100,0	0,0
Total			256			
D ₈₀ , μm						82
% -200 #Ty						61,0

Figura 10.6. Granulometrías del relave en pasta del spigot 3/1 y 3/2 realizadas el 30 del septiembre de 2020 (Minera Florida, 2023).

Spigot 3/3		Peso Tamizado		280		
Muro		Superficial (Entre 20 cm)		Zona cercana a descarga Spigot		
P.Húmedo	0,788	P.Seco	0,606	Húmedad	23,10	
Muestra :						
Malla	Abertura, μm	P 80	Peso, g	Retenido, %		Pasante
				Parcial	Acumulado	
70	212	0	1,2	0,4	0,4	99,6
100	150	0	7,1	2,5	3,0	97,0
150	106	84	20,1	7,2	10,1	89,9
200	75	0	40,1	14,3	24,5	75,5
270	53	0	58,0	20,7	45,2	54,8
400	38	0	14,0	5,0	50,2	49,8
-400	38	0	139,5	49,8	100,0	0,0
Total			280			
D ₈₀ , μm						84
% -200 #Ty						54,8

Figura 10.7. Granulometría del relave en pasta del spigot 3/3 realizada el 30 del septiembre de 2020 (Minera Florida, 2023).

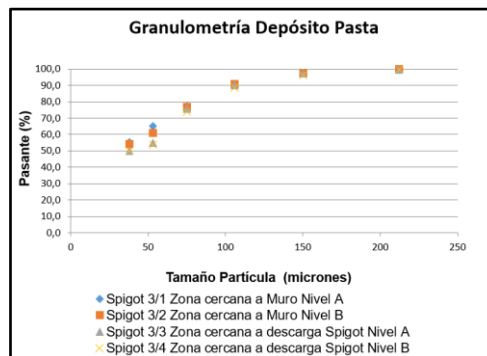


Figura 10.8. Gráfico de las granulometrías del relave en pasta del spigot 3/1, 3/2, 3/3 y 3/4 realizadas el 30 de septiembre de 2020 (Minera Florida, 2023).

Spigot 5/1		Peso Tamizado		257					
Nivel A		Superficial (Entre 20 cm)							
Descarga		Zona cercana a descarga Spigot							
P.Húmedo		0,774		P.Seco 0,608		Húmedad		21,45	
Muestra :									
Malla	Abertura μm	P 80 μm	Peso, g	Retenido, %		Pasante			
				Parcial	Acumulado		%		
70	212	0	1,3	0,0	0,0	100,0			
100	150	112	7,3	6,3	6,3	93,7			
150	106	0	18,5	15,9	22,2	77,8			
200	75	0	34,6	29,8	52,0	48,0			
270	53	0	27,4	23,6	75,6	24,4			
400	38	0	27,1	23,3	98,9	1,1			
-400	38	0		0,0	98,9	1,1			
		0		0,0	98,9	1,1			
		0		0,0	98,9	1,1			
Total			116,2						
D ₉₀ , μm						112			
% -200 #Ty						24,4			

Spigot 5/2		Peso Tamizado		270					
Nivel B		Superficial (Entre 40 cm)							
Descarga		Zona cercana a descarga Spigot							
P.Húmedo		1,208		P.Seco 0,944		Húmedad		21,85	
Muestra :									
Malla	Abertura μm	P 80 μm	Peso, g	Retenido, %		Pasante			
				Parcial	Acumulado		%		
70	212	0	2,1	0,0	0,0	100,0			
100	150	114	9,6	7,0	7,0	93,0			
150	106	0	22,0	16,1	23,1	76,9			
200	75	0	38,8	28,3	51,4	48,6			
270	53	0	37,1	27,1	78,5	21,5			
400	38	0	27,3	19,9	98,5	1,5			
-400	38	0		0,0	98,5	1,5			
		0		0,0	98,5	1,5			
		0		0,0	98,5	1,5			
Total			136,9						
D ₉₀ , μm						114			
% -200 #Ty						21,5			

Figura 10.9. Granulometrías del relave en pasta del spigot 5/1 y 5/2 realizadas el 28 de agosto de 2020 (Minera Florida, 2023).

Spigot 5/3		Peso Tamizado		255					
Nivel A		Superficial (Entre 20 cm)							
Descarga		Zona cercana a descarga Spigot							
P.Húmedo		0,857		P.Seco 0,671		Húmedad		21,70	
Muestra :									
Malla	Abertura μm	P 80 μm	Peso, g	Retenido, %		Pasante			
				Parcial	Acumulado		%		
70	212	0	2,2	0,0	0,0	100,0			
100	150	118	8,3	7,4	7,4	92,6			
150	106	0	19,7	17,6	25,0	75,0			
200	75	0	31,8	28,4	53,5	46,5			
270	53	0	23,9	21,4	74,9	25,1			
400	38	0	25,9	23,2	98,0	2,0			
-400	38	0		0,0	98,0	2,0			
		0		0,0	98,0	2,0			
		0		0,0	98,0	2,0			
Total			111,8						
D ₉₀ , μm						118			
% -200 #Ty						25,1			

Spigot 5/4		Peso Tamizado		264					
Nivel B		Superficial (Entre 40 cm)							
Descarga		Zona cercana a descarga Spigot							
P.Húmedo		1,089		P.Seco 0,85		Húmedad		21,95	
Muestra :									
Malla	Abertura μm	P 80 μm	Peso, g	Retenido, %		Pasante			
				Parcial	Acumulado		%		
70	212	0	3	0,0	0,0	100,0			
100	150	117	9,6	8,0	8,0	92,0			
150	106	0	19,7	16,4	24,4	75,6			
200	75	0	35,6	29,6	53,9	46,1			
270	53	0	27,0	22,4	76,4	23,6			
400	38	0	25,4	21,1	97,5	2,5			
-400	38	0		0,0	97,5	2,5			
		0		0,0	97,5	2,5			
		0		0,0	97,5	2,5			
Total			120,3						
D ₉₀ , μm						117			
% -200 #Ty						23,6			

Figura 10.10. Granulometrías del relave en pasta del spigot 5/3 y 5/4 realizadas el 28 de agosto de 2020 (Minera Florida, 2023).

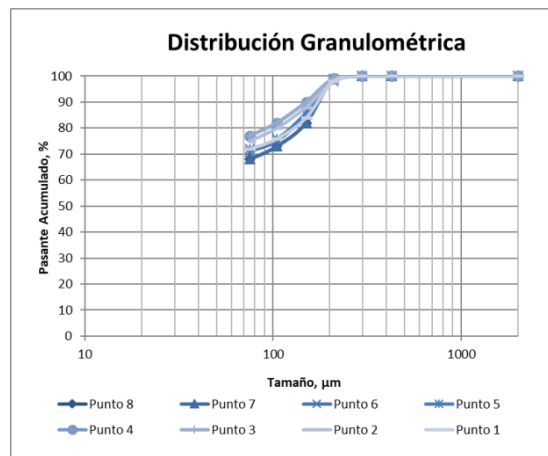


Figura 10.11. Granulometría del relave en pasta en 8 puntos distintos del tranque realizada en el año 2020 (Minera Florida, 2023).

Anexo E. Dosis de coagulante SNF

Se tiene que la densidad del coagulante SNF es de 1,13. Además, en promedio, se agregan 60 [mL coagulante puro/min] al relave del proceso. Considerando una densidad promedio del agua de 0,998 [g/mL], entonces la densidad del coagulante está representada por la ecuación (10.1):

$$\rho_{coagulante} = 1,13 \cdot 0,998 \left[\frac{g}{mL} \right] \approx 1,12 \left[\frac{g}{mL} \right] \quad (10.1)$$

Por lo que la masa de coagulante que se agrega por minuto al proceso está representada por la expresión (10.2):

$$60 \left[\frac{mL}{min} \right] \cdot 1,12 \left[\frac{g}{mL} \right] \approx 67,66 \left[\frac{g}{min} \right] \quad (10.2)$$

En la subsección 3.1 se esclarece que el flujo másico a promediar en promedio es de 114 [TMS/h], que es equivalente a 1,9 [TMS/min].

Finalmente se calcula la dosis de coagulante mediante la ecuación (10.3):

$$Dosis\ coagulante = \frac{67,66 \left[\frac{g}{min} \right]}{1,9 \left[\frac{TMS}{min} \right]} \approx 35,6 \left[\frac{g}{TMS} \right] \quad (10.3)$$

Considerando que la dosis de floculante MFL es de 22 [g/TMS] en promedio, entonces la dosis de coagulante respecto de la dosis de floculante se representa por la expresión (10.4):

$$\frac{35,6 \left[\frac{g}{TMS} \right]}{22 \left[\frac{g}{TMS} \right]} \approx 162\% \quad (10.4)$$

Cabe destacar que las pruebas se realizaron a 166% porque el promedio del flujo másico a la fecha de septiembre correspondía a 111 [TMS/h].

Anexo F. Totalidad de los productos químicos a ensayar

Nomenclatura del Modificador Reológico	Orgánico / Inorgánico	Aspecto físico
MRinorg	Inorgánico	Líquido
MRorg1	Orgánico	Líquido
MRorg2	Orgánico	Líquido
MRorg3	Orgánico	Líquido

Tabla 10.8. Caracterización de los modificadores reológicos a ensayar en base a su naturaleza química y aspecto físico.

Nomenclatura	Peso molecular relativo	Carga relativa	Aspecto físico	Química	Estructura
00FM	Medio	No iónico	Polvo	Homopolímero de acrilamida	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n$
10FM	Medio	Aniónico 10%	Polvo	Terpolímero de acrilamida con acrilato y urea (2,5%) como aditivo	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{NH}-\text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_o \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_m$
30FM	Medio	Aniónico 30%	Polvo	Copolímero de acrilamida con acrilato	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_m$
40FA	Alto	Aniónico 40%	Polvo	Copolímero de acrilamida con acrilato	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_m$
00FB	Bajo	No iónico	Emulsión	Copolímero de acrilamida con cadena de 13 carbonos ramificado y etoxilado (2,5-10%)	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} (\text{CH}_2)_{13} \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_m \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_o$
20FmA	Muy alto	Aniónico 20%	Emulsión	Terpolímero de acrilamida con cadenas etoxiladas de 10-16 carbonos y acrilato	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_m \left[\begin{array}{c} (\text{CH}_2)_{10-16} \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_o$
30FmA	Muy alto	Aniónico 30%	Emulsión	Terpolímero de acrilamida con cadenas etoxiladas de 10-16 carbonos y acrilato	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array} \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\ \\ \text{C}=\text{O} \\ \\ \text{O}^- \end{array} \right]_m \left[\begin{array}{c} (\text{CH}_2)_{10-16} \\ \\ \text{O} \end{array} \right]_o$

Tabla 10.9. Caracterización de los floculantes ensayados en función de su naturaleza química y su aspecto físico.

Anexo G. Materiales y métodos

Los procedimientos que se detallan a continuación consisten principalmente en pruebas de laboratorio, por lo que para estas actividades siempre se deben utilizar los siguientes Elementos de Protección Personal (EPP):

1. Zapatos de seguridad.
2. Bata de laboratorio.
3. Lentes de seguridad transparentes.
4. Guantes de nitrilo.

Adicionalmente, existe el procedimiento de trabajo para ir a buscar muestra de relave a la PTR. En este caso se deben utilizar los siguientes EPPs:

1. Casco de seguridad.
2. Lentes de seguridad.
3. Guantes de cabretilla.
4. Zapatos de seguridad.
5. Chaleco de geólogo.
6. Semi máscara de gases Dräger.

Anexo G.1. Densidad del agua

Se extrajeron los datos de la densidad del agua saturada desde 0 a 30°C del Cengel, los que se exponen en la Tabla 10.10.

Densidad del agua $\left[\frac{g}{L}\right]$	Temperatura [°C]
999,8	0,01
999,9	5
999,7	10
999,1	15
998	20
997	25
996	30

Tabla 10.10. Datos de la densidad del agua en función de la temperatura (Cengel, 2007).

Para obtener una ecuación continua que represente la densidad del agua, se agrupan los datos de manera de obtener una ecuación de tendencia que se ajuste al grupo de datos. Para maximizar el coeficiente de determinación (R^2), los datos se ordenan en dos grupos, los que se exhiben en la Figura 10.12 y 10.13

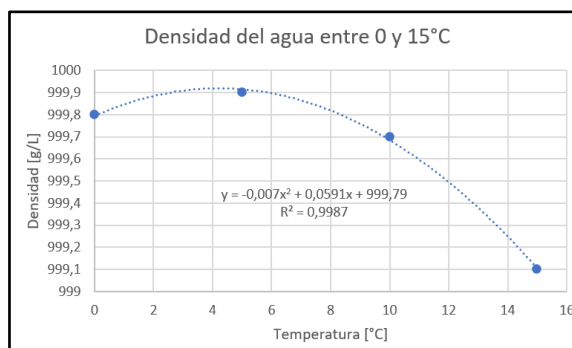


Figura 10.12. Gráfico de la densidad del agua en función de la temperatura entre los 0 y 15°C con su respectiva ecuación de tendencia.

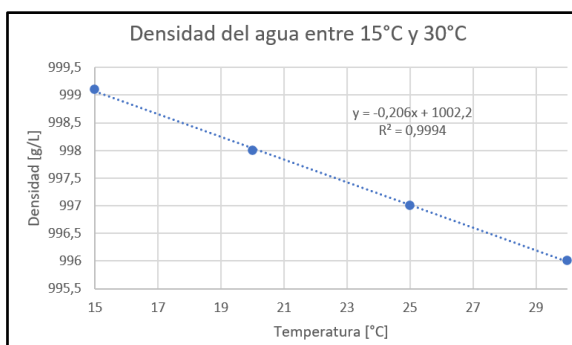


Figura 10.13. Gráfico de la densidad del agua en función de la temperatura entre los 15 y 30°C con su respectiva ecuación de tendencia.

En consecuencia, la ecuación (10.5) representa la densidad del agua en función de la temperatura entre los 0 y 30°C.

$$\rho_{H_2O}(T) \left[\frac{g}{L} \right] = \begin{cases} -0,007 \cdot T^2 + 0,0591 \cdot T + 999,79 & \text{si } T \in [0 - 15^\circ C] \\ -0,206 \cdot T + 1002,2 & \text{si } T \in [15 - 30^\circ C] \end{cases} \quad (10.5)$$

Anexo G.2. Preparación de solución madre y de trabajo de polímeros en forma de polvo

Reactivos

1. Agua de preparación del polímero.
2. Polímero en forma de polvo.

Materiales

1. Toalla nova.
2. Piceta.
3. 2 botellas plásticas de 300 [mL].
4. 1 vaso precipitado de 250 [mL].
5. 1 vaso precipitado de 100 [mL].
6. 1 probeta de 250 [mL].
7. 1 jeringa de 20 [mL].
8. Tineta de desechos de 20 [L].

Equipamiento

1. Balanza digital de sobremesa de 1200 [g] x 0,01 [g].
2. Agitador magnético.
3. Barra magnética.

Método

Es necesario recalcar que los polvos tienen un contenido activo equivalente al 100%.

Previo a la experimentación, se calcula la masa de polímero en polvo y el volumen de agua de preparación de polímero al que se le añadirá dicha cantidad de polvo en base a la ecuación (10.11).

El día de la experimentación, se limpia, enjuaga y seca una botella plástica de 300 [mL], una probeta graduada 250 [mL], un vaso precipitado de 100 y 250 [mL]. Luego, se añade el volumen necesario de agua a la probeta graduada con la ayuda de la piceta para luego depositarlo en el vaso precipitado de 250 [mL]. Paralelamente se tara el vaso de 100 [mL] en la balanza digital de sobremesa, para posteriormente agregar la masa de polímero en polvo calculada con una precisión de 10 [mg]. Luego, en caso de que se trabaje con agitador magnético, se ubica la barra magnética al interior del vaso precipitado de 250 [mL] para situarlo en el agitador magnético, el que se ajusta a una velocidad de 700 [rpm], seguidamente se transfiere lentamente el polvo al vórtice del vaso precipitado y se deja agitar por un minuto, de lo contrario, se ubica en un agitador mecánico a la misma velocidad. Cumplido el tiempo se reduce la velocidad a 300 [rpm] y se dejar agitar hasta observar una solución homogénea. Una vez homogenizada la solución, se transfiere la solución a la botella plástica de 300 [mL]. Cabe mencionar que la solución madre se prepara a una concentración másica del 1%.



Figura 10.14. Preparación de la solución madre.

Para la preparación de la solución de trabajo, previo a la experimentación se determina el volumen de solución de polímero de trabajo necesario para realizar las pruebas deseadas y se calcula la dilución de trabajo que se requiere en base a las ecuaciones (10.15) y (10.17).

Al momento de la experimentación, se limpia, enjuaga y seca una botella plástica de 300 [mL], una jeringa de 20 [mL], un vaso precipitado y una probeta graduada de 250 [mL],

luego se transfiere el volumen de agua de preparación de polímero con la probeta graduada al vaso precipitado. Posteriormente, en caso de que se trabaje con agitador magnético, se ubica la barra magnética al interior del vaso precipitado y este sobre el agitador magnético, él que se ajusta a una velocidad de 300 [rpm], de lo contrario se ubica en un agitador mecánico a la misma velocidad. Después, con una jeringa limpia y seca se extrae el volumen calculado de la solución madre y se transfiere al vórtice del vaso precipitado para dejar agitando la solución durante 5 minutos. Una vez transcurrido el tiempo, se transfiere la solución a una botella plástica limpia y seca de 300 [mL]. Cabe mencionar que la solución de trabajo se prepara a una concentración másica del 0,1%.

Finalmente, una vez vencida la solución madre o utilizada la solución de trabajo, se arrojan a la tineta de desechos de 20 [L] que luego es depositada en pequeños depósitos ubicados en la planta de procesos que son bombeados directamente al tranque de relaves en pasta.

Memoria de cálculo

En primer lugar, hay que determinar el volumen de agua y la masa de polímero en polvo a agregar en esta. Para esto, lo primero que hay que calcular sería la masa de agua presente, ya que todas las proporciones serán en porcentaje en masa a menos que se indique lo contrario. La masa de agua se calcula con la ecuación (10.6).

$$m_{H_2O}[g] = \rho_{H_2O} \left[\frac{g}{L} \right] \cdot V_{H_2O}[mL] \cdot \frac{1 [L]}{1000 [mL]} \quad (10.6)$$

Donde:

- m_{H_2O} es la masa de agua.
- ρ_{H_2O} es la densidad del agua.
- V_{H_2O} es el volumen del agua.

Se tiene que la ecuación general de la masa real del polímero está dada por la expresión (10.7).

$$m_{polímero} = m_{polímero,físico} \cdot \frac{C_{Ac}[\%]}{100} \quad (10.7)$$

Donde:

- $m_{polímero}$ es la masa real de polímero.
- $m_{polímero,físico}$ es la masa del polímero en su estado físico real, ya sea polvo o emulsión.
- C_{Ac} es la concentración activa del polímero.

La ecuación (10.8) representa la concentración masa/masa del polímero.

$$\frac{m_{polímero}}{m_{total}} = \frac{m_{polímero}}{m_{polímero} + m_{H_2O}} = \frac{C[\%]}{100} \quad (10.8)$$

De esta forma, despejando la masa del polímero, por álgebra se obtiene la ecuación (10.9).

$$m_{polimero} = \frac{m_{H_2O} \cdot \frac{C[\%]}{100}}{\left(1 - \frac{C[\%]}{100}\right)} \quad (10.9)$$

Reemplazando la ecuación (10.7) en (10.9), se llega a la expresión (10.10), que representa la ecuación general para calcular la cantidad de polímero físico a añadir al volumen/masa de agua determinada previamente.

$$m_{polimero,fisico} = \frac{m_{H_2O} \cdot \frac{C[\%]}{100}}{\left(1 - \frac{C[\%]}{100}\right)} \cdot \frac{1}{\frac{C_{Ac}[\%]}{100}} \quad (10.10)$$

En el caso de los polvos, se tiene un contenido activo del polímero del 100%, es decir, $C_{Ac}[\%] = 100\%$. Por lo que la fórmula que representa la cantidad de polímero en polvo a añadir a una cantidad de masa determinada de agua definida previamente, para la preparación de la solución madre ($C_M = 1\%$), se indica en la ecuación (10.11).

$$m_{polimero,polvo} = \frac{0,001 \cdot m_{H_2O}}{0,999} \quad (10.11)$$

Por ejemplo, si se decide preparar una solución madre para el polímero 10FM (polvo) en 100 [mL] de agua, ¿cuánta masa de polvo se requiere agregar a dicha cantidad de agua?

Para esto, se debe determinar la densidad del agua a la temperatura ambiente, por lo que se utiliza la ecuación (10.5). Suponiendo que hay una temperatura de 20°C, entonces la densidad del agua será de:

$$\rho_{H_2O}(20^\circ C) \left[\frac{g}{L}\right] = -0,206 \cdot 20 + 1002,2 = 998,08 \left[\frac{g}{L}\right] \quad (10.12)$$

Así, según la ecuación (10.6), la masa de agua equivale a:

$$m_{H_2O} = 998,08 \left[\frac{g}{L}\right] \cdot 100[mL] \cdot \frac{1[L]}{1000[mL]} = 99,808[g] \quad (10.13)$$

Por lo que la cantidad de polvo a añadir estaría dada por la expresión (10.14):

$$m_{polimero,polvo} = \frac{0,001 \cdot 99,808}{0,999} = 1,008 [g] \quad (10.14)$$

Ahora, para obtener la solución de trabajo, se debe diluir la solución madre en una razón de 1:10, para lograr la concentración en masa de 0,1%. Para esto se utiliza la ecuación (10.15).

$$C_M \cdot V_{add,M-W} = C_W \cdot V_W \quad (10.15)$$

Donde:

- C_M es la concentración de la solución madre.
- $V_{add,M-W}$ es el volumen a añadir de la solución madre a la solución de trabajo.
- C_W es la concentración de la solución de trabajo.
- V_W es el volumen que utiliza la solución de trabajo.

En donde se debe definir previamente V_W , es decir, el volumen de agua de la solución de trabajo. Suponiendo que se define el volumen de la solución de trabajo en 100 [mL], entonces numéricamente, se tiene que:

$$V_{add,M-W} = \frac{0,1\%}{1\%} \cdot 100[mL] = 10[mL] \quad (10.16)$$

En consecuencia, la cantidad de agua a añadir está dada por la ecuación (10.17):

$$V_{H_2O,W} = V_W - V_{add,M-W} \quad (10.17)$$

Donde $V_{H_2O,W}$ corresponde al volumen de agua a añadir a la solución de trabajo.

Reemplazando numéricamente se tiene que la cantidad de agua a añadir a la solución de trabajo, según la expresión (10.18), es de 90 [mL].

$$V_{H_2O,W} = 100[mL] - 10[mL] = 90[mL] \quad (10.18)$$

Anexo G.3. Preparación de solución madre y de trabajo de polímeros en forma de líquido o emulsión

Reactivos

1. Agua de preparación del polímero.
2. Polímero en forma de líquido o emulsión.

Materiales

1. Toalla nova.
2. Piceta.
3. 2 botellas plásticas de 300 [mL].
4. 1 vaso precipitado de 250 [mL].
5. 1 vaso precipitado de 100 [mL].
6. 1 probeta de 250 [mL].
7. 1 jeringa de 1 o 3 [mL].
8. 1 jeringa de 20 [mL].
9. Tineta de desechos de 20 [L].

Equipamiento

1. Balanza digital de sobremesa de 1200 [g] x 0,01 [g].
2. Agitador magnético.
3. Barra magnética.

Método

Es necesario recalcar que los floculantes ensayados en emulsión tienen un contenido activo del 35%, los modificadores reológicos inorgánicos un 50% y los orgánicos un 100%.

Previo a la experimentación, se calcula el volumen de polímero en emulsión y de agua de preparación de polímero al que se le añadirá dicha cantidad de emulsión.

El día de la experimentación, se limpia, enjuaga y seca una botella plástica de 300 [mL], una jeringa de 1 o 3 [mL] una probeta graduada 250 [mL], un vaso precipitado de 100 y 250 [mL]. Luego, se añade el volumen necesario de agua a la probeta graduada con la ayuda de la piceta para luego depositarlo en el vaso precipitado de 250 [mL].

Posteriormente, al mismo vaso precipitado, se le introduce la barra magnética para situarlo en el agitador magnético a una velocidad de 700 [rpm]. Paralelamente se extrae el volumen calculado de polímero en emulsión en una jeringa limpia y seca de 1 o 3 [mL] para transferir lentamente el contenido de esta al vórtice del vaso precipitado y se deja agitar por un minuto. Cumplido el tiempo se reduce la velocidad a 300 [rpm] y se deja agitar hasta observar una solución homogénea. Una vez homogenizada la solución, se transfiere la solución a la botella plástica de 300 [mL]. Cabe mencionar que la solución madre se prepara a una concentración másica del 1%.

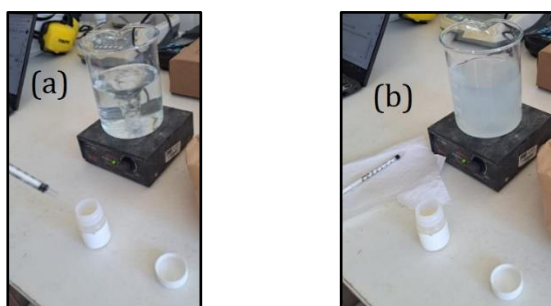


Figura 10.15. Preparación de una solución madre de un polímero en emulsión. (a) antes de agregar el polímero al vórtice del vaso precipitado. (b) después de agregar el polímero en emulsión.

Para la preparación de la solución de trabajo, previo a la experimentación se determina el volumen de solución de polímero de trabajo necesario para realizar las pruebas deseadas y se calcula la dilución de trabajo que se requiere.

Al momento de la experimentación, se limpia, enjuaga y seca una botella plástica de 300 [mL], una jeringa de 20 [mL], un vaso precipitado y una probeta graduada de 250 [mL], luego se transfiere el volumen de agua de preparación de polímero con la probeta graduada al vaso precipitado. Posteriormente se ubica la barra magnética al interior del vaso precipitado y este sobre el agitador magnético, él que se ajusta a una velocidad de 300 [rpm]. Después, con una jeringa limpia y seca de 20 [mL] se extrae el volumen calculado de la solución madre y se transfiere al vórtice del vaso precipitado para dejar agitando la solución durante 5 minutos. Una vez transcurrido el tiempo, se transfiere la solución a una botella plástica limpia y seca de 300 [mL]. Cabe mencionar que la solución de trabajo se prepara a una concentración másica del 0,1%.

Finalmente, una vez vencida la solución madre o utilizada la solución de trabajo, se arrojan a la tineta de desechos de 20 [L] que luego es depositada en pequeños depósitos ubicados en la planta de procesos que son bombeados directamente al tranque de relaves en pasta.

Memoria de cálculo

Para calcular la masa del polímero en emulsión a añadir a una cantidad de agua predefinida para la preparación de la solución madre, se debe usar la ecuación general

(10.10). Por ejemplo, se considera que se debe preparar una solución madre del modificador reológico inorgánico, en este caso, considerando las mismas condiciones utilizadas en las ecuaciones (10.12) y (10.13), entonces la masa de emulsión que se debe añadir está representada por la ecuación (10.19).

$$m_{polímero,emulsión} = \frac{99,808[g] \cdot \frac{1\%}{100}}{\left(1 - \frac{1\%}{100}\right)} \cdot \frac{1}{\frac{50\%}{100}} = 2,02 [g] \quad (10.19)$$

Como el contenido se trata de una emulsión, hay que utilizar su densidad específica para calcular el volumen de emulsión a agregar:

$$\rho_{polymer} = SG_{polymer} \cdot \rho_{H_2O} \quad (10.20)$$

Donde:

- $\rho_{polymer}$ es la densidad del polímero.
- $SG_{polymer}$ es la gravedad específica del polímero.

Reemplazando valores se tiene que:

$$\rho_{polymer} = 1,34 \cdot 998,08 \left[\frac{g}{L}\right] = 1337 \left[\frac{g}{L}\right] \quad (10.21)$$

Calculando el volumen:

$$V_{add} = \frac{m}{\rho} = \frac{2,02 [g]}{1337 \left[\frac{g}{L}\right]} \cdot \frac{1000 [mL]}{1[L]} = 1,51 [mL] \quad (10.22)$$

Luego, para preparar la solución de trabajo se debe establecer el volumen de la solución de trabajo. En este caso, se considerará de 100 [mL]. Utilizando la ecuación (10.15) se calcula el volumen que hay que añadir de la solución madre a la de trabajo:

$$V_{add,M-W} \frac{0,1\% \cdot 100 [mL]}{1\%} = 10[mL] \quad (10.23)$$

En consecuencia, el volumen de agua a añadir para formar la solución de trabajo está dada por la ecuación (10.24):

$$V_{H_2O,W} = 100[mL] - 10[mL] = 90[mL] \quad (10.24)$$

Anexo G.4. Toma de muestra

Materiales

1. 2 tinetas de 20 [L].
2. Cortador de muestra metálico.

Para tomar muestra se debe llevar las dos tinetas y el cortador de muestra metálico para poder recoger la muestra de relave. Antes de salir del laboratorio se debe pedir permiso al encargado de la PTR para ingresar a la zona de la extracción de la muestra. Una vez llegado al lugar se procede a llenar el cortador de muestra metálico con relave para depositar su contenido en la tineta hasta llenar cada una con 13 litros de muestra. Una vez alcanzado el volumen necesario en cada tineta, se dirige nuevamente al laboratorio.



Figura 10.16. Lugar donde se toma la muestra. Cortador de muestra metálico.

Anexo G.5. Dilución de la muestra

Reactivos

1. Muestra de relave sin coagulante ni floculante.
2. Agua de proceso.

Materiales

1. Toalla nova.
2. Regla metálica de 30 [cm].
3. Probetas graduadas de 1000 [mL].
4. 2 tinetas de 20 [L] para almacenar muestra de relave.
5. Tineta de desechos de 20 [L].
6. Jarro plástico de 1,4 [L].
7. Tubo de PVC de 1 metro de longitud.
8. Cuaderno de registro y lápiz.

Equipamiento

1. Balanza digital de sobremesa de 1200 [g] x 0,01 [g].

Método

Antes de realizar la prueba de sedimentación, la concentración de sólidos se ajustará a un 30%, es decir, a un $C_p=30\%$ por dos razones:

- Para mantener esta variable inalterable y poder discutir en base a una menor cantidad de variables.
- A dicha concentración es posible ver diferencias entre la aplicación de los productos químicos, para mantenerla inalterable y poder discutir en base a una menor cantidad de variables.

Cabe mencionar que la muestra siempre cumplía que $C_p>30\%$, por lo que siempre hay que diluir la muestra. La dilución se realiza con agua de proceso, que corresponde al agua que utilizan en la planta de procesos.

Es necesario recalcar que la dilución se realiza con agua de proceso, que corresponde al agua que utilizan en la planta de procesos para la producción de oro y plata. El

porcentaje de sólidos o compactación de la pulpa se calcula en base a la ecuación (10.25):

$$C_p[\%] = \frac{\rho_s \cdot (\rho_{H_2O} \cdot V_p - m_p)}{m_p \cdot (\rho_{H_2O} - \rho_s)} \times 100\% \quad (10.25)$$

Donde:

- C_p es la concentración másica del sólido en la muestra de pulpa o relave.
- ρ_s es la densidad del sólido.
- ρ_{H_2O} es la densidad del agua.
- V_p es el volumen de la pulpa a masar.
- m_p es la masa de la pulpa contenida en V_p .

Previo a la dilución, se debe ir a buscar la muestra de relave a la planta de procesos, en la que se agrega 13 litros aproximados de pulpa a cada tineta, además de tarar la probeta con la que se medirá la masa de la pulpa para el registro de su densidad.

Posteriormente, para homogenizar la muestra, con la ayuda del tubo PVC se agita la muestra de la tineta e inmediatamente, desde el vórtice de la tineta, se recoge con el jarro plástico de 1,4 [L] aproximadamente 600 [mL] de pulpa y se deposita en la probeta graduada de 1000 [mL]. Luego, se limpian los restos de pulpa que se derramaron sobre la probeta con la toalla nova y se registra el volumen contenido en la probeta graduada y se ubica sobre la balanza digital de sobremesa para registrar su masa y así obtener la densidad de la pulpa. Una vez registrada la densidad, se deposita la pulpa en la misma tineta de donde se extrajo la pulpa. Posteriormente, en base a la ecuación (10.26), se calcula la cantidad de agua aproximada que se debe agregar a la tineta para obtener la concentración deseada de sólidos. Cabe destacar que el procedimiento anterior hay que realizarlo con las dos tinetas que tienen muestra.

$$m_{H_2O,add} = \frac{V_{muestra} \cdot \rho_{muestra,i} \cdot C_{p,i}}{30\%} - V_{muestra,i} \cdot \rho_{muestra,i} \quad (10.26)$$

Donde:

- $m_{H_2O,add}$ es la masa de agua a añadir a la tineta.
- $V_{muestra,i}$ es el volumen total de la muestra.
- $\rho_{muestra,i}$ es la densidad inicial de la muestra.
- $C_{p,i}$ es la concentración de sólidos inicial de la muestra.



Figura 10.17. Exhibición del proceso de homogenizar la muestra de relave y agregarla a la probeta para la medición de su densidad.

Para medir el volumen de la muestra que está contenido en la tineta se podría utilizar una tineta graduada, sin embargo, en este caso se determinaron 12 pares ordenados que relacionan el volumen de la tineta con la altura del fluido (ver Tabla 10.11).

Volumen [L]	Altura [cm]
5	10
6	11,74
7	13,48
8	15,22
9	16,96
10	18,7
11	20,3
12	21,9
13	23,5
14	25,1
15	26,7
20	39

Tabla 10.11. Pares ordenados obtenidos contabilizando el volumen con la ayuda de una probeta graduada de 1000 [mL] y una regla metálica.

Dichos puntos se ajustaron en una recta resultando la ecuación (10.27).

$$Volumen [L] = 0,537 \cdot (altura [cm]) - 0,024 \quad (10.27)$$

De modo que para determinar el volumen de la muestra se medía la altura del fluido en la tineta (ver Figura 10.18).



Figura 10.18. Medición de altura del fluido contenido en la tineta para determinar el volumen de la muestra.

Es necesario recalcar que una vez diluida la muestra, se vuelve a calcular la densidad de modo si se logró la concentración de sólidos deseada.

Memoria de cálculo

Para deducir la ecuación (10.26) hay que seguir los siguientes pasos. En primer lugar, en la ecuación (10.28) se tiene la definición de C_p .

$$C_p = \frac{\text{masa del sólido}}{\text{masa total}} = \frac{m_s}{m_T} \quad (10.28)$$

La masa del sólido se representa por la igualdad de la ecuación (10.29).

$$m_s = V_{\text{muestra}} \cdot \rho_{\text{muestra},i} \cdot C_{p,i} \quad (10.29)$$

Donde:

- V_{muestra} es el volumen total de la muestra.
- $\rho_{\text{muestra},i}$ es la densidad inicial de la muestra o relave.
- $C_{p,i}$ es el porcentaje de sólidos inicial de la muestra.

Además, la masa total se puede escribir como:

$$m_T = V_{\text{muestra}} \cdot \rho_{\text{muestra},i} \quad (10.30)$$

En caso de dilución, el porcentaje de sólidos final estará dado por la ecuación (10.31).

$$C_{p,f} = \frac{m_s}{m_T + m_{H_2O,add}} = \frac{V_{\text{muestra}} \cdot \rho_{\text{muestra},i} \cdot C_{p,i}}{V_{\text{muestra}} \cdot \rho_{\text{muestra},i} + m_{H_2O,add}} \quad (10.31)$$

Como se quiere que el porcentaje de sólidos final sea equivalente a 30%, entonces se despeja $m_{H_2O,add}$ y se tiene la ecuación (10.26).

A continuación, se procederá a demostrar la fórmula de la ecuación (10.25).

Para determinar el porcentaje de sólidos de la pulpa (C_p) se utilizará fórmula de la densidad de la pulpa:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (10.32)$$

En el presente caso se asumirá que la pulpa está compuesta por sólido y agua, por lo que se deducen las ecuaciones (10.33) y (10.34)

$$m_p = m_s + m_{H_2O} \quad (10.33)$$

$$V_p = V_s + V_{H_2O} \quad (10.34)$$

De esta forma, la ecuación (10.33) se puede reescribir como la ecuación (10.35).

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} = \frac{1}{\frac{V_s + V_{H_2O}}{m_p}} \quad (10.35)$$

Usando las relaciones de la densidad del sólido y del agua descritas por las ecuaciones (10.36) y (10.37), la ecuación (10.35) se puede reescribir como la ecuación (10.38).

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (10.36)$$

$$\rho_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{V_{H_2O}} \quad (10.37)$$

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} = \frac{1}{\frac{V_s + V_{H_2O}}{m_p}} = \frac{1}{\frac{m_s}{\rho_s \cdot m_p} + \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O} \cdot m_p}} \quad (10.38)$$

El porcentaje de sólido en la pulpa se representa por la ecuación (10.39).

$$C_{p,p} = \frac{m_s}{m_p} \quad (10.39)$$

Por relaciones de balance de masa, también se deduce la ecuación (10.40).

$$m_{H_2O} = 1 - C_{p,p} \quad (10.40)$$

En consecuencia, la ecuación (10.38) se puede escribir como la expresión de la ecuación (10.41).

$$\rho_p = \frac{1}{\frac{C_{p,p}}{\rho_s} + \frac{(1 - C_{p,p})}{\rho_{H_2O}}} \quad (10.41)$$

Después de un desarrollo algebraico de la ecuación (10.41) se llega a la expresión (10.25) que describe el porcentaje de sólidos de la pulpa en función de parámetros conocidos como la densidad del sólido, del agua, el volumen de la probeta ensayada y la masa de la pulpa.

Anexo G.6. Preparación de las probetas

Reactivos

1. Muestra de relave sin coagulante ni floculante.
2. Agua de proceso.

Materiales

1. Toalla nova.
2. Probetas graduadas de 1000 [mL].
3. 2 tinetas de 20 [L] para almacenar muestra de relave.
4. Tinetas de desechos de 20 [L].
5. Jarro plástico de 1,4 [L].
6. Tubo de PVC de 1 metro de longitud.
7. Papel Parafilm.

Método

En primer lugar, se limpian, enjuagan y secan la cantidad de probetas graduadas de 1000 [mL] a ser utilizadas. Considerando que son N probetas a utilizar y que se tienen dos tinetas con 17 [L] aproximados de pulpa, con el jarro plástico de 1,4 [L] se recogen 500 [mL] de pulpa de la tineta 1 y se deposita en la probeta n°1, luego, se recogen 500 [mL] de muestra desde la tineta 2 y se depositan en la probeta n°2 y se repite el procedimiento desde la tineta 1 con la probeta 3 y así sucesivamente hasta que se complete la probeta n°N con 500 [mL] de pulpa. Posteriormente, se completan los 1000 [mL] de la probeta graduada n°N con 500 [mL] de la otra tineta con que fueron rellenos los primeros 500 [mL] de pulpa, luego se completan los 1000 [mL] de capacidad de la probeta graduada n°N-1 y así sucesivamente hasta completar la probeta n°1. Cabe destacar que antes de recoger muestra con el jarro plástico de cada tineta hay que homogenizar la pulpa de cada tineta agitándola con el tubo PVC, debido a que la muestra suele sedimentar rápido.

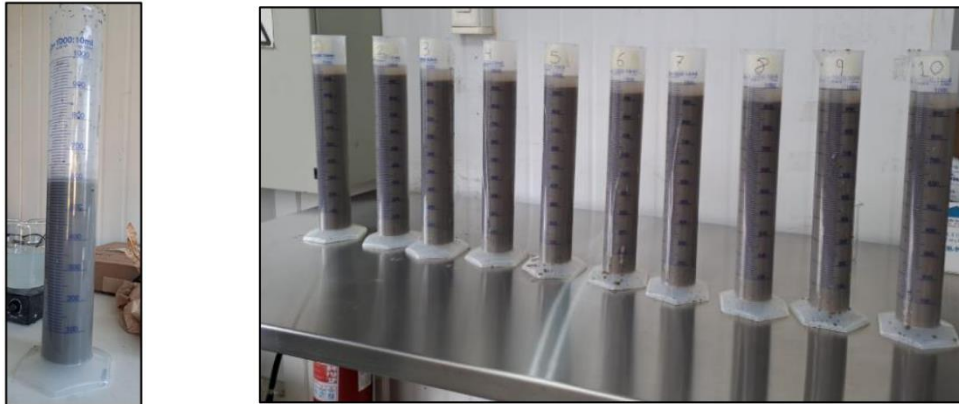


Figura 10.19. Exhibición de la preparación de las probetas.

Posteriormente se procede a colocar papel Parafilm en la parte superior de la probeta, tal como se exhibe en la Figura 5.3.

Anexo G.7. Prueba de sedimentación

Los reactivos, materiales y equipamiento que se exhiben a continuación corresponden a los procedimientos descritos en el Anexo G.8, G.9 y G.10.

Reactivos

1. Muestra de relave sin coagulante ni floculante.
2. Agua de proceso.
3. Agua fresca.

Materiales

1. Toalla nova.
2. Regla metálica de 30 [cm].
3. Probetas graduadas de 1000 [mL].
4. 2 tinetas de 20 [L] para almacenar muestra de relave.
5. Tineta de desechos de 20 [L].
6. Jarro plástico de 1,4 [L].
7. Tubo de PVC de 1 metro de longitud.

8. Cronómetro.
9. Cuaderno de registro y lápiz.
10. 1 jeringa de 20 [mL].
11. Papel Parafilm.
12. Vasos plásticos de 300 [mL] de capacidad.
13. Cortador de muestra metálico.

Equipamiento

1. Balanza digital de sobremesa de 1200 [g] x 0,01 [g].
2. Colorímetro y sus implementos.

Memoria de cálculo

Para calcular el volumen de solución de trabajo a añadir en la probeta de ensayo, se deben seguir los siguientes pasos.

En primer lugar, se debe calcular la densidad del sólido, la que está dada por la ecuación (10.42).

$$\rho_s \left[\frac{g}{L} \right] = SG_s \cdot \rho_{H_2O} \left[\frac{g}{L} \right] \quad (10.42)$$

Donde:

- ρ_s es la densidad del sólido, en $\left[\frac{g}{L} \right]$.
- SG_s es la gravedad específica del sólido.

Por otro lado, conociendo el porcentaje de sólido de la pulpa por la ecuación (10.25) y la masa de la pulpa se determinará la masa del sólido contenida en el recipiente a analizar:

$$m_s [g] = \frac{C_{p,pulpa} [\%] \cdot m_{pulpa}}{100} \quad (10.43)$$

Luego, se calcula la masa de polímero contenida en la muestra, expresada por la ecuación (10.44):

$$m_{polymer} [g] = \frac{Dosis \left[\frac{g \text{ polymer}}{TMS} \right] \cdot m_s [g]}{10^6 \left[\frac{g}{TMS} \right]} \quad (10.44)$$

Posteriormente se calcula la masa de la solución de trabajo a añadir a la probeta mediante la ecuación (10.45):

$$m_{sol,add} [g] = \frac{m_{polymer} [g]}{\frac{C_w [\%]}{100}} \quad (10.45)$$

Finalmente, para calcular el volumen a añadir de la solución de trabajo a la probeta, se debe utilizar la fórmula de la densidad. Para la densidad de la solución se asumirá que tiene una densidad equivalente a la del agua.

$$V_{add,probeta} [mL] = \frac{m_{sol,add} [g]}{\rho_{H_2O} \left[\frac{g}{mL} \right]} \quad (10.46)$$

Anexo G.8. Cálculo de velocidad de sedimentación

Una vez que la interfaz sólido-líquido en la probeta alcance los 900 [mL] de la probeta se inicia el cronómetro y se detiene en los 700 [mL] para calcular la velocidad de sedimentación mediante la ecuación (10.47).

$$V_s \left[\frac{m}{h} \right] = \frac{(h_{900mL} - h_{700mL})[cm]}{(t_{900mL} - t_{700mL})[s]} \cdot \frac{3600 [s]}{1 [h]} \cdot \frac{1 [m]}{100 [cm]} \quad (10.47)$$

Donde:

- V_s es la velocidad de sedimentación, en $\left[\frac{m}{h} \right]$.
- h_{900mL} es la altura inicial o altura en la marca de 900 mL de la probeta, en [cm]. Se calcula con la ecuación (10.49).
- h_{700mL} es la altura final o altura en la marca de 700 mL de la probeta, en [cm]. Se calcula con la ecuación (10.50).
- t_{900mL} es el tiempo inicial o tiempo cuando el lodo alcanza la altura de la marca de los 900 mL de la probeta, en [s].
- t_{700mL} es el tiempo final o tiempo cuando el lodo alcanza la altura de la marca de los 700 mL de la probeta, en [s].
- Diámetro probeta: 6,3 [cm].
- Radio probeta: 3,15 [cm].

El cálculo del área transversal se exhibe en la ecuación (10.48).

$$A[cm^2] = \pi \cdot (r[cm])^2 = 31,17245 [cm^2] \quad (10.48)$$

$$h_{900mL} = \frac{900 [mL] \cdot \frac{1[cm^3]}{1[mL]}}{A[cm^2]} = \frac{900}{31,17245} [cm] = 28,87165 [cm] \quad (10.49)$$

Donde A es el área transversal de la probeta.

$$h_{700mL} = \frac{700 [mL] \cdot \frac{1[cm^3]}{1[mL]}}{A[cm^2]} = \frac{700}{31,17245} [cm] = 22,45572 [cm] \quad (10.50)$$

Reemplazando los valores en la ecuación (10.47) se obtiene la ecuación (10.51).

$$V_s \left[\frac{m}{h} \right] = 36 \cdot \frac{6,415921}{(t_{900mL} - t_{700mL})} \left[\frac{m}{h} \right] \quad (10.51)$$

Anexo G.9. Cálculo de la compactación a las 2 horas y final

Después de 120 minutos de que comienza la sedimentación, se registra el volumen final para calcular la compactación a las dos horas mediante la ecuación (10.52):

$$C_{p,max} [\%] = \frac{m_s [g]}{m_p [g] - (V_p [mL] - V_{UF} [mL]) \cdot \rho_{H_2O} \left[\frac{g}{mL} \right]} \times 100\% \quad (10.52)$$

Donde:

- $C_{p,max}$ es la compactación máxima de la pulpa.
- m_s es la masa de sólido que está contenida en 1000 [mL] de pulpa, en [g].
- m_p es la masa de 1000 [mL] de pulpa, en [g].

- V_p es el volumen de la pulpa con el que se trabajó en la probeta para la prueba de sedimentación, en [mL].
- V_{UF} es el volumen del underflow, es decir, del volumen que utiliza la pulpa compactada, en [mL].

Con respecto a la compactación final, su fórmula corresponde a la ecuación (10.57).

Memoria de cálculo

A continuación, se procederá a detallar la deducción de la ecuación (10.52).

Para calcular la compactación del relave a las dos horas se consideró el siguiente supuesto:

1. Se considera que todo el sólido de la pulpa está en el underflow, es decir, que el sólido que se encuentra suspendido en el sobrenadante u overflow es despreciable.

$$C_{p,\max}[\%] = \frac{m_s}{m_{T,UF}} = \frac{m_s}{m_p - m_{H_2O,OF}} \times 100\% \quad (10.53)$$

De modo que

$$m_{H_2O,OF} = \rho_{H_2O} \cdot (V_p - V_{UF}) \quad (10.54)$$

De esta forma, reemplazando la ecuación (10.54) en (10.53) se obtiene la ecuación (10.52).

Anexo G.10. Análisis reológico

Reactivos

1. Agua fresca para lavar.
2. Relave compacto luego de 14 a 20 horas.

Materiales

1. Piceta.
2. Toalla nova.
3. Tineta de desechos de 20 [L].
4. Toalla nova.

Equipamiento

1. Reómetro Brookfield DV3T RV.
2. Husillo de paleta (V-74).
3. Cable de conexión USB.

Método

Una vez transcurridas entre 14 y 20 horas desde que se depositó el relave compacto en el vaso plástico, se procede a retirar el sobrenadante del vaso con la ayuda de jeringas para comenzar su análisis reológico en el reómetro.



Figura 10.20. Pretratamiento de la muestra para el análisis reológico.

Para calcular la compactación final alcanzada por el relave dentro del vaso luego de extraer el sobrenadante, se sigue el siguiente procedimiento.

La cantidad de sólido contenida en el vaso se calcula con la ecuación (10.55):

$$m_s [g] = m_{neta,i} [g] \cdot C_p(2h) [\%] \quad (10.55)$$

Ahora, después de 14-20 horas, el contenido sigue sedimentando y se forma un volumen de sobrenadante. Asumiendo que en este sobrenadante no hay sólido, entonces para calcular el porcentaje de sólidos final en el vaso se asume la expresión (10.56):

$$m_{s,vaso,t=0} = m_{s,vaso,t=t1} \quad (10.56)$$

De esta forma, como se tiene la masa del vaso cuando se le extrae el sobrenadante, es decir, se tiene una nueva masa neta, entonces el nuevo C_p de este vaso sería, según la ecuación (10.55), la masa de sólido dividido por la nueva masa neta, que está representado por la ecuación (10.57).

$$C_{p,final} = \frac{m_s}{m_{neta,f}} = \frac{m_{neta,i} \cdot C_p(2h)}{m_{neta,f}} \quad (10.57)$$

Continuando con el procedimiento del análisis reológico, en primer lugar, se debe montar el reómetro. Una vez montado, se procede a configurarlo, estableciendo la fecha, el idioma, entre otros aspectos.

Posteriormente, se debe escoger el husillo de paletas o “vane spindle” a utilizar en el método.



Figura 10.21. Forma general de un husillo de paletas, exhibiendo su marca primaria y secundaria de inmersión en el fluido a analizar (Brookfield, 2019).

En la Figura 10.21 se exhiben los posibles husillos de paletas a utilizar.

Husillo de paletas	Longitud de la paleta [cm]	Diámetro de la paleta [cm]
V-71	6,878	3,439
V-72	4,338	2,167
V-73	2,535	1,267
V-74	1,176	0,589
V-75	1,610	0,803

Tabla 10.12. Longitud y diámetro de la paleta por cada husillo de paletas (Brookfield, 2019).

En el presente trabajo para todos los análisis reológicos se utiliza el husillo de paletas V-74 en su marca de inmersión primaria, ya que aborda todo el rango de tensión de cizallamiento de las muestras a analizar.

El método para la obtención de la curva reológica de tensión de cizallamiento [Pa] o [dina/cm²] en función de velocidad de cizallamiento o de corte [1/s] se obtiene utilizando una metodología que consiste en 15 etapas. Cada etapa tiene una duración de 30 segundos y una velocidad de cizallamiento cada vez mayor. En la Tabla 10.13 se detallan las características de cada etapa:

Etapas	Tiempo [s]	Velocidad de corte [RPM]
1	30	0,01
2	30	0,02
3	30	0,03
4	30	0,04
5	30	0,05
6	30	0,06
7	30	0,07
8	30	0,08
9	30	0,09
10	30	0,1
11	30	0,15
12	30	0,2
13	30	0,25
14	30	0,3
15	30	035

Tabla 10.13. Detalle de la configuración de cada etapa del método que se realiza con el spindle V-74.

Respecto de la colección de datos se utiliza la opción del promedio de puntos múltiples, en la que cada 5 segundos se recoleta un punto que resulta ser el promedio de los datos

obtenidos en los últimos 3 segundos del intervalo. En consecuencia, como el método en total tiene una duración de 7 minutos y 30 segundos, se recolectan 90 datos.

En base a lo anterior, cada etapa contiene 6 puntos, que representan 6 valores de tensión, en a una misma velocidad de corte. En consecuencia, para la obtención del diagrama reológico se realiza un promedio de estos 6 puntos de tensión para obtener un par ordenado de tensión y velocidad de cizallamiento, el que se grafica en el diagrama. Por tanto, en el diagrama habrá 15 puntos.

Una vez terminado el procedimiento de la obtención de la curva, se exportan los datos al USB insertado en el reómetro para guardarlos.

Posteriormente, se retira el vaso y se limpia el husillo de paletas con agua fresca con la ayuda de la piceta.

Una vez hecho el análisis reológico de la muestra, se procede a desechar el contenido del vaso en la tineta de residuos.



Figura 10.22. Desecho del relave con modificador reológico y floculante en la tineta de residuos para posteriormente ser bombeada hacia el depósito de relaves.

Anexo G.11. Memoria de cálculo de la viscosidad

Considerando el ejemplo del diagrama reológico expuesto en la Figura 10.23, para calcular la viscosidad de cada curva reológica hay que considerar el régimen elástico, los que se exhiben en la Figura 10.24.

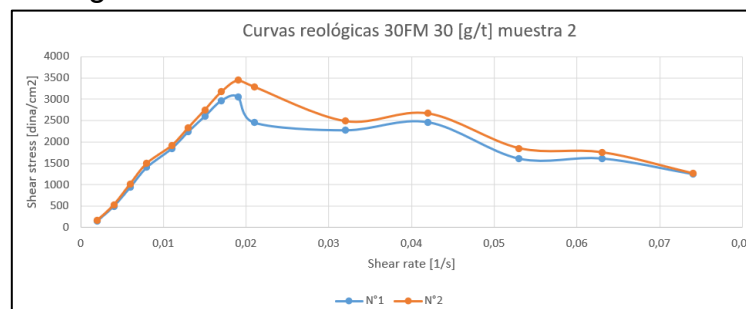


Figura 10.23. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona el floculante 30FM a una dosis de 30 [g/t] en la muestra 2 de relave.

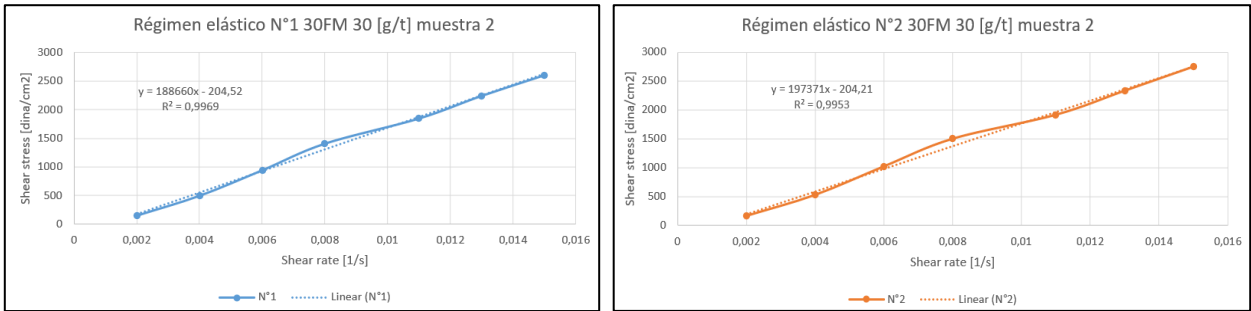


Figura 10.24. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, y 2 cuando se adiciona el floculante 30FM a una dosis de 30 [g/t] en la muestra 2 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

Luego, se realiza una regresión lineal a cada curva del régimen elástico, donde la pendiente de la ecuación de la recta obtenida corresponde a la magnitud de la viscosidad (sección 2.1.2). En el presente ejemplo la viscosidad se obtiene en la unidad de $\left[\frac{\text{dina}\cdot\text{s}}{\text{cm}^2}\right]$, para transformar esta unidad de medida en [cP] se utilizan las conversiones expresadas en las ecuaciones (10.58) y (10.59)

$$1000 \text{ [cP]} = 1 \text{ [Pa}\cdot\text{s]} \quad (10.58)$$

$$1 \text{ [Pa]} = 10 \left[\frac{\text{dina}}{\text{cm}^2}\right] \quad (10.59)$$

Relacionando las ecuaciones se obtiene la expresión (10.60):

$$100 \text{ [cP]} = 1 \left[\frac{\text{dina}\cdot\text{s}}{\text{cm}^2}\right] \quad (10.60)$$

Por lo tanto, para obtener la viscosidad en [cP] se debe multiplicar la pendiente de la ecuación de la regresión lineal por cien. Por esto, la viscosidad de la curva reológica N°1 y 2 será de 18.866.000 y 19.737.100[cP], respectivamente.

Para calcular un valor único de viscosidad del relave espesado por aplicación de floculante con o sin modificador reológico, en primer lugar, se calcula el error muestral que corresponde a la desviación estándar muestral, posteriormente se utiliza el dato del error individual de la medición de la viscosidad por las especificaciones del reómetro (Tabla 5.1) y ambos errores se introducen a la ecuación del cálculo del error total (10.78) expresada en el Anexo I.

En el presente caso se tendría que $\varepsilon_{\text{muestral}} = 435550[\text{cP}]$ y $\varepsilon_{\text{individual}} = 0,01 \cdot \mu_{\text{muestra}} = 0,01 \cdot 1,93 \times 10^7$, luego, ingresando estos valores a la ecuación del error total se obtendría que el valor de la viscosidad del ejemplo con su respectivo error está dado por la ecuación (10.61):

$$\varepsilon_{\text{total}} = \sqrt{(435550)^2 + (1,93 \times 10^5)^2} \approx 4,76 \times 10^5 \quad (10.61)$$

Anexo H. Cálculo de la ganancia de recuperación de agua

Los balances de masa de la presente sección se realizan considerando estado estacionario, es decir, la acumulación del sistema es nula. Además, al ser un proceso exclusivamente de separación de especies, se considera que la generación y consumo de las especies también es nulo. En consecuencia, la base de los balances de masa está representado por la ecuación (10.62).

$$\text{Entrada} = \text{Salida} \quad (10.62)$$

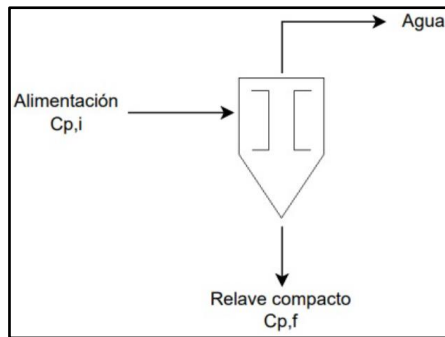


Figura 10.25. Diagrama que representa el proceso de la etapa de sedimentación del relave en pasta (elaboración propia).

En base a la Figura 10.25 se tiene que el balance de masa global del sistema está representado por la ecuación (10.63).

$$\dot{m} = \dot{m}_{OF} + \dot{m}_{UF} \quad (10.63)$$

Donde:

- \dot{m} es la masa neta de relave entrante al espesador.
- \dot{m}_{OF} es la masa neta que egresa por el overflow del espesador.
- \dot{m}_{UF} es la masa neta que egresa por el underflow del espesador.

Asumiendo que la cantidad de sólido que se extrae por el overflow es despreciable, entonces se tiene el siguiente balance de masa para el sólido dentro del sistema:

$$\dot{m} \cdot C_{p,i} = \dot{m}_{UF} \cdot C_{p,f} \quad (10.64)$$

Donde:

- $C_{p,i}$ es la concentración de sólido del relave a la entrada del espesador.
- $C_{p,f}$ es la concentración de sólido del relave a la salida del underflow del espesador.

Además, se cumple la ecuación (10.65):

$$\dot{m}_{OF} = m_{H_2O,recuperada} \quad (10.65)$$

Donde $m_{H_2O,recuperada}$ representa la cantidad de agua recuperada, que egresa por el overflow del espesador.

Y el balance de masa del agua en función de las variables mencionadas estaría representado por la ecuación (10.66):

$$\dot{m} - \dot{m} \cdot C_{p,i} = \dot{m}_{OF} + (\dot{m}_{UF} - \dot{m}_{UF} \cdot C_{p,f}) \quad (10.66)$$

Ahora, para calcular la ganancia de recuperación de agua con los nuevos productos aplicados se debe calcular el flujo másico del overflow usando los productos del blanco, que son los usados actualmente por Minera Florida y los productos nuevos a ensayar, de modo que la ganancia de recuperación de agua vendría a ser la diferencia entre estos dos valores.

Para obtener dicho valor, hay que considerar un flujo másico constante de alimentación para ambos casos, además de definir el Cp de entrada y un Cp de salida que puede variar entre 69 y 72%. Además, se considerará que el Cp de entrada es igual en ambos casos de productos, donde el Cp de salida de los productos ensayados estará en función de los datos obtenidos de laboratorio en función de la ecuación (10.67):

$$C_{p,f,nuevos\ productos} = C_{p,f,blanco} \cdot \left(1 + \frac{\Delta C_{p,exp,laboratorio}}{100}\right) \quad (10.67)$$

Donde:

- $C_{p,f,blanco}$ es la concentración de sólido del relave del underflow del espesador utilizando los productos del blanco.
- $C_{p,f,nuevos\ productos}$ es la concentración de sólido del relave del underflow del espesador utilizando los productos ensayados.
- $\Delta C_{p,exp,laboratorio}$ representa el aumento porcentual de la concentración de sólido del relave que se obtuvo experimentalmente en los ensayos de laboratorio.

Luego, en función de los datos, como el flujo de alimentación, el Cp inicial y final de los productos usados por Minera Florida, se puede calcular el flujo de agua recuperado a través del Overflow del espesador mediante la ecuación (10.68), que corresponde a un arreglo algebraico de la ecuación (10.66).

$$\dot{m}_{OF} = \dot{m}(1 - C_{p,i}) - (\dot{m}_{UF} - \dot{m}_{UF} \cdot C_{p,f}) \quad (10.68)$$

De esta forma se pueden obtener gráficos de la ganancia de recuperación de agua en función del Cp final.

Anexo I. Error de la medición de turbidez (colorímetro DR890)

En la ficha técnica del colorímetro DR890 se establece si el colorímetro informa que una muestra de agua posee una turbidez de 200 [FAU], implica que la turbidez real de la muestra se encuentra en el intervalo (195:205) [FAU] con un 95% de confianza. Considerando que lo anterior se demostró realizando una cantidad de pruebas tendiendo al infinito, entonces se puede determinar el error usando el gráfico de distribución normal estándar.

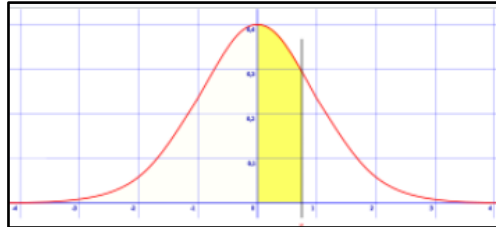


Figura 10.26. Gráfico de distribución normal estándar.

Los valores de la Tabla 10.14 representan el área bajo la curva en función de la Figura 10.26.

z	+0.00	+0.01	+0.02	+0.03	+0.04	+0.05	+0.06	+0.07	+0.08	+0.09
0.0	0.00000	0.00399	0.00798	0.01197	0.01595	0.01994	0.02392	0.02790	0.03188	0.03586
0.1	0.03983	0.04380	0.04776	0.05172	0.05567	0.05962	0.06356	0.06749	0.07142	0.07535
0.2	0.07926	0.08317	0.08706	0.09095	0.09483	0.09871	0.10257	0.10642	0.11026	0.11409
0.3	0.11791	0.12172	0.12552	0.12930	0.13307	0.13683	0.14058	0.14431	0.14803	0.15173
0.4	0.15542	0.15910	0.16276	0.16640	0.17003	0.17364	0.17724	0.18082	0.18439	0.18793
0.5	0.19146	0.19497	0.19847	0.20194	0.20540	0.20884	0.21226	0.21566	0.21904	0.22240
0.6	0.22575	0.22907	0.23237	0.23565	0.23891	0.24215	0.24537	0.24857	0.25175	0.25490
0.7	0.25804	0.26115	0.26424	0.26730	0.27035	0.27337	0.27637	0.27935	0.28230	0.28524
0.8	0.28814	0.29103	0.29389	0.29673	0.29955	0.30234	0.30511	0.30785	0.31057	0.31327
0.9	0.31594	0.31859	0.32121	0.32381	0.32639	0.32894	0.33147	0.33398	0.33646	0.33891
1.0	0.34134	0.34375	0.34614	0.34849	0.35083	0.35314	0.35543	0.35769	0.35993	0.36214
1.1	0.36433	0.36650	0.36864	0.37076	0.37286	0.37493	0.37698	0.37900	0.38100	0.38298
1.2	0.38493	0.38686	0.38877	0.39065	0.39251	0.39435	0.39617	0.39796	0.39973	0.40147
1.3	0.40320	0.40490	0.40658	0.40824	0.40988	0.41149	0.41308	0.41466	0.41621	0.41774
1.4	0.41924	0.42073	0.42220	0.42364	0.42507	0.42647	0.42785	0.42922	0.43056	0.43189
1.5	0.43319	0.43448	0.43574	0.43699	0.43822	0.43943	0.44062	0.44179	0.44295	0.44408
1.6	0.44520	0.44630	0.44738	0.44845	0.44950	0.45053	0.45154	0.45254	0.45352	0.45449
1.7	0.45543	0.45637	0.45728	0.45818	0.45907	0.45994	0.46080	0.46164	0.46246	0.46327
1.8	0.46407	0.46485	0.46562	0.46638	0.46712	0.46784	0.46856	0.46926	0.46995	0.47062
1.9	0.47128	0.47193	0.47257	0.47320	0.47381	0.47441	0.47500	0.47558	0.47615	0.47670
2.0	0.47725	0.47778	0.47831	0.47882	0.47932	0.47982	0.48030	0.48077	0.48124	0.48169
2.1	0.48214	0.48257	0.48300	0.48341	0.48382	0.48422	0.48461	0.48500	0.48537	0.48574
2.2	0.48610	0.48645	0.48679	0.48713	0.48745	0.48776	0.48809	0.48840	0.48870	0.48899
2.3	0.48928	0.48956	0.48983	0.49010	0.49036	0.49061	0.49086	0.49111	0.49134	0.49158
2.4	0.49180	0.49202	0.49224	0.49245	0.49266	0.49286	0.49305	0.49324	0.49343	0.49361
2.5	0.49379	0.49396	0.49413	0.49430	0.49446	0.49461	0.49477	0.49492	0.49506	0.49520
2.6	0.49534	0.49547	0.49560	0.49573	0.49585	0.49598	0.49609	0.49621	0.49632	0.49643
2.7	0.49653	0.49664	0.49674	0.49683	0.49693	0.49702	0.49711	0.49720	0.49728	0.49736
2.8	0.49744	0.49752	0.49760	0.49767	0.49774	0.49781	0.49788	0.49795	0.49801	0.49807
2.9	0.49813	0.49819	0.49825	0.49831	0.49836	0.49841	0.49846	0.49851	0.49856	0.49861
3.0	0.49865	0.49869	0.49874	0.49878	0.49882	0.49886	0.49889	0.49893	0.49896	0.49900

Tabla 10.14. Tabla numérica de la distribución normal estándar.

Considerando que se tiene un 95% de confianza, implica lo siguiente:

$$\mathbb{P}(195[FAU] < 200[FAU] < 205[FAU]) = 0,95 \quad (10.69)$$

Considerando que X es una variable aleatoria de una distribución normal con media μ y desviación estándar σ , el valor asignado Z , que representa la distribución normal estándar puede calcularse a partir de la ecuación (10.70).

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (10.70)$$

Considerando las ecuaciones (10.71) y (10.72), las que son equivalentes:

$$\mathbb{P}(|Z| < z) = 0,95 \quad (10.71)$$

$$\mathbb{P}(-z < Z < z) = 0,95 \quad (10.72)$$

Para encontrar el valor de z en la tabla, se debe dividir la confianza en dos y encontrar el valor de z acorde, en este caso hay que buscar el z que otorga un área bajo la curva de 0,475. Observando la Tabla 10.14 se tiene que $z = 1,96$.

Combinando las ecuaciones (10.72) y (10.73) se llega a que:

$$\mathbb{P}(\mu - z \cdot \sigma < X < \mu + z \cdot \sigma) = 0,95 \quad (10.73)$$

De esta forma se tiene el siguiente sistema de ecuaciones formado por las ecuaciones (10.74) y (10.75):

$$195 = \mu - 1,96 \cdot \sigma \quad (10.74)$$

$$205 = \mu + 1,96 \cdot \sigma \quad (10.75)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones se tiene que $\mu = 200$ y $\sigma \approx 2,551$.

En consecuencia, el valor de σ es el error absoluto individual que conlleva el colorímetro.

Por lo tanto, el error relativo estaría dado por la ecuación (10.76):

$$\varepsilon_r = \frac{2,551}{200} \times 100\% = 1,2755\% \quad (10.76)$$

De esta forma, el error individual de cada medición está dado por la expresión (10.77):

$$\varepsilon_{individual} = Turbidez \cdot \varepsilon_r = Turbidez \cdot 0,012755 \quad (10.77)$$

Asimismo, el error total se calcula mediante la ecuación (10.78) (Hogan, 2006):

$$\varepsilon_{total} = \sqrt{(\varepsilon_{muestral})^2 + (\varepsilon_{individual})^2} \quad (10.78)$$

Anexo J. Lectura de gráficos

Para leer los gráficos que muestran la magnitud de las variables de velocidad de sedimentación, compactación, turbidez y viscosidad en función de la dosis relativa de modificador reológico se deben seguir los siguientes pasos

- En primer lugar, se debe observar la leyenda, que se conforma con el nombre del modificador reológico y del floculante, en ese orden, además de indicar la dosis utilizada de floculante.
- La variación del eje X representa el porcentaje de dosis de modificador reológico con respecto a la de floculante, la que es fija.
- En consecuencia, los puntos del eje Y representa el caso cuando no se agrega modificador reológico, es decir, solo se agrega floculante a la dosis indicada en la leyenda.
- Por ejemplo, en la Figura 10.27, se tiene que, en el caso de la leyenda amarilla, se tienen dos puntos. El punto del eje Y representa el punto en el que hay un 0% de dosis de modificador reológico, es decir, solo se añaden los 30 [g/t] de floculante 10FM. Por su parte, el segundo punto indica que se añade una dosis de modificador reológico del 50% de la dosis añadida de floculante, en este caso, como la dosis de floculante es fija en 30 [g/t] (como se establece en la leyenda), quiere decir que se agrega una dosis de modificador reológico de 15 [g/t], ya que es el 50% de 30 [g/t].

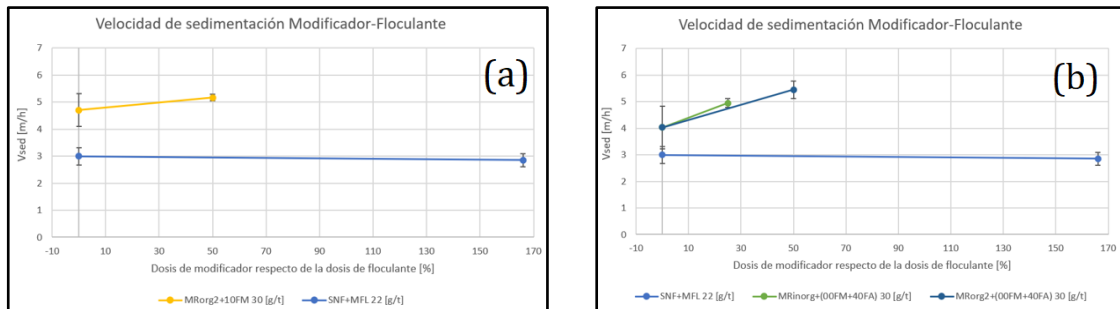


Figura 10.27. Velocidad de sedimentación del relave por la acción de (a) MRorg2+10FM 30 [g/t] y (b) MRinorg+(00FM+40FA) 30 [g/t] y MRorg2+(00FM+40FA) 30 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante los ensayos de reproducibilidad del primer día, ambos gráficos en comparación con la pareja de productos utilizada en la planta de procesos (SNF+MFL 22 [g/t]).

Anexo K. Resultados

Los ensayos de la presente sección tienen la intención de observar las tendencias generales de las variables una vez aplicados los productos, es decir, no se busca establecer un análisis estadístico, puesto que en base a las tendencias observadas se escogerán los productos que obtengan el mejor rendimiento sobre el proceso del espesamiento de relaves para realizar los ensayos de reproducibilidad y así evaluar su validez estadística.

Anexo K.1. Variación de la concentración inicial de sólidos del relave

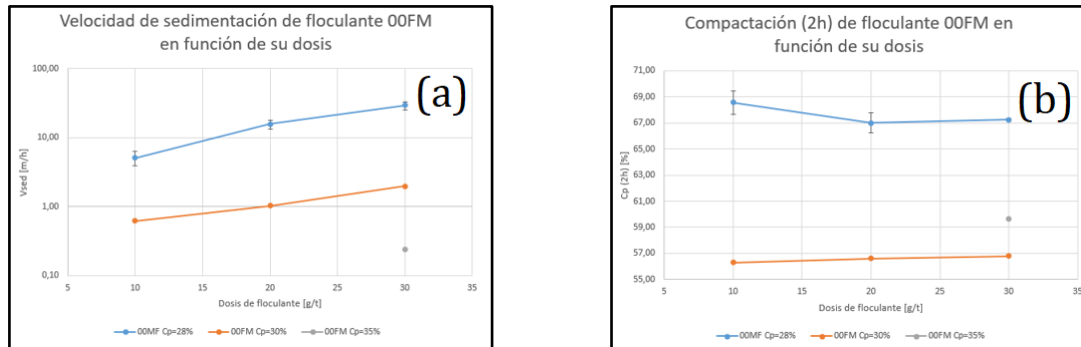


Figura 10.28. (a) Velocidad de sedimentación y (b) compactación del relave a distintas concentraciones inicial de sólido por la acción del floculante 00FM en función de su dosis de la muestra 5 de relave.

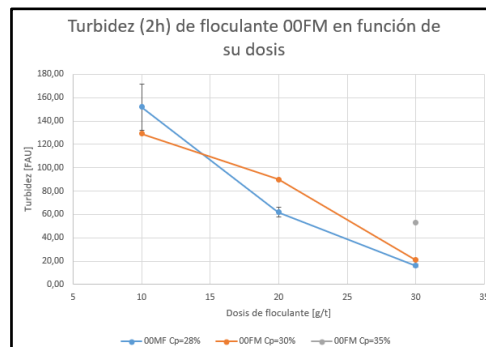


Figura 10.29. Turbidez del relave a distintas concentraciones de sólido inicial por la acción del floculante 00FM en función de su dosis de la muestra 5 de relave.

En la Figura 10.28 se observa que a una concentración de sólidos (C_p) inicial de 28% en peso se tiene una mayor velocidad de sedimentación y compactación del relave en comparación con un C_p inicial de 30% en peso ($C_{pi}=30\%$) en todo el rango de dosis ensayado, y a una dosis de floculante de 30 [g/t] a un $C_{pi}=35\%$. En cambio, de la Figura 10.29 se observa que la turbidez depende principalmente de la dosis de floculante, teniendo leves variaciones respecto del C_{pi} .

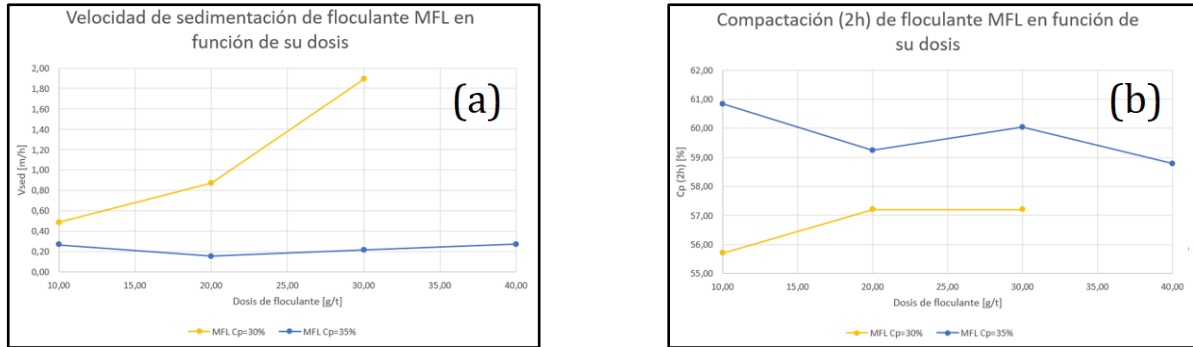


Figura 10.30. (a) Velocidad de sedimentación y (b) compactación del relave a distintas concentraciones de sólido inicial por la acción del floculante MFL en función de su dosis de la muestra 6 de relave.

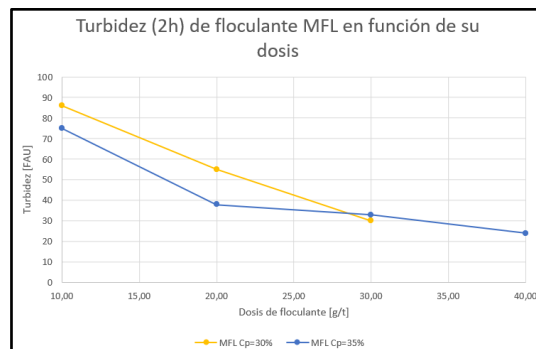


Figura 10.31. Turbidez del relave a distintas concentraciones de sólido por la acción del floculante MFL en función de su dosis de la muestra 6 de relave.

En la Figura 10.30 se observan las mismas tendencias de la Figura 10.28, ya que a un $C_{pi}=30\%$ se tiene una velocidad de sedimentación y compactación mayor y menor, respectivamente, que a un $C_{pi}=35\%$. Por su parte, en la Figura 10.31 se tiene que la turbidez depende principalmente de la dosis de floculante, observándose leves diferencias respecto del C_{pi} .

Respecto de las diferencias en la magnitud de las variables estudiadas respecto de la dosis de floculante, se observa que la velocidad de sedimentación, a un $C_{pi}=28\%$ y $C_{pi}=30\%$, aumenta en función de la dosis de floculante, en cambio, a un $C_{pi}=35\%$ se suele mantener constante. Por su parte, la compactación se suele mantener constante independiente del C_{pi} . En cuanto a la turbidez, esta variable disminuye en función de la dosis de floculante.

A modo de discusión, independiente de la dosis de floculante adicionada, la velocidad de sedimentación y la compactación se ven ampliamente afectadas por la fracción volumétrica de sólidos, donde se observa que una floculación óptima se logra en una dilución del orden de un $C_{p,i}=28\%$. Sin embargo, para el desarrollo del trabajo, se decidió trabajar a un $C_{p,i}=30\%$, aumentando la tasa de colisiones entre las partículas, porque permite diferenciar con mayor desigualdad las variables en estudio.

En relación con la concentración de sólidos inicial de la muestra del relave, se concluye que su variación conlleva cambios significativos en la magnitud de las variables estudiadas, especialmente en la velocidad de sedimentación y compactación, determinando que una concentración inicial de sólidos del 30% en peso es una concentración adecuada para contemplar diferencias significativas en las variables estudiadas en las pruebas de sedimentación por el método de la probeta graduada.

Anexo K.2. Ensayos únicamente con flocculantes

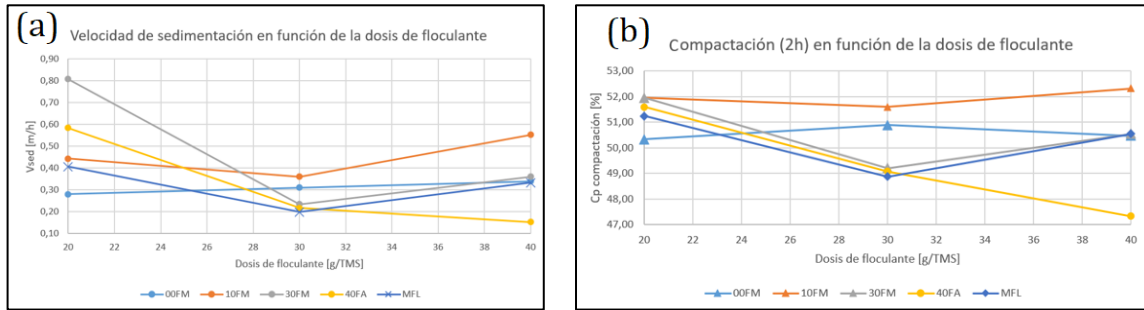


Figura 10.32. (a) Velocidad de sedimentación y (b) compactación del relave a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de cinco flocculantes ensayados en función de su dosis de la muestra 7 de relave.

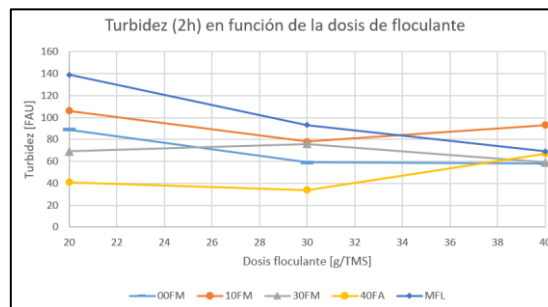


Figura 10.33. Turbidez del agua recuperada a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de cinco flocculantes ensayados en función de su dosis de la muestra 7 de relave.

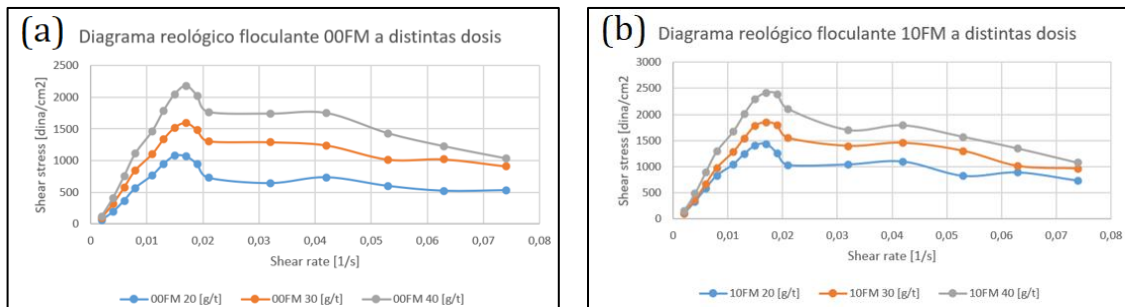


Figura 10.34. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el (a) flocculante 00FM y (b) 10FM a 20, 30 y 40 [g/t] de la muestra 7 de relave.

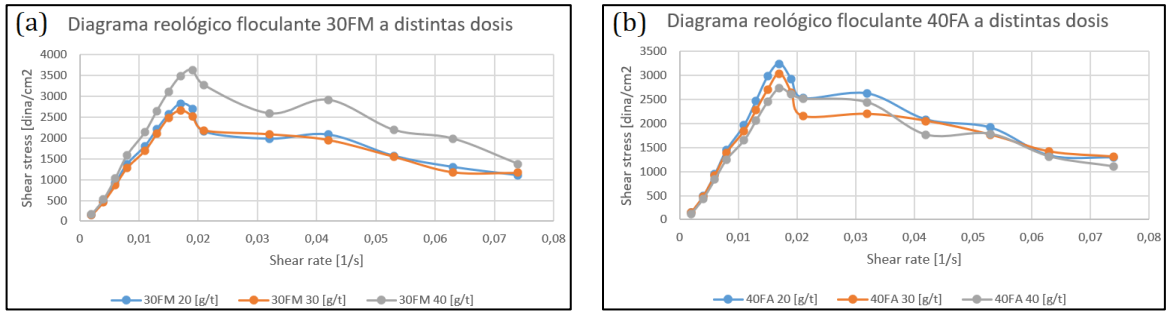


Figura 10.35. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el (a) flocculante 30FM y (b) 40FA a 20, 30 y 40 [g/t] de la muestra 7 de relave.

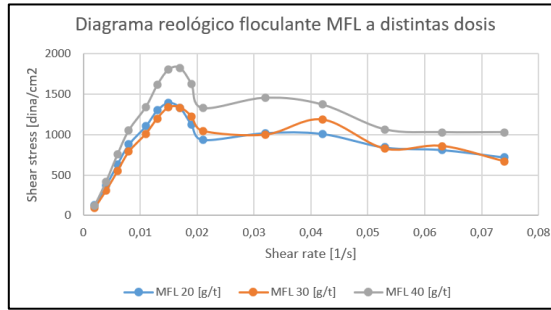


Figura 10.36. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el flocculante MFL de la muestra 7 de relave.

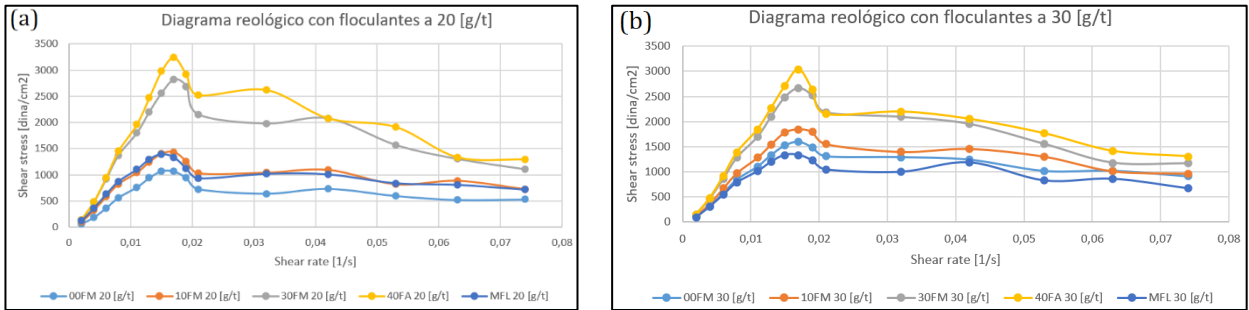


Figura 10.37. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplican los flocculantes 00FM, 10FM, 30FM, 40FA y MFL a una dosis de (a) 20 [g/t] y (b) 30 [g/t] de la muestra 7 de relave.

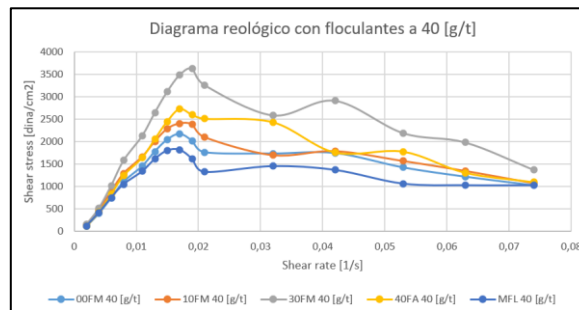


Figura 10.38. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplican los flocculantes 00FM, 10FM, 30FM, 40FA y MFL a una dosis de 40 [g/t] de la muestra 7 de relave.

De acuerdo con los resultados exhibidos en la Figura 10.37 y la Figura 10.38 se deduce que a medida que se incrementa la dosis de floculante, las magnitudes de la tensión de cizallamiento en función de la velocidad de cizallamiento son mayores. Además, en base a la Figura 10.32 y la Figura 10.33 se obtiene que el aumento de la dosis a 40 [g/t] no tiene mejoras significativas en las variables de velocidad de sedimentación, compactación y turbidez en comparación cuando se aplica una dosis de 20 y 30 [g/t], por lo que se decidió que en las siguientes pruebas no se ensayará a una dosis de 40 [g/t]. En consecuencia, en las pruebas posteriores se ensayarán los floculantes a una dosis de 20 y 30 [g/t].

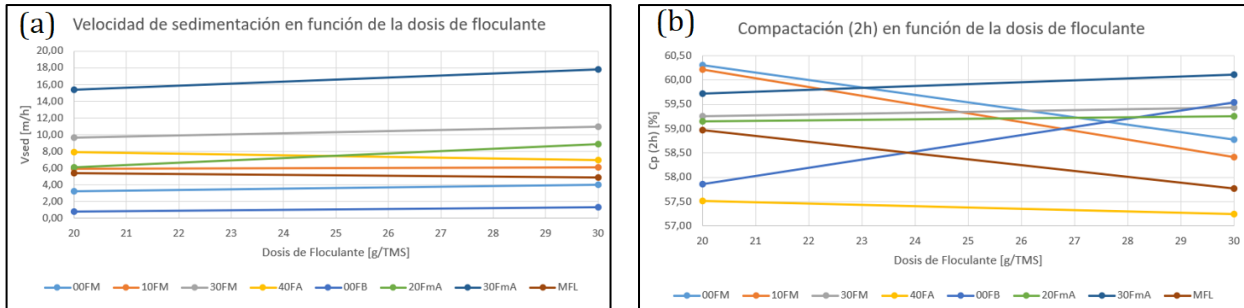


Figura 10.39. (a) Velocidad de sedimentación y (b) compactación del relave a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de ocho floculantes ensayados en función de su dosis de la muestra 8 de relave.

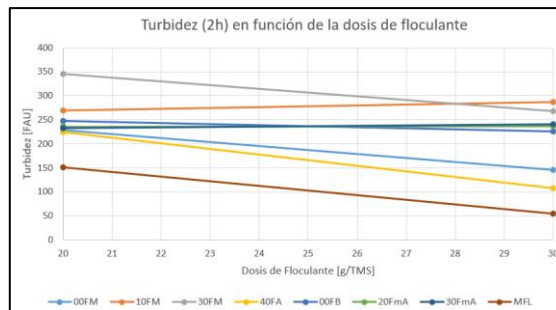


Figura 10.40. Turbidez del agua recuperada a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de ocho floculantes ensayados en función de su dosis de la muestra 8 de relave.

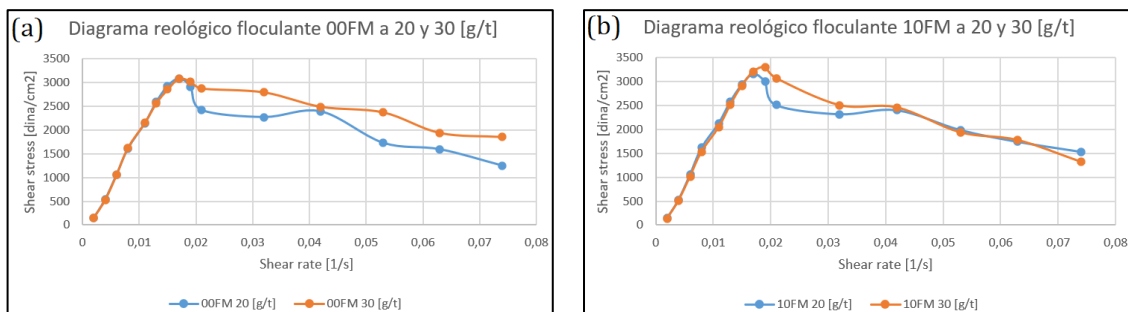


Figura 10.41. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el (a) floculante 00FM y (b) 10FM a 20 y 30 [g/t] de la muestra 8 de relave.

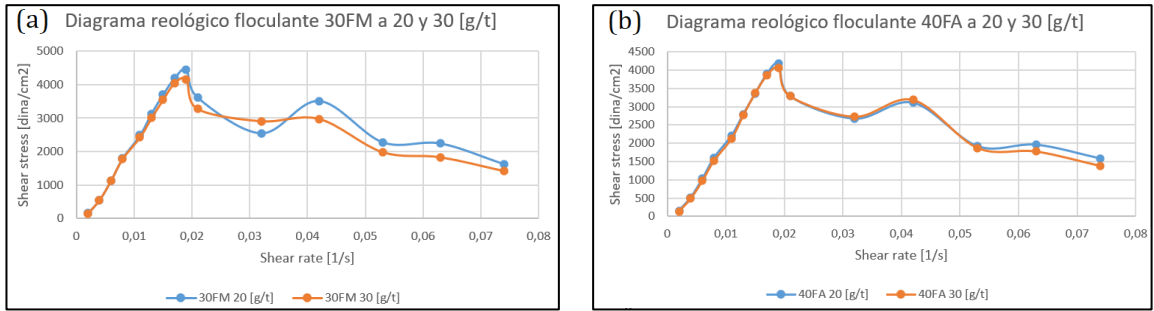


Figura 10.42. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el (a) flocculante 30FM y (b) 40FM a 20 y 30 [g/t] de la muestra 8 de relave.

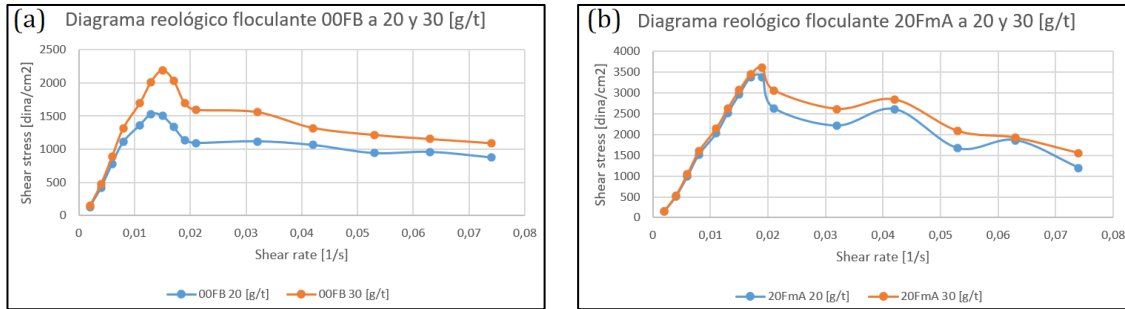


Figura 10.43. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el (a) flocculante 00FB y (b) 20FmA a 20 y 30 [g/t] de la muestra 8 de relave.

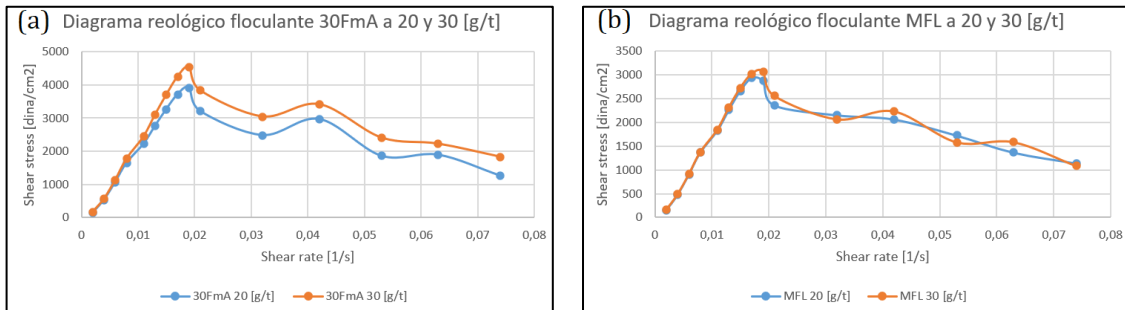


Figura 10.44. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el (a) flocculante 30FmA y (b) MFL a 20 y 30 [g/t] de la muestra 8 de relave.

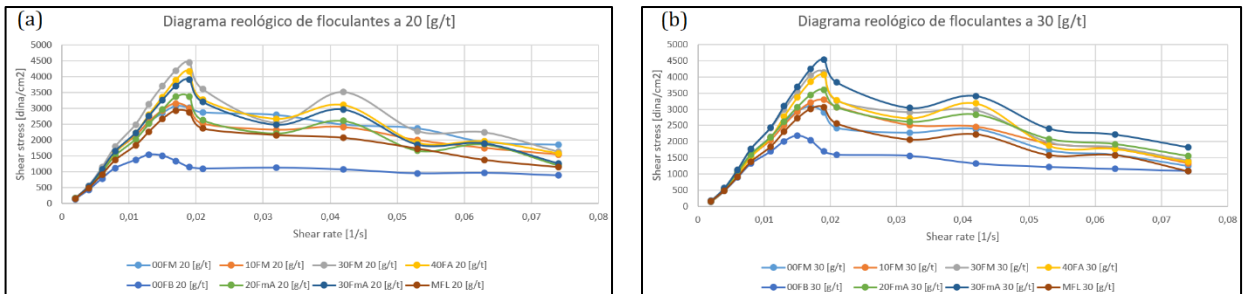


Figura 10.45. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplican los flocculantes 00FM, 10FM, 30FM, 40FA, 00FB, 20FmA, 30FmA y MFL a una dosis de (a) 20 [g/t] y (b) 30 [g/t] de la muestra 8 de relave.

Además, la Figura 10.39 y la Figura 10.40 muestran que a medida que aumenta la dosis de floculante aplicada:

- La turbidez tiende a ser menor.
- La velocidad de sedimentación se mantiene constante.
- La compactación puede aumentar, disminuir o mantenerse en función de cada floculante.

Respecto de las magnitudes de cada variable obtenida en comparación con el blanco se concluye que:

- Los floculantes 30FM, 40FA y 30FmA otorgan velocidades de sedimentación mayores, en cambio el resto de los floculantes suelen mantenerla.
- La mayoría de los floculantes suelen mantener la compactación.
- Ningún floculante otorga un agua recuperada menos turbia. Sin embargo, el floculante 40FA, en comparación con el resto de los floculantes ensayados, logra el agua recuperada menos turbia.
- Solo el floculante 00FB logra que propiedades reológicas del relave espesado sean menores, en cambio, el floculante 00FM y 10FM las suelen mantener o aumentar levemente y el resto de los floculantes tienden a aumentarlas.

Se concluye que los floculantes no iónicos de bajo peso molecular (00FB) tienen menores propiedades reológicas que todo el resto de los floculantes ensayados. Al mismo tiempo, los floculantes que tienen propiedades reológicas similares al floculante MFL son el 00FM y 10FM. Por el contrario, el resto de floculantes ensayados tienen mayores propiedades reológicas que el floculante MFL.

Es por lo anterior que se concluye que la dosis óptima es de 30 [g/t], debido a que se obtienen menores magnitudes en la variable de la turbidez, manteniendo constantes las variables de velocidad de sedimentación y compactación, además de tener propiedades reológicas similares al blanco a 20 y 30 [g/t]. Considerando todos los resultados obtenidos hasta el momento, se concluye que los floculantes que otorgan un mejor rendimiento al proceso de espesamiento son los floculantes 00FM y 10FM. Sin embargo, si bien estos floculantes mejoran la variable de la compactación, mantienen la velocidad de sedimentación y las propiedades reológicas, otorgan un agua recuperada más turbia, lo que es perjudicial para el proceso. Considerando que el floculante 40FA otorga el agua recuperada menos turbia, se ensayarán con mezclas de floculantes, específicamente las mezclas (00FM+40FA), (10FM+40FA) y (10FM+30FmA).

Es por lo anterior que las siguientes pruebas a realizar se realizarán a una dosis de 30 [g/t].

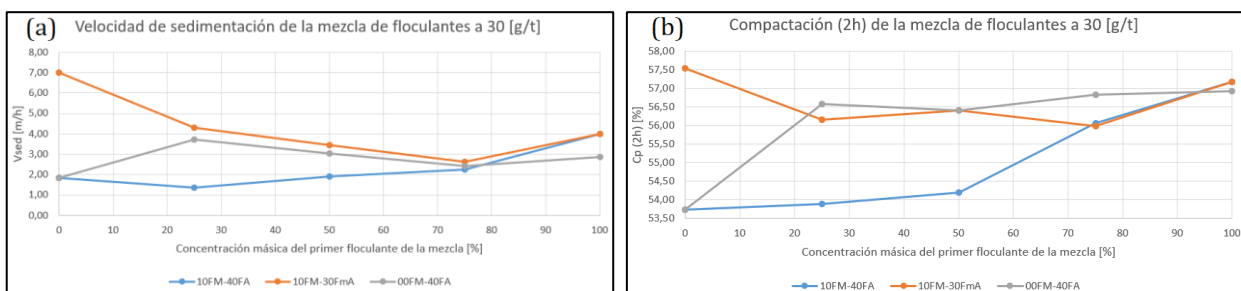


Figura 10.46. (a) Velocidad de sedimentación y (b) compactación del relave a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de las mezclas de floculantes (10FM+40FA), (10FM+30FmA) y (00FM+40FA) en función de la concentración máscica del primer floculante en la mezcla a 30 [g/t] de la muestra 9 de relave.

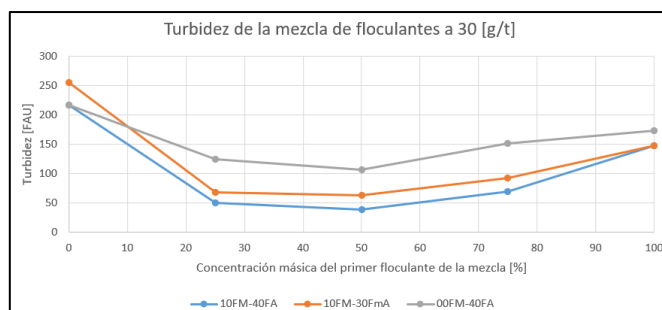


Figura 10.47. Turbidez del agua recuperada relave a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de las mezclas de floculantes (10FM+40FA), (10FM+30FmA) y (00FM+40FA) en función de la concentración máscica del primer floculante en la mezcla a 30 [g/t] de la muestra 9 de relave.

La Figura 10.46 (a) establece que la mezcla (10FM+40FA) tiene una velocidad de sedimentación menor que las mezclas (00FM+40FA) y (10FM+30FmA) que resultan tener velocidades de sedimentación comparables. En cuanto a la compactación, la Figura 10.46 (b) establece las mismas tendencias que la velocidad de sedimentación. Con respecto a la turbidez, la Figura 10.47 exhibe que la mezcla (10FM+30FmA) y (10FM+40FA) tienen magnitudes comparables, sin embargo, la mezcla (00FM+40FA) otorga un agua recuperada más turbia.

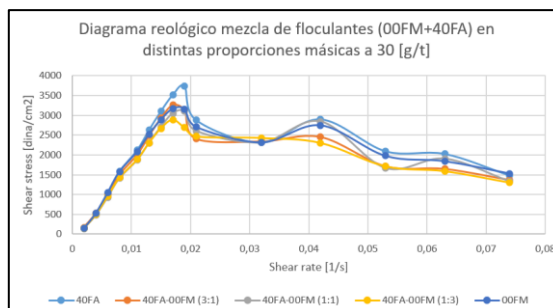


Figura 10.48. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el floculante 40FA y 00FM, y sus respectivas mezclas en una razón máscica de 3:1, 1:1 y 1:3 a 30 [g/t] de la muestra 9 de relave.

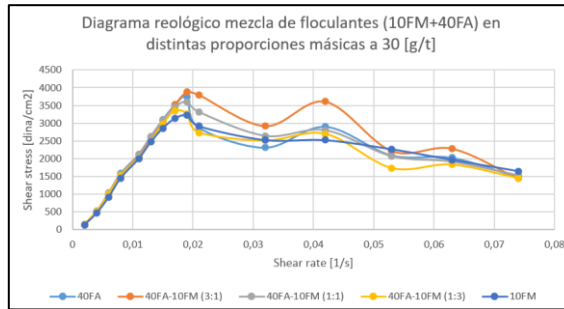


Figura 10.49. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el floclante 40FA y 10FM, y sus respectivas mezclas en una razón másica de 3:1, 1:1 y 1:3 a 30 [g/t] de la muestra 9 de relave.

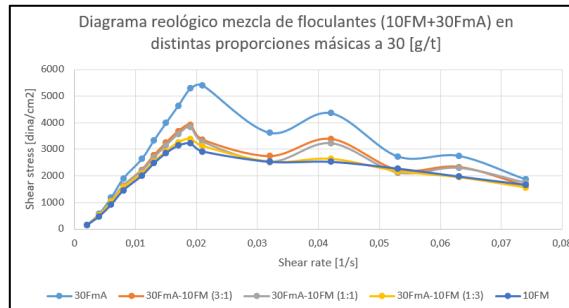


Figura 10.50. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el floclante 30FmA y 10FM, y sus respectivas mezclas en una razón másica de 3:1, 1:1 y 1:3 a 30 [g/t] de la muestra 9 de relave.

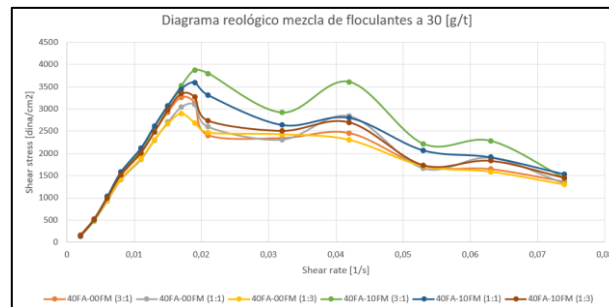


Figura 10.51. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplican las mezclas de floclantes (00FM+40FA) y (10FM+40FA) en razones másicas de 3:1, 1:1 y 1:3 a una dosis de 30 [g/t] de la muestra 9 de relave.

Los diagramas reológicos expuestos muestran que las propiedades reológicas van aumentando a medida que aumenta la concentración másica de los floclantes 40FA y 30FmA, lo que es consistente con las conclusiones obtenidas al momento. Además, se observa que las propiedades reológicas de las mezclas son comparables a los floclantes 10FM y 00FM, por lo que se concluye que las propiedades reológicas de las mezclas no varían significativamente respecto de las propiedades reológicas de los floclantes individuales.

Considerando todas las variables, se concluye que la mezcla (10FM+30FmA) otorga un mejor rendimiento que los floculantes individuales y que el resto de las mezclas, sin embargo, la aplicación de esta mezcla en la práctica no es viable puesto que la planta de preparación de floculante está diseñada para mezclar dos floculantes en polvo, por lo que no sería posible aplicar a nivel industrial esta mezcla. Es por lo anterior, que se concluye que la mezcla (00FM+40FA) mejora en mayor grado la eficacia del espesamiento, porque a pesar de que tenga una turbidez del agua recuperada mayor a la de la mezcla (10FM+40FA), logra mayores niveles de compactación.

Para efecto del presente trabajo, se continuará trabajando con el mejor floculante individual y la mejor mezcla de floculantes. De acuerdo con lo discutido hasta el momento, se concluye que el mejor floculante individual es el 10FM a una dosis de 30 [g/t], porque a pesar de que obtenga el agua recuperada más turbia, otorga propiedades reológicas al relave espesado levemente menores a las otorgadas por el floculante 00FM, además de tener compactaciones mayores. Además, se concluye que la mezcla que mejora el proceso del espesamiento en mayor grado es la mezcla (00FM+40FA).

Muestra 1			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	10,2	No	Tabla 10.36
Compactación [%]	1,7	Si	Tabla 10.37
Turbidez [%]	19,9	Si	Tabla 10.38
Viscosidad [%]	9,1	No	Tabla 10.39

Tabla 10.15. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] a la muestra 1 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Muestra 2			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	0,9	No	Tabla 10.40
Compactación [%]	2,6	Si	Tabla 10.41
Turbidez [%]	-39,1	Si	Tabla 10.42
Viscosidad [%]	15,7	No	Tabla 10.43

Tabla 10.16. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] a la muestra 2 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Muestra 1			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	65,0	Si	Tabla 10.60
Compactación [%]	0,6	No	Tabla 10.61
Turbidez [%]	-3,4	No	Tabla 10.62
Viscosidad [%]	17,4	Si	Tabla 10.63

Tabla 10.17. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica el floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] a la muestra 1 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Muestra 2			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	62,3	Si	Tabla 10.64
Compactación [%]	1,3	Si	Tabla 10.65
Turbidez [%]	-23,3	No	Tabla 10.66
Viscosidad [%]	19,7	No	Tabla 10.67

Tabla 10.18. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica el floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] a la muestra 2 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Muestra 2			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	11,3	Si	Tabla 10.88
Compactación [%]	1,2	Si	Tabla 10.89
Turbidez [%]	-9,1	Si	Tabla 10.90
Viscosidad [%]	-5,7	No	Tabla 10.91

Tabla 10.19. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] a la muestra 1 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Muestra 3			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	34,5	No	Tabla 10.92
Compactación [%]	0,4	No	Tabla 10.93
Turbidez [%]	-18,2	No	Tabla 10.94
Viscosidad [%]	6,7	No	Tabla 10.95

Tabla 10.20. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] a la muestra 2 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Anexo K.3. Ensayos con modificadores reológicos

En primer lugar, en la Tabla 10.8 se exhibe la caracterización de los modificadores reológicos ensayados.

Una vez determinada la mezcla de floculantes y el floculante individual que mejoran el proceso del espesamiento de relaves en mayor grado, se procede a ensayar los modificadores reológicos para estudiar su efecto en el rendimiento del espesamiento.

Uso de modificadores reológicos con el floculante 10FM

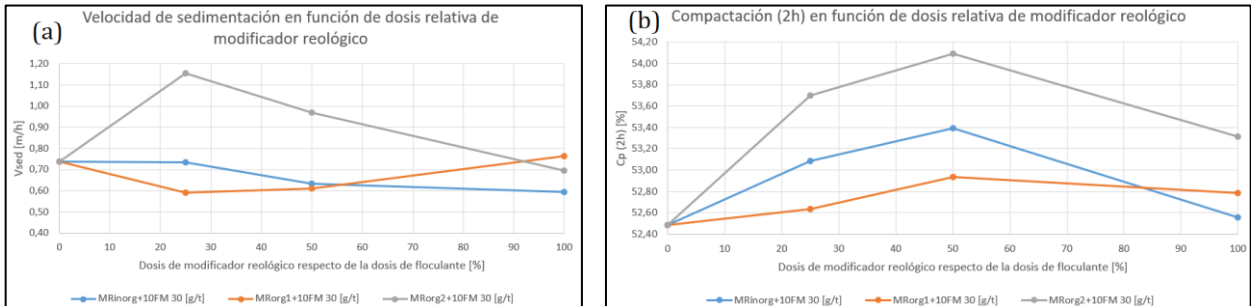


Figura 10.52. (a) Velocidad de sedimentación y (b) compactación del relave a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de los modificadores reológicos MRinorg, MRorg1 y MRorg2 en conjunto con el floculante 10FM (30 [g/t]) en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 10 de relave.

La Figura 10.52 (a) muestra que el modificador reológico MRinorg y MRorg1 no tienen efecto sobre la velocidad de sedimentación, en cambio, el modificador reológico MRorg2 a una dosis de 7,5 [g/t] aumenta la magnitud de la velocidad de sedimentación aproximadamente en un 70%, sin embargo, a medida que aumenta la dosis de MRorg2 hasta 30 [g/t], la velocidad de sedimentación disminuye hasta la misma magnitud a como si no se añadiera MRorg2. En cuanto a la compactación, la Figura 10.52 (b) muestra que la aplicación de los tres modificadores reológicos ensayados aumenta la compactación hasta un máximo a una dosis de 15 [g/t], en la que el modificador reológico MRorg2 otorga un mayor aumento en la magnitud de la compactación.

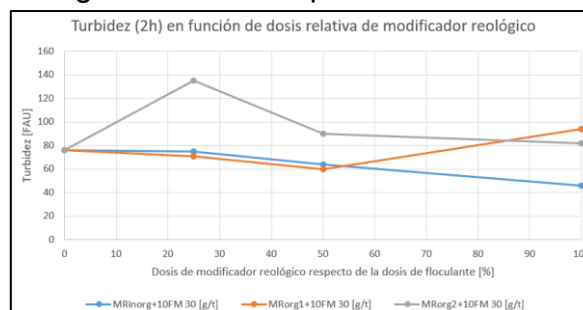


Figura 10.53. Turbidez del agua recuperada a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de los modificadores reológicos MRinorg, MRorg1 y MRorg2

en conjunto con el floculante 10FM (30 [g/t]) en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 10 de relave.

La Figura 10.53 exhibe que la incorporación del modificador reológico MRorg2 tiende a aumentar la turbidez en un 75% aproximadamente cuando se añade a una dosis de 7,5 [g/t], sin embargo, a medida que aumenta su dosis hasta 30 [g/t] disminuye hasta la misma magnitud a como si no se añadiera MRorg2. Por otro lado, la adición de MRorg1 y MRinorg tienden a mantener la turbidez del agua recuperada.

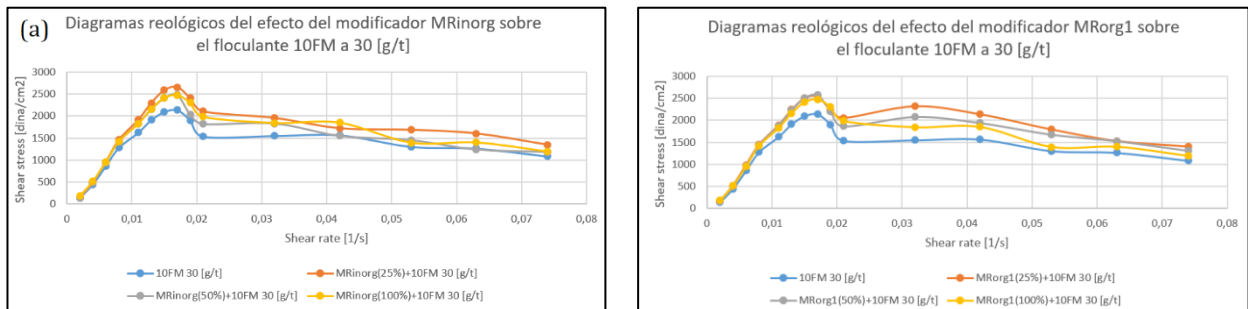


Figura 10.54. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el (a) modificador reológico MRinorg y (b) MRorg1 en una dosis de 25%, 50% y 100% respecto de la dosis de floculante 10FM que es de 30 [g/t] de la muestra 10 de relave.

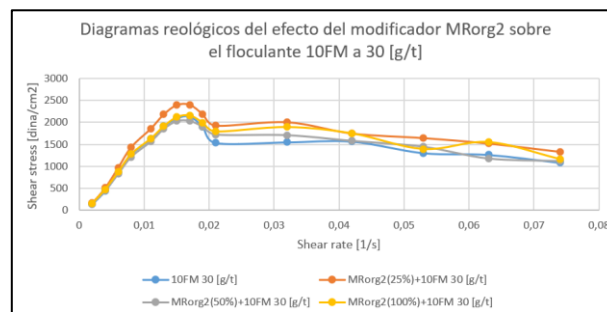


Figura 10.55. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el modificador reológico MRorg2 en una dosis de 25%, 50% y 100% respecto de la dosis de floculante 10FM que es de 30 [g/t] de la muestra 10 de relave.

La Figura 10.54 y 10.55 muestran que la adición de los tres modificadores reológicos ensayados aumenta levemente las propiedades reológicas, lo que es desfavorable para el proceso.

A modo de conclusión, el modificador reológico MRorg2 mejora las variables de velocidad de sedimentación y compactación, sin embargo, desfavorece las variables de turbidez y las propiedades reológicas. En cuanto a la adición de MRorg1 y MRinorg mantienen constante la velocidad de sedimentación y la turbidez, además de aumentar levemente la compactación y las propiedades reológicas.

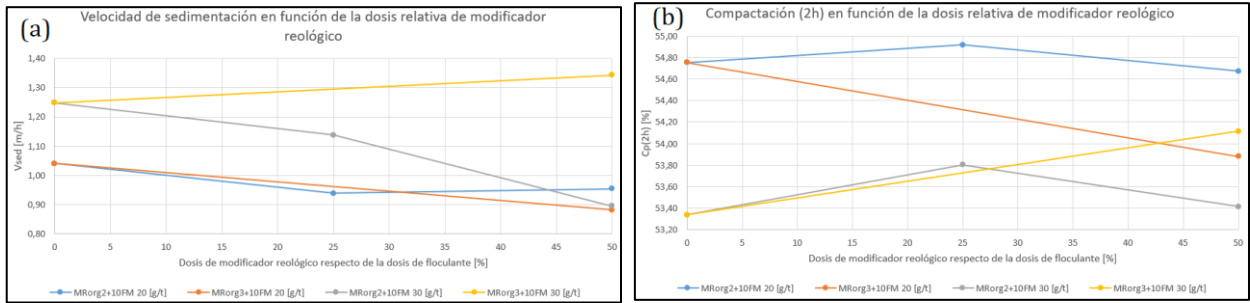


Figura 10.56. (a) Velocidad de sedimentación y (b) compactación del relave a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de los modificadores reológicos MRorg2 y MRorg3 en conjunto con el floculante 10FM a una dosis de 20 y 30 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 11 de relave.

La Figura 10.56 (a) muestra que la aplicación del modificador reológico MRorg2 tiende a disminuir la velocidad de sedimentación, en cambio MRorg3 tiende a mantenerla. Respecto de la compactación, la Figura 10.56 (b) exhibe que el modificador reológico MRorg2 tiende a mantener la compactación y el MRorg3 tiende a aumentarla cuando se trabaja con una dosis de floculante de 30 [g/t] y a disminuirla cuando se trabaja a una dosis de 20 [g/t].

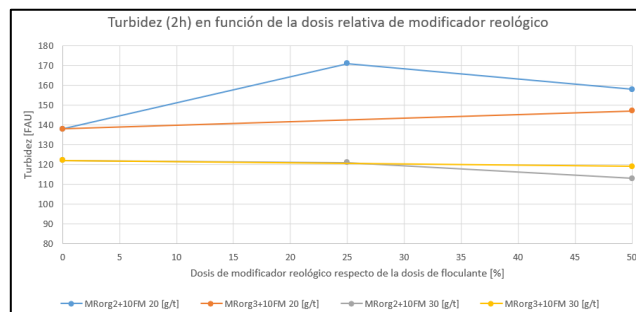


Figura 10.57. Turbidez del agua recuperada a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de los modificadores reológicos MRorg2 y MRorg3 en conjunto con el floculante 10FM a una dosis de 20 y 30 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 11 de relave.

La Figura 10.57 muestra que el modificador reológico MRorg2 aumenta la turbidez en un 20% aproximadamente a una dosis de 5 [g/t] cuando se agrega el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t], sin embargo, la turbidez del agua recuperada se mantiene cuando se incorpora el floculante 10FM a 30 [g/t]. En cambio, la aplicación del modificador reológico MRorg3 en un rango de dosis de 5 a 15 [g/t] mantiene la turbidez en conjunto con la aplicación del floculante 10FM.

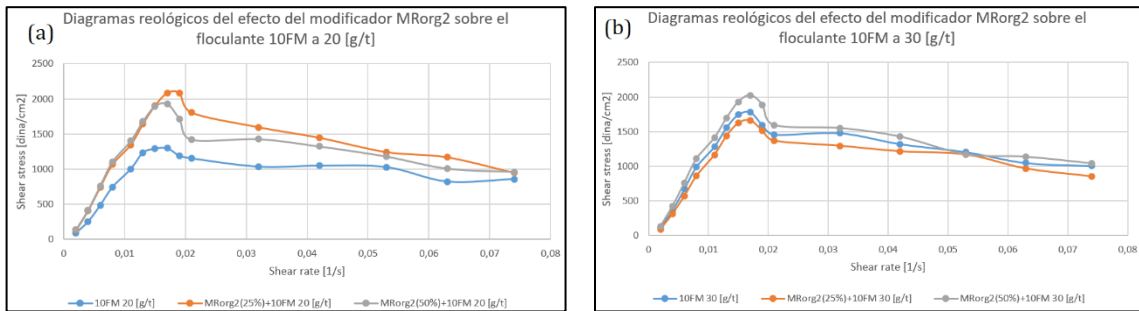


Figura 10.58. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el modificador reológico MRorg2 en una dosis de 25% y 50% respecto de la dosis de floculante 10FM a una dosis de (a) 20 [g/t] y de (b) 30 [g/t] de la muestra 11 de relave.

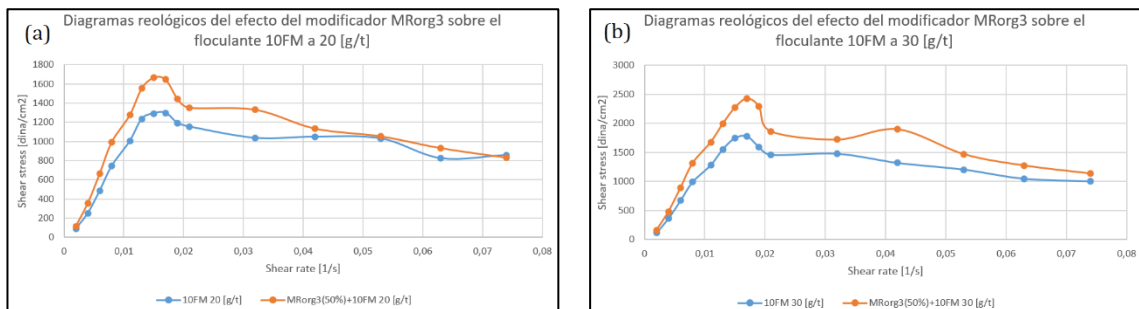


Figura 10.59. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el modificador reológico MRorg3 en una dosis de 50% respecto de la dosis de floculante 10FM a una dosis de (a) 20 [g/t] y de (b) 30 [g/t] de la muestra 11 de relave.

Con respecto a las propiedades reológicas del relave espesado, la Figura 10.58 indica que el modificador reológico las aumenta cuando se trabaja con una dosis de floculante 10FM de 20 [g/t], en cambio las suele mantener cuando se trabaja a una dosis de 30 [g/t]. Por otra parte, la Figura 10.59 expone que la adición del modificador reológico MRorg3 aumenta las propiedades reológicas en comparación a cuando no se añade el modificador reológico.

A modo de conclusión, el modificador reológico MRorg3 no realiza cambios significativos a las variables estudiadas respecto de la aplicación del floculante 10FM. Por otro lado, los modificadores reológicos MRinorg y MRorg1 tienden a aumentar levemente la compactación y las propiedades reológicas, manteniendo la velocidad de sedimentación y la turbidez respecto de la aplicación del floculante 10FM.

Respecto de la consistencia de los resultados entre las muestras 10 y 11, se concluye que la adición del modificador reológico MRorg2, en comparación con la adición única del floculante 10FM:

- Puede disminuir, mantener o aumentar la velocidad de sedimentación.
- Puede aumentar o mantener la compactación.
- Aumenta la turbidez.
- Puede mantener o aumentar las propiedades reológicas.

Se concluye que ningún modificador reológico tiende a disminuir la turbidez.

Se concluye que el modificador reológico que mejora en mayor grado el proceso de espesamiento en conjunto con el floculante 10FM a 20 y 30 [g/t] es el MRorg2.

Muestra 4			
Variación porcentual de cada variable cuando se añade el modificador reológico MRorg2 y el floculante 10FM a una dosis de 5 y 20 [g/t], respectivamente, respecto del efecto de MRorg2 con 10FM a una dosis de 10 y 30 [g/t], respectivamente.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-16,8	No	Tabla 10.32
Compactación [%]	-0,7	No	Tabla 10.33
Turbidez [%]	3,0	No	Tabla 10.34
Viscosidad [%]	-4,7	No	Tabla 10.35

Tabla 10.21. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] a la muestra 4 en comparación cuando se adiciona MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación al segundo caso.

Muestra 4			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el modificador reológico MRorg2 y el floculante 10FM a una dosis de 5 y 20 [g/t], respectivamente, respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	306	Si	Tabla 10.44
Compactación [%]	2,2	Si	Tabla 10.45
Turbidez [%]	-13,3	Si	Tabla 10.46
Viscosidad [%]	131,9	Si	Tabla 10.47

Tabla 10.22. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] a la muestra 4 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Muestra 4			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el modificador reológico MRorg2 y el floculante 10FM a una dosis de 10 y 20 [g/t], respectivamente, respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	238	Si	Tabla 10.48
Compactación [%]	1,5	Si	Tabla 10.49
Turbidez [%]	-10,7	Si	Tabla 10.50
Viscosidad [%]	121	Si	Tabla 10.51

Tabla 10.23. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] a la muestra 4 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Muestra 1			
Variación porcentual de cada variable cuando se añade el modificador reológico MRorg2 y el floculante 10FM a una dosis de 15 y 30 [g/t], respectivamente, respecto del efecto del floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t].		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	9,8	No	Tabla 10.52
Compactación [%]	0,3	No	Tabla 10.53
Turbidez [%]	14,6	Si	Tabla 10.54
Viscosidad [%]	-7,5	No	Tabla 10.55

Tabla 10.24. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] a la muestra 1 en comparación cuando se adiciona únicamente el floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación cuando no se añade modificador reológico.

Muestra 2			
Variación porcentual de cada variable cuando se añade el modificador reológico MRorg2 y el floculante 10FM a una dosis de 15 y 30 [g/t], respectivamente, respecto del efecto del floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t].		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-1,0	No	Tabla 10.56
Compactación [%]	-0,9	No	Tabla 10.57
Turbidez [%]	38,5	Si	Tabla 10.58
Viscosidad [%]	-3,6%	No	Tabla 10.59

Tabla 10.25. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] a la muestra 2 en comparación cuando se adiciona únicamente el floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación cuando no se añade modificador reológico.

Muestra 1			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el modificador reológico MRorg2 y el floculante 10FM a una dosis de 15 y 30 [g/t], respectivamente, respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	81,2	Si	Tabla 10.68
Compactación [%]	0,9	No	Tabla 10.69
Turbidez [%]	10,7	Si	Tabla 10.70
Viscosidad [%]	8,4	No	Tabla 10.71

Tabla 10.26. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] a la muestra 1 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Muestra 2			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el modificador reológico MRorg2 y el floculante 10FM a una dosis de 15 y 30 [g/t], respectivamente, respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	60,8	Si	Tabla 10.72
Compactación [%]	0,4	No	Tabla 10.73
Turbidez [%]	6,3	No	Tabla 10.74
Viscosidad [%]	15,4	No	Tabla 10.75

Tabla 10.27. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] a la muestra 2 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Muestra 3			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el modificador reológico MRorg2 y el floculante 10FM a una dosis de 15 y 30 [g/t], respectivamente, respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	50,3	Si	Tabla 10.76
Compactación [%]	0,7	No	Tabla 10.77
Turbidez [%]	43,3	Si	Tabla 10.78
Viscosidad [%]	14,7	No	Tabla 10.79

Tabla 10.28. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] a la muestra 3 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Muestra 4			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el modificador reológico MRorg2 y el floculante 10FM a una dosis de 15 y 30 [g/t], respectivamente, respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	338	Si	Tabla 10.80
Compactación [%]	-0,7	No	Tabla 10.81
Turbidez [%]	6	No	Tabla 10.82
Viscosidad [%]	114	Si	Tabla 10.83

Tabla 10.29. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] a la muestra 4 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Uso de modificadores reológicos con la mezcla de floculantes (00FM+40FA) 20 [g/t]

Muestra 3			
Variación porcentual de cada variable cuando se añade el modificador reológico MRinorg y la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 2,5 y 20 [g/t], respectivamente, respecto del efecto de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-41,8	Si	Tabla 10.84
Compactación [%]	0,2	No	Tabla 10.85
Turbidez [%]	-35,1	No	Tabla 10.86
Viscosidad [%]	43,9	Si	Tabla 10.87

Tabla 10.30. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] a la muestra 3 en comparación cuando se adiciona únicamente la mezcla (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación cuando no se añade modificador reológico.

Muestra 3			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el modificador reológico MRinorg y la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 2,5 y 20 [g/t], respectivamente, respecto del efecto del blanco.		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-21,7	No	Tabla 10.96
Compactación [%]	0,6	No	Tabla 10.97
Turbidez [%]	-46,9	Si	Tabla 10.98
Viscosidad [%]	53,9	Si	Tabla 10.99

Tabla 10.31. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica la combinación de productos MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) [g/t] a la muestra 3 en comparación cuando se adiciona el blanco indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95% en comparación con el blanco.

Uso de modificadores reológicos con la mezcla de floculantes (00FM+40FA) 30 [g/t]

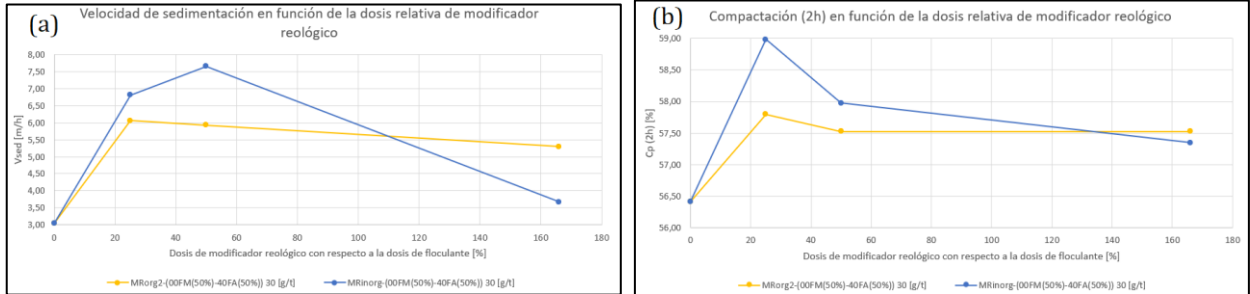


Figura 10.60. (a) Velocidad de sedimentación y (b) compactación del relave a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de los modificadores reológicos MRorg2 y MRinorg en conjunto con la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en una razón másica de 1:1 a una dosis de 30 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 12 de relave.

La Figura 10.60 (a) muestra que el modificador reológico MRinorg aumenta la velocidad de sedimentación hasta en un 150% respecto de la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en una razón másica de 1:1 en una dosis de 30 [g/t], en cambio el modificador reológico MRorg2 la aumenta hasta un 100%, aproximadamente. En ambos casos se observa que la velocidad de sedimentación llega a un máximo y luego comienza a disminuir en función de la dosis de modificador reológico. En cuando a la compactación del relave, la Figura 10.60 (b) muestra las mismas tendencias que se presentan en la variable de la velocidad de sedimentación, en la que el modificador reológico aumenta la compactación hasta en un 4,4% respecto de la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en una razón másica de 1:1 en una dosis de 30 [g/t], en cambio el modificador reológico MRorg2 la mejora hasta un 2,3%, aproximadamente.

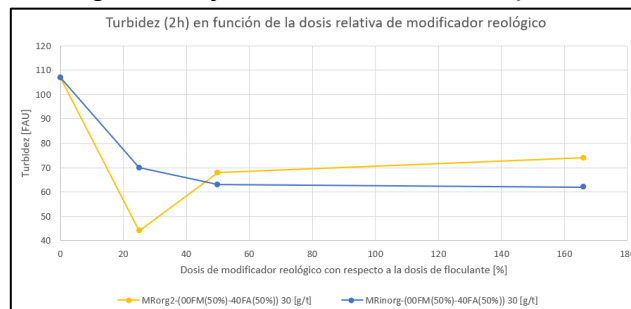


Figura 10.61. Turbidez del agua recuperada a las dos horas de haber iniciado la sedimentación por la acción de los modificadores reológicos MRorg2 y MRinorg en conjunto con la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en una razón másica de 1:1 a una dosis de 30 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 12 de relave.

La Figura 10.61 muestra que el modificador reológico MRinorg disminuye la turbidez hasta un 55% del valor obtenido con la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en una razón másica de 1:1 en una dosis de 30 [g/t], en cambio el modificador reológico MRorg2 la disminuye hasta un 41%, aproximadamente

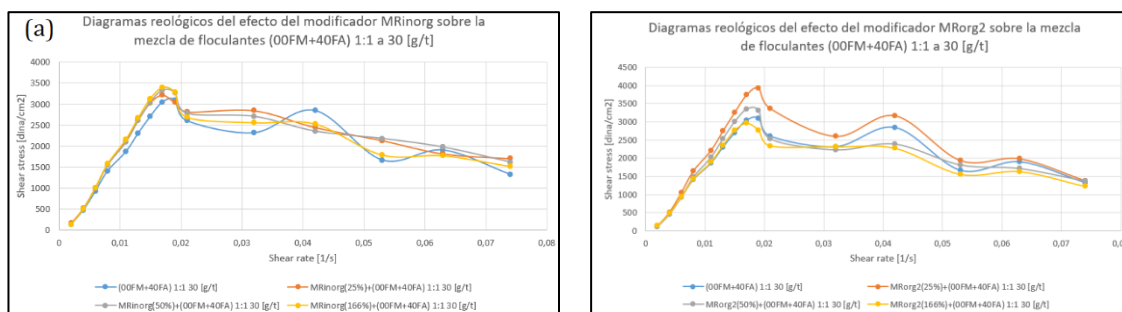


Figura 10.62. Diagrama reológico del relave espesado cuando se aplica el modificador reológico (a) MRinorg y (b) MRorg2 en una dosis de 25%, 50% y 166% respecto de la dosis de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en una razón másica 1:1 a una dosis de 30 [g/t] de la muestra 12 de relave.

En cuanto a las propiedades reológicas, la Figura 10.62 muestra que la adición de los modificadores reológicos MRinorg y MRorg2 tienden a mantenerlas en comparación la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en una razón másica de 1:1 en una dosis de 30 [g/t].

En base a los resultados exhibidos respecto de las cuatro variables estudiadas, se tiene que el modificador reológico MRinorg mejora en mayor grado la eficacia del espesamiento que el modificador reológico MRorg2 en conjunto con la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en una razón másica de 1:1 en una dosis de 30 [g/t].

En consecuencia, las duplas de productos a experimentar en las pruebas de reproducibilidad serán:

1. El modificador reológico MRorg2 con el floculante 10FM.
2. El modificador reológico MRinorg con la mezcla de floculantes (00FM+40FA).

Anexo L. Curvas reológicas y regímenes elásticos

Anexo L.1. Curvas reológicas del relave espesado de la muestra 1

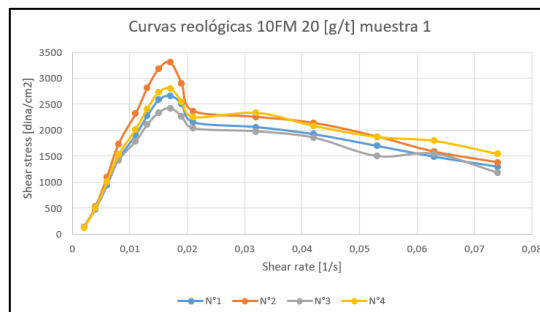


Figura 10.63. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2, 3 y 4 cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] en la muestra 1 de relave.

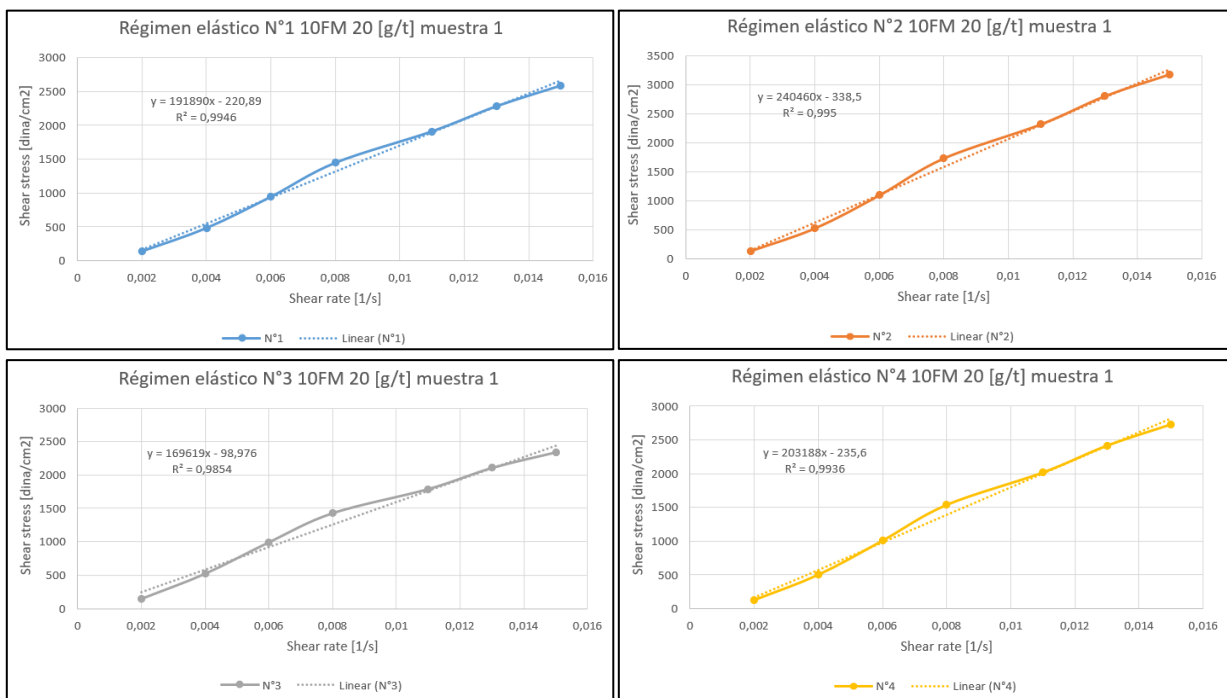


Figura 10.64. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2, 3 y 4 cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] en la muestra 1 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

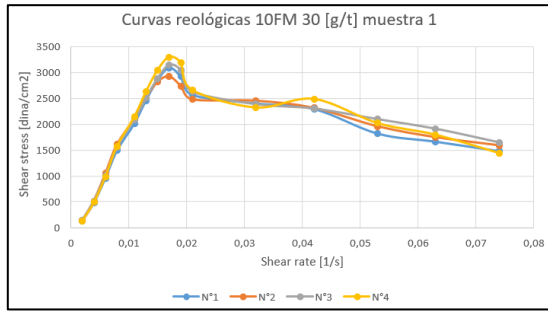


Figura 10.65. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2, 3 y 4 cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] en la muestra 1 de relave.

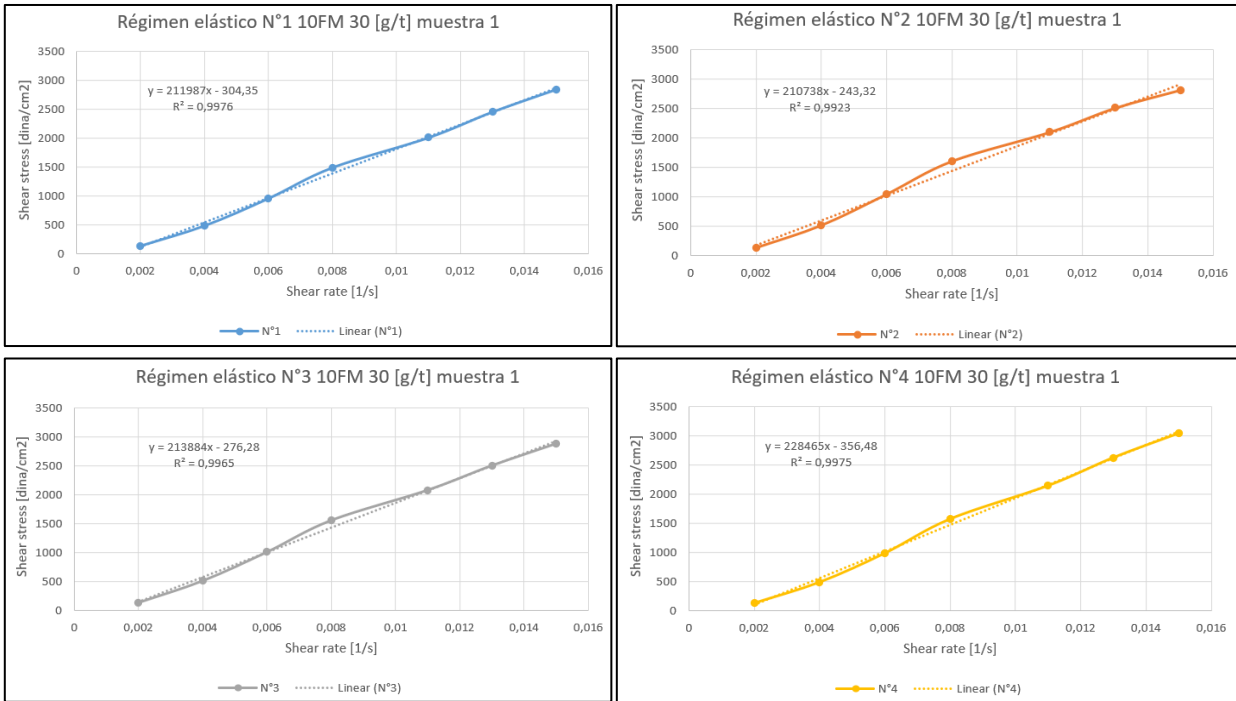


Figura 10.66. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2, 3 y 4 cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] en la muestra 1 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

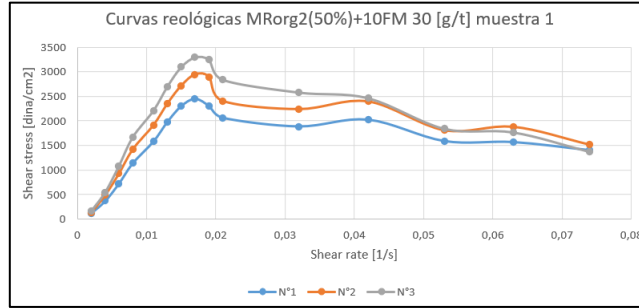


Figura 10.67. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona MRorg(50%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 1 de relave.

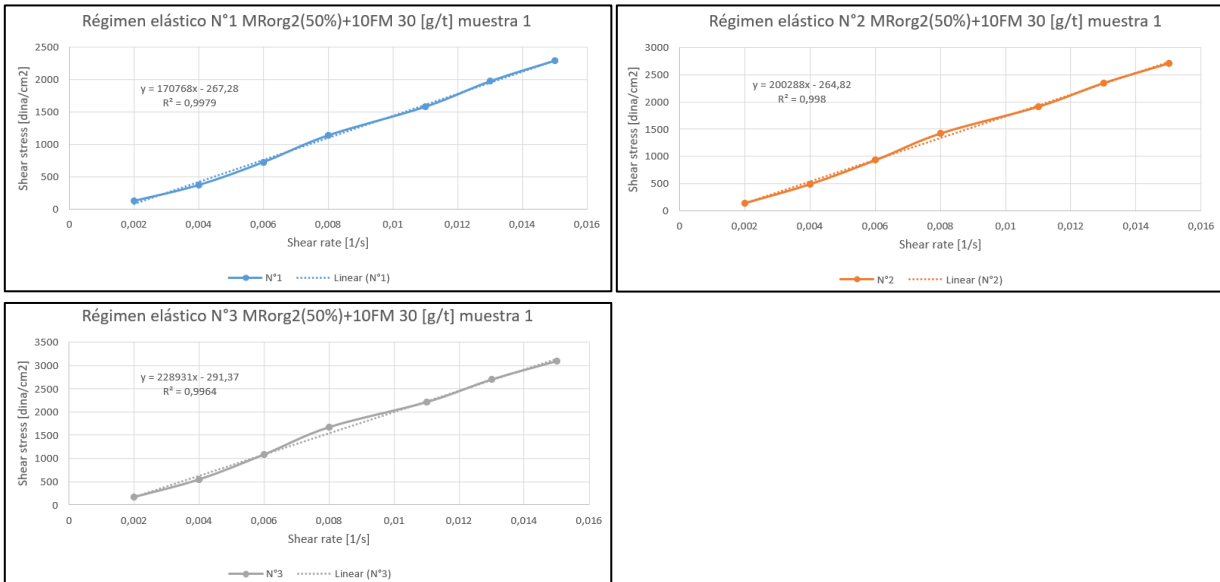


Figura 10.68. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona MRorg(50%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 1 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

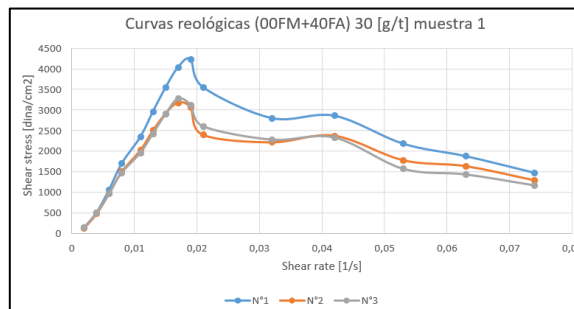


Figura 10.69. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en una dosis de 30 [g/t] en la muestra 1 de relave.

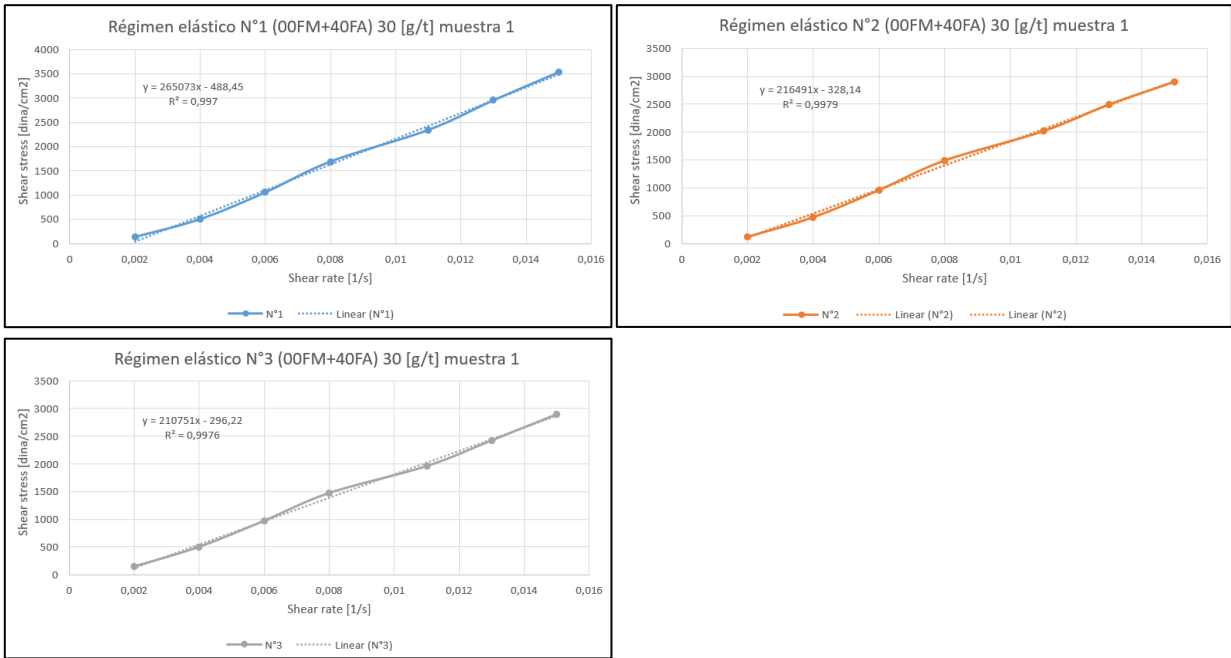


Figura 10.70. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en una dosis de 30 [g/t] en la muestra 1 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

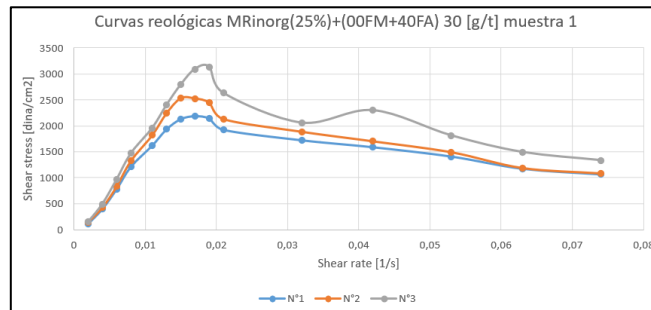


Figura 10.71. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] en la muestra 1 de relave.

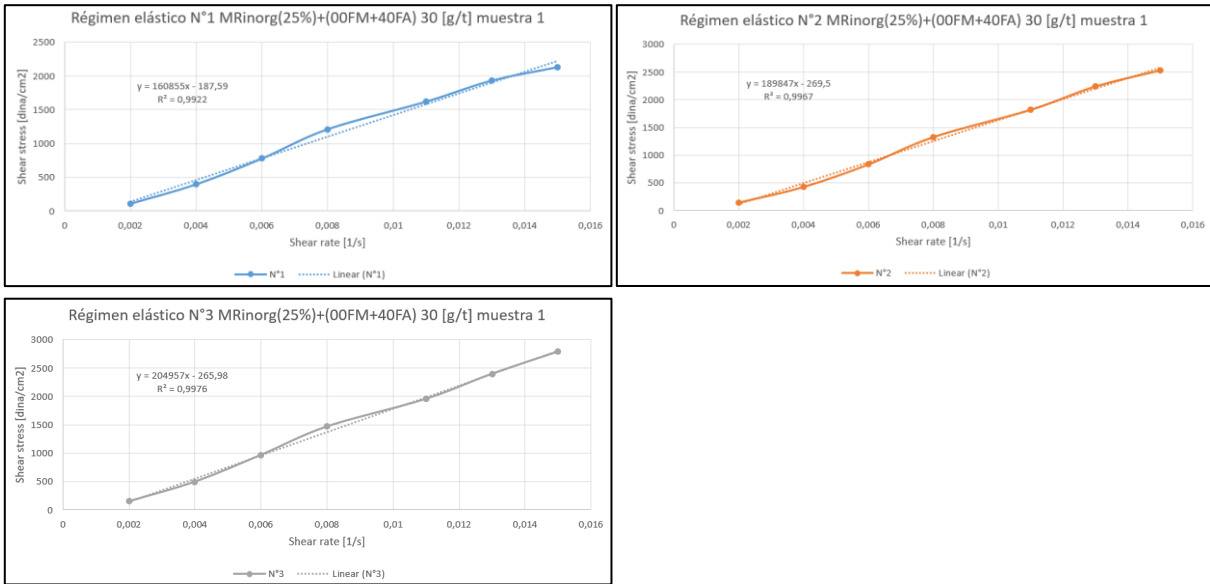


Figura 10.72. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona MRInorg(25%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] en la muestra 1 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

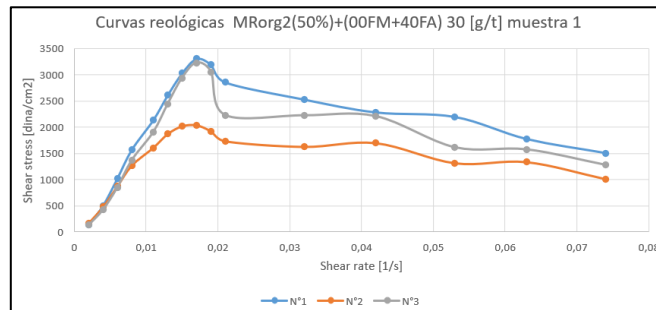


Figura 10.73. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona MRorg2(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] en la muestra 1 de relave.

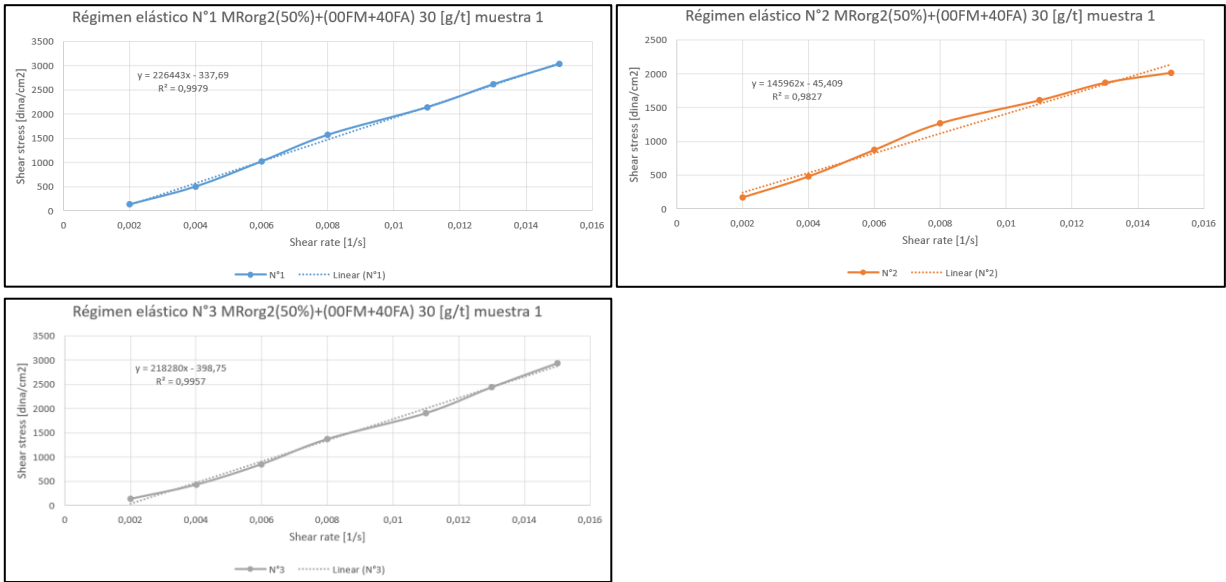


Figura 10.74. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona MRorg(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] en la muestra 1 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

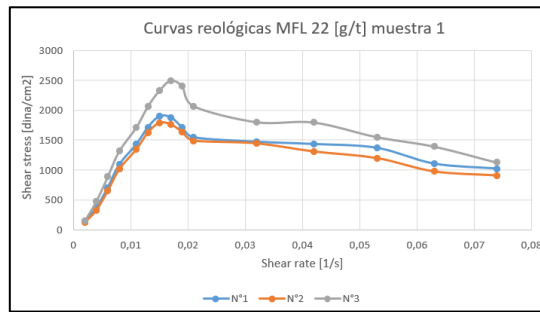


Figura 10.75. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona el floculante MFL a una dosis de 22 [g/t] en la muestra 1 de relave.

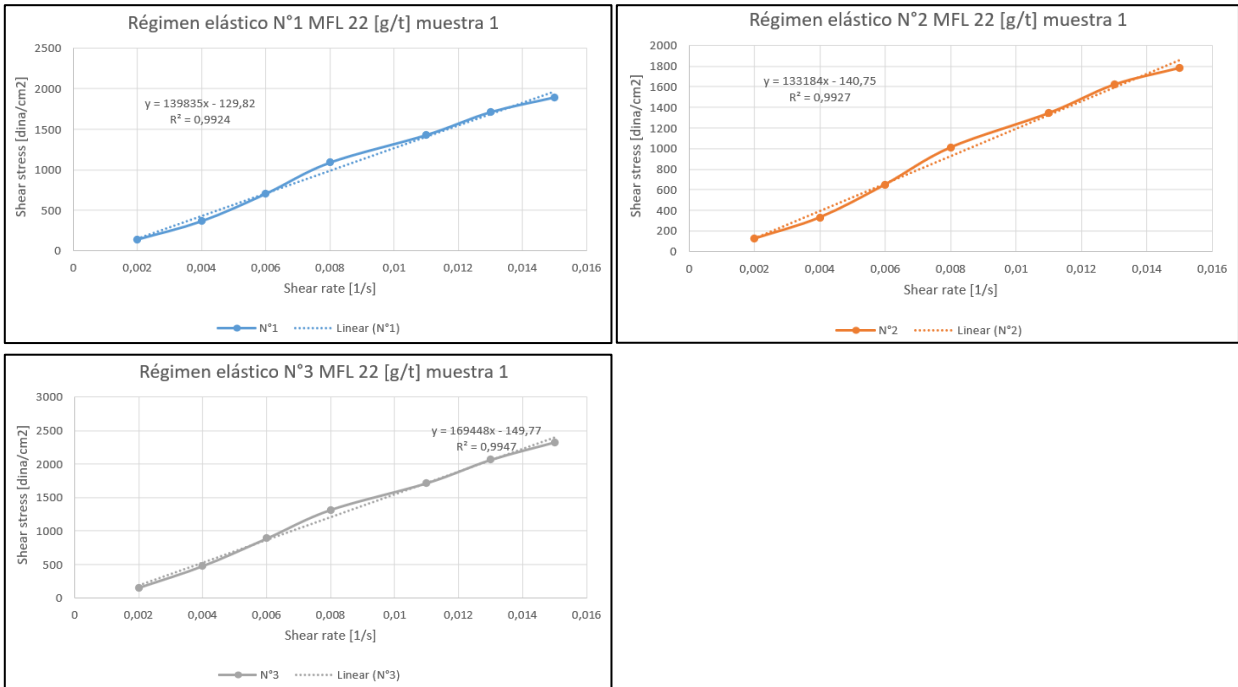


Figura 10.76. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona el floculante MFL a una dosis de 22 [g/t] en la muestra 1 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

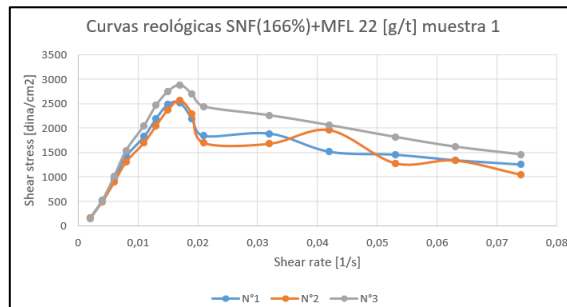


Figura 10.77. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona SNF(166%)+MFL 22 [g/t] en la muestra 1 de relave.

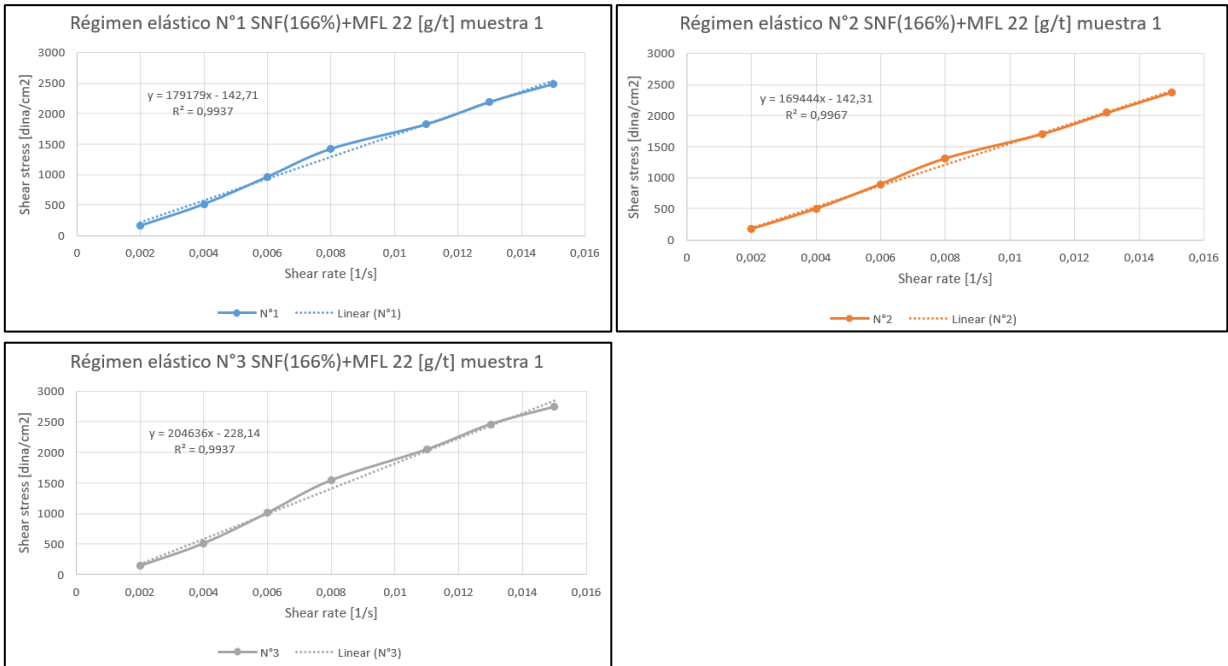


Figura 10.78. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona SNF(166%)+MFL 22 [g/t] en la muestra 1 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

Anexo L.2. Curvas reológicas del relave espesado de la muestra 2

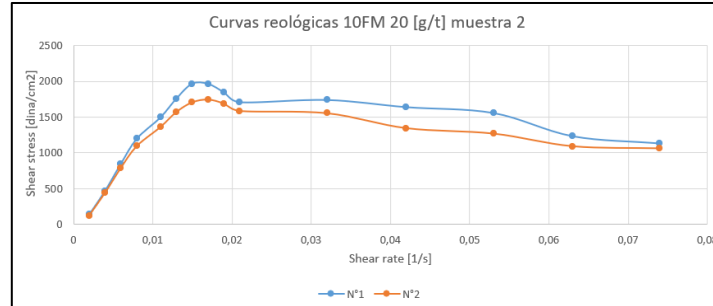


Figura 10.79. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] en la muestra 2 de relave.

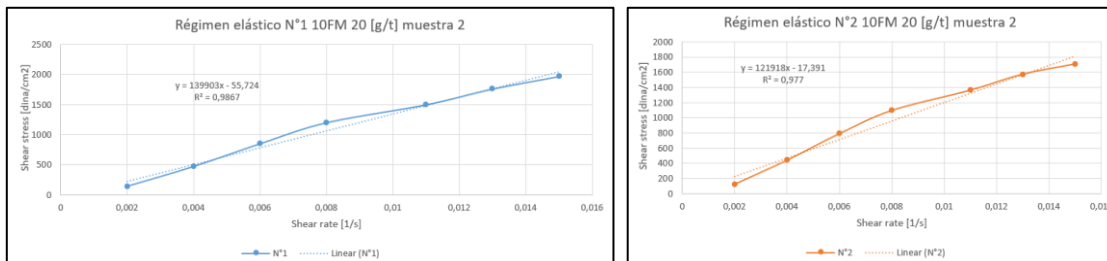


Figura 10.80. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] en la muestra 2 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

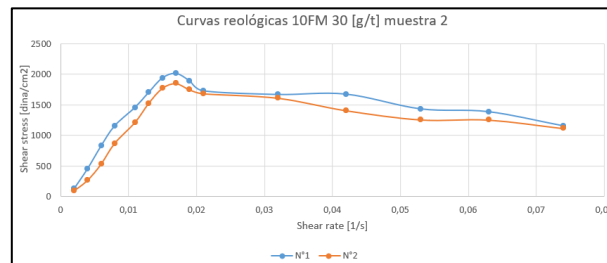


Figura 10.81. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] en la muestra 2 de relave.

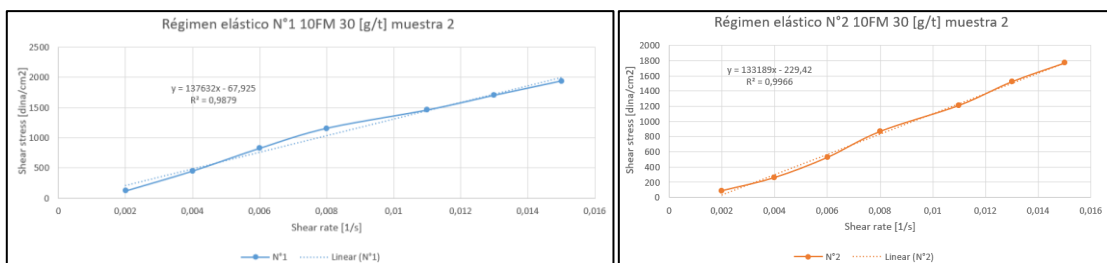


Figura 10.82. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 30 [g/t] en la muestra 2 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

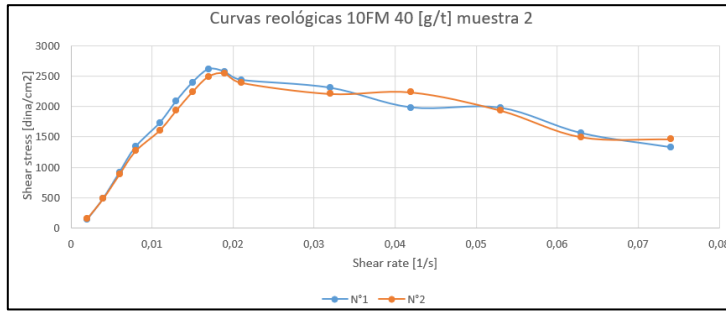


Figura 10.83. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 40 [g/t] en la muestra 2 de relave.

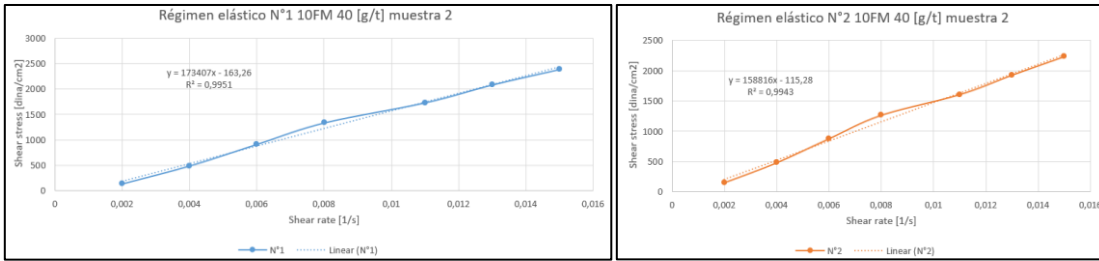


Figura 10.84. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 40 [g/t] en la muestra 2 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

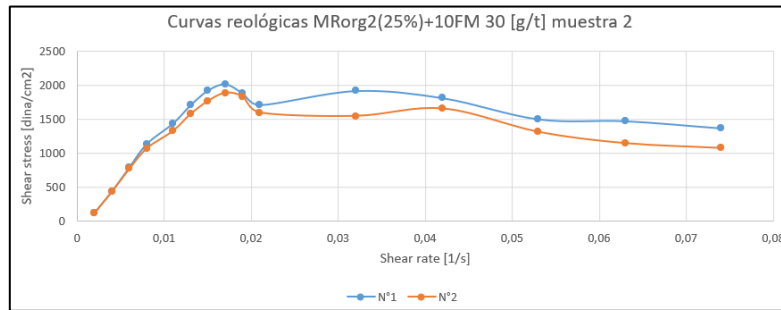


Figura 10.85. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 2 de relave.

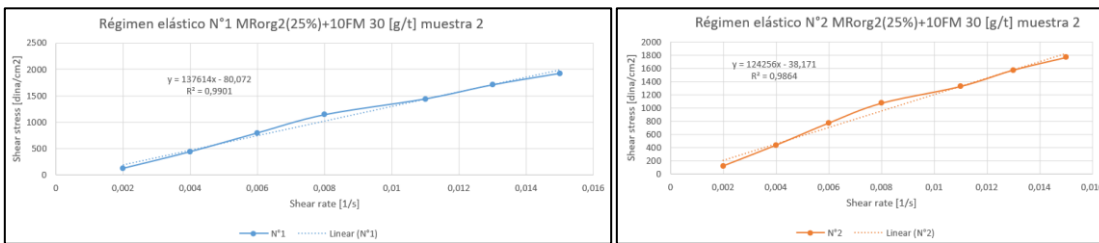


Figura 10.86. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 2 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

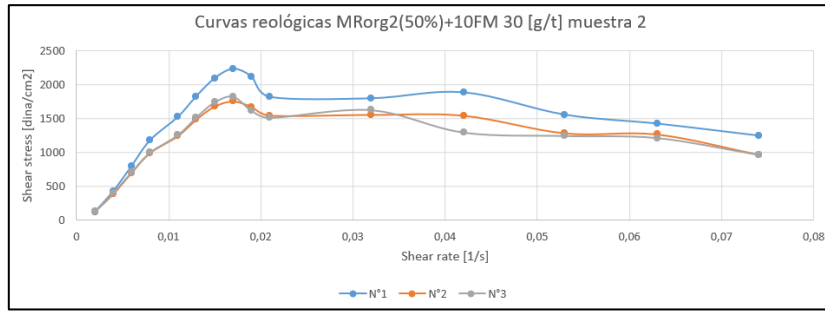


Figura 10.87. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 2 de relave.

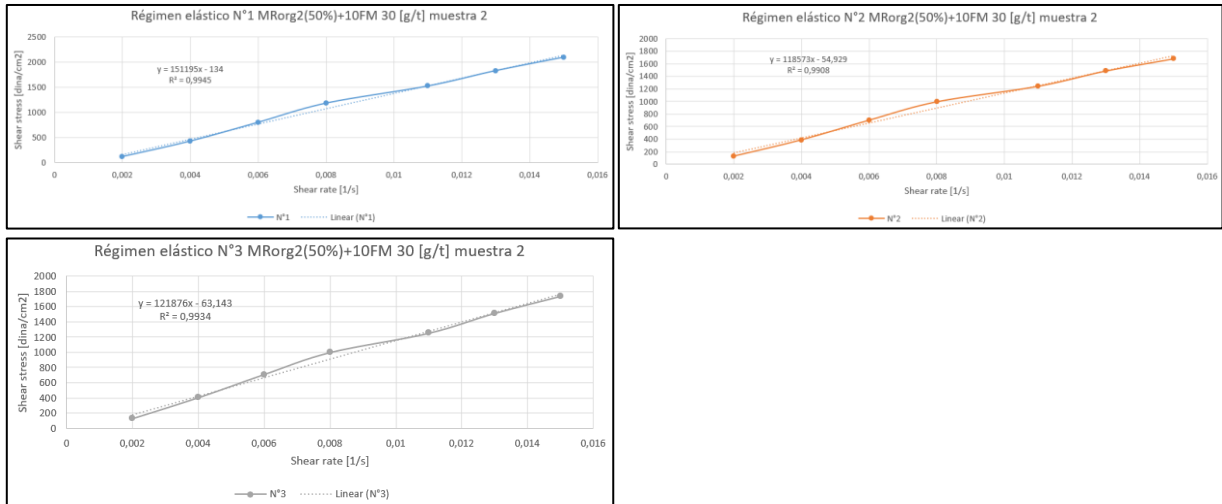


Figura 10.88. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 2 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

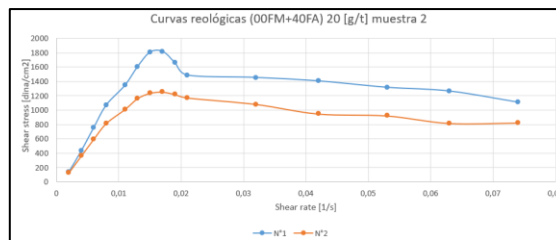


Figura 10.89. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] en la muestra 2 de relave.

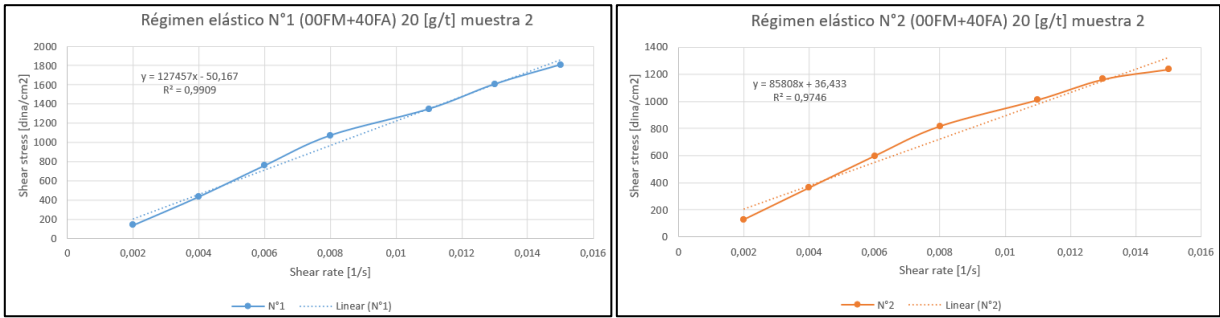


Figura 10.90. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] en la muestra 2 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

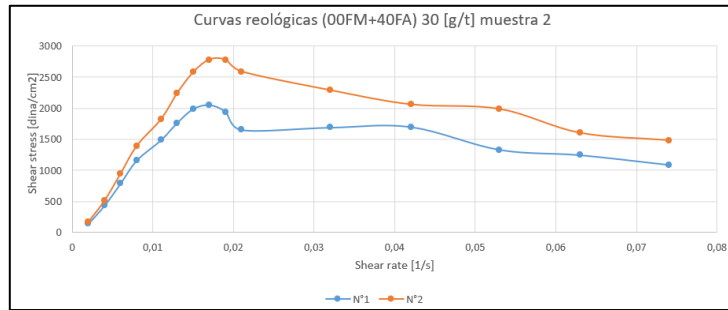


Figura 10.91. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 30 [g/t] en la muestra 2 de relave.

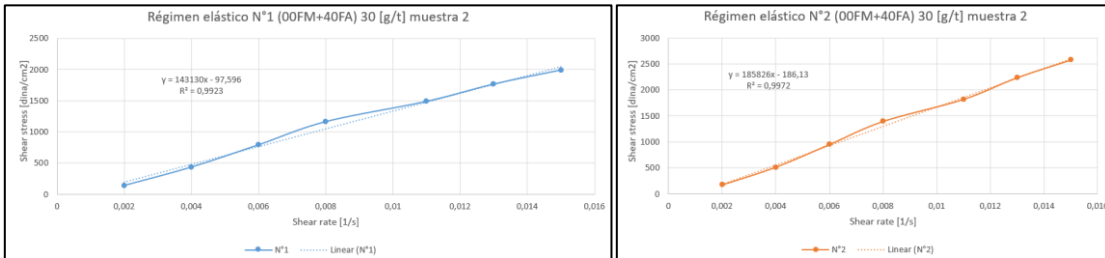


Figura 10.92. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 30 [g/t] en la muestra 2 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

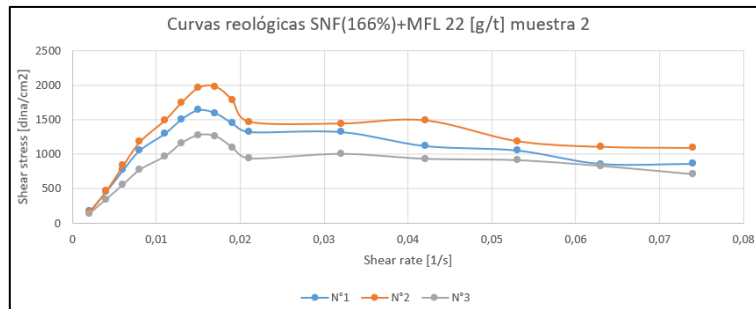


Figura 10.93. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona SNF(166%)+MFL 22 [g/t] en la muestra 2 de relave.

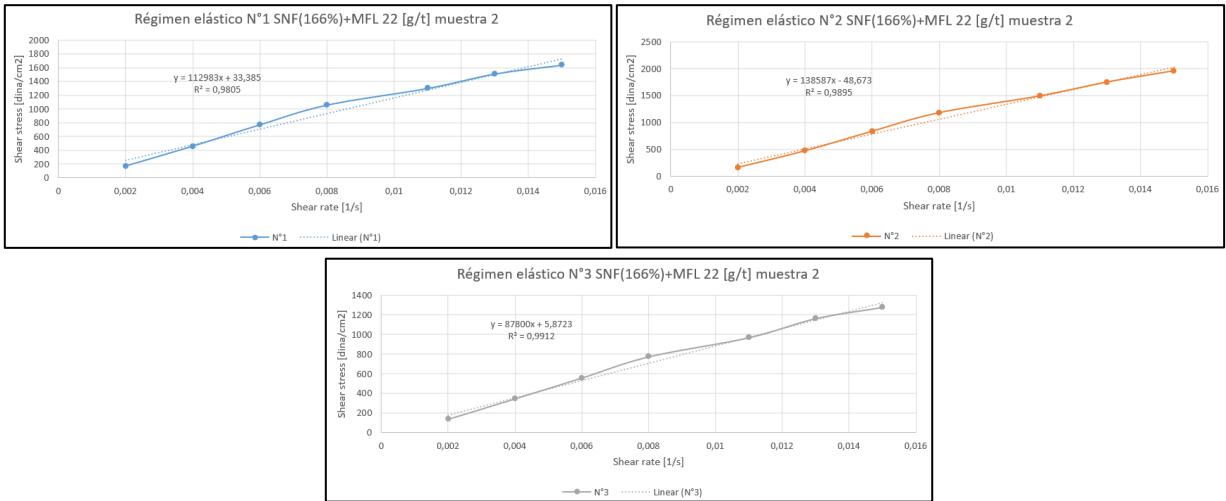


Figura 10.94. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona SNF(166%)+MFL 22 [g/t] en la muestra 2 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

Anexo L.3. Curvas reológicas del relave espesado de la muestra 3

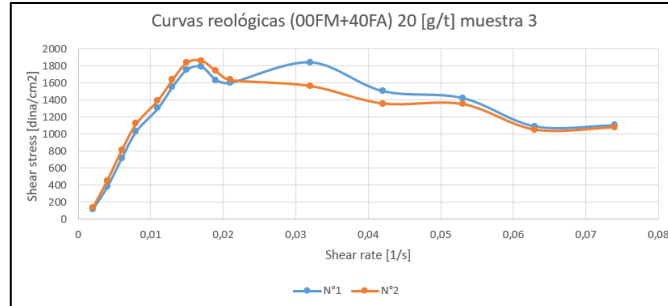


Figura 10.95. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] en la muestra 3 de relave.

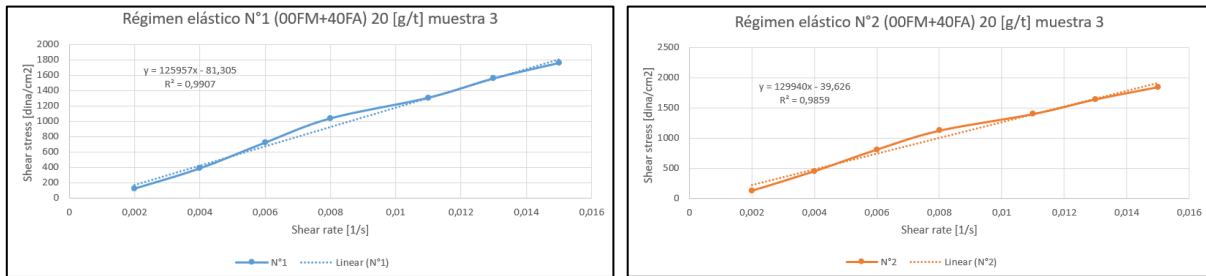


Figura 10.96. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 20 [g/t] en la muestra 3 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

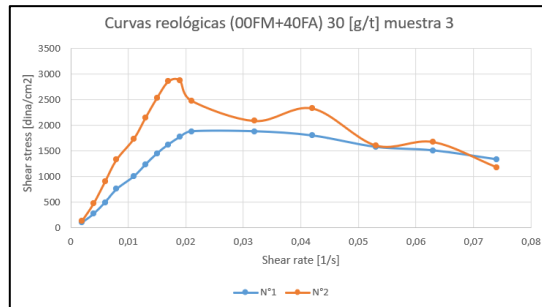


Figura 10.97. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 30 [g/t] en la muestra 3 de relave.

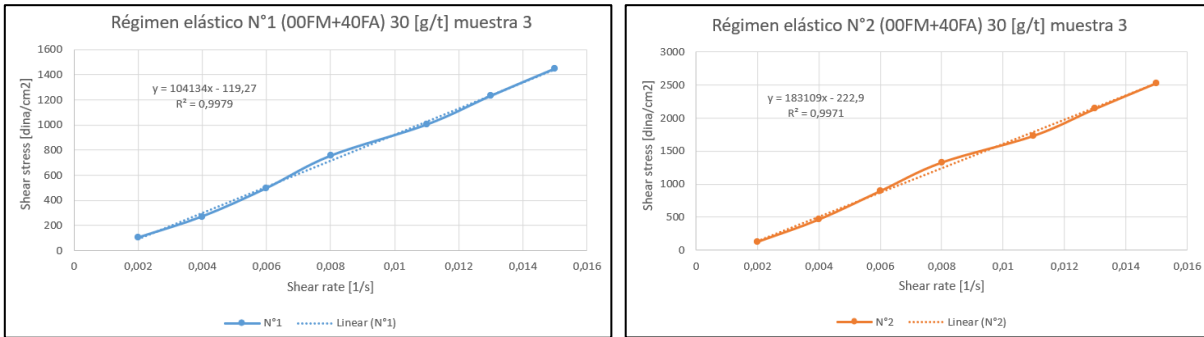


Figura 10.98. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 30 [g/t] en la muestra 3 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

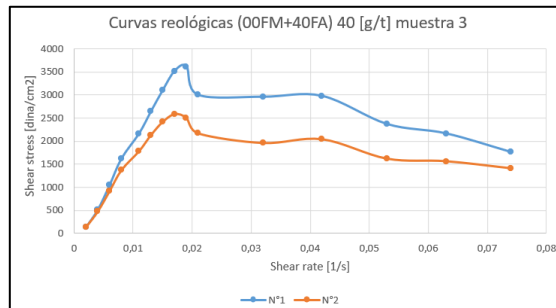


Figura 10.99. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 40 [g/t] en la muestra 3 de relave.

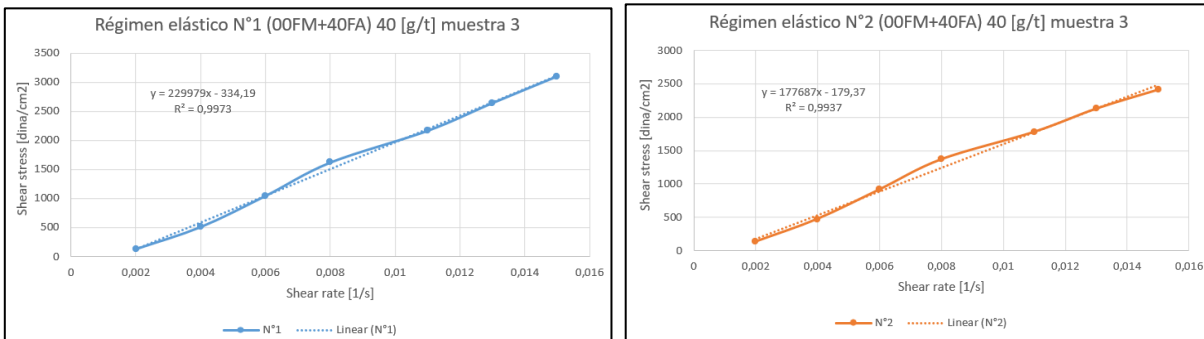


Figura 10.100. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona la mezcla de floculantes (00FM+40FA) a una dosis de 40 [g/t] en la muestra 3 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

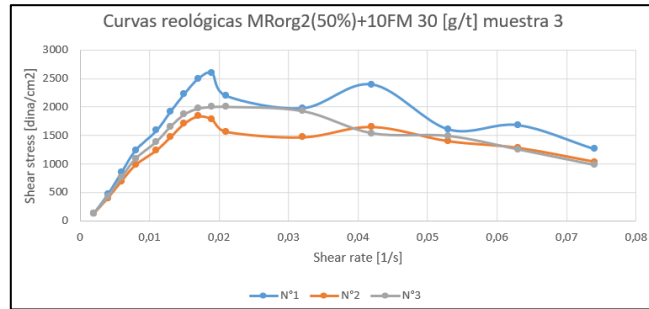


Figura 10.101. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 3 de relave.

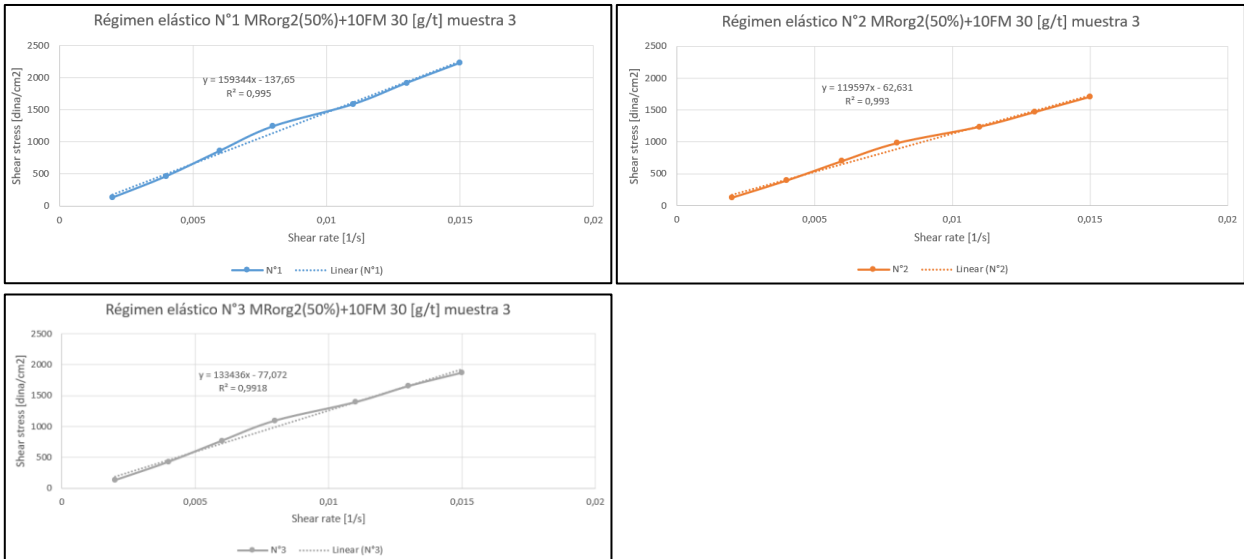


Figura 10.102. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 3 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

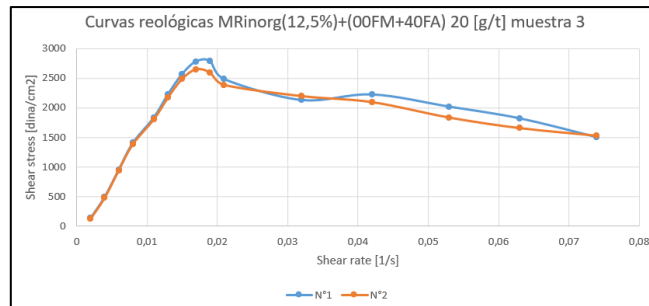


Figura 10.103. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] en la muestra 3 de relave.

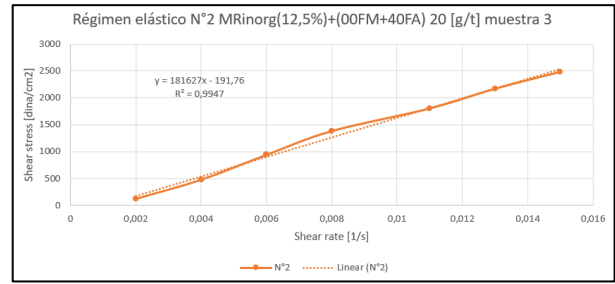
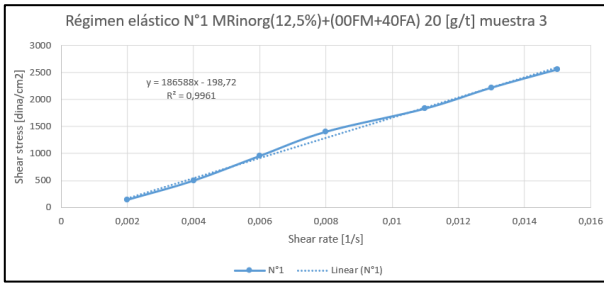


Figura 10.104. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRinorg2(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] en la muestra 3 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

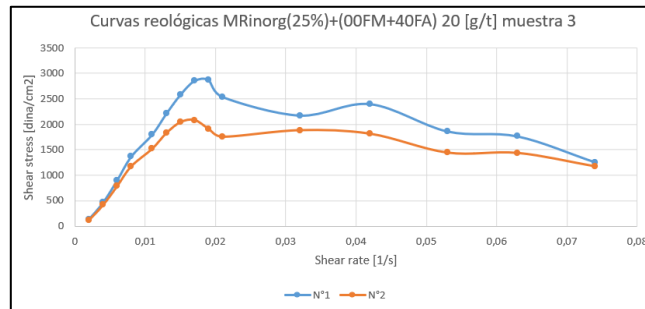


Figura 10.105. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRinorg2(25%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] en la muestra 3 de relave.

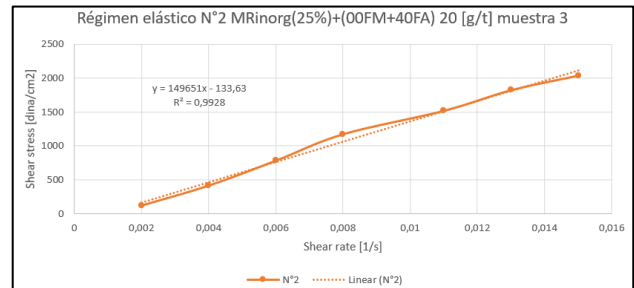
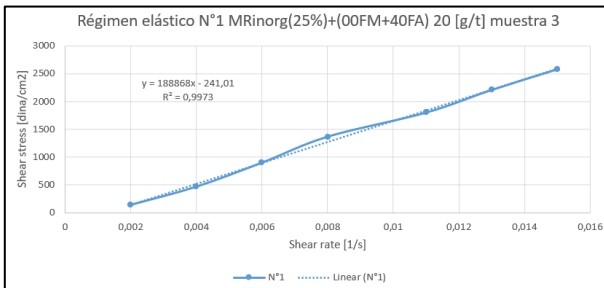


Figura 10.106. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRinorg2(25%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] en la muestra 3 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

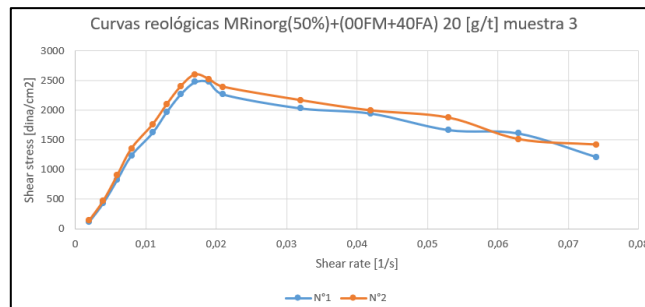


Figura 10.107. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRinorg2(50%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] en la muestra 3 de relave.

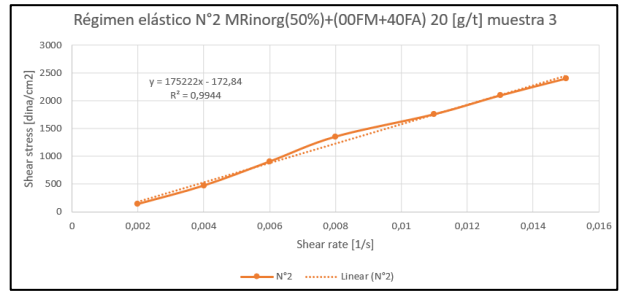
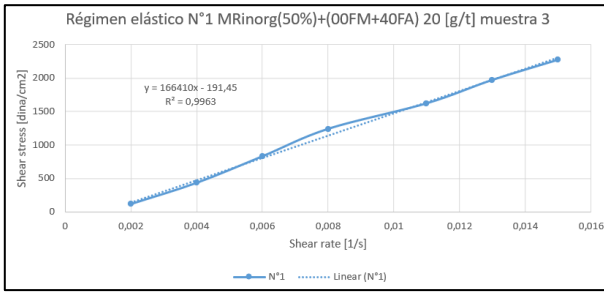


Figura 10.108. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRinorg2(50%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] en la muestra 3 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

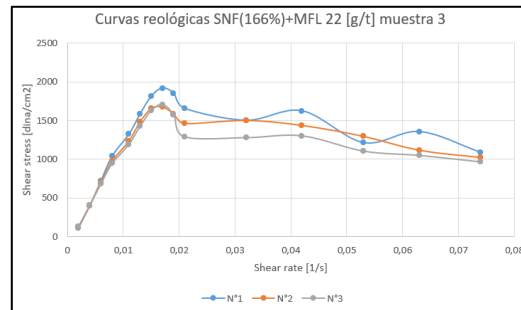


Figura 10.109. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona SNF(166%)+MFL 22 [g/t] en la muestra 3 de relave.

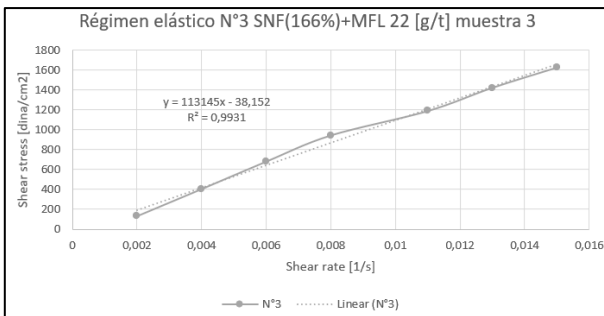
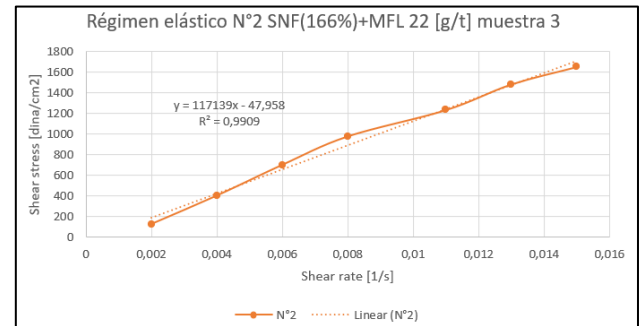
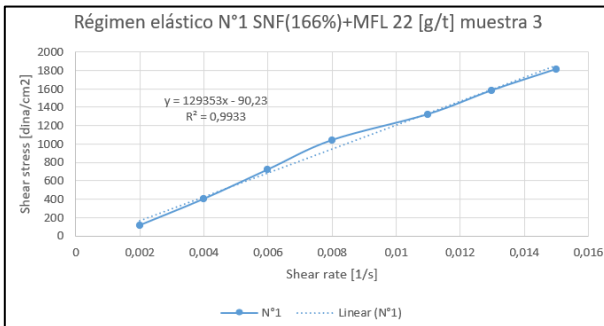


Figura 10.110. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona SNF(166%)+MFL 22 [g/t] en la muestra 3 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

Anexo L.4. Curvas reológicas del relave espesado de la muestra 4

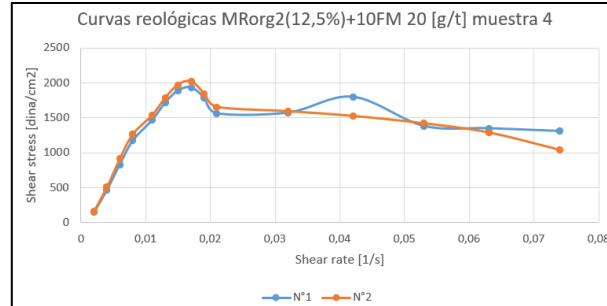


Figura 10.111. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t] en la muestra 4 de relave.

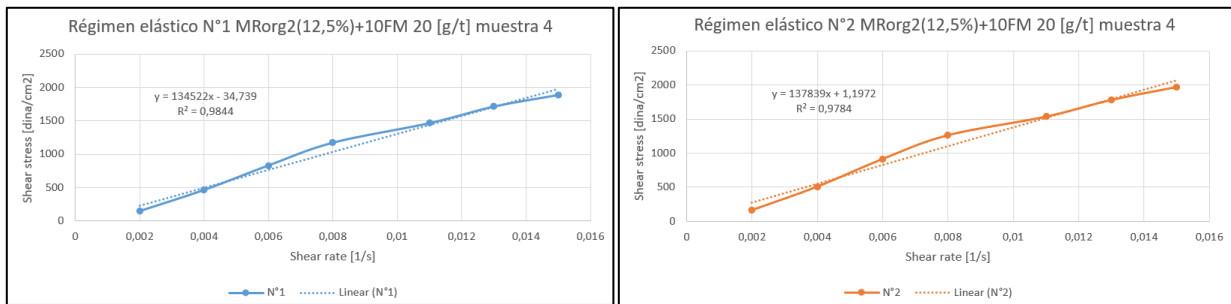


Figura 10.112. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t] en la muestra 4 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

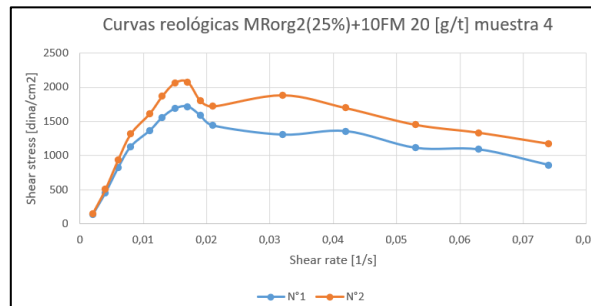


Figura 10.113. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] en la muestra 4 de relave.

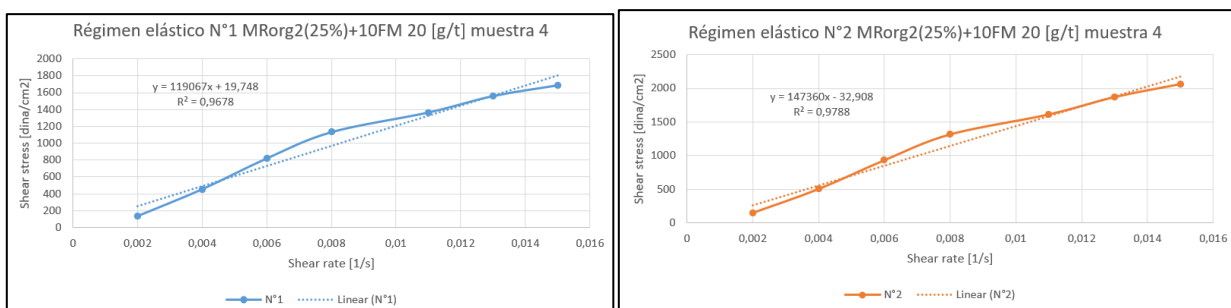


Figura 10.114. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] en la muestra 4 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

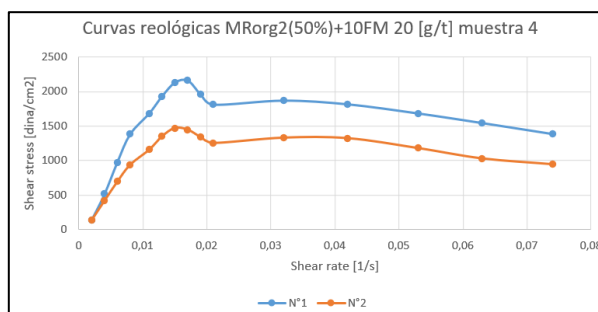


Figura 10.115. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] en la muestra 4 de relave.

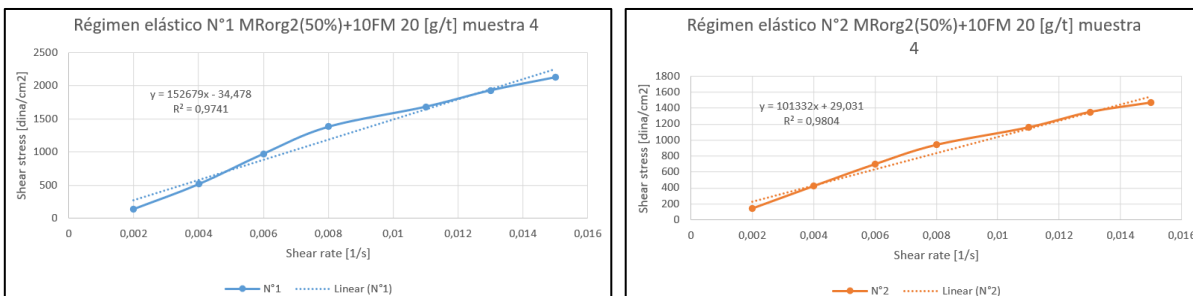


Figura 10.116. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] en la muestra 4 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

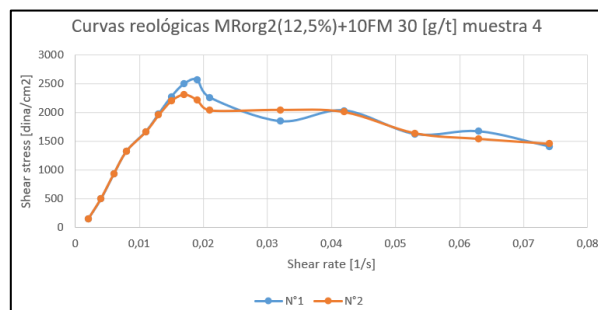


Figura 10.117. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 4 de relave.

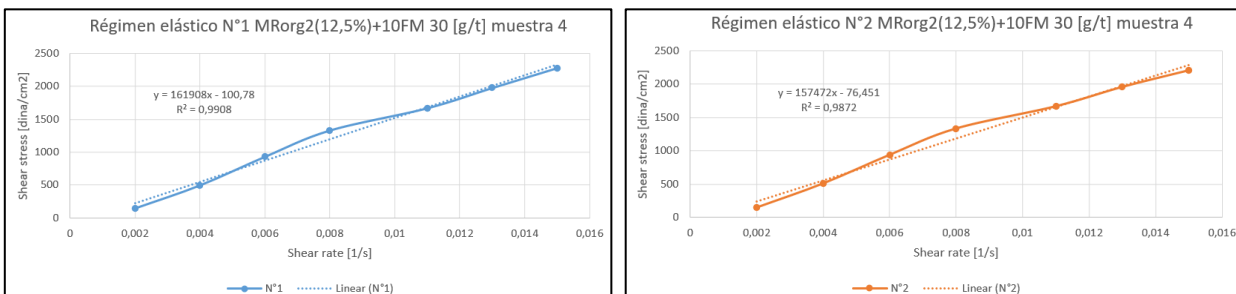


Figura 10.118. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 4 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

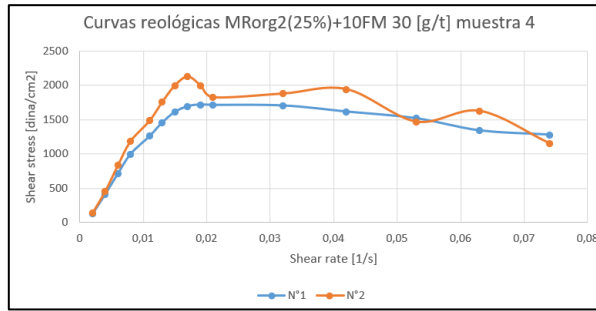


Figura 10.119. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 4 de relave.

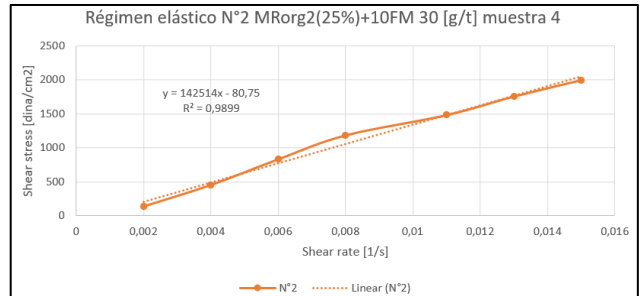
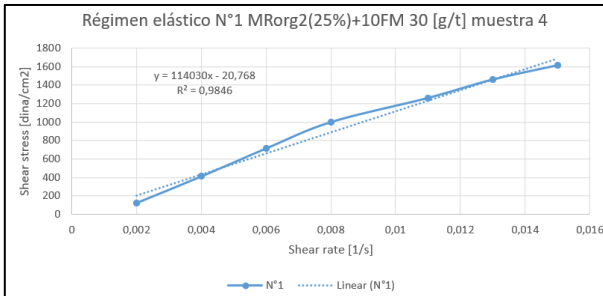


Figura 10.120. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] en la muestra 4 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

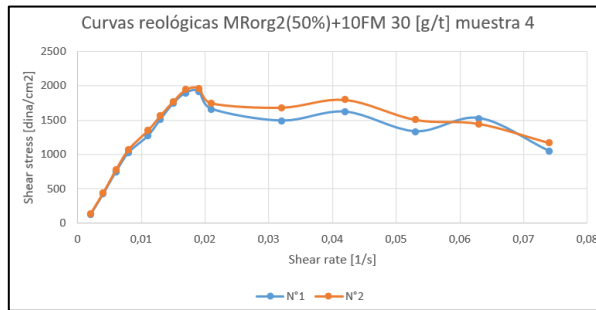


Figura 10.121. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] en la muestra 4 de relave.

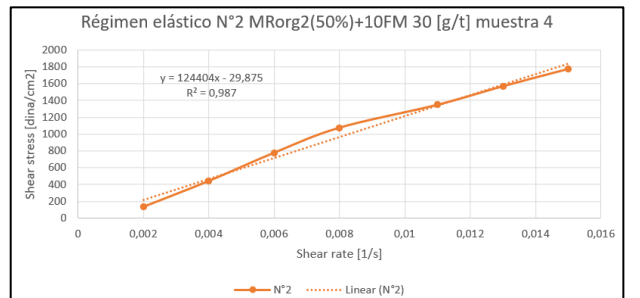
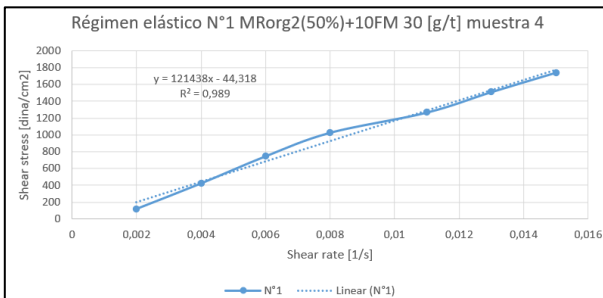


Figura 10.122. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1 y 2 cuando se adiciona MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] en la muestra 4 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

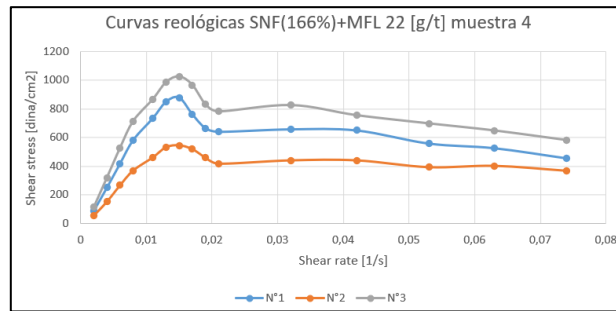


Figura 10.123. Curvas reológicas del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona SNF(166%)+MFL 22 [g/t] en la muestra 4 de relave.

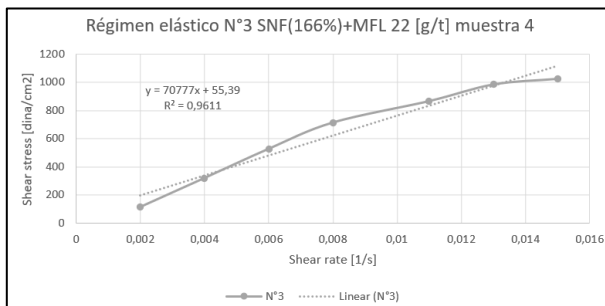
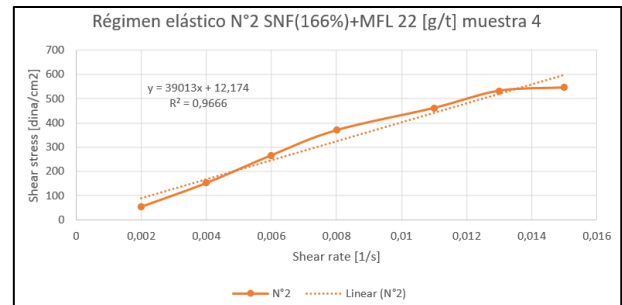
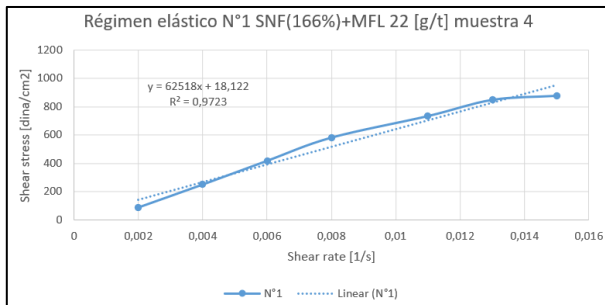


Figura 10.124. Régimen elástico del relave espesado de las pruebas N°1, 2 y 3 cuando se adiciona SNF(166%)+MFL 22 [g/t] en la muestra 4 de relave con sus regresiones lineales y coeficientes de determinación respectivos.

Anexo M. Pruebas estadísticas de t-student de contraste de medias

Anexo M.1. Ensayos con el floculante 10FM 20 [g/t]

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(25%)-10FM 20 [g/t]	MRorg2(50%)-10FM 20 [g/t]
Promedio	3,82	3,61
Varianza	0,28	0,03
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,15	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	0,54	
p valor una cola	0,3224	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.32. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Compactación (2h) [%]	MRorg2(25%)-10FM 20 [g/t]	MRorg2(50%)-10FM 20 [g/t]
Promedio	54,89	54,89
Varianza	0,003	0,03
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,02	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-0,002	
p valor una cola	0,4993	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.33. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave después de dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Turbidez (2h) [FAU]	MRorg2(25%)-10FM 20 [g/t]	MRorg2(50%)-10FM 20 [g/t]
Promedio	211	242
Varianza	1458	1458
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	1458	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-0,81	
p valor una cola	0,2511	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.34. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada después de dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Viscosidad [cP]	MRorg2(25%)-10FM 20 [g/t]	MRorg2(50%)-10FM 20 [g/t]
Promedio	$1,33 \times 10^7$	$1,27 \times 10^7$
Varianza	4×10^{12}	$1,32 \times 10^{13}$
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	$8,59 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	0,21	
p valor una cola	0,4259	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.35. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Velocidad de sedimentación [m/h]	10FM 20[g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	3,14	2,85
Varianza	0,04	0,06
Observaciones	4	3
Varianza agrupada	0,05	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	1,73	
p valor una cola	0,0722	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.36. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación del floculante 10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Compactación (2h) [%]	10FM 20[g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	58,28	57,29
Varianza	0,11	0,13
Observaciones	4	3
Varianza agrupada	0,12	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	3,74	
p valor una cola	0,0067	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.37. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas con la aplicación del floculante 10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Turbidez (2h) [FAU]	10FM 20[g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	209,75	175
Varianza	230,9167	421
Observaciones	4	3
Varianza agrupada	306,95	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	2,60	
p valor una cola	0,0242	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.38. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ entre los datos recopilados de la

turbidez del agua recuperada a las dos horas con la aplicación del floculante 10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Viscosidad [cP]	10FM 20[g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$2,01 \times 10^7$	$1,84 \times 10^7$
Varianza	$8,76 \times 10^{12}$	$3,3 \times 10^{12}$
Observaciones	4	3
Varianza agrupada	$6,58 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	0,86	
p valor una cola	0,2143	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.39. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación del floculante 10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Velocidad de sedimentación [m/h]	10FM 20[g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	1,97	1,95
Varianza	0,0001	0,01
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,004	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	0,30	
p valor una cola	0,3907	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.40. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación del floculante 10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Compactación (2h) [%]	10FM 20[g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	56,83	55,37
Varianza	0,01	0,15
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,11	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	4,91	
p valor una cola	0,0081	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.41. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas con la aplicación del floculante 10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Turbidez (2h) [FAU]	10FM 20[g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	96,5	158,3
Varianza	12,5	44,3
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	33,72	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-11,66	
p valor una cola	0,0007	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.42. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas con la aplicación del floculante 10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Viscosidad [cP]	10FM 20[g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$1,31 \times 10^7$	$1,13 \times 10^7$
Varianza	$1,62 \times 10^{12}$	$6,45 \times 10^{12}$
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	$4,84 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	0,89	
p valor una cola	0,2205	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.43. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación del floculante 10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	3,35	0,83
Varianza	0,005	0,07
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,05	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	12,24	
p valor una cola	0,0006	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.44. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Compactación (2h) [%]	MRorg2(25%)-10FM 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	56,47	55,26
Varianza	0,004	0,19
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,13	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	3,72	
p valor una cola	0,0169	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.45. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Turbidez (2h) [FAU]	MRorg2(25%)-10FM 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	198	228,3
Varianza	162	86,3
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	111,5	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-3,14	
p valor una cola	0,0257	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.46. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Viscosidad [cP]	MRorg2(25%)-10FM 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$1,33 \times 10^7$	$5,74 \times 10^6$
Varianza	4×10^{12}	$2,72 \times 10^{12}$
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	$3,14 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	4,68	
p valor una cola	0,0092	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.47. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(50%)-10FM 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	2,79	0,83
Varianza	0,02	0,07
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,06	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	9,07	
p valor una cola	0,0014	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.48. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Compactación (2h) [%]	MRorg2(50%)-10FM 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	56,09	55,26
Varianza	0,01	0,19
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,13	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	2,51	
p valor una cola	0,0435	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.49. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Turbidez (2h) [FAU]	MRorg2(50%)-10FM 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	204	228,3
Varianza	18	86,3
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	63,6	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-3,34	
p valor una cola	0,0221	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.50. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Viscosidad [cP]	MRorg2(50%)-10FM 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$1,27 \times 10^7$	$5,74 \times 10^6$
Varianza	$1,32 \times 10^{13}$	$2,72 \times 10^{12}$
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	$6,21 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	3,06	
p valor una cola	0,0275	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.51. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Anexo M.2. Ensayos con el floculante 10FM 30 [g/t]

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	10FM 30 [g/t]
Promedio	5,17	4,71
Varianza	0,02	0,38
Observaciones	3	4
Varianza agrupada	0,23	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	1,25	
p valor una cola	0,13256	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.52. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Compactación (2h) [%]	MRorg2(50%)+10FM 30[g/t]	10FM 30 [g/t]
Promedio	57,82	57,63
Varianza	0,02	0,31
Observaciones	3	4
Varianza agrupada	0,19	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	0,57	
p valor una cola	0,29751	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.53. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave tras dos horas una vez iniciada la sedimentación con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Turbidez (2h) [FAU]	MRorg2(50%)+10FM 30[g/t]	10FM 30 [g/t]
Promedio	193,67	169,00
Varianza	44,33	96,67
Observaciones	3	4
Varianza agrupada	75,73	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	3,71	
p valor una cola	0,00692	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.54. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada tras dos horas una vez iniciada la sedimentación con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Viscosidad [cP]	10FM 30 [g/t]	MRorg2(50%)-10FM 30 [g/t]
Promedio	21626850	19999566,67
Varianza	6,7786E+11	8,45798E+12
Observaciones	4	3
Varianza agrupada	3,78991E+12	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	1,09	
p valor una cola	0,1618	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.55. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Velocidad de sedimentación [m/h]	10FM 30 [g/t]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	3,16	3,13
Varianza	0,40	0,05
Observaciones	2,00	3,00
Varianza agrupada	0,17	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	0,08	
p valor una cola	0,46981	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.56. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Compactación (2h) [%]	10FM 30 [g/t]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	56,11	55,62
Varianza	0,29	0,17
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,21	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	1,18	
p valor una cola	0,16207	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.57. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave tras dos horas una vez iniciada la sedimentación con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Turbidez (2h) [FAU]	10FM 30 [g/t]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	121,5	168,33
Varianza	180,5	70,33
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	107,06	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-4,96	
p valor una cola	0,00787	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.58. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada tras dos horas una vez iniciada la sedimentación con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Viscosidad [cP]	10FM 30 [g/t]	MRorg2(50%)-10FM 30 [g/t]
Promedio	$1,35 \times 10^7$	$1,31 \times 10^7$
Varianza	$9,87 \times 10^{10}$	$3,22 \times 10^{12}$
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	$2,18 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	0,36	
p valor una cola	0,3712	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.59. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Velocidad de sedimentación [m/h]	10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	4,71	2,85
Varianza	0,38	0,06
Observaciones	4	3
Varianza agrupada	0,25	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	4,88	
p valor una cola	0,0023	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.60. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Compactación (2h) [%]	10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	57,63	57,29
Varianza	0,31	0,13
Observaciones	4	3
Varianza agrupada	0,24	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	0,92	
p valor una cola	0,2005	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.61. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación relave tras dos horas una vez iniciada la sedimentación con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Turbidez (2h) [FAU]	10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	169	175
Varianza	96,7	421
Observaciones	4	3
Varianza agrupada	226,4	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	-0,52	
p valor una cola	0,3119	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.62. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada tras dos horas una vez iniciada la sedimentación con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Viscosidad [cP]	10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$2,16 \times 10^7$	$1,84 \times 10^7$
Varianza	$6,78 \times 10^{11}$	$3,30 \times 10^{12}$
Observaciones	4	3
Varianza agrupada	$1,73 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	5	
Estadístico t	3,17	
p valor una cola	0,0124	
Valor crítico de t	2,02	

Tabla 10.63. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Velocidad de sedimentación [m/h]	10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	3,16	1,95
Varianza	0,40	0,01
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,14	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	3,60	
p valor una cola	0,0183	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.64. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la

velocidad de sedimentación del relave con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Compactación (2h) [%]	10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	56,11	55,37
Varianza	0,29	0,15
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,20	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	1,82	
p valor una cola	0,0835	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.65. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación relave tras dos horas una vez iniciada la sedimentación con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Turbidez (2h) [FAU]	10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	121,5	158,3
Varianza	180,5	44,3
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	89,72	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-4,26	
p valor una cola	0,0119	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.66. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada tras dos horas una vez iniciada la sedimentación con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Viscosidad [cP]	10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$1,35 \times 10^7$	$1,13 \times 10^7$
Varianza	$9,87 \times 10^{10}$	$6,45 \times 10^{12}$
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	$4,33 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	1,17	
p valor una cola	0,1627	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.67. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación del floculante 10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	5,17	2,85
Varianza	0,02	0,06
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,04	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	15,02	
p valor una cola	0,0001	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.68. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Compactación (2h) [%]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	57,82	57,29
Varianza	0,02	0,13
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,08	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	2,36	
p valor una cola	0,0388	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.69. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave después de dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Turbidez (2h) [FAU]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	193,7	175
Varianza	44,3	421
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	232,7	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	1,50	
p valor una cola	0,1041	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.70. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada después de dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Viscosidad [cP]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	2×10^7	$1,84 \times 10^7$
Varianza	$8,46 \times 10^{12}$	$3,3 \times 10^{12}$
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	$5,88 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	0,79	
p valor una cola	0,2377	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.71. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	3,13	1,95
Varianza	0,05	0,01
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,03	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	8,39	
p valor una cola	0,0006	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.72. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Compactación (2h) [%]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	55,62	55,37
Varianza	0,17	0,15
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,16	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	0,76	
p valor una cola	0,2444	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.73. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave después de dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Turbidez (2h) [FAU]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	168,3	158,3
Varianza	70,3	44,3
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	57,3	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	1,62	
p valor una cola	0,0905	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.74. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada después de dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Viscosidad [cP]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$1,31 \times 10^7$	$1,13 \times 10^7$
Varianza	$3,22 \times 10^{12}$	$6,45 \times 10^{12}$
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	$4,84 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	0,97	
p valor una cola	0,1934	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.75. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	1,92	1,28
Varianza	0,05	0,11
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,08	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	2,83	
p valor una cola	0,0237	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.76. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Compactación (2h) [%]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	54,17	53,80
Varianza	0,01	0,22
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,12	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	1,29	
p valor una cola	0,1328	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.77. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave después de dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Turbidez (2h) [FAU]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	152,3	106,3
Varianza	345,3	101,3
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	223,3	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	3,77	
p valor una cola	0,0098	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.78. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada después de dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Viscosidad [cP]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$1,37 \times 10^7$	$1,2 \times 10^7$
Varianza	$4,07 \times 10^{12}$	$7,13 \times 10^{11}$
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	$2,39 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	1,39	
p valor una cola	0,1181	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.79. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	3,61	0,83
Varianza	0,03	0,07
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,06	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	12,69	
p valor una cola	0,0005	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.80. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Compactación (2h) [%]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	54,89	55,26
Varianza	0,03	0,19
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,14	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-1,09	
p valor una cola	0,1771	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.81. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave después de dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Turbidez (2h) [FAU]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	242	228,3
Varianza	1458	86,3
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	543,6	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	0,64	
p valor una cola	0,2832	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.82. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada después de dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Viscosidad [cP]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$1,23 \times 10^7$	$5,74 \times 10^6$
Varianza	$4,4 \times 10^{10}$	$2,72 \times 10^{12}$
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	$1,83 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	5,31	
p valor una cola	0,0065	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.83. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4.

Anexo M.3. Ensayos con la mezcla de floculantes (00FM+40FA) 20 [g/t]

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 20 [g/t]
Promedio	1,00	1,72
Varianza	0,04	0,04
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,04	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-3,70	
p valor una cola	0,03300	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.84. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Compactación (2h)	MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 20 [g/t]
Promedio	54,11	54,00
Varianza	0,012	0,003
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,01	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	1,34	
p valor una cola	0,15598	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.85. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave tras dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Turbidez (2h)	MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 20 [g/t]
Promedio	56,5	87
Varianza	1300,5	200
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	750,25	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-1,11	
p valor una cola	0,19069	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.86. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada tras dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Viscosidad [cP]	(00FM+40FA) 20 [g/t]	MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]
Promedio	$1,28 \times 10^7$	$1,84 \times 10^7$
Varianza	$7,93 \times 10^{10}$	$1,23 \times 10^{11}$
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	$1,01 \times 10^{11}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-17,65	
p valor una cola	0,0016	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.87. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Velocidad de sedimentación [m/h]	(00FM-40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	2,17	1,95
Varianza	0,0002	0,01
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,004	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	3,85	
p valor una cola	0,0155	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.88. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Compactación (2h) [%]	(00FM-40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	56,02	55,37
Varianza	0,004	0,15
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,10	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	2,22	
p valor una cola	0,0563	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.89. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave transcurridas dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Turbidez (2h) [FAU]	(00FM-40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	144	158,3
Varianza	2	44,3
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	30,2	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-2,86	
p valor una cola	0,0324	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.90. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la

turbidez del agua recuperada transcurridas dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Viscosidad [cP]	(00FM-40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$1,07 \times 10^7$	$1,13 \times 10^7$
Varianza	$8,67 \times 10^{12}$	$6,45 \times 10^{12}$
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	$7,19 \times 10^{12}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-0,27	
p valor una cola	0,4040	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.91. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1.

Velocidad de sedimentación [m/h]	(00FM+40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	1,72	1,28
Varianza	0,04	0,11
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,08	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	1,67	
p valor una cola	0,0972	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.92. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Compactación (2h) [%]	(00FM+40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	54,00	53,80
Varianza	0,003	0,22
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,15	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	0,55	
p valor una cola	0,3114	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.93. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave transcurridas dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Turbidez (2h) [FAU]	(00FM+40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	87	106,3
Varianza	200	101,3
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	134,2	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-1,83	
p valor una cola	0,0825	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.94. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada transcurridas dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Viscosidad [cP]	(00FM+40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$1,28 \times 10^7$	$1,2 \times 10^7$
Varianza	$7,93 \times 10^{10}$	$7,13 \times 10^{11}$
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	$5,02 \times 10^{11}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	1,25	
p valor una cola	0,1503	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.95. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	1,00	1,28
Varianza	0,04	0,11
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,08	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-1,05	
p valor una cola	0,1850	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.96. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRinorg(12,5%)+(00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Compactación (2h) [%]	MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	54,11	53,80
Varianza	0,01	0,22
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	0,15	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	0,87	
p valor una cola	0,2237	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.97. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave tras dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRinorg(12,5%)+(00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Turbidez (2h) [FAU]	MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	56,5	106,3
Varianza	1300,5	101,3
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	501,1	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	-2,44	
p valor una cola	0,0463	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.98. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada tras dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRinorg(12,5%)+(00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Viscosidad [cP]	MRinorg(12,5%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22 [g/t]
Promedio	$1,84 \times 10^7$	$1,2 \times 10^7$
Varianza	$1,23 \times 10^{11}$	$7,13 \times 10^{11}$
Observaciones	2	3
Varianza agrupada	$5,16 \times 10^{11}$	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	3	
Estadístico t	9,79	
p valor una cola	0,0011	
Valor crítico de t	2,35	

Tabla 10.99. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la viscosidad del relave espesado con la aplicación de MRinorg(12,5%)+(00FM-40FA) 20 [g/t] y el blanco de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3.

Anexo N. Totalidad de ensayos de reproducibilidad

Anexo N.1. Ensayos únicamente con floculantes

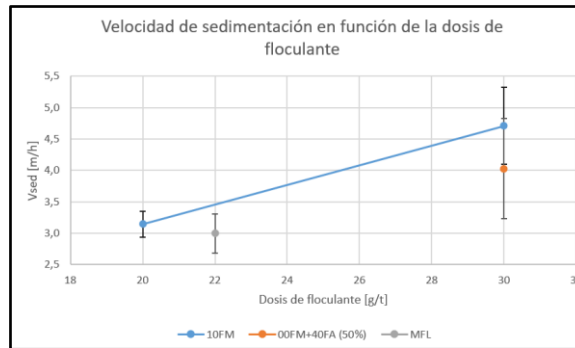


Figura 10.125. Velocidad de sedimentación del relave por la acción del floculante 10FM, MFL y la mezcla (00FM+40FA) en función de su dosis de la muestra 1 de relaves.

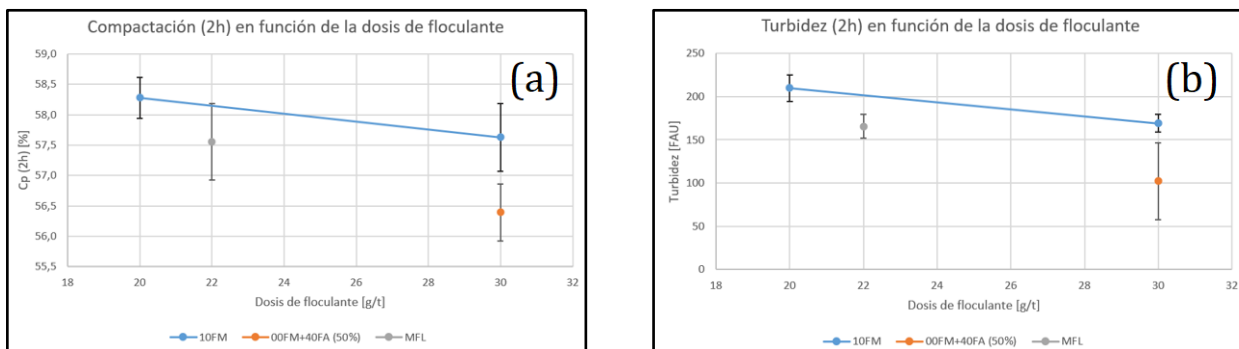


Figura 10.126. (a) Compactación y (b) turbidez por la acción de los floculantes 10FM, MFL y la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en función de su dosis de la muestra 1 de relaves.

Muestra 1			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] respecto de 10FM 30 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-33,2	Si	Tabla 10.115
Compactación [%]	1,1	No	Tabla 10.116
Turbidez [%]	24,1	Si	Tabla 10.117
Viscosidad [%]	-6,9	-	-

Tabla 10.100. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] a la muestra 1 en comparación cuando se adiciona 10FM 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

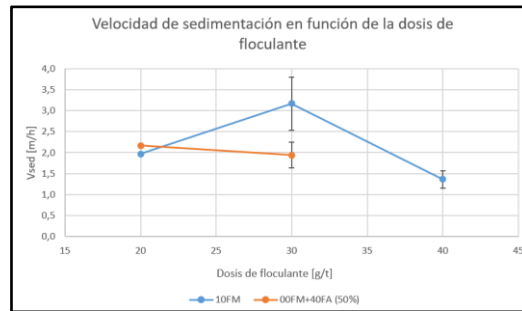


Figura 10.127. Velocidad de sedimentación del relave por la acción de distintos floculantes en función de su dosis de los ensayos de la muestra 2 de relaves.

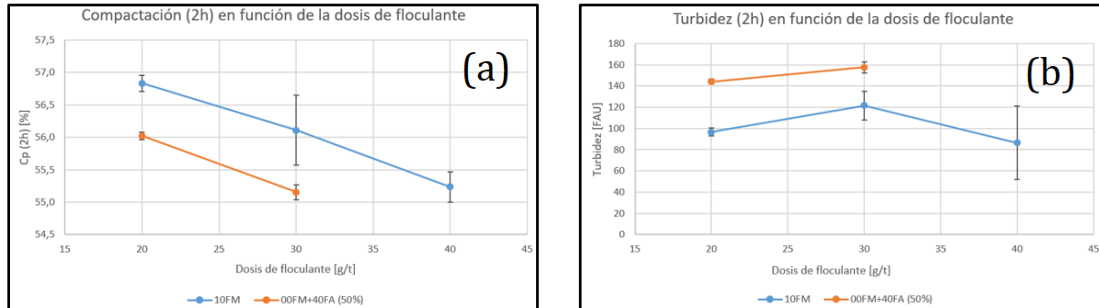


Figura 10.128. (a) Compactación y (b) turbidez a las dos horas de haber iniciado la sedimentación del relave por la acción del floculante 10FM y la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en función de su dosis de los ensayos de reproducibilidad del segundo día.

Muestra 2			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] respecto de 10FM 30 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	60,9	No	Tabla 10.118
Compactación [%]	-1,3	No	Tabla 10.119
Turbidez [%]	25,9	No	Tabla 10.120

Tabla 10.101. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica el floculante 10FM a una dosis de 20 [g/t] a la muestra 2 en comparación cuando se adiciona 10FM 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Muestra 2			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona (00FM+40FA) 20 [g/t] respecto de (00FM+40FA) 30 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-10,5	No	Tabla 10.121
Compactación [%]	-1,6	Si	Tabla 10.122
Turbidez [%]	9,4	Si	Tabla 10.123

Tabla 10.102. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica (00FM+40FA) 20 [g/t] a la muestra 2 en comparación cuando se adiciona (00FM+40FA) 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

En relación con la compactación del relave, en ambos casos, va disminuyendo en función del aumento de la dosis ensayado de floculante aplicado, siendo esta mayor de manera consistente en función de la dosis cuando se aplica el floculante 10FM en comparación con la mezcla de floculantes ensayada. Lo anterior se puede explicar porque la red de flóculos sostenida por los puentes de hidrógeno, las fuerzas de Van der Waals y los enlaces salinos formados por el floculante 10FM, que tiene un menor peso molecular neto que la mezcla, genera que los flóculos sean más deformables y menos rígidos aumentando la compactación en comparación con la aplicación de la mezcla de floculantes.

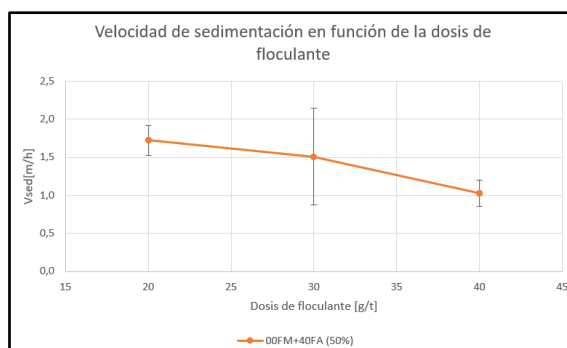


Figura 10.129. Velocidad de sedimentación del relave por la acción de la mezcla de floculantes 00FM+40FA en función de su dosis de la muestra 3 de relaves.

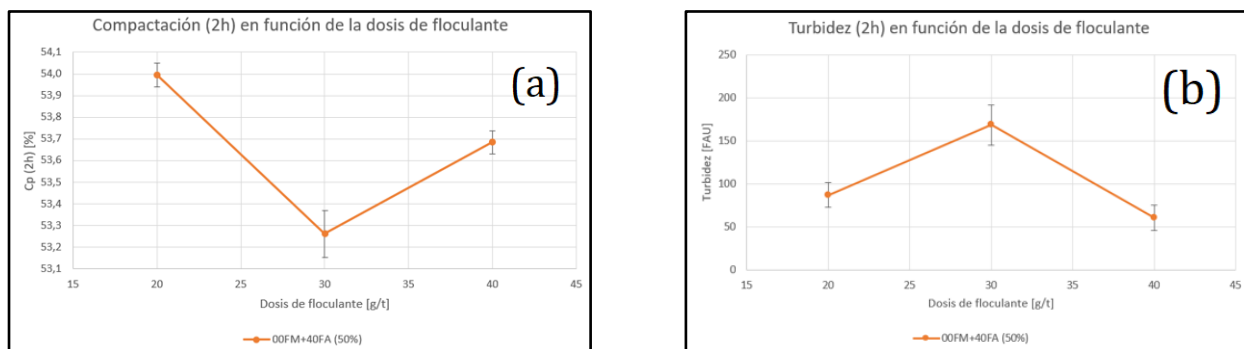


Figura 10.130. (a) Compactación y (b) turbidez a las dos horas de haber iniciado la sedimentación del relave por la acción de distintos floculantes en función de su dosis de la muestra 3 de relaves.

Muestra 3			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona (00FM+40FA) 20 [g/t] respecto de (00FM+40FA) 30 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-12,4	No	Tabla 10.124
Compactación [%]	-1,4	-	
Turbidez [%]	93,7	Si	Tabla 10.125

Tabla 10.103. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica (00FM+40FA) 20 [g/t] a la muestra 3 en comparación cuando se adiciona (00FM+40FA) 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Muestra 3			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona (00FM+40FA) 20 [g/t] respecto de (00FM+40FA) 40 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-40,3	-	-
Compactación [%]	-0,6	Si	Tabla 10.126
Turbidez [%]	-30,5	No	Tabla 10.127

Tabla 10.104. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica (00FM+40FA) 20 [g/t] a la muestra 3 en comparación cuando se adiciona (00FM+40FA) 40 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Observando el rendimiento de la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en el relave del proceso durante el segundo y tercer día de ensayos de reproducibilidad, se puede observar consistencia en todas las variables ensayadas en el intervalo de dosis desde 20 a 30 [g/t], observando las mismas tendencias.

En base a lo explicado anteriormente, se puede concluir que la dosis óptima de la aplicación de la mezcla de floculantes (00FM+40FA) en el relave del proceso es de 20 [g/t] puesto que, a diferencia de cuando se aplica una dosis de 30 [g/t] se tiene una velocidad de sedimentación y compactación mayor, además de una turbidez menor con una probabilidad promedio de 97,1% y menores propiedades reológicas.

Anexo N.2. Efecto de los modificadores reológicos

Antes que nada, en el Anexo J se explica como leer los gráficos expuestos en la presente subsección.

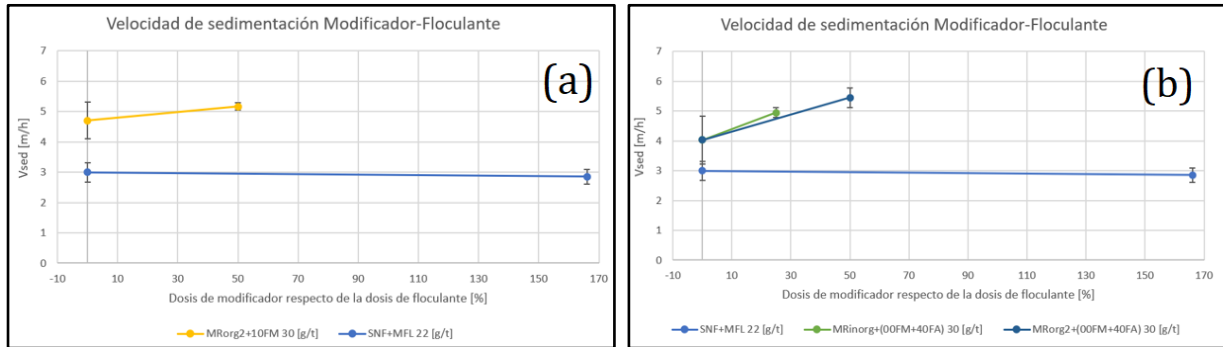


Figura 10.131. Velocidad de sedimentación del relave por la acción de (a) MRorg2+10FM 30 [g/t] y (b) MRinorg+(00FM+40FA) 30 [g/t] y MRorg2+(00FM+40FA) 30 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 1 de relaves, ambos gráficos en comparación con el blanco.

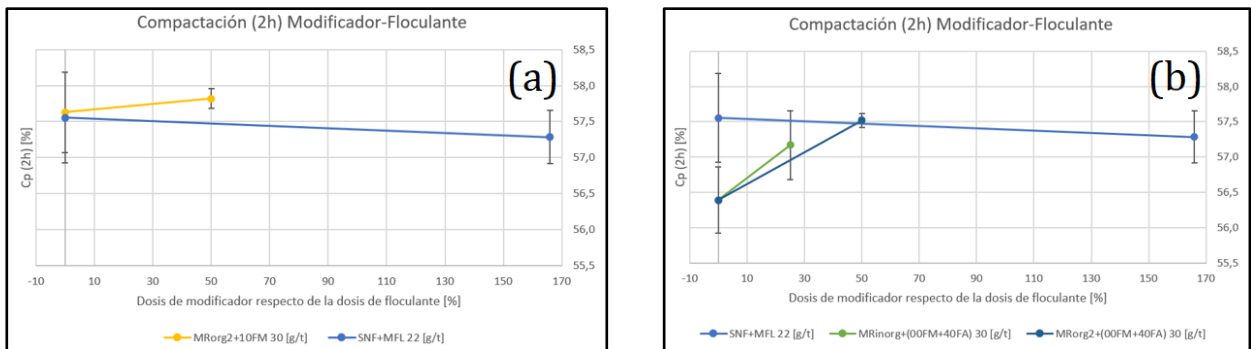


Figura 10.132. Compactación del relave a las dos horas de haber iniciado la sedimentación del relave por la acción de (a) MRorg2+10FM 30 [g/t] y (b) MRinorg+(00FM+40FA) 30 [g/t] y MRorg2+(00FM+40FA) 20 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 1 de relaves, ambos gráficos en comparación con el blanco.

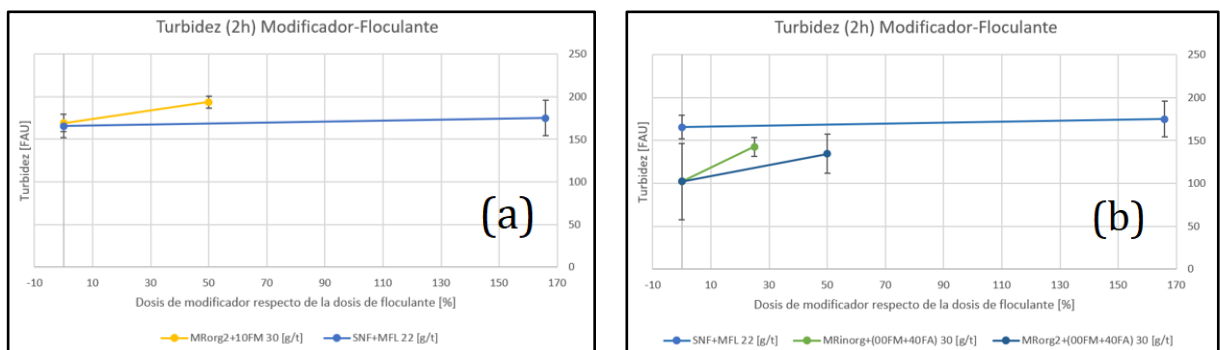


Figura 10.133. Turbidez a las dos horas de haber iniciado la sedimentación del relave por la acción de (a) MRorg2+10FM 30 [g/t] y (b) MRinorg+(00FM+40FA) 30 [g/t] y MRorg2+(00FM+40FA) 30 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 1 de relaves, ambos gráficos en comparación con el blanco.

Muestra 1			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] respecto de (00FM+40FA) 30 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	22,7	No	Tabla 10.128
Compactación [%]	1,4	No	Tabla 10.129
Turbidez [%]	39,4	No	Tabla 10.130

Tabla 10.105. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] a la muestra 1 en comparación cuando se adiciona (00FM+40FA) 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Muestra 1			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona MRorg2(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] respecto de (00FM+40FA) 30 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	35,2	Si	Tabla 10.131
Compactación [%]	-58,5	Si	Tabla 10.132
Turbidez [%]	2	No	Tabla 10.133

Tabla 10.106. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica MRorg2(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] a la muestra 1 en comparación cuando se adiciona (00FM+40FA) 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Muestra 1			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona SNF(166%)+MFL 22[g/t] respecto de MFL 22 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-4,8	No	Tabla 10.134
Compactación [%]	-0,5	No	Tabla 10.135
Turbidez [%]	5,6	No	Tabla 10.136

Tabla 10.107. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica SNF(166%)+MFL 22[g/t] a la muestra 1 en comparación cuando se adiciona MFL 22[g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Se deduce que al adicionar SNF(166%)+MFL 22[g/t] al relave del proceso, se mantiene constante la velocidad de sedimentación, compactación y turbidez respecto de la aplicación única del floculante MFL 22 [g/t].

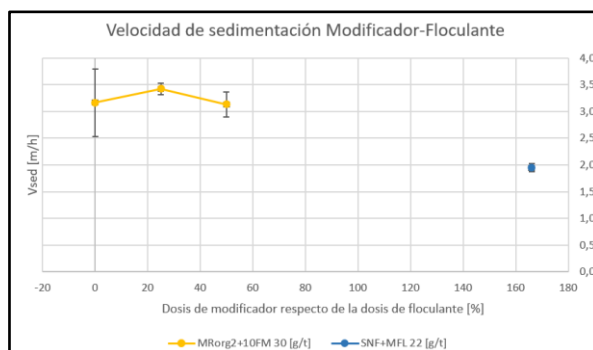


Figura 10.134. Velocidad de sedimentación del relave por la acción de MRorg2+10FM 30 [g/t] y SNF+MFL 22 [g/t]. en función del porcentaje de la dosis de modificador respecto de la dosis de floculante de la muestra 2 de relaves.

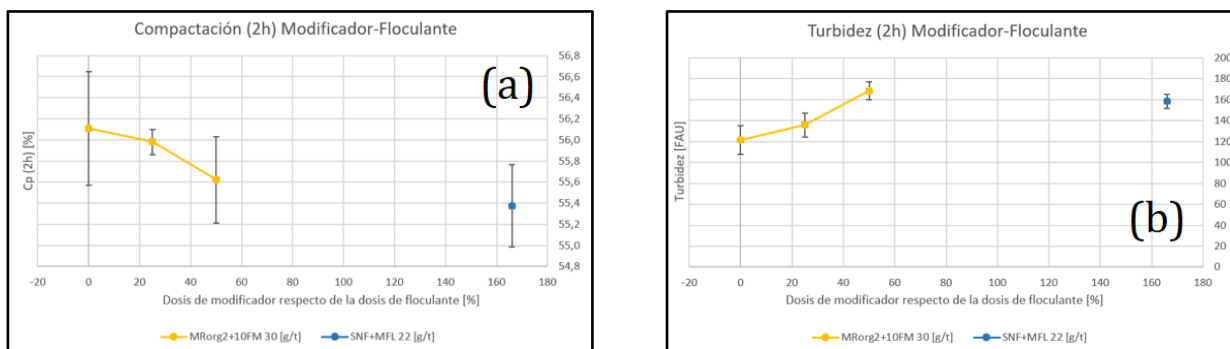


Figura 10.135. (a) Compactación y (b) turbidez a las dos horas de haber iniciado la sedimentación del relave por la acción de MRorg2+10FM 30 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 2 de relaves., ambos gráficos en comparación con el blanco.

Muestra 2			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] respecto de 10FM 30 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	8,2	No	Tabla 10.137
Compactación [%]	-0,2	No	Tabla 10.138
Turbidez [%]	11,9	No	Tabla 10.139

Tabla 10.108. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] a la muestra 2 en comparación cuando se adiciona 10FM 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Se deduce que la adición de la combinación MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] al relave del proceso, en comparación con la aplicación de 10FM 30 [g/t] no varía significativamente las tres variables analizadas.

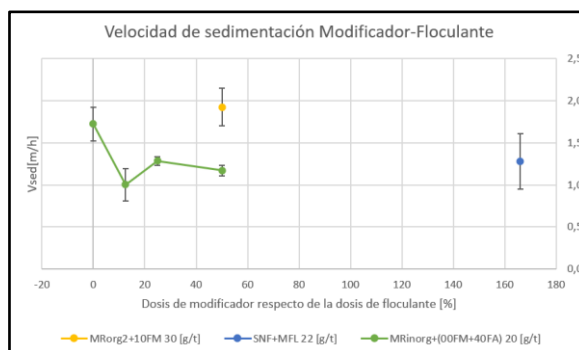


Figura 10.136. Velocidad de sedimentación del relave por la acción de MRorg2+10FM 30 [g/t] y MRinorg+(00FM+40FA) 20 [g/t] en función del porcentaje de la dosis de modificador respecto de la dosis de floculante de la muestra 3 de relaves en comparación el blanco.

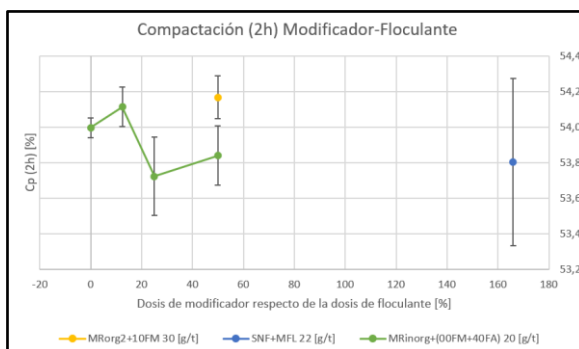


Figura 10.137. Compactación a las dos horas de haber iniciado la sedimentación del relave por la acción de MRorg2+10FM 30 [g/t] y MRinorg+(00FM+40FA) 20 [g/t] en función del porcentaje de la dosis de modificador respecto de la dosis de floculante de la muestra 2 de relaves en comparación con el blanco.

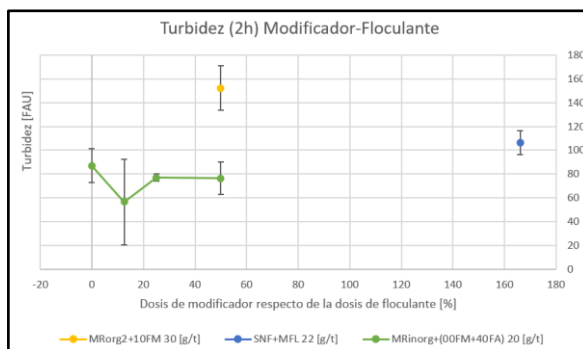


Figura 10.138. Turbidez a las dos horas de haber iniciado la sedimentación del relave por la acción de MRorg2+10FM 30 [g/t] y MRinorg+(00FM+40FA) 20 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante los ensayos de la muestra 3 de relaves en comparación con el blanco.

Muestra 3			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] respecto de (00FM+40FA) 20 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-25,4	Si	Tabla 10.140
Compactación [%]	-0,5	No	Tabla 10.141
Turbidez [%]	-11,5	No	Tabla 10.142

Tabla 10.109. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] a la muestra 3 en comparación cuando se adiciona (00FM+40FA) 20 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Muestra 3			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] respecto de (00FM+40FA) 20 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-32	Si	Tabla 10.143
Compactación [%]	-0,3	No	Tabla 10.144
Turbidez [%]	-12,1	No	Tabla 10.145

Tabla 10.110. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] a la muestra 3 en comparación cuando se adiciona (00FM+40FA) 20 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Se infiere que la adición del modificador reológico MRinorg antes de adicionar la mezcla de floculantes (00FM+40FA) 20 [g/t] al relave del proceso reduce la velocidad de sedimentación, pero mantiene la compactación y la turbidez.

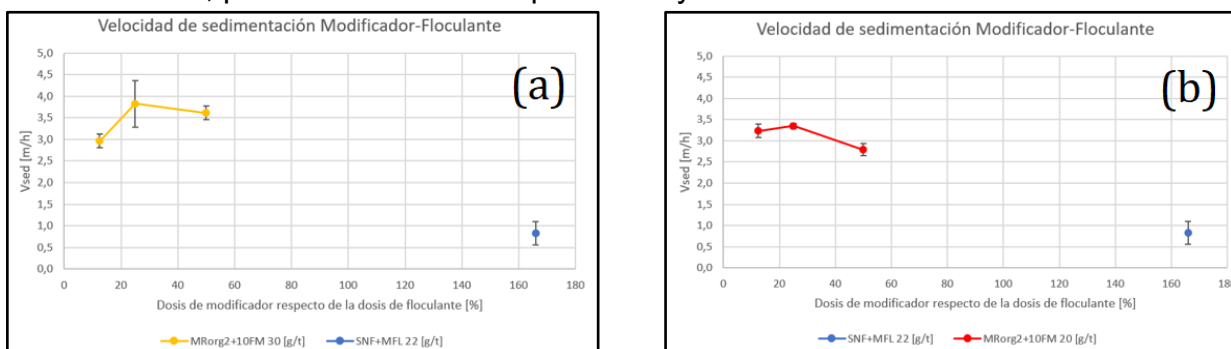


Figura 10.139. Velocidad de sedimentación del relave por la acción de (a) MRorg2+10FM 30 [g/t] y (b) MRorg2+10FM 20 [g/t] en función de la dosis de modificador reológico respecto de la dosis de floculante de la muestra 4 de relaves, ambos gráficos en comparación con el blanco.

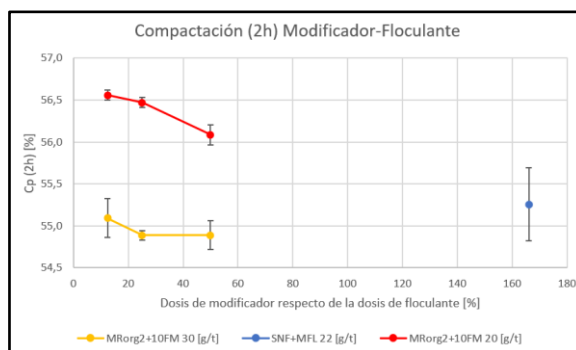


Figura 10.140. Compactación a las dos horas de haber iniciado la sedimentación del relave por la acción de MRorg2+10FM 30 [g/t] y MRorg2+10FM 20 [g/t] en función del porcentaje de la dosis de modificador respecto de la muestra 4 de relaves, ambos gráficos en comparación con el blanco.

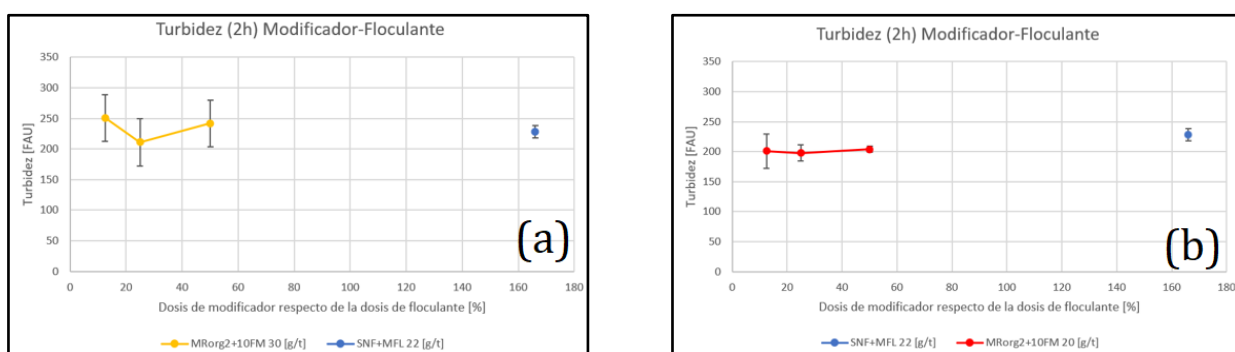


Figura 10.141. Turbidez a las dos horas de haber iniciado la sedimentación del relave por la acción de (a) MRorg2+10FM 30 [g/t] y (b) MRorg2+10FM 20 [g/t] en función del porcentaje de la dosis de modificador respecto de la dosis de floculante de la muestra 4 de relaves, ambos gráficos en comparación con el blanco.

Muestra 4			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] respecto de MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	3,5	No	Tabla 10.146
Compactación [%]	-0,2	No	Tabla 10.147
Turbidez [%]	-1,5	No	Tabla 10.148

Tabla 10.111. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] a la muestra 4 en comparación cuando se adiciona MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Muestra 4			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] respecto de MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	-13,8	Si	Tabla 10.149
Compactación [%]	-0,8	Si	Tabla 10.150
Turbidez [%]	1,5	No	Tabla 10.151

Tabla 10.112. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] a la muestra 4 en comparación cuando se adiciona MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Muestra 4			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] respecto de MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	28,9	No	Tabla 10.152
Compactación [%]	-0,4	No	Tabla 10.153
Turbidez [%]	-15,9	No	Tabla 10.154

Tabla 10.113. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] a la muestra 4 en comparación cuando se adiciona MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Muestra 4			
Variación porcentual de cada variable cuando se adiciona MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] respecto de MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t]		Significancia estadística ($\alpha = 0,05$)	Fuente
Velocidad de sedimentación [%]	21,8	Si	Tabla 10.155
Compactación [%]	-0,4	No	Tabla 10.156
Turbidez [%]	-3,6	No	Tabla 10.157

Tabla 10.114. Variación porcentual de las variables obtenidas cuando se aplica MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] a la muestra 4 en comparación cuando se adiciona MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t] indicando si la variable obtenida en el primer caso es significativamente mayor o menor con un nivel de confianza del 95%.

Se deduce que al aumentar la dosis del modificador reológico MRorg2 del 12,5% al 50% antes de adicionar el floculante 10FM 30 [g/t] al relave del proceso, solo se ve afectada positivamente la velocidad de sedimentación, manteniendo constante el resto de las variables.

Anexo O. Pruebas estadísticas de t-student auxiliares de las pruebas de reproducibilidad

Anexo O.1. Ensayos con floculantes de la muestra 1 de relave

Velocidad de sedimentación [m/h]	10FM 20 [g/t]	10FM 30 [g/t]
Promedio	3,14	4,71
Varianza	0,04	0,38
Observaciones	4	4
Varianza agrupada	0,21	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	6	
Estadístico t	-4,83	
p valor una cola	0,00146	
Valor crítico de t	1,94	

Tabla 10.115. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de 10FM 20 [g/t] y 10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Compactación (2h)	10FM 20 [g/t]	10FM 30 [g/t]
Promedio	58,28	57,63
Varianza	0,11	0,31
Observaciones	4	4
Varianza agrupada	0,21	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	6	
Estadístico t	2,01	
p valor una cola	0,04573	
Valor crítico de t	1,94	

Tabla 10.116. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de 10FM 20 [g/t] y 10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Turbidez (2h)	10FM 20 [g/t]	10FM 30 [g/t]
Promedio	209,75	169
Varianza	230,92	96,67
Observaciones	4	4
Varianza agrupada	163,79	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	6	
Estadístico t	4,50	
p valor una cola	0,00205	
Valor crítico de t	1,94	

Tabla 10.117. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de 10FM 20 [g/t] y 10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Anexo O.2. Ensayos con floculantes de la muestra 2 de relave

Velocidad de sedimentación [m/h]	10FM 20 [g/t]	10FM 30 [g/t]
Promedio	1,97	3,16
Varianza	0,00	0,40
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,20	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-2,69	
p valor una cola	0,05760	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.118. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de 10FM 20 [g/t] y 10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2 de relave.

Compactación (2h)	10FM 20 [g/t]	10FM 30 [g/t]
Promedio	56,83	56,11
Varianza	0,01	0,29
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,15	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	1,86	
p valor una cola	0,10205	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.119. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de 10FM 20 [g/t] y 10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2 de relave.

Turbidez (2h)	10FM 20 [g/t]	10FM 30 [g/t]
Promedio	96,5	121,5
Varianza	12,5	180,5
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	96,5	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-2,54	
p valor una cola	0,06295	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.120. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de 10FM 20 [g/t] y 10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2 de relave.

Velocidad de sedimentación [m/h]	(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	2,17	1,94
Varianza	0,00	0,09
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,05	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	1,05	
p valor una cola	0,20273	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.121. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2 de relave.

Compactación (2h)	(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	56,02	55,15
Varianza	0,004	0,013
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,01	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	9,48	
p valor una cola	0,00548	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.122. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2 de relave.

Turbidez (2h)	(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	144	157,5
Varianza	2	24,5
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	13,25	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-3,71	
p valor una cola	0,03281	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.123. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 2 de relave.

Anexo O.3. Ensayos con floculantes de la muestra 3 de relave

Velocidad de sedimentación [m/h]	(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	1,72	1,51
Varianza	0,04	0,40
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,22	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	0,45	
p valor una cola	0,34694	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.124. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 40 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3 de relave.

Compactación (2h)	(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 40 [g/t]
Promedio	54,00	53,68
Varianza	0,0031	0,0030
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,0030	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	5,66	
p valor una cola	0,01493	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.125. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 40 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3 de relave.

Turbidez (2h)	(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	87	168,5
Varianza	200	544,5
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	372,25	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-4,22	
p valor una cola	0,02587	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.126. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3 de relave.

Turbidez (2h)	(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 40 [g/t]
Promedio	87	60,5
Varianza	200	220,5
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	210,25	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	1,83	
p valor una cola	0,10457	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.127. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 40 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3 de relave.

Anexo O.4. Efecto de modificadores reológicos en la muestra 1 de relave

Velocidad de sedimentación [m/h]	(00FM+40FA) 30 [g/t]	MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	4,03	4,94
Varianza	0,63	0,03
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,33	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-1,95	
p valor una cola	0,06181	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.128. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de (00FM+40FA) 30 [g/t] y MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Compactación (2h)	(00FM+40FA) 30 [g/t]	MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	56,39	57,17
Varianza	0,22	0,23
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,23	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-2,00	
p valor una cola	0,05774	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.129. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 30 [g/t] y MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Turbidez (2h)	(00FM+40FA) 30 [g/t]	MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	102,33	142,67
Varianza	1976,33	114,33
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	1045,33	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-1,53	
p valor una cola	0,10063	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.130. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 30 [g/t] y MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Velocidad de sedimentación [m/h]	(00FM+40FA) 30 [g/t]	MRorg2(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	4,03	5,45
Varianza	0,63	0,11
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,37	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-2,85	
p valor una cola	0,02313	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.131. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de (00FM+40FA) 30 [g/t] y MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Compactación (2h)	(00FM+40FA) 30 [g/t]	MRorg2(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	56,39	57,52
Varianza	0,22	0,01
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,11	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-4,08	
p valor una cola	0,00753	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.132. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 30 [g/t] y MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Turbidez (2h)	(00FM+40FA) 30 [g/t]	MRorg2(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t]
Promedio	102,33	134,67
Varianza	1976,33	506,33
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	1241,33	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-1,12	
p valor una cola	0,16196	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.133. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 30 [g/t] y MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MFL 22 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22[g/t]
Promedio	2,99	2,85
Varianza	0,10	0,06
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,08	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	0,63	
p valor una cola	0,28130	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.134. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación MFL 22 [g/t] y SNF(166%)+MFL 22[g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Compactación (2h)	MFL 22 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22[g/t]
Promedio	57,55	57,29
Varianza	0,40	0,13
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	0,26	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	0,64	
p valor una cola	0,27872	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.135. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MFL 22 [g/t] y SNF(166%)+MFL 22[g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Turbidez (2h)	MFL 22 [g/t]	SNF(166%)+MFL 22[g/t]
Promedio	165,67	175
Varianza	184,33	421
Observaciones	3	3
Varianza agrupada	302,67	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-0,66	
p valor una cola	0,27352	
Valor crítico de t	2,13	

Tabla 10.136. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de los productos SNF(166%)+MFL 22[g/t] y MFL 22 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad del primer día.Efecto de los modificadores reológicos con la muestra 2 de relave

Velocidad de sedimentación [m/h]	10FM 30 [g/t]	MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	3,16	3,42
Varianza	0,40	0,01
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,20	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-0,58	
p valor una cola	0,31148	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.137. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de 10FM 30 [g/t] y MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Compactación (2h)	10FM 30 [g/t]	MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	56,11	55,98
Varianza	0,29	0,01
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,15	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	0,33	
p valor una cola	0,38605	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.138. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 30 [g/t] y MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Turbidez (2h)	10FM 30 [g/t]	MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	121,5	136
Varianza	180,5	128
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	154,25	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-1,17	
p valor una cola	0,18168	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.139. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de (00FM+40FA) 30 [g/t] y MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 1 de relave.

Anexo O.5. Efecto de modificadores reológicos en la muestra 3 de relave

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 20 [g/t]
Promedio	1,28	1,72
Varianza	0,003	0,039
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,02	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-3,03	
p valor una cola	0,04703	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.140. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de los productos MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3 de relave.

Compactación (2h)	MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 20 [g/t]
Promedio	53,72	54,00
Varianza	0,048	0,003
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,03	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-1,70	
p valor una cola	0,11537	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.141. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3 de relave.

Turbidez (2h)	MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 20 [g/t]
Promedio	77	87
Varianza	8	200
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	104	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-0,98	
p valor una cola	0,21510	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.142. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRinorg(25%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3 de relave.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 20 [g/t]
Promedio	1,17	1,72
Varianza	0,004	0,039
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,02	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-3,74	
p valor una cola	0,03226	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.143. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de los productos MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3 de relave.

Compactación (2h)	MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 20 [g/t]
Promedio	53,84	54,00
Varianza	0,027	0,003
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,02	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-1,27	
p valor una cola	0,16651	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.144. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3 de relave.

Turbidez (2h)	MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 20 [g/t]	(00FM+40FA) 20 [g/t]
Promedio	76,5	87
Varianza	180,5	200
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	190,25	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-0,76	
p valor una cola	0,26301	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.145. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRinorg(50%)+(00FM+40FA) 20 [g/t] y (00FM+40FA) 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 3 de relave.

Anexo O.6. Efecto de modificadores reológicos en la muestra 4 de relave

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t]
Promedio	3,35	3,23
Varianza	0,005	0,03
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,02	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	0,92	
p valor una cola	0,22637	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.146. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Compactación (2h)	MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t]
Promedio	56,47	56,56
Varianza	0,004	0,004
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,004	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-1,41	
p valor una cola	0,14645	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.147. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Turbidez (2h)	MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t]
Promedio	198	201
Varianza	162	800
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	481	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-0,14	
p valor una cola	0,45186	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.148. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 20 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t]
Promedio	2,79	3,23
Varianza	0,02	0,03
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,02	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-2,96	
p valor una cola	0,04891	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.149. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Compactación (2h)	MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t]
Promedio	56,09	56,56
Varianza	0,014	0,004
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,01	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-4,94	
p valor una cola	0,01929	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.150. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Turbidez (2h)	MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t]
Promedio	204	201
Varianza	18	800
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	409	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	0,15	
p valor una cola	0,44784	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.151. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 20 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 20 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	3,82	2,97
Varianza	0,28	0,03
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,15	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	2,18	
p valor una cola	0,08037	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.152. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Compactación (2h)	MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	54,89	55,09
Varianza	0,003	0,053
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,03	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-1,21	
p valor una cola	0,17472	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.153. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Turbidez (2h)	MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	211	251
Varianza	1458	1458
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	1458	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-1,05	
p valor una cola	0,20239	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.154. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(25%)+10FM 30 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Velocidad de sedimentación [m/h]	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	3,61	2,97
Varianza	0,03	0,03
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,03	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	4,03	
p valor una cola	0,02819	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.155. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la velocidad de sedimentación del relave con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Compactación (2h)	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	54,89	55,09
Varianza	0,03	0,05
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	0,04	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-1	
p valor una cola	0,21132	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.156. Resultados de la prueba estadística de t-student considerando un $\alpha = 0,05$ y varianzas iguales entre los datos recopilados de la compactación del relave a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Turbidez (2h)	MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t]	MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t]
Promedio	242	251
Varianza	1458	1458
Observaciones	2	2
Varianza agrupada	1458	
Hipótesis de diferencia de promedio	0	
Grados de libertad	2	
Estadístico t	-0,24	
p valor una cola	0,41780	
Valor crítico de t	2,92	

Tabla 10.157. Resultados de la prueba estadística de t-student de contraste de medias de una cola considerando varianzas iguales con $\alpha = 0,05$ y entre los datos recopilados de la turbidez del agua recuperada a las dos horas de iniciada la sedimentación con la aplicación de MRorg2(50%)+10FM 30 [g/t] y MRorg2(12,5%)+10FM 30 [g/t] de los ensayos de reproducibilidad de la muestra 4 de relave.

Anexo P. Datos experimentales

Anexo P.1. Ensayos de reproducibilidad con la muestra 1 de relave

Las condiciones de las pruebas son:

- Temperatura de 22°C.
- pH del relave de 8,98.

N° de prueba	Primer producto aplicado	Segundo producto aplicado	Dosis primer producto aplicado	Dosis segundo producto aplicado	Vsed [m/h]	Cp (2h) [%]	Turbidez [FAU]	Masa neta (2h)	Masa neta final	Cp_final
1	10FM	N/A	20	0	3,1	58,7	203	376,93	331,02	66,8
21	10FM	N/A	20	0	3,2	57,8	198	339,7	292,52	67,2
22	10FM	N/A	20	0	2,9	58,3	232	318,79	269,78	68,9
23	10FM	N/A	20	0	3,4	58,3	206	396,88	342,06	67,6
2	10FM	N/A	30	0	5,4	58,4	162	401,85	351,85	66,7
24	10FM	N/A	30	0	3,9	57,3	160	369,44	313,86	67,5
25	10FM	N/A	30	0	4,9	57,1	181	384,42	328,79	66,8
26	10FM	N/A	30	0	4,6	57,7	173	384,29	328,5	67,5
3	MRorg2	10FM	15	30	5,3	57,9	197	336,6	289,63	67,3
4	MRorg2	10FM	15	30	5,2	57,8	186	399,19	345,94	66,8
5	MRorg2	10FM	15	30	5,0	57,7	198	365,04	316,48	66,5
6	00FM+40FA	N/A	30	0	3,3	55,9	62	340,09	295	64,4
7	00FM+40FA	N/A	30	0	4,8	56,6	95	354,23	312,29	64,2
8	00FM+40FA	N/A	30	0	4,0	56,7	150	359,4	312,19	65,3
9	MRinorg	00FM+40FA	7,5	30	4,9	56,7	145	370,21	325,53	64,5
10	MRinorg	00FM+40FA	7,5	30	5,1	57,1	131	351,05	309,91	64,7
11	MRinorg	00FM+40FA	7,5	30	4,8	57,7	152	340,28	298,79	65,7
12	MRorg2	00FM+40FA	15	30	5,5	57,4	160	331,12	292,43	65,0
13	MRorg2	00FM+40FA	15	30	5,1	57,6	127	351,1	309,95	65,2
14	MRorg2	00FM+40FA	15	30	5,8	57,6	117	372,12	336,94	63,6
15	MFL	N/A	22	0	3,3	58,1	150	328,21	285,81	66,7
16	MFL	N/A	22	0	2,9	56,9	173	334,36	287,99	66,0
17	MFL	N/A	22	0	2,7	57,7	174	344,66	300,07	66,2
18	SNF	MFL	36,52	22	2,7	56,9	155	346,6	301,27	65,4
19	SNF	MFL	36,52	22	2,7	57,4	196	336,29	288,34	66,9
20	SNF	MFL	36,52	22	3,1	57,6	174	389,73	336,5	66,7

Tabla 10.158. Datos experimentales de los ensayos de reproducibilidad con la muestra 1 de relave.

A continuación, se exhibe el registro fotográfico de los ensayos de reproducibilidad.

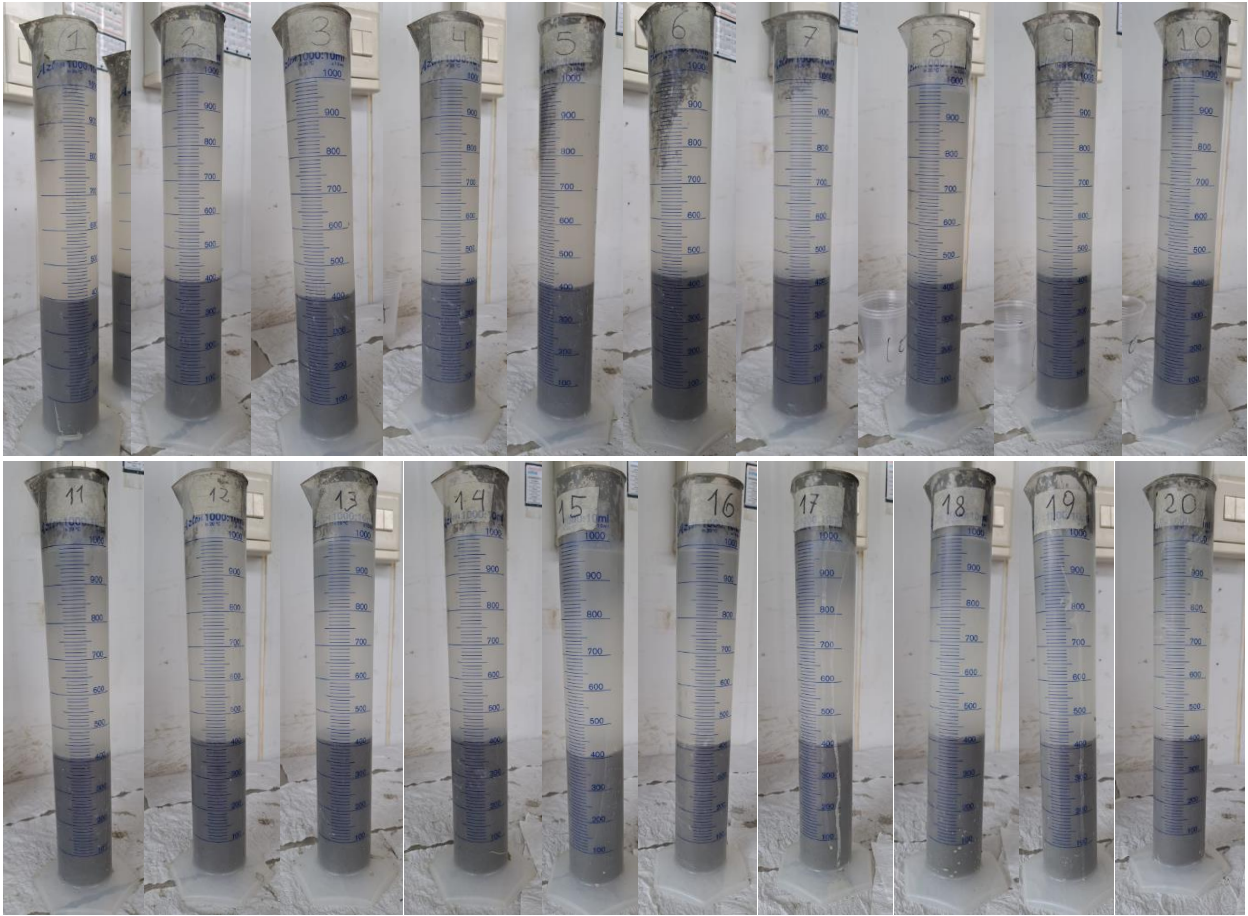


Figura 10.142. Registro fotográfico de los relaves compactos después de dos horas de iniciada la sedimentación con la muestra 1 de relave.

Cabe mencionar que no se registró foto de la probeta 21, 22, 23, 24, 25 ni 26.

Anexo P.2. Ensayos de reproducibilidad con la muestra 2 de relave

Las condiciones de las pruebas son:

- Temperatura de 22°C.
- pH del relave de 9,2.

N° de prueba	Primer producto aplicado	Segundo producto aplicado	Dosis primer producto aplicado	Dosis segundo producto aplicado	Vsed [m/h]	Cp (2h) [%]	Turbidez [FAU]	Masa neta (2h)	Masa neta final	Cp_final
1	10FM	N/A	20	0	2,0	56,7	94	332,07	287,81	65,5
2	10FM	N/A	20	0	2,0	56,9	99	320,1	275,34	66,2
3	10FM	N/A	30	0	3,6	56,5	112	329,24	282,88	65,7
4	10FM	N/A	30	0	2,7	55,7	131	312,96	265,25	65,8
5	10FM	N/A	40	0	1,2	55,1	62	335,97	285,49	64,8
6	10FM	N/A	40	0	1,5	55,4	111	309,95	259,07	66,3
7	MRorg2	10FM	7,5	30	3,3	56,1	128	308,88	261,84	66,1
8	MRorg2	10FM	7,5	30	3,5	55,9	144	322,26	273,08	66,0
9	MRorg2	10FM	15	30	3,0	55,2	178	315,73	266,37	65,4
10	MRorg2	10FM	15	30	3,4	55,8	164	313,4	262,69	66,6
11	MRorg2	10FM	15	30	3,0	55,9	163	303,95	252,83	67,2
15	00FM+40FA	N/A	20	0	2,2	56,0	143	331,76	284,08	65,4
16	00FM+40FA	N/A	20	0	2,2	56,1	145	319,59	271,54	66,0
17	00FM+40FA	N/A	30	0	2,2	55,1	161	323,33	273,34	65,1
18	00FM+40FA	N/A	30	0	1,7	55,2	154	340,29	293,71	64,0
12	SNF	MFL	36,52	22	2,0	55,8	155	339,02	292,89	64,6
13	SNF	MFL	36,52	22	1,9	55,1	154	325,85	280,88	63,9
14	SNF	MFL	36,52	22	2,0	55,2	166	310,22	262,77	65,2
19	AP1110	N/A	30	0	3,8	54,3	232	350,56	293,27	64,9
20	AP1110	N/A	30	0	2,4	52,7	252	336,5	268,24	66,2

Tabla 10.159. Datos experimentales de los ensayos de reproducibilidad con la muestra 2 de relave.

A continuación, se exhibe el registro fotográfico de los ensayos de reproducibilidad.

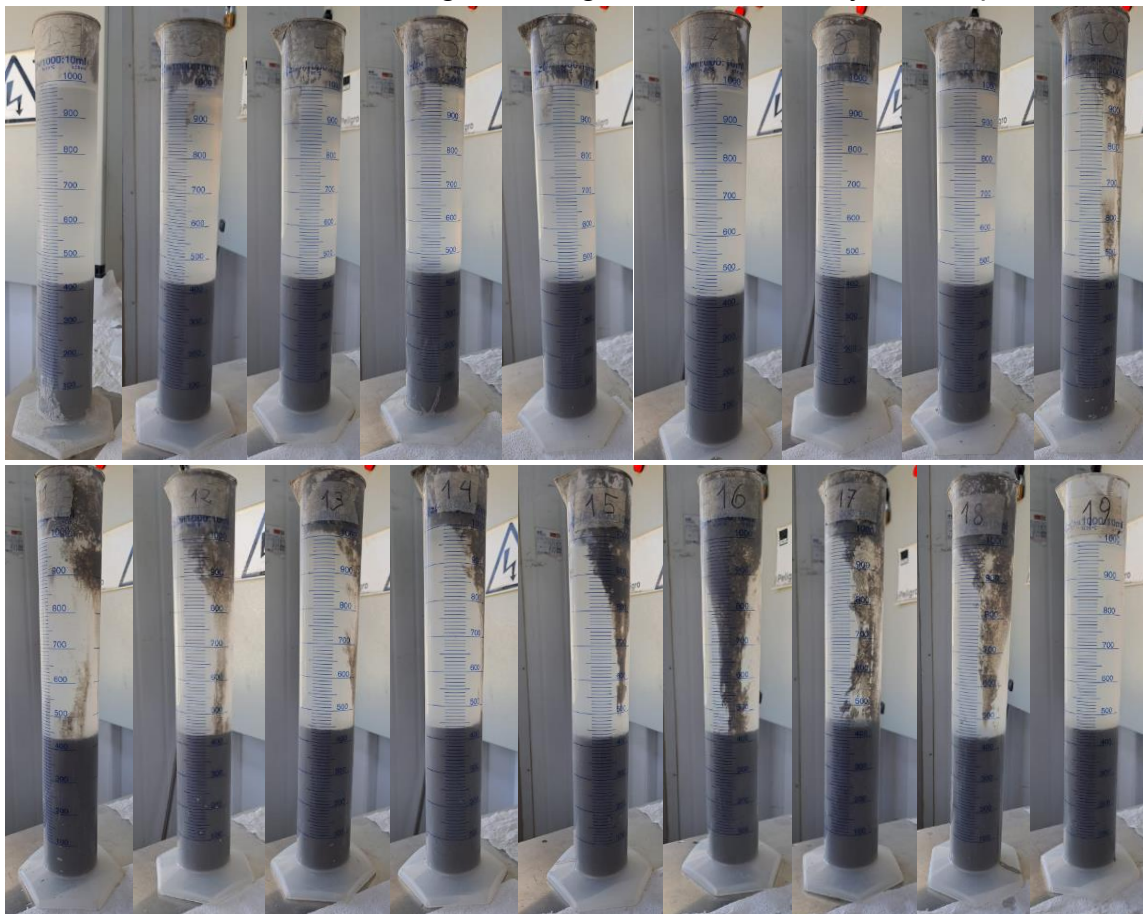


Figura 10.143. Registro fotográfico de los relaves compactos después de dos horas de iniciada la sedimentación con la muestra 2 de relave.

Cabe mencionar que no se registró foto de la probeta 2 ni 20.

Anexo P.3. Ensayos de reproducibilidad con la muestra 3 de relave

Las condiciones de las pruebas son:

- Temperatura de 22°C.
- pH del relave de 9,13.

N° de prueba	Primer producto aplicado	Segundo producto aplicado	Dosis primer producto aplicado	Dosis segundo producto aplicado	Vsed [m/h]	Cp (2h) [%]	Turbidez [FAU]	Masa neta (2h)	Masa neta final	Cp_final
1	00FM+40FA	N/A	20	0	1,6	54,0	77	314,26	261,25	64,9
2	00FM+40FA	N/A	20	0	1,9	54,0	97	327,43	277,18	63,8
3	00FM+40FA	N/A	30	0	2,0	53,2	185	295,87	237,14	66,4
4	00FM+40FA	N/A	30	0	1,1	53,3	152	330,85	276	63,9
5	00FM+40FA	N/A	40	0	1,1	53,6	50	313,37	271,62	61,9
6	00FM+40FA	N/A	40	0	0,9	53,7	71	329,47	279,39	63,4
13	MRorg2	10FM	15	30	1,8	54,3	173	300,53	247,28	66,0
14	MRorg2	10FM	15	30	2,2	54,0	137	302,18	251,61	64,9
15	MRorg2	10FM	15	30	1,8	54,2	147	302,23	250,65	65,3
7	MRinorg	00FM+40FA	2,5	20	0,9	54,2	31	301,41	254,98	64,1
8	MRinorg	00FM+40FA	2,5	20	1,1	54,0	82	305,76	257,39	64,2
9	MRinorg	00FM+40FA	5	20	1,2	53,6	75	309,71	259,07	64,0
10	MRinorg	00FM+40FA	5	20	1,3	53,9	79	310,39	259,03	64,6
11	MRinorg	00FM+40FA	10	20	1,1	53,7	86	309	258,44	64,2
12	MRinorg	00FM+40FA	10	20	1,2	54,0	67	314,32	263,53	64,4
16	SNF	MFL	36,52	22	0,9	53,3	105	302,44	254,2	63,4
17	SNF	MFL	36,52	22	1,4	54,0	97	328,16	277,5	63,9
18	SNF	MFL	36,52	22	1,6	54,1	117	315,53	265,45	64,3

Tabla 10.160. Datos experimentales de los ensayos de reproducibilidad con la muestra 3 de relave.

A continuación, se exhibe el registro fotográfico de los ensayos de reproducibilidad.

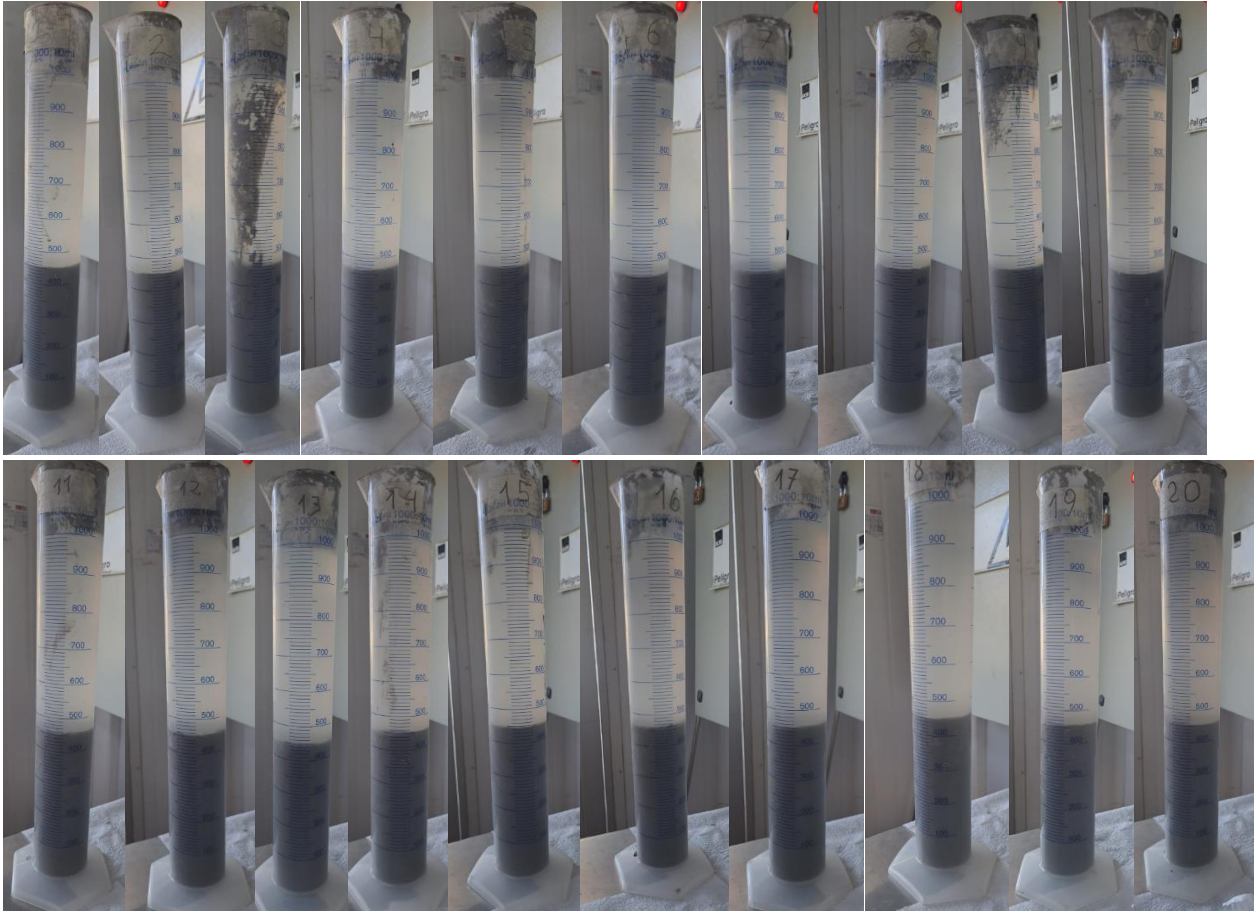


Figura 10.144. Registro fotográfico de los relaves compactos después de dos horas de iniciada la sedimentación con la muestra 3 de relave.

Anexo P.4. Ensayos de reproducibilidad con la muestra 4 de relave

Las condiciones de las pruebas son:

- Temperatura de 22°C.
- pH del relave de 9,15.

N° de prueba	Primer producto aplicado	Segundo producto aplicado	Dosis primer producto aplicado	Dosis segundo producto aplicado	Vsed [m/h]	Cp (2h) [%]	Turbidez [FAU]	Masa neta (2h)	Masa neta final	Cp_final
1	MRorg2	10FM	2,5	20	3,1	56,6	221	480,77	420,77	64,7
2	MRorg2	10FM	2,5	20	3,3	56,5	181	516,86	448,98	65,1
3	MRorg2	10FM	5	20	3,4	56,4	207	501,01	435,88	64,9
4	MRorg2	10FM	5	20	3,3	56,5	189	493,78	425,38	65,6
5	MRorg2	10FM	10	20	2,9	56,0	207	483,93	417,98	64,8
6	MRorg2	10FM	10	20	2,7	56,2	201	478,28	416,05	64,6
7	MRorg2	10FM	3,75	30	2,9	54,9	278	456,27	387,52	64,7
8	MRorg2	10FM	3,75	30	3,1	55,3	224	506,22	434,59	64,4
9	MRorg2	10FM	7,5	30	4,2	54,9	238	473,34	396,17	65,6
10	MRorg2	10FM	7,5	30	3,4	54,8	184	473,68	404,64	64,2
11	MRorg2	10FM	15	30	3,5	54,8	269	475,82	404,69	64,4
12	MRorg2	10FM	15	30	3,7	55,0	215	488,96	413,98	65,0
13	SNF	MFL	36,52	22	0,7	54,9	222	455,06	398,08	62,8
14	SNF	MFL	36,52	22	0,6	55,1	224	507,01	427,71	65,3
15	SNF	MFL	36,52	22	1,1	55,8	239	474,85	415,64	63,7

Tabla 10.161. Datos experimentales de los ensayos de reproducibilidad con la muestra 4 de relave.

A continuación, se exhibe el registro fotográfico de los ensayos de reproducibilidad.

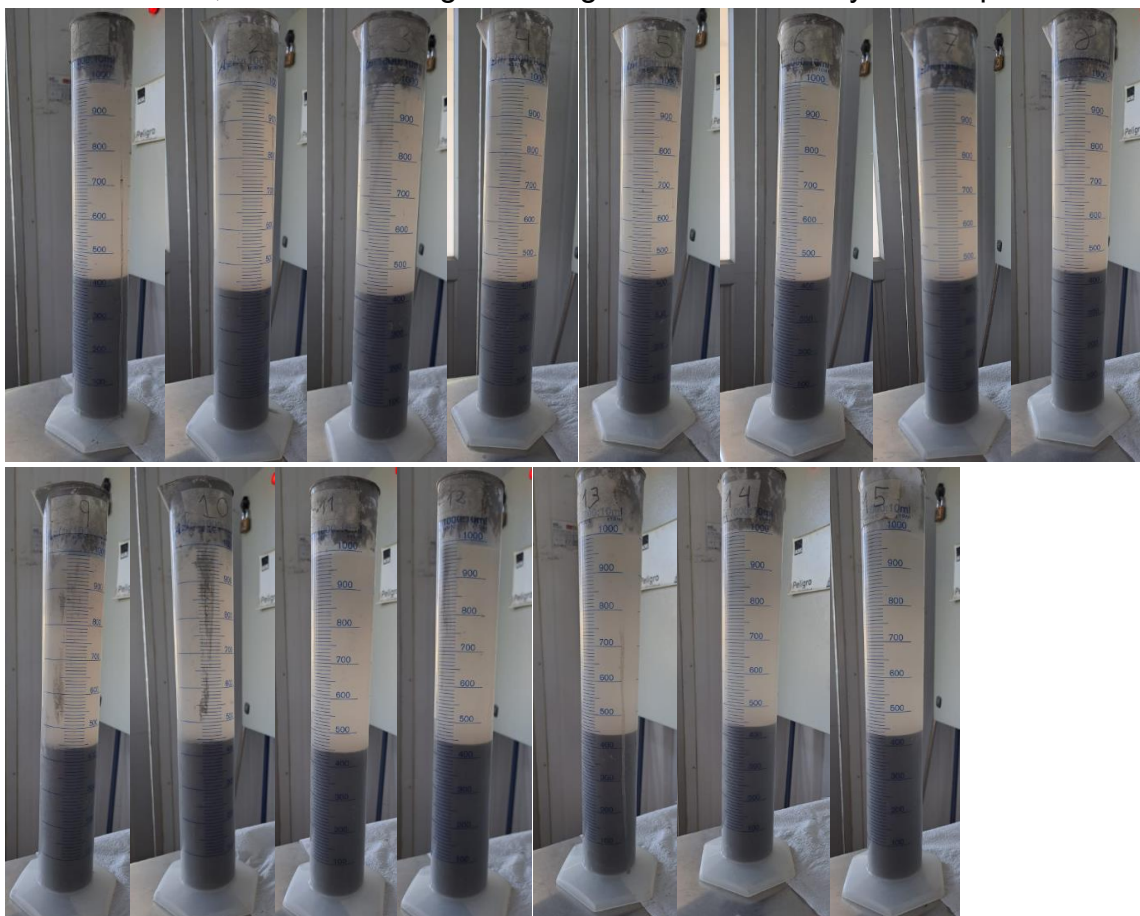


Figura 10.145. Registro fotográfico de los relaves compactos después de dos horas de iniciada la sedimentación con la muestra 4 de relave.

Anexo P.5. Condiciones muestra 5 a 12

Cabe destacar que la temperatura ronda alrededor de los 22 °C.

Muestra N°	pH relave
5	No se registra
6	No se registra
7	9,13
8	9,36
9	9,48
10	8,95
11	8,93
12	9,5

Tabla 10.162. pH en función del número de muestra analizado.

Anexo Q. Cantidad de ensayos realizados

Anexo Q.1. Floculantes y sus mezclas

Floculantes	Cantidad de ensayos	Rango de dosis [g/t]
00FM	56	10-40
10FM	158	10-40
30FM	13	20-40
40FA	8	20-40
00FB	10	20-30
20FmA	2	20-30
30FmA	9	20-30
MFL	104	10-40

Tabla 10.163. Cantidad de ensayos realizados por cada floculante con su respectivo rango de dosis ensayado.

Mezcla de Floculantes ensayados	Cantidad de ensayos
10FM	9
40FA	
10FM	3
30FMA	
00FM	162
40FA	
00FB	7
30FmA	

Tabla 10.164. Cantidad de ensayos realizados por cada mezcla de floculantes.

Anexo Q.2. Modificadores reológicos

Floculante	Modificador Reológico	Cantidad de ensayos
00FM	MRinorg	15
	MRorg1	8
	MRorg2	28
	MRorg3	5

Tabla 10.165. Cantidad de ensayos realizados con los modificadores reológicos en conjunto con el floculante 00FM.

Floculante	Modificador Reológico	Cantidad de ensayos
10FM	MRinorg	7
	MRorg1	8
	MRorg2	23
	MRorg3	9
	MRorg7	4

Tabla 10.166. Cantidad de ensayos realizados con los modificadores reológicos y mezclas de estos en conjunto con el floculante 10FM.

Floculante	Modificador Reológico	Cantidad de ensayos
30FM	MRinorg	2
	MRorg3	4

Tabla 10.167. Cantidad de ensayos realizados con los modificadores reológicos en conjunto con el floculante 30FM.

Floculante	Modificador Reológico	Cantidad de ensayos
40FA	MRinorg	2

Tabla 10.168. Cantidad de ensayos realizados con el modificador reológico MRinor en conjunto con el floculante 40FA.

Floculante	Modificador Reológico	Cantidad de ensayos
00FB	MRinorg	3
	MRorg2	3

Tabla 10.169. Cantidad de ensayos realizados con los modificadores reológicos en conjunto con el floculante 00FB.

Floculante	Modificador Reológico	Cantidad de ensayos
30FmA	MRinorg	2
	MRorg2	2

Tabla 10.170. Cantidad de ensayos realizados con los modificadores reológicos en conjunto con el floculante 30FmA.

Floculante	Modificador Reológico	Cantidad de ensayos
MFL	MRorg2	3
	SNF	73

Tabla 10.171. Cantidad de ensayos realizados con el modificador reológico MRorg2 y el coagulante SNF en conjunto con el floculante MFL.

Mezcla de floculante	Modificador Reológico	Cantidad de ensayos
10FM + 40FA	MRinorg	3
	MRorg2	3

Tabla 10.172. Cantidad de ensayos realizados con los modificadores reológicos en conjunto con la mezcla de floculantes 10FM+40FA.

Mezcla de floculante	Modificador Reológico	Cantidad de ensayos
00FM + 40FA	MRinorg	13
	MRorg2	9

Tabla 10.173. Cantidad de ensayos realizados con los modificadores reológicos y mezclas de estos en conjunto con la mezcla de floculantes 00FM+40FA.

Mezcla de floculante	Modificador Reológico	Cantidad de ensayos
00FB + 30FmA	MRinorg	3
	MRorg2	3

Tabla 10.174. Cantidad de ensayos realizados con los modificadores reológicos en conjunto con la mezcla de floculantes 00FB+30FmA.

Cabe mencionar que todos los modificadores reológicos y las mezclas de estos se ensayaron en un rango de dosis desde 12,5 a 166% respecto de la dosis de floculante, en [g/t].

Anexo Q.3. Totalidad de ensayos

La sumatoria de todas las tablas presentes en la actual subsección suman una cantidad total de 357 ensayos realizados, de los que 278 fueron para comparar el rendimiento entre las combinaciones de modificadores reológicos con floculantes y mezclas de floculantes a distintas dosis. En base a toda esta cantidad de ensayos se seleccionaron las mejores combinaciones acorde a los objetivos del trabajo y se ejecutaron los 79 ensayos de reproducibilidad.