

POLITÉCNICO DE MILÁN

Escuela de Ingeniería Civil, Ambiental y Territorial

Curso de Maestría en Ingeniería Ambiental y Ambiental
Territorio – Ingeniería Ambiental y de Ordenación del Territorio



Propiedades reológicas de los lodos de depuradora

Supervisor: Prof. Roberto Canziani

Cosupervisores: Francesco Briatico
Simone Visigalli

Candidato:

Francesco Alessandro Pellegrino

Número de identificación 873707

Año académico 2018/2019

Expresiones de gratitud

Expresiones de gratitud

Me gustaría expresar mi gratitud y respeto a mi supervisor, el profesor Roberto Canziani.
por la oportunidad de trabajar en este tema y por el continuo apoyo, paciencia y
motivación a lo largo de este período.

Mi más sincero agradecimiento a mis co-supervisores Simone Visigalli y al Prof. Francesco Briatico,
quienes compartieron sus conocimientos para responder todas mis preguntas y me ayudaron a darle forma a esto.
Trabajo con aportes invaluable sobre el tema.

A mis amigos y colegas de los laboratorios del Departamento de Ciencias Civiles y
Ingeniería Ambiental y Departamento de Química, Materiales y Química
Ingeniería, les agradezco por brindar un ambiente de trabajo amigable y servicial.

A mis amigos y colegas de la universidad y del extranjero, aprecio y valoro todo el
momentos compartidos en todos los cursos, otorgando un significado especial al tiempo pasado aquí
en Milán.

Finalmente, un agradecimiento especial a mi familia por su continuo apoyo y sacrificios realizados en
en mi nombre para lograr mis objetivos.

Expresiones de gratitud

Abstracto

En este trabajo se evaluó el comportamiento reológico de los lodos de depuradora. Las muestras de lodos se tomaron después de diferentes métodos de estabilización de cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). En primer lugar, los lodos espesados no acondicionados (UT) y los lodos espesados acondicionados (DS). Las muestras (TC), después de la dosificación del polímero mediante pruebas de jarra, se caracterizaron en términos de sólidos secos (DS) y contenido de sólidos volátiles, pH, conductividad, tiempo de succión capilar (CST) y zeta potencial.

Luego se utilizaron dos dispositivos de medición reómetros para caracterizar la Propiedades reológicas de las diferentes muestras: el viscosímetro digital Brookfield DVE y El reómetro Anton Paar MCR 502. Dado que la metodología se consideró la más Como aspecto importante de este trabajo, se dedicó un gran esfuerzo a la reometría preliminar. mediciones y pruebas con el fin de establecer un procedimiento estándar para futuras mediciones. Para las pruebas preliminares, se utilizó el viscosímetro Brookfield para abordar el manejo de lodos, lograr la reproducibilidad de la prueba y evaluar cualitativamente la tixotropía. Por otra parte, Se realizaron pruebas preliminares del reómetro Anton Paar para abordar el manejo de lodos. y evaluar los parámetros necesarios para una adecuada reproducibilidad en velocidad de corte controlada, dinámicas (amplitud y frecuencia) y pruebas de fluencia y recuperación. Se obtuvo una buena reproducibilidad. Se encontraron valores para todas las pruebas y muestras utilizadas. Se obtuvieron curvas de viscosidad con ambos dispositivos, Mientras que se obtuvieron curvas de flujo, barridos de amplitud y frecuencia y fluencia y recuperación. con el reómetro Anton Paar. A partir de estas pruebas se obtienen parámetros reométricos como el límite Se seleccionaron o calcularon la viscosidad, el límite elástico y el punto de flujo para evaluar las diferencias. entre diferentes EDAR y diferentes contenidos de DS o dosificaciones de polímeros.

Se instalaron diferentes modelos, como los modelos Herschel-Bulkley, Sisko y Cross, para comparar las mediciones experimentales realizadas en el laboratorio con las encontradas en el literatura. El modelo que mejor se ajustó a los resultados alcanzados en esta investigación fue el Cross modelo.

Finalmente, se establece una relación entre las características de los lodos y los parámetros reológicos para la deshidratación. Se estableció la aplicación entre los valores CST y de viscosidad al variar el DS contenido o la dosis del polímero.

Abstracto

Resumen

En este trabajo se estudió el comportamiento reológico de lodos de depuradora. EL Se tomaron muestras de lodo después de cuatro métodos diferentes de estabilización. Plantas depuradoras (EDAR). En primer lugar, se caracterizaron, en términos de contenido de sólidos secos (DS) y sólidos volátiles, pH, conductividad, tiempo de succión capilar (CST) y potencial zeta, muestras de lodos espesados no acondicionados (TU) y muestras de lodos espesados (TC) acondicionadas después de dosificar el polímero mediante jarra prueba.

Posteriormente, se utilizaron dos dispositivos de medición para caracterizar la propiedades reológicas de diferentes muestras: el viscosímetro digital DVE Brookfield y el Reómetro Anton Paar MCR 502. Dado que la metodología fue considerada el aspecto más Parte importante de este trabajo, se dedicó una gran cantidad de esfuerzo a mediciones y pruebas reométricas. pruebas preliminares con el fin de establecer un procedimiento estándar para mediciones posteriores. para yo En las pruebas preliminares se utilizó el viscosímetro Brookfield para optimizar la preparación. de la muestra, obtener la reproducibilidad de las pruebas y evaluar cualitativamente la tixotropía. Por otro lado, se realizaron pruebas preliminares del reómetro Anton Paar para optimizar la preparación de muestras y evaluar los parámetros necesarios para una Correcta reproducibilidad en ensayos de velocidad de corte controlada, ensayos dinámicos (amplitud y frecuencia) y ensayos de fluencia y recuperación. Se encontró buena reproducibilidad para todas las pruebas. y las muestras utilizadas. Las curvas de viscosidad se obtuvieron con ambos dispositivos, mientras que con el reómetro Anton Paar las curvas de flujo, las amplitudes y la oscilaciones de frecuencia y fluencia y recuperación. De estas pruebas se seleccionaron o Parámetros reométricos calculados, como la viscosidad límite, el límite elástico y el punto. Caudal para evaluar las diferencias entre diferentes sistemas y diferentes contenidos de sólidos. dosis secas o poliméricas.

Se han equipado varios modelos, como los modelos Herschel-Bulkley, Sisko y Cross, para comparar las mediciones experimentales realizadas en el laboratorio con las encontradas en la literatura. El modelo que mostró un mejor ajuste de los resultados obtenidos fue el modelo Cross Finalmente, se estableció una relación entre las características del lodo y los parámetros reológicos para aplicaciones de deshidratación entre el CST y los valores de viscosidad como el contenido de Dosificación de sólidos secos o polímeros.

Resumen

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	V
RESUMEN	VII
ÍNDICE	IX
LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABLAS.....	XV
ABREVIATURAS	XVII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. El problema de la gestión y eliminación de lodos de depuradora.....	1
1.2. Objetivos de la tesis.....	2
1.3. Estructura de la tesis.....	2
2. ESTADO DEL TÉCNICO	5
2.1. Deshidratación de lodos	5
2.1.1. Índices de deshidratación de lodos.....	8
2.2. Características de los lodos y procesos preliminares que afectan la deshidratabilidad	10
2.2.1. Origen de los lodos	10
2.2.2. Acondicionamiento de lodos	11
2.3. Reología	11
2.3.1. Flujo de cizallamiento.....	12
2.3.2. Curvas de caudal y viscosidad para fluidos no newtonianos.....	13
2.3.3. Líquidos pseudoplásticos o pseudoplásticos.....	13
2.3.4. Líquidos dilatantes o espesantes por cizallamiento.....	14
2.3.5. Plasticidad o líquidos muy pseudoplásticos.....	14
2.3.6. Tixotropía.....	15
2.3.7. Efecto de deslizamiento de la pared.....	16
2.3.8. Viscoelasticidad	16
2.3.9. Método de ensayo de fluencia y recuperación.....	18
2.3.10. Métodos de ensayo dinámicos.....	20

Tabla de contenido

2.4. Reometría y viscosimetría	22
2.5. Reología de lodos.....	23
2.5.1. Viscosidad de lodos	23
2.5.2. Estrés de fluencia de lodos.....	24
2.5.3. Viscoelasticidad de los lodos	26
2.5.4. Tixotropía de lodos	27
2.5.5. Modelos reológicos de lodos.....	27
2.5.6. Relación de parámetros reológicos y clásicos	30
2.5.7. Acondicionamiento de lodos y su relación con la reología	32
2.6. Dispositivos para el análisis de la reología de lodos	33
3. MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.1. Muestras de lodos	35
3.2. Caracterización de lodos.....	35
3.2.1. Contenido de sólidos	36
3.2.2. pH y conductividad.....	38
3.2.3. Tiempo de succión capilar (CST)	38
3.2.4. Potencial Zeta.....	39
3.3. Acondicionamiento de lodos.....	40
3.4. Dispositivos de medición.....	41
3.4.1. Viscosímetro digital Brookfield DVE.....	41
3.4.2. Reómetro Anton Paar MCR 502.....	42
3.5. Pruebas preliminares.....	43
3.5.1. Viscometría	43
3.5.2. Reometría	44
3.6. Metodología de medición final.....	47
3.6.1. Pruebas de flujo y viscosidad	47
3.6.2. Pruebas de barrido de amplitud	48
3.6.3. Pruebas de barrido de frecuencia	48
3.6.4. Pruebas de fluencia y recuperación.....	48
3.6.5. Ensayos con geometría de cono y placa	48
3.7. Aplicación de modelos y relación de las características de los lodos con los parámetros reológicos.....	49
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1. Caracterización y acondicionamiento de lodos.....	51
4.2. Resultados reológicos preliminares.....	55
4.2.1. Viscometría	55
4.2.2. Reometría	57
4.3. Curvas de caudal y viscosidad.....	64
4.3.1. Curvas de viscosidad del viscosímetro.....	64

4.3.2.	Curvas de caudal y viscosidad del reómetro	67
4.4.	Pruebas de barrido de amplitud.....	74
4.5.	Pruebas de barrido de frecuencia.....	80
4.6.	Prueba de fluencia y recuperación	84
4.7.	Pruebas de comparación utilizando geometría de cono y placa	89
4.8.	Aplicación de modelos y relación de las características de los lodos con los parámetros reológicos.....	92
4.8.1.	Modelos de curvas de caudal y viscosidad.....	92
4.8.2.	Relación de la concentración de sólidos con la viscosidad y el límite elástico	95
4.8.3.	Influencia de la dosificación de polímeros en la viscosidad	96
4.8.4.	Relación de la CST con la viscosidad al variar la concentración de sólidos y la dosis de polímeros.....	99
5.	CONCLUSIONES	100
6.	BIBLIOGRAFÍA	104

Tabla de contenido

Lista de figuras

Figura 1: Métodos de deshidratación en relación con la distribución de agua en materiales de lodos (Tsang y Vesilind, 1990)	6
Figura 2: Flujo de corte en el modelo de placas paralelas (Barnes, 2000).....	12
Figura 3: Ejemplos de curvas de flujo y viscosidad en escala logarítmica (Schramm, 1994).....	13
Figura 4: Diagramas que describen la tixotropía (Schramm, 1994).....	15
Figura 5: Representación del modelo de Maxwell, Kelvin-Voigt y Burgers, donde "G" y "n" representan la constante elástica y la viscosidad respectivamente (Barnes, 2000).....	17
Figura 6: Desplazamiento y recuperación de un modelo de Burger en función del tiempo (Schramm, 1994).....	19
Figura 7: Representación esquemática de pruebas oscilatorias (Barnes, 2000).	20
Figura 8: Diagrama vectorial del módulo complejo (Paroline, 2016).	21
Figura 9: Reograma típico de Tixier, Guibaud y Baudu (2003).....	24
Figura 10: Determinación de la tensión de fluencia utilizando datos de barrido de deformación, donde G_0^* es el módulo complejo y γ_c es la deformación crítica (Ayol, Dentel y Filibeli, 2006).	25
Figura 11: Modelos reológicos (Eshtiaghi et al., 2013).....	28
Figura 12: Reograma de Campbell y Crescuolo (1982).	32
Figura 13: Dispositivo de medición del tiempo de succión capilar utilizado en el laboratorio.....	38
Figura 14: Dispositivo de prueba de jarra utilizado para acondicionar las muestras de lodo.....	40
Figura 15: Viscosímetro digital Brookfield DVE.....	41
Figura 16: Sistema de medición de placas paralelas (Schramm, 1994).....	43
Figura 17: Reómetro Anton Paar MCR 502.	43
Figura 18: Variación del CST por DS para lodos TU de la EDAR N°1.	53
Figura 19: Variación del CST por efecto del polímero en muestras de lodos de las EDAR N° 1 y 2.	54
Figura 20: Repeticiones de curvas de viscosidad con el viscosímetro DVE.....	56
Figura 21: Curvas de viscosidad en aumento y disminución de la velocidad de rotación para muestras TU de la PTAR N° 1.....	57
Figura 22: Variación de la viscosidad en el tiempo con la velocidad de corte escalonada para tres muestras diferentes de lodos TU de la EDAR N°1.....	58
Figura 23: Resultados preliminares de las pruebas de barrido de amplitud para lodos TU de la EDAR N° 1. Donde 1, 2 y 3 se refieren a tres repeticiones con muestras diferentes.	59
Figura 24: Resultados preliminares de las pruebas de barrido de frecuencia para lodos TU de la EDAR N° 1. Donde 1, 2 y 3 se refieren a tres repeticiones con muestras diferentes.	60
Figura 25: Resultados preliminares de la prueba de fluencia para lodos TU de la planta de tratamiento de aguas residuales N° 1 con una tensión de corte de 2 Pa. Variación en el intervalo de tiempo.	61
Figura 26: Ensayo de fluencia con esfuerzo cortante de 2 Pa. Definición de porciones.	62
Figura 27: Resultados preliminares de la prueba de fluencia a diferentes esfuerzos cortantes (logaritmo lineal).....	63
Figura 28: Resultados preliminares de la prueba de fluencia a diferentes esfuerzos cortantes (log-log).	63
Figura 29: Variación de la viscosidad debido al contenido de sólidos secos para muestras de la planta de tratamiento de aguas residuales N° 1.....	64
Figura 30: Variación de la viscosidad límite debido a la concentración de sólidos secos de muestras de lodos de EDAR N° 1.	65
Figura 31: Comportamiento de la viscosidad debido a la dosificación de polielectrolito para muestras de la EDAR N° 1....	66
Figura 32: Comportamiento de la viscosidad en función de la dosificación de polielectrolito para muestras de la EDAR n° 2.	66
Figura 33: Variación de la viscosidad límite debido a la dosificación de polímeros en muestras de lodos de las EDAR N° 1 y 2.....	67

Lista de figuras

Figura 34: Curvas de pre-corte para muestras de lodos de la PTAR N° 1 (tres repeticiones para TU y TC). 68	68
Figura 35: Curvas de caudal medio (a) y viscosidad (b) de lodos TU y TC de las muestras de la EDAR n°	
1.	69
Figura 36: Curvas de caudal medio (a) y viscosidad (b) de lodos TU y TC de las muestras de la EDAR n°	
2.	70
Figura 37: Curvas de caudal medio (a) y viscosidad (b) de lodos TU y TC de las muestras de la EDAR n°	
3.	71
Figura 38: Curvas de caudal medio (a) y viscosidad (b) de lodos TU y TC de las muestras de la EDAR n°	
4.	72
Figura 39: Resultados de la prueba de barrido de amplitud. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 1...	75
Figura 40: Resultados de la prueba de barrido de amplitud. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 2...	76
Figura 41: Resultados de la prueba de barrido de amplitud. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 3...	76
Figura 42: Resultados de la prueba de barrido de amplitud. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 4...	77
Figura 43: Comparación de pruebas de amplitud entre muestras de lodos TU(a) y TC(b) de todas las EDAR.	
.....	78
Figura 44: Comparación de la tensión de fluencia y el punto de flujo para todas las EDAR.....	80
Figura 45: Resultados de la prueba de barrido de frecuencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 1...	81
Figura 46: Resultados de la prueba de barrido de frecuencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 2...	81
Figura 47: Resultados de la prueba de barrido de frecuencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 3...	82
Figura 48: Resultados de la prueba de barrido de frecuencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 4...	82
Figura 49: Diferencia entre las pruebas de frecuencia y amplitud en el punto común de deformación cortante (0,1 %) – velocidad de corte (10 rad/s)	
para muestras de TU y TC de las cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales.....	84
Figura 50: Resultados de la prueba de fluencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 1. Por debajo	
del punto de esfuerzo de fluencia (a). Por encima del punto de flujo (b).....	85
Figura 51: Resultados de la prueba de fluencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 2. Por debajo	
del punto de esfuerzo de fluencia (a). Por encima del punto de flujo de fluencia (b).....	86
Figura 52: Resultados de la prueba de fluencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 3. Por debajo	
del punto de esfuerzo de fluencia (a). Por encima del punto de flujo de fluencia (b).....	87
Figura 53: Resultados de la prueba de fluencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.° 4. Por debajo	
del punto de esfuerzo de fluencia (a). Por encima del punto de flujo de fluencia (b).....	88
Figura 54: Curvas de caudal (a) y viscosidad (b). Comparación de la geometría de placas paralelas frente a la de cono y placa para la	
planta de tratamiento de aguas residuales n.° 4.	90
Figura 55: Prueba de barrido de amplitud dinámica. Comparación de la geometría de placas paralelas y de cono y placa para la planta	
de tratamiento de aguas residuales n.° 4.	91
Figura 56: Relación entre el DS y el límite elástico de los lodos TU extraídos de las cuatro EDAR.....	96
Figura 57: Relación entre la viscosidad y el CST para lodos TU extraídos de la EDAR n° 1. Cada punto tiene un contenido de DS	
diferente.....	99
Figura 58: Relación entre la viscosidad y la CST con dosis de polímero variable para la EDAR N° 1 (a) y la EDAR N° 2 (b). Cada punto tiene una dosis	
de polímero diferente.	100

Lista de Tablas

Tabla 1: Comparación de métodos alternativos de deshidratación (Metcalf et al., 2014).	7
Tabla 2: Información general y características de las muestras de lodos tomadas de las cuatro EDAR.	35
Tabla 3: Principales características de las muestras de lodos de las cuatro EDAR.....	51
Tabla 4: Características de las muestras diluidas con TU de la EDAR N°1.....	52
Tabla 5: Características de las muestras de las EDAR N°1 y N°2 en función de la dosificación del polímero.....	53
Tabla 6: Principales características de las muestras de lodos utilizadas para la medición reológica.	55
Tabla 7: Principales parámetros de viscosidad de las muestras de lodos de las cuatro EDAR.....	73
Tabla 8: Límite de fluencia y punto de fluidez de las muestras de lodos de las cuatro EDAR.....	79
Tabla 9: Comparación de pruebas de frecuencia y amplitud para muestras de lodos de las cuatro EDAR. 83	
Tabla 10: Comparación de pruebas de fluencia y amplitud para muestras de lodos de las cuatro EDAR.	89
Tabla 11: Resultados del ajuste del modelo Herschel-Bulkley y los parámetros clave para las cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales. (Ajuste realizado utilizando únicamente datos de curvas de caudal de: 6,31 1/s a 63,10 1/s y extrapolando τ_0)....	93
Tabla 12: Resultados del ajuste del modelo Sisko y los parámetros clave para las cuatro EDAR.....	93
Tabla 13: Resultados del ajuste del modelo Cross y los parámetros clave para las cuatro EDAR.	94
Tabla 14: Resultados del ajuste de la función exponencial que relaciona el contenido de sólidos con la viscosidad y los parámetros clave para la EDAR N°1, utilizando el viscosímetro Brookfield y con contenido de sólidos variable.	95
Tabla 15: Resultados del ajuste de la función exponencial que relaciona el contenido de sólidos con la viscosidad y los parámetros clave para la EDAR N°1, utilizando el viscosímetro Brookfield y con dosis de polímero variables.	97
Tabla 16: Resultados del ajuste de la función exponencial que relaciona el contenido de sólidos con la viscosidad y los parámetros clave para la EDAR N° 2, utilizando el viscosímetro Brookfield y con dosis de polímero variables.	97
Tabla 17: Resultados del ajuste de la función exponencial que relaciona el contenido de sólidos con la viscosidad y los parámetros clave para las cuatro EDAR, utilizando el reómetro Anton Paar y con una dosificación de 6,0 g/kgDS para muestras de TC.....	98

Abreviaturas

RSE	Velocidad de corte controlada
CSS	Esfuerzo cortante controlado
CST	Tiempo de succión capilar
DS	Sólidos secos
Elia Mundial de la Salud	Electrodeshidratación
EPS	Sustancias poliméricas extracelulares
LVE	Viscoelástica lineal
MDW	Deshidratación mecánica
Departamento de salud de Oregon	Dosis óptima de polímero
Resistencia específica a la filtración	Resistencia específica a la filtración
TC	Acondicionado espesado
TS	Sólidos totales
Resistencia de ruptura térmica	Sólidos suspendidos totales
TU	Espesado sin acondicionar
Contra	Sólidos volátiles
VSS	Sólidos volátiles suspendidos
Planta de tratamiento de aguas residuales	Planta de tratamiento de aguas residuales

Abreviaturas

1. Introducción

1.1.El problema de la gestión y eliminación de lodos de depuradora

Los lodos de depuradora son el subproducto inevitable del tratamiento de aguas residuales. Básicamente, el problema a la solución de un problema mayor. La cantidad de material producido anualmente ha sido aumentando debido al rápido crecimiento de la industria y la población, acompañado de un Aumento riguroso de los estándares de tratamiento que exigen los productos respetuosos con el medio ambiente. métodos de eliminación. Como resultado, los costos de manipulación y transporte de lodos han aumentado. El punto en que a menudo constituyen la mitad de los costos totales de un tratamiento de aguas residuales. Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (To et al., 2016, Hong et al., 2018). La respuesta internacional a esta El problema es lograr una estrategia de gestión sostenible de lodos que también pueda abordar los problemas legales. prohibición de los métodos de eliminación convencionales, como los vertederos (Eshtiaghi et al., 2013).

Por lo tanto, la deshidratación se ha convertido en el principal proceso de eliminación de lodos que recibe atención. reducción de costes, ya que utiliza una gran parte de la energía total consumida por las EDAR. Normalmente, el lodo se deshidrata mediante procesos mecánicos como prensas de filtro de banda, centrífugas o filtros prensa. Para mejorar la eficiencia del proceso, se utiliza un acondicionador El agente se añade antes de la deshidratación mecánica, por lo que se optimiza el uso de El polímero se ha convertido en un foco de atención principal para muchos investigadores, como lo enumeran Kholisa, Fester y Revista de Ciencias Sociales (2018).

Esto significa que los parámetros reológicos tienen ahora una importancia cada vez mayor en los lodos. caracterización, ya que afectan fuertemente las operaciones de tratamiento y disposición tales como bombeo, almacenamiento, manipulación, deshidratación, secado, transporte y relleno sanitario, entre otros. Otros, por ejemplo, la selección del sistema y el equipo más adecuados para el almacenamiento. y el transporte depende de la consistencia física del lodo. Si bien el lodo líquido puede ser Los lodos plásticos se almacenan en tanques y se transportan por tuberías, y se pueden almacenar en contenedores. y trasladados mediante camiones, facilitando la gestión y manipulación del material a disponer. de (Spinosa y Lotito, 2003).

Aunque el comportamiento reológico de los lodos con un contenido de sólidos muy bajo (por debajo del 2%) se considera newtoniano (como el agua), el comportamiento común encontrado para la concentración Los lodos se describen como no newtonianos (Spinosa y Lotito, 2003). Como resultado, los lodos son Se considera un material muy complejo de estudiar con diversas limitaciones experimentales y debates metodológicos en torno a ella (Eshtiaghi et al., 2013).

En el caso del proceso de deshidratación, a pesar de los numerosos esfuerzos, sigue siendo un gran desafío. Muchos factores influyen en las características de deshidratación de los lodos, lo que dificulta la correcta evaluación del desempeño y selección de índices adecuados (To et al., 2016).

1.2. Objetivos de la tesis

El objetivo principal de la tesis fue la evaluación del comportamiento reológico de las aguas residuales. lodos de cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales. Para lograrlo, los objetivos de este trabajo fueron:

- Establecer el marco de medición necesario para los diferentes parámetros reológicos.
pruebas.
- Estudiar la influencia del contenido de sólidos en la reología de los lodos a través de diferentes métodos reométricos.
- Estudiar la influencia del acondicionamiento con diferentes dosis de polielectrolitos sobre la Reología de lodos a través de diferentes métodos reométricos.
- Finalmente, establecer una relación entre las características de los lodos y las propiedades reológicas. Parámetros para aplicaciones de deshidratación.

1.3. Estructura de la tesis

El esquema general de esta tesis es el siguiente:

- El capítulo 1 presenta brevemente los problemas modernos asociados con los lodos. gestión, eliminación y tratamiento. El peso económico de la deshidratación y la Enfoque reológico del problema. Además, se describen los objetivos, las limitaciones y las Se describe la estructura de la tesis.

- El capítulo 2 proporciona una breve descripción inicial del proceso de deshidratación con
Se hace hincapié en los índices y el condicionamiento. Además, se ofrece una visión más profunda de reología y especialmente a su aplicación en lodos de aguas residuales.
- El capítulo 3 muestra los materiales y métodos utilizados para la preparación preliminar de lodos.
caracterización y para las mediciones reológicas.
- En el capítulo 4 se discuten los resultados obtenidos de la metodología.
- El capítulo 5 resume los principales hallazgos y presenta áreas de interés para el futuro.
investigación.

1.3 Estructura de la tesis

2. Estado del arte

2.1. Deshidratación de lodos

Dado que el proceso de lodos activados es el más utilizado en las plantas de tratamiento de aguas residuales, El resultado es la producción de grandes cantidades de lodos activados en exceso que contienen diversos componentes orgánicos y minerales. Esto presenta un serio problema de eliminación ya que es considerado un material peligroso. A pesar de los resultados de la minimización de lodos en la aireación proceso, se han dedicado muchos esfuerzos a mejorar la deshidratabilidad de los lodos (Neyens y Baeyens, 2003).

Para fines de deshidratación, muchos investigadores a menudo describen la fase acuosa del lodo. en cuatro categorías simplificadas según lo propuesto por Tsang y Vesilind (1990):

- Agua libre que no está en contacto con las partículas, incluida el agua vacía no afectada por proceso de capilar.
- Agua intersticial atrapada entre los flóculos.
- Agua superficial retenida por adsorción y adhesión a la superficie de la partícula.
- Agua intercelular y químicamente unida.

El contenido de agua ligada es uno de los principales aspectos limitantes en la eficiencia de eliminación de agua. debido a la gran cantidad de energía necesaria para separarlo (Neyens y Baeyens, 2003). La figura 1 muestra una visualización conceptual de la distribución del agua en los lodos en comparación a la eliminación por deshidratación, dependiendo del método aplicado.

El proceso más convencional y ampliamente utilizado para la deshidratación de lodos en EDAR ha sido deshidratación mecánica (MDW) mediante filtración y compresión, a menudo seleccionada debido a una menor requerimiento de energía en comparación con otros métodos (Vaxelaire, Bongiovanni y Puiggali, 1999). Sin embargo, dependiendo del rango de aplicación, esta técnica no puede alcanzar el contenido de agua necesario para una disposición final eficiente. En promedio, sólo una Se puede lograr un rango de contenido final de DS del 20 al 30 % (Zhan et al., 2015; Visigalli et al., 2017). En consecuencia, la tendencia actual de investigación es proponer alternativas potenciales para mejorar la

capacidad de deshidratación de los procesos convencionales. Esto se traduce en la intensificación de la
 Proceso de deshidratación mediante la combinación de diferentes métodos, incluida la fuerza mecánica,
 influencia térmica y diferentes superposiciones de campos como el eléctrico, el magnético o
 campos de ultrasonidos (Mahmoud et al., 2010). Algunas de las combinaciones que dieron como resultado
 Las aplicaciones prácticas son la unidad de secado térmico equipada antes del proceso de incineración.
 o el proceso de electro-deshidratación (EDW). Este último es capaz de aumentar el contenido final de DS.
 hasta el rango del 40-45% (Feng, Wang y Ji, 2014; Visigalli et al., 2017). Ambos se muestran
 a lo largo de la deshidratación mecánica en la Figura 1 en relación con el grado de eliminación de humedad.

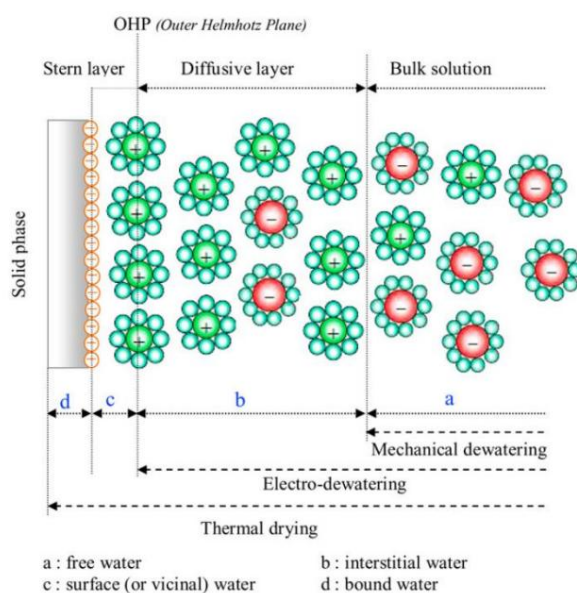


Figura 1: Métodos de deshidratación en relación con la distribución de agua en materiales de lodos (Tsang y Vesilind, 1990).

Generalmente, la deshidratación mecánica comprende dos etapas de proceso. En la primera, el filtrado
 etapa en la que se forma la torta, mientras que en la segunda etapa de compresión se aplica fuerza mecánica.
 para extraer agua adicional. Los diferentes métodos de combinación de campos se pueden aplicar en
 Además de una o ambas etapas de deshidratación, o puede introducirse como tratamiento previo o posterior.
 de todo el proceso. La elección adecuada de los métodos combinados para un determinado lodo de EDAR
 El esquema de tratamiento es esencial para lograr una mayor recuperación del producto y una menor humedad en el
 tortas finales con el añadido de reducir el consumo energético y por tanto la disminución de
 costos ambientales. La Figura 1, por ejemplo, muestra que técnicas como
 filtración/compresión u otros métodos MDW correspondientes a la sedimentación gravitacional y
 La centrifugación es eficaz para eliminar el agua libre. En los casos en que la centrifugación convencional

El método no sería suficiente para lograr la eliminación adecuada del agua o requeriría lo contrario.

En condiciones extremas, se ha demostrado que EDW logra una mejor eficiencia de eliminación al tomar en cuenta una proporción significativa de agua intersticial gracias al campo eléctrico y presión utilizada además de las condiciones normales de funcionamiento (Mahmoud et al., 2010).

Información adicional sobre ventajas y desventajas de algunos de los mencionados métodos de deshidratación, ver Tabla 1.

Tabla 1: Comparación de métodos alternativos de deshidratación (Metcalf et al., 2014).

Deshidratación Método	Ventajas	Desventajas
Filtro de banda prensa	• Bajo requerimiento de energía • Capital relativamente bajo y los costos operativos • Menos complejo mecánicamente y más fácil Para mantener	• Limitado hidráulicamente en Rendimiento • Muy sensible a la entrada Características de la alimentación de lodos • El funcionamiento automático es Generalmente no se recomienda
Electro- deshidratación	• Funcionamiento automático • Buenos resultados para situaciones difíciles. lodos y biosólidos • Cierta flexibilidad para lodos entrantes características • 3-5 veces más energía más eficiente que las secadoras	• Operación por lotes • Costos de capital moderados a altos • Nueva tecnología • El costo operativo es sensible A la electricidad local
Lodo camas de secado	• Costo de capital más bajo método donde la tierra es Fácilmente disponible • Bajo consumo de energía • Menos sensible a los lodos. variabilidad Mayor contenido de sólidos que los métodos mecánicos	• Requiere una gran superficie de terreno. • Requiere lodos estabilizados • La eliminación de lodos es una tarea laboriosa. intensivo

2.1 Deshidratación de lodos

2.1.1. Índices de deshidratación de lodos

Para alcanzar los objetivos de reducción de costes de gestión y transporte de lodos mediante
Para mejorar el proceso de deshidratación, es necesario establecer índices confiables que reflejen
su eficiencia. Sin embargo, debido a la naturaleza altamente complicada de los lodos y las variaciones
En diversos procesos de deshidratación, la dificultad para evaluar el rendimiento se vuelve mayor.
Inmediatamente se aprecian diferentes aspectos de las propiedades de los lodos, su acondicionamiento y deshidratación.
Los métodos no han permitido un indicador universal adecuado que refleje la capacidad de la relación líquido-sólido.
separación. A pesar de la dificultad de cuantificar los parámetros, se han realizado numerosos estudios
Se llevó a cabo con diferentes propiedades de lodos que pueden influir en la deshidratabilidad del mismo.
lodos. Estos valores incluyen pH, contenido orgánico, carga superficial de partículas, porosidad de la torta,
compresibilidad, tamaño de partícula, concentración de sólidos, agua ligada y reología
características (To et al., 2016).

Las técnicas tradicionales de medición de la deshidratabilidad de lodos incluyen la succión capilar.
Tiempo (CST) y Resistencia Específica a la Filtración (SRF). Aunque la SRF imita la presión
filtros y filtros de vacío, CST apenas se parece al proceso de deshidratación real.
En teoría, simular el proceso de deshidratación real debería ser el método ideal para estimar
la concentración final de la torta. Sin embargo, esto no es factible con solo CST o SRF como único
Los indicadores no son suficientes para describir una separación líquido-sólido que está influenciada por varios
parámetros. Además, simular el proceso real que ocurre en la deshidratación.
La adquisición de equipos no es una tarea fácil (To et al., 2016).

Resistencia específica a la filtración (SRF)

La prueba SRF introducida por Coakley y Jones (1956), fue la primera técnica en utilizarse
ampliamente, ya que se consideró un parámetro importante para evaluar la calidad de filtración del
lodos. Las pruebas SRF utilizan vacío o presión para medir la resistencia al agua.
extracción a través de un medio poroso. Un valor alto de resistencia específica indica una mayor dificultad para deshidratar
el lodo y viceversa. Los valores entre 1010 y 1011 m/kg se consideran bajos y, por lo tanto, clasifican un lodo como fácil
de deshidratar. Mientras que los valores en el rango de 1014
– 1015 m/kg describen un lodo difícil de deshidratar. El uso principal del parámetro SRF es
Ha estado en la optimización del acondicionamiento de lodos para varios dispositivos de deshidratación como

filtros de vacío, prensas de banda y prensas de placas y marcos. Además de ser un proceso complicado y es un procedimiento que requiere mucho tiempo, la principal limitación del método de prueba SRF recae en la Reconocimiento de un alto nivel de especialización y de un equipamiento sofisticado para lograr un buen resultado. mediciones, especialmente para mediciones de campo (Graham, 1999; To et al., 2016).

Tiempo de succión capilar (CST)

La CST se puede definir como el tiempo (en segundos) necesario para un determinado volumen de lodo. filtrar a través del papel secante por fuerza capilar. Este índice fue desarrollado y Introducido por Baskerville y Gale (1968) como sustituto de la prueba SRF. También puede ser Se describe como "tiempo de deshidratación" y desde entonces se ha utilizado ampliamente para evaluar los efectos de acondicionamiento de lodos así como determinar la dosis óptima de acondicionadores para el proceso de deshidratación. Valores bajos de CST (menos de 20 segundos) indican una buena condición para El proceso de deshidratación, ya que el agua se puede separar fácilmente de la fase sólida. Por otra parte, valores altos de CST son indicativos de una mala deshidratabilidad (Novak, 2006; Graham, 1999; To et al., 2016). De la ecuación 1, queda claro que CST es función de Parámetros que dependen de las propiedades del papel de filtro, de las constantes instrumentales y del lodo. propiedades.

$$\text{Ecuación 1} \quad \theta = \frac{1}{C} \left(\frac{\mu}{X} \right) \quad \text{---}$$

Dónde,

θ : es una constante instrumental adimensional

μ : es la viscosidad del filtrado

C : es la concentración sólida

X : es la constante de filtrabilidad

Uno de los problemas con este método es el hecho de que, a diferencia de SRF, el CST se ve afectado por los sólidos. concentración y, por lo tanto, no se pueden comparar con muestras de otras plantas de tratamiento de aguas residuales. Se utiliza un valor normalizado para superar la limitación y se puede calcular dividiendo Valor de CST por los sólidos suspendidos totales (SST) iniciales (Yu et al., 2008).

Aunque se han realizado esfuerzos para mejorar la precisión y confiabilidad de la prueba CST, existen dificultades aún sin resolver. Por ejemplo, Christensen et al. (1993) observaron que las pruebas CST

2.2 Características de los lodos y procesos preliminares que afectan la deshidratabilidad

El objetivo de determinar la dosis óptima de polímero (OPD) puede provocar una sobredosis. del acondicionador debido a la viscosidad del filtrado que se utiliza en los cálculos. Además, dado que Se aplica poca presión a los flóculos de lodo durante las mediciones, el CST no puede reflejar resistencia del flóculo o resistividad al esfuerzo cortante durante el proceso de deshidratación. Esto se resume en problemas de falta de confiabilidad con las mediciones de CST (Pan et al., 2003; To et al., 2016).

2.2 Características de los lodos y procesos preliminares que afectan a la deshidratabilidad

2.2.1 Origen de los lodos

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) comúnmente diseñadas incluyen cuatro principales:

Etapas del tratamiento: preliminar, primario, secundario (biológico) y terciario (avanzado).

En función de cada proceso se pueden observar cambios significativos en los parámetros fisicoquímicos, biológicos y reológicos. comportamiento se produce en los residuos de las aguas residuales municipales a lo largo de todo el proceso. De acuerdo con En estos pasos se generan distintos tipos de lodos.

Los lodos primarios proceden del desbordamiento de la corriente de los tanques de sedimentación primaria. contiene materiales tanto orgánicos como inorgánicos presentes en los sólidos sedimentables.

La composición compuesta principalmente de partículas discretas favorece una fácil deshidratación.

Lodos secundarios o exceso de lodos activados producidos en la etapa biológica secundaria de

El tratamiento se espesa en el espesador de flotación por aire disuelto. El exceso espesado

El lodo activado es un material coloidal complejo que incluye microorganismos, bacterias y microorganismos muertos. células y sus residuos y otros sólidos suspendidos y coloides adsorbidos. Como resultado,

La deshidratabilidad depende de muchas variables. Además, la deshidratabilidad es comúnmente menor que en los lodos primarios debido a la presencia de partículas más finas.

Tanto el lodo activado en exceso primario como el espesado se combinan para formar lodos mixtos.

El último material se introduce luego en un digestor anaeróbico para su posterior degradación.

La digestión es un proceso bacteriano que convierte la materia orgánica en dióxido de carbono, agua y

Los desechos orgánicos se estabilizan en presencia de oxígeno. La digestión anaeróbica, en cambio, ocurre en

La ausencia de oxígeno, que conduce a la producción de metano y dióxido de carbono.

Se requiere la estabilización de la materia orgánica putrescible antes del proceso de deshidratación y disposición final.

2.2.2. Acondicionamiento de lodos

El tratamiento de acondicionamiento es generalmente beneficioso o necesario para la mayoría de los tipos de lodos con el fin de preparar el lodo para una deshidratación más eficiente. El acondicionamiento con polímeros ha sido el método más estudiado y aplicado, especialmente para la deshidratación mecánica. Aunque muchos investigadores han invertido tiempo en estudiar la optimización de los regímenes de acondicionamiento, pocos se han incluido los efectos del equipo de deshidratación. Se ha dado a entender que la selección de los agentes acondicionadores no debe basarse únicamente en la naturaleza de los biosólidos de los lodos, sino también depende del tipo de sistema de deshidratación. Por ejemplo, Novak et al. (1999) informaron que la banda de la prensa de filtro y la centrífuga, ambas técnicas mecánicas, tienen diferentes condiciones de acondicionamiento. demandas. (To et al., 2016).

Además, la dosis óptima de polímero no solo depende de la cantidad añadida, sino también sobre la tensión de corte aplicada antes y después del proceso de acondicionamiento. La tensión de corte generados en bombas, tuberías y dispositivos de deshidratación tienen un efecto significativo en el polímero. Dosis. La mezcla durante períodos prolongados aumenta la demanda de polímeros de los lodos debido a la ruptura de flóculos que exponen superficies cargadas negativamente al polímero. Esta es una de las razones por las que la caracterización reológica se ha convertido en una herramienta importante para caracterizar la deshidratación de lodos (Örmeci y Ahmad, 2009).

2.3 Reología

La reología se puede definir como la ciencia que estudia el flujo y la deformación de los materiales, con énfasis en el primero (Barnes, 2000). Describe la deformación de la materia bajo la influencia de tensiones o fuerzas aplicadas (Schramm, 1994; Hong et al., 2018).

Esta rama científica existe porque sólo unos pocos líquidos se acercan al comportamiento ideal en aplicaciones prácticas o técnicas. La gran mayoría son parte de un espectro que se destaca entre el comportamiento líquido y sólido. Esto significa que presentan comportamientos tanto elásticos como viscosos.

2.3 Reología

propiedades en cierta medida y en diferentes rangos, y por lo tanto pueden denominarse "visco-elástica" (Schramm, 1994).

2.3.1. Flujo de cizallamiento

El tipo de flujo de interés para este trabajo es el flujo de corte (Figura 2), donde las partículas adyacentes se desplazan unas sobre otras generando capas hipotéticas que se deslizan unas sobre otras. La más simple El caso a explicar es el modelo de placas paralelas, que da una mejor idea para definir la fuerza cortante. tensión y la velocidad de corte presentes en un flujo de corte. Si se aplica una fuerza tangencialmente y por área unitaria de la capa superior, generará una respuesta del líquido llamada esfuerzo cortante. hace que el líquido fluya siguiendo un patrón distintivo: capa desplazada sobre capa, entre el espacio de las placas. La velocidad máxima se encuentra en el límite superior donde la fuerza es aplicado, mientras que en el límite inferior la velocidad del flujo se considera apropiadamente nula. Por lo tanto, la velocidad de corte se define como la pendiente de la caída de velocidad lineal a lo largo del tamaño del espacio. que se traduce matemáticamente en gradiente de velocidad o tasa de deformación Schramm, (1994); 1998.

Ecuación 2

$$= \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{v}{h} = \dot{\gamma}$$

Ecuación 3

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \frac{v}{h} = \eta \dot{\gamma}$$

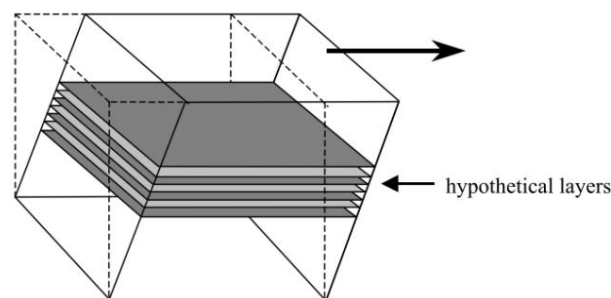


Figura 2: Flujo de corte en el modelo de placas paralelas (Barnes, 2000).

Siguiendo las observaciones de Isaac Newton, la relación entre el esfuerzo cortante y Se expresó la velocidad de corte con la ley básica de la viscosimetría para un líquido ideal, afirmando que La tensión de corte es proporcional a la velocidad de corte en función de la viscosidad. La viscosidad Puede definirse como la resistencia interna del líquido (Schramm, 1994).

2.3.2. Curvas de flujo y viscosidad para fluidos no newtonianos

Los diagramas más básicos que se pueden representar en reología son el flujo y la viscosidad.

curvas. La primera muestra la correlación entre la tensión de corte y la velocidad de corte, mientras que la última relaciona la viscosidad con la velocidad de corte. Ambas curvas se representan logarítmicamente y están relacionadas entre sí en el sentido de que la curva de viscosidad se puede obtener matemáticamente a partir de la Curva de caudal medida. Las curvas de caudal se pueden medir adoptando dos enfoques: controlado Velocidad de corte (CSR) o tensión de corte controlada (CSS). En CSR, la velocidad de corte aumenta y la Se mide la tensión de corte necesaria para alcanzar dicha velocidad de corte. Mientras que en CSS ocurre lo contrario. ocurre (Schramm, 1994; Paroline, 2016).

La figura 3 muestra algunos ejemplos del comportamiento de diferentes tipos de líquidos y cómo se comportan.

Las curvas se relacionan. Por ejemplo, se puede ver fácilmente que para un fluido newtoniano existe una relación lineal relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte, ya que la viscosidad permanece constante para diferentes tasas de deformación. Cualquier otro comportamiento es estrictamente no newtoniano (Schramm, 1994).

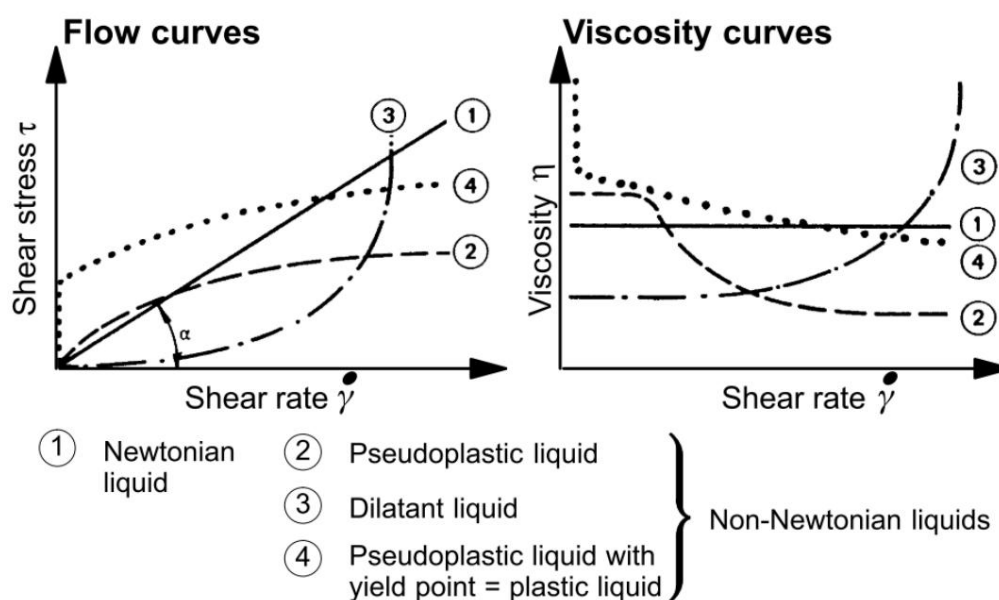


Figura 3: Ejemplos de curvas de flujo y viscosidad en escala logarítmica (Schramm, 1994).

2.3.3. Líquidos pseudoplásticos o pseudoplásticos

Varios fluidos que parecen homogéneos pueden en realidad caracterizarse por muchas características diferentes. partículas de diferentes formas y orientaciones, o por la presencia de largas cadenas entrelazadas cadenas moleculares. Cuando el material está en reposo, el orden interno irregular de dichos elementos

2.3 Reología

dará como resultado una alta resistencia contra cualquier estrés de flujo inducido, lo que se correlaciona con un alto viscosidad. A medida que aumenta la velocidad de corte, las partículas cambian de orientación, se estiran, se desenredan, y se deforman en la dirección del flujo para aliviar la resistencia, reduciendo la viscosidad general del material. Esto es lo que se llama efecto pseudoplástico (Schramm, 1994).

Este comportamiento se observa cuando la viscosidad es constante a baja velocidad de corte (η_0), luego a una En cierto punto, a medida que aumenta la velocidad de corte, la primera disminuye linealmente en un gráfico logarítmico. hasta que finalmente alcanza un nuevo valor constante (η_∞). La pseudoplástica se puede describir mejor Luego, la viscosidad disminuye con la velocidad de corte. La curva de viscosidad muestra dos viscosidades newtonianas limitantes, separadas por una región de ley de potencia (Barnes, 2000).

2.3.4. Líquidos dilatantes o espesantes por cizallamiento

Estos líquidos se caracterizan por un aumento de la viscosidad a medida que aumenta la velocidad de corte debido a comportamiento específico entre partículas. A velocidades bajas, pueden fluir fácilmente unas contra otras, Pero con el aumento de la velocidad de corte, el cambio de posición de las partículas se vuelve más difícil. y por lo tanto aumenta la viscosidad. Este efecto en los líquidos es generalmente poco frecuente (Schramm, 1994).

En raras ocasiones, la viscosidad puede aumentar a medida que aumenta la velocidad de corte. Este fenómeno se produce después de un comportamiento pseudoplástico aparentemente normal. Hay un punto en el que el pseudoplástico La tensión es lo suficientemente alta como para alterar las partículas ordenadas en la dirección del flujo. Esto provoca Estos últimos se agrupan o se aglutinan de manera aleatoria, lo que da como resultado un aumento de la viscosidad. (Barnes, 2000).

2.3.5 Plasticidad o líquidos muy pseudoplásticos

Estos pueden describirse como líquidos pseudoplásticos con la introducción del punto de fluencia, También se denomina tensión de fluencia. Tradicionalmente se define como la tensión cortante que supera la suma de resistir la red intermolecular/interpartícula de fuerzas de enlace que podrían ser polares fuerzas, fuerzas de Van der Waals, etc. Después de este umbral, la red colapsa y la El material comienza a fluir como un líquido, mientras que antes del punto de fluencia el material solo deformarse elásticamente como un sólido (Schramm, 1994).

Hoy en día se le conoce como tensión de fluencia aparente ya que a velocidades de corte más bajas la viscosidad no tiende al infinito sino que en realidad se establece en un valor constante que es de algunos órdenes de magnitud mayor que la que se puede medir. En otras palabras, todavía fluye (Barnes, 2000).

En la práctica, varios fluidos muestran una tensión de fluencia aparente. En general, la mayoría de los modelos utilizados para describir líquidos integrando la constante en las formulaciones en un rango limitado de cizallamiento.

tensión/velocidad de corte, donde el punto de fluencia puede ser válido. Se ha demostrado que esta práctica

Puede hacer predicciones efectivas y, por lo tanto, es comúnmente aceptado. Algunas de las más populares

Los modelos son los modelos Bingham, Casson y Herschel-Bulkley (Barnes, 2000).

2.3.6. tixotropía

Este término se utiliza para describir el fenómeno del cambio de viscosidad en el tiempo además de

Dependencia de la velocidad de corte. Esto es diferente de la pseudoplástica, ya que esta última es solo

Depende de la velocidad de deformación. Muchas dispersiones muestran enlaces entre partículas y moléculas relacionados con el tiempo.

que conducen a la creación de estructuras en red llamadas "geles". Cuando el material se somete a

Una tensión externa hace que la microestructura se rompa en pocos minutos, dando como resultado un

Disminución de la viscosidad. Cuando el flujo se detiene, el movimiento browniano es suficiente para disminuir lentamente

Reconstruir la estructura tridimensional a medida que se forman enlaces más débiles, como el hidrógeno o los enlaces iónicos.

lugar en un proceso que podría durar horas o incluso días (Schramm, 1994; Barnes, 2000).

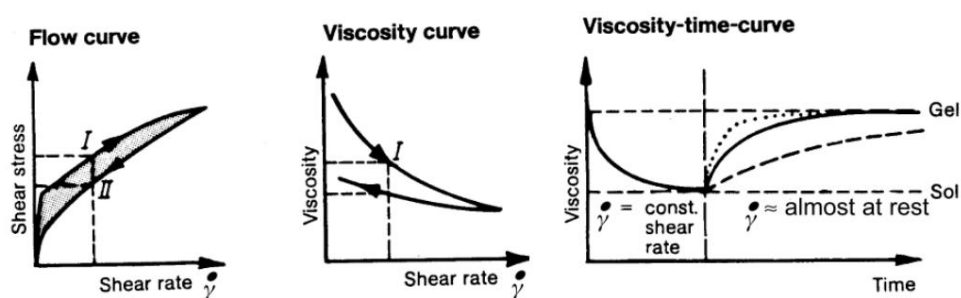


Figura 4: Diagramas que describen la tixotropía (Schramm, 1994).

El fenómeno explicado anteriormente se puede visualizar en el experimento de la Figura 4. Como

La velocidad de corte aumenta en la curva I, la estructura del gel se descompone rápidamente hasta formar una nueva

Se alcanza una viscosidad mínima estable, denominada "sol". Luego, a medida que aumenta la velocidad de deformación

reducida, siguiendo la curva II, la viscosidad aumenta a un ritmo menor, ya que el tiempo no es

2.3 Reología

suficiente para reformar la microestructura original. En la curva de flujo, el área entre los puntos trazados

Las curvas ilustran que se requiere energía para romper la estructura tixotrópica.

La curva de viscosidad-tiempo, por otro lado, muestra la diferencia en la tasa de transformación.

de gel a sol y viceversa (Schramm, 1994).

Medir la tixotropía no es fácil. El hecho de que dependa tanto del tiempo como de la velocidad de corte,

significa que no se puede medir en ningún experimento en el que varíen. Experimentos que

Mantener una velocidad de corte constante en el tiempo son las mejores soluciones (Barnes, 2000).

2.3.7. Efecto de deslizamiento de la pared

Este efecto está presente en cualquier límite entre cualquier suspensión de partículas y una superficie lisa.

pared. El deslizamiento de la pared es un fenómeno local en el que la microestructura se ve alterada por la

adyacencia de la superficie debido a fuerzas hidrodinámicas, viscoelásticas y químicas que actúan sobre

La suspensión en ese nivel. El resultado es una superficie de lubricación aparente en la interfaz.

que disminuye la viscosidad de la suspensión. La capa compuesta prácticamente de partículas

La suspensión libre puede variar su tamaño dependiendo del radio de las partículas más grandes, generalmente alrededor de

5 veces el radio de la partícula. La consecuencia es el aumento de la concentración en la

alrededores inmediatos de la capa (Barnes, 2000; Mezger, 2015).

La importancia de este efecto se acentúa en los experimentos de laboratorio ya que la capa

se hace más evidente si se trabaja con espacios pequeños o si se utilizan geometrías diferentes.

Por ejemplo, cuando aumenta la concentración o el tamaño de partícula, o si la brecha geométrica o

La velocidad de corte disminuye. Una forma de eliminar la capa deslizante es simplemente hacerla rugosa.

superficies (Barnes, 2000; Mezger, 2015).

2.3.8. Viscoelasticidad

Como ya se ha introducido, los materiales viscoelásticos presentan propiedades tanto elásticas como viscosas que

Se pueden medir y determinar para obtener una mejor idea de la estructura molecular.

que caracteriza el comportamiento de dichos materiales. Esta información permite

manipulación de las propiedades para cumplir con los requisitos de la aplicación (Schramm, 1994).

La mecánica de un fluido viscoelástico se basa en una microestructura que representa un mínimo estado de energía almacenada en condiciones naturales de reposo. Si los líquidos se deforman, la energía almacenada se manifiesta como una fuerza elástica que se opone a las tensiones de deformación (como los resortes), con El objetivo es mantener la condición inicial de relajación. La fuerza elástica se puede evidenciar como diferentes módulos elásticos para pequeñas deformaciones y representados como un módulo de almacenamiento. la tensión aumenta, la respuesta elástica pasa de un aumento lineal a uno no lineal hasta que Se alcanza un estado estable. La fuerza elástica se vuelve constante y el comportamiento general cambios. Básicamente, la deformación se vuelve muy lenta y constante, lo que significa que la El material fluye de manera constante. Además, las fuerzas viscosas que dependen de la velocidad siempre son presente (Barnes, 2000).

En este punto, es importante señalar la diferencia entre la respuesta viscoelástica y el comportamiento tixotrópico en el tiempo. En la región viscoelástica lineal, la microestructura responde elásticamente sin cambios en la estructura. Por el contrario, en la tixotropía la La estructura se rompe o se reconstruye (Barnes, 2000).

Se pueden utilizar modelos mecánicos simples para comprender el comportamiento viscoelástico. Los elementos elásticos y viscosos lineales, como resortes y amortiguadores respectivamente, pueden ser combinados para recrear el comportamiento natural. Entre los modelos habituales, el Maxwell, Se pueden mencionar los modelos de Kelvin-Voigt y Burger. Este último es una combinación de ambos. Modelos de Maxwell y Kelvin-Voigt, haciéndolo complejo pero más realista. (Barnes, 2000).

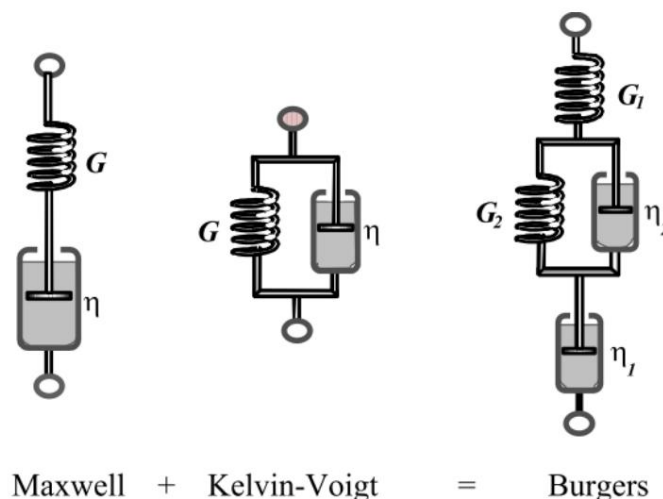


Figura 5: Representación del modelo de Maxwell, Kelvin-Voigt y Burgers, donde "G" y "n" representan la constante elástica y la viscosidad respectivamente (Barnes, 2000).

Un número adimensional útil que permite evaluar la relevancia de la viscoelasticidad en

Un proceso de deformación es el número de Deborah: $De = \frac{\lambda}{t}$. Como se analiza en Schramm (1994),

2.3 Reología

Se puede definir como la relación entre el tiempo característico del material " λ " y el

procesos de deformación basados en valores de tiempo característicos " t ". Cuando el proceso

El tiempo característico es más corto que el tiempo característico de los materiales, $De \gg 1$, y

No se desarrollará un comportamiento viscoelástico y el material se comportará como un sólido elástico.

En cambio, el tiempo característico del material es más corto que el tiempo de proceso, $De \ll 1$ y el

El material fluirá como un líquido viscoso. Finalmente, si De es alrededor de 1, el comportamiento viscoelástico se desarrollará durante el proceso.

2.3.9. Método de ensayo de fluencia y recuperación

Este método de prueba se introdujo para diferenciar las respuestas elásticas y viscosas.

en una muestra dada. Además, para marcar el hecho de que las diferentes respuestas son la velocidad de corte dependiente, este método incluye el tiempo de respuesta a la dependencia del estrés como un nuevo parámetro (Schramm, 1994).

Las pruebas de fluencia y recuperación generalmente se consideran como la primera aproximación a lo desconocido.

materiales que se espera que sean viscoelásticos (Schramm, 1994). En la práctica, un cambio repentino

Se aplica una tensión constante a la muestra mientras se monitorea la deformación resultante (Barnes, 2000).

2.3.9.1. Modelo de hamburguesas

Para comprender el modelo de Burgers es necesario introducir cada uno de sus

componentes. El comportamiento ideal del sólido bajo tensión sigue la conocida ley de Hooke,

que establece que la deformación o tensión de un material es linealmente proporcional a la fuerza

o tensión aplicada. Generalmente, un modelo elástico ideal se representa como un resorte espiral, y el

Las respuestas medidas provienen de tensiones de tracción y de corte, que no dependen del tiempo.

El módulo de Young " E " y el módulo de corte " G " representan la resistencia mencionada de un

sólido que se deforma (Schramm, 1994).

Ecuación 4 =

Ecuación 5 =

= esfuerzo de tracción; = esfuerzo cortante

Los fluidos idealizados, por otro lado, se caracterizan por una correlación lineal entre la tasa de deformación y la tensión aplicada como para la ley de Newton. Para modelar este comportamiento se utiliza un amortiguador. Las fuerzas y deformaciones que actúan sobre el pistón son lineales. Unidos por la viscosidad del líquido interno (Schramm, 1994).

Ecuación 6

= "

Para definir la viscoelasticidad se utilizan diferentes combinaciones de resortes y amortiguadores, en serie o en paralelo, se puede utilizar. Aunque una deducción matemática precisa para la viscoelástica real. Las sustancias pueden lograrse mediante combinaciones complejas, este modelo mecánico no tiene correlación con la estructura molecular interna u homogeneidad del material estudiado (Schramm, 1994).

El modelo de Burger puede definirse así como una de las combinaciones posibles más comunes. utilizado y se puede visualizar en la Figura 6. En la fase de fluencia, en respuesta al paso de fluencia, un El paso de deformación instantánea es seguido por un aumento gradual no lineal hasta un aumento en Se alcanza una tasa constante. La pendiente descrita en el aumento lineal está relacionada con una respuesta viscosa. Una vez que se elimina el estrés, comienza la fase de recuperación. Al principio, la tensión se reduce instantáneamente en una respuesta elástica, seguida de una disminución no lineal. Finalmente, como había flujo, queda una deformación irreversible o no recuperada. La linealidad de las curvas es un comportamiento viscoelástico esperado (Schramm, 1994).

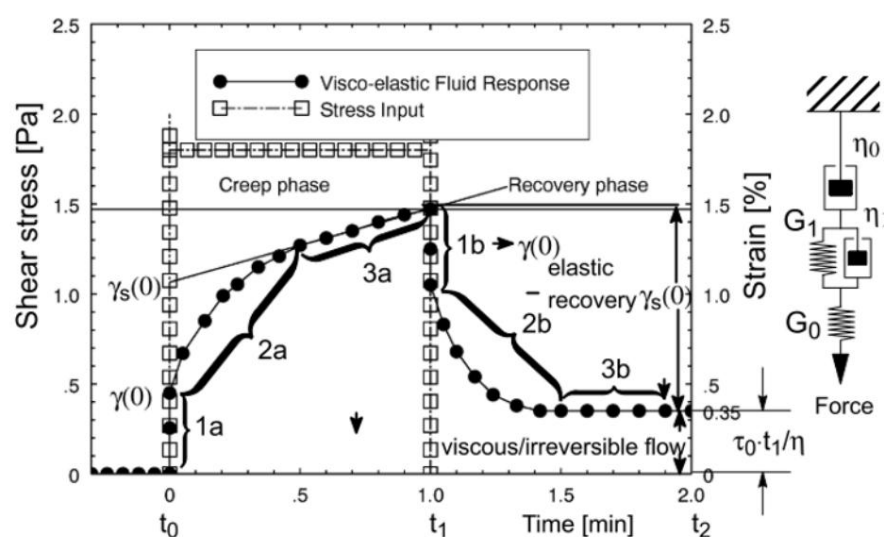


Figura 6: Fluencia y recuperación de un modelo de Burger en función del tiempo (Schramm, 1994).

2.3 Reología

2.3.10. Métodos de ensayo dinámicos

En lugar de aplicar una tensión constante en el tiempo que conduce a un estado estable, también es posible realizar una prueba oscilatoria en muestras sobre un rango preestablecido de frecuencias.

Las frecuencias altas corresponden a tiempos cortos y, por lo tanto, a una respuesta elástica predominante, mientras que las frecuencias bajas están relacionadas con períodos de tiempo más largos, de ahí un comportamiento viscoso dominante. (Barnes, 2000; Mezger, 2015).

Generalmente se utiliza una función de tiempo con forma de onda sinusoidal para aplicar la tensión o deformación a la muestra. La forma resultante de la entrada sinusoidal se convierte electrónicamente en Respuestas en fase similares a sólidos y líquidos. La entrada es la forma de la ecuación 7 (Barnes, 2000; Mezger, 2015).

$$\text{Ecuación 7} \quad \gamma = \gamma_0 \sin(\omega t) \quad (7)$$

La velocidad angular está vinculada a la frecuencia de oscilación por:

$$\text{Ecuación 8} \quad \omega = 2\pi f \quad (8)$$

El componente de respuesta similar a un sólido se define como "módulo de almacenamiento" (G') y se caracteriza al estar en fase con la onda de entrada. G' también se puede describir como el módulo elástico o la tendencia a retroceder o mantener la forma. La respuesta similar a un líquido se describe en cambio por la "módulo de pérdida" complementario (G'') ya que está desfasado 90 grados con respecto a la onda de entrada, ver Figura 7. G'' puede verse como el módulo viscoso o la tendencia a fluir (Barnes, 2000; (2015).

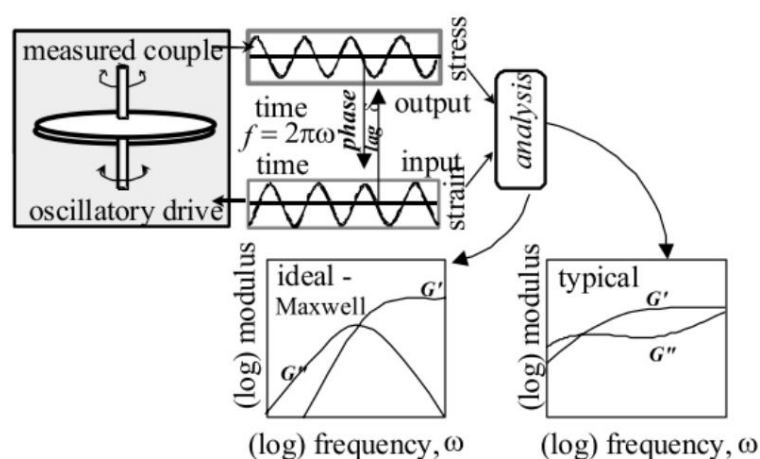


Figura 7: Representación esquemática de la prueba oscilatoria (Barnes, 2000).

En general, tanto G' como G'' también pueden interpretarse como una única respuesta denominada G^* que representa la resistencia total del material de muestra contra la tensión aplicada en la forma de la ecuación 9. G^* es un número complejo que se puede representar mediante un diagrama vectorial en donde G' significa la parte real, mientras que G'' indica la parte imaginaria. El ángulo formado entre G^* y G' está el ángulo de fase (δ), que varía de 0° a 90° (Figura 8). Mientras que un valor de ángulo de 0° representa un comportamiento puramente elástico o sólido, un valor de 90° caracteriza un comportamiento puramente viscoso o líquido. Los materiales viscoelásticos tienen ángulos de fase en este rango. La tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$), llamada "factor de amortiguamiento" o "factor de pérdida", es la relación G''/G' y describe el equilibrio viscoelástico del material (Schramm, 1994; Paroline, 2016).

Ecuación 9

$$G^* = \frac{G'}{\sqrt{2}} + \frac{G''}{\sqrt{2}}i$$

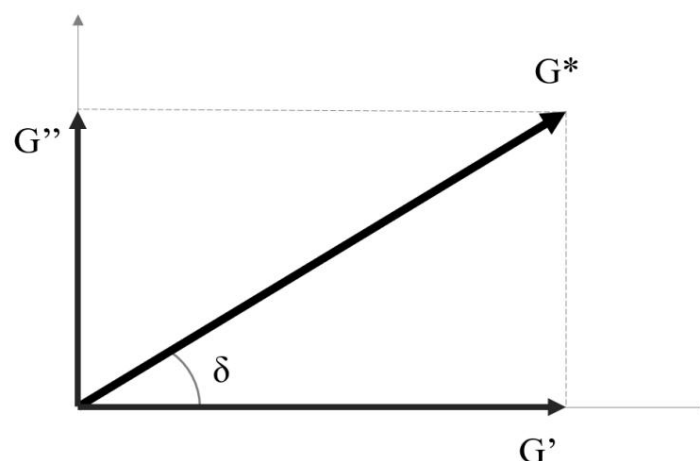


Figura 8: Diagrama vectorial del módulo complejo (Paroline, 2016).

En la práctica, el ángulo de deflexión del rotor del reómetro utilizado a menudo permanecerá por debajo de 1° para garantizar una respuesta viscoelástica lineal. Esto significa que el material permanecerá "en reposo" y no se verá alterado mecánicamente ni se romperá la estructura interna. (Schramm, 1994).

2.4. Reometría y viscosimetría

La reometría se puede definir como la ciencia de la medición de la viscosidad y otras propiedades y comportamientos reológicos. Los reómetros aplican una fuerza (que se traduce a una tensión cortante en el material) o una velocidad (que significa la deformación o esfuerzo cortante) velocidad impuesta al material) en la superficie en contacto con la muestra de prueba. La respuesta de la muestra se mide en la superficie de contacto. Se pueden utilizar diferentes geometrías como tubos, placas paralelas, conos y placas y cilindros concéntricos. La tensión cortante y la fuerza cortante Por lo tanto, las tasas se evalúan utilizando constantes geométricas en puntos de referencia estándar como el Por ejemplo, el borde exterior de las placas paralelas. Finalmente, se pueden representar gráficamente como una función de entre sí en un gráfico llamado reograma o curva de flujo, la tensión cortante se puede dividir por la velocidad de corte para poder graficar el comportamiento de la viscosidad (Barnes, 2000).

Dependiendo de la geometría, la velocidad de corte y la tensión de corte son las mismas en todas partes. a lo largo de la superficie (como cono y placa) o uno de ellos varía en una materia conocida independientemente de la reología de la muestra de ensayo. Esto último se puede observar, por ejemplo, en el flujo utilizando el reómetro de placas paralelas, donde la velocidad de corte varía linealmente desde cero en el centro hasta un valor conocido " $\omega R/h$ " en el borde de las placas, donde " R " es la placa radio, " h " el espacio y " ω " la velocidad de rotación en rad/s. (Barnes, 2000).

Es importante destacar que los "reómetros absolutos" se definen por las unidades físicas utilizadas. Se acepta internacionalmente que son "Newtons" para las fuerzas, "metros" para las dimensiones del sistema sensor y "segundos" para intervalos de tiempo. Estos dan como resultado el definición de viscosidad en "pascal por segundo". El objetivo es que los datos sean fácilmente comparable entre reómetros, lo que es particularmente esencial para definir no Propiedades de flujo newtoniano (Schramm, 1994).

Los reómetros pueden funcionar a una velocidad de corte o a una tensión de corte constantes, lo que proporciona la Posibilidad de realizar muchas mediciones diferentes. Cuando se ejecuta el experimento Al controlar la velocidad de corte, los resultados son las curvas de flujo y viscosidad. En general, esto se puede Se realiza con los dispositivos más simples, que se denominan viscosímetros. Los reómetros, por otro lado. La mano, aunque todavía puede completar las mediciones anteriores, también puede realizar mediciones controladas. esfuerzo cortante, dando así la posibilidad de medir propiedades viscoelásticas por fluencia y métodos de recuperación o dinámicos (Hong et al., 2018).

2.5 Reología de lodos

Se puede definir de forma general como las características viscosas de un lodo, y más precisamente como la relación entre la tensión cortante y la velocidad de corte, medida mediante un viscosímetro o reómetro y se presenta inicialmente en un reograma, seguido de curvas de viscosidad y dinámica complementaria. pruebas. El proceso de caracterización reológica de un lodo se puede concebir en tres pasos: el viscosimetría/reometría, el modelado reológico y finalmente la correlación de los parámetros reológicos. parámetros (Slatter, 1997). El comportamiento fluido del lodo depende en gran medida de los sólidos contenido. Para un lodo de depuradora diluido, se acerca a un fluido newtoniano (Sanin, 2002), mientras que A medida que aumenta la concentración de sólidos, el comportamiento se vuelve no newtoniano. En este estado, A partir del 3% de concentración de sólidos, los diferentes procesos de tratamiento inciden en Características reológicas (V.Lotito, L.Spinosa, G.Mininni, 1997).

2.5.1 Viscosidad de los lodos

En la práctica, los lodos de aguas residuales se consideran constantemente como fluidos no newtonianos, ya que El gradiente de velocidad (velocidad de corte) no es linealmente proporcional a la tensión de corte. El término Para describir su comportamiento se utiliza la "viscosidad aparente" (Eshtiaghi et al., 2013). El comportamiento complica la determinación de las propiedades del flujo de lodos y de parámetros simples, como la viscosidad, que de otro modo sería un valor fácil de determinar para describir fácilmente cualquier proceso (Dentel, 1997).

Un comportamiento comúnmente observado del lodo es la pseudoabrasión, caracterizada por una disminución viscosidad aparente a medida que aumenta la velocidad de corte (Chaari et al., 2003). En la Figura 9 se muestran dos características son inmediatamente evidentes: viscosidad de corte cero (η_0) como la viscosidad aparente a corte cero velocidad y viscosidad de corte infinita (η_∞) que en cambio es la viscosidad aparente resultante en tasas de corte muy altas

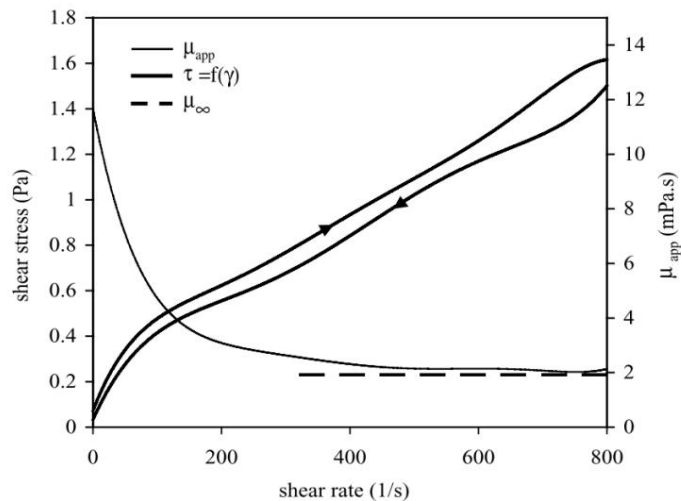


Figura 9: Reograma típico de Tixier, Guibaud y Baudu (2003).

Otro parámetro utilizado por investigadores como Tixier, Guibaud y Baudu (2003) es el “limitante viscosidad”, que corresponde al valor de la asíntota de la curva viscosidad-tiempo a alta velocidad de corte ya que la viscosidad aparente tiende a ser constante. La interpretación del parámetro describe la máxima dispersión de flóculos en el lodo resultante del impacto de altas Velocidad de corte. Este parámetro se puede utilizar para comparar la viscosidad de diferentes muestras y como un indicador de resistencia interna.

2.5.2. Estrés de fluencia del lodo

Con base en el artículo de revisión de Eshtiaghi et al. (2013), queda claro que la noción y definición

El límite de fluencia aún se debate debido al hecho de que los investigadores utilizan diferentes métodos experimentales y modelos reológicos para lograrlo. Esto se agrava si los valores son muy bajos.

Las velocidades de corte son necesarias para medirlo ya que los resultados pueden verse afectados por el deslizamiento de la pared. efecto.

La tensión de fluencia, como se definió anteriormente, es la tensión mínima aplicada requerida para un flujo continuo.

flujo de un material. Del artículo de revisión de Seyssiecq, Ferrasse y Roche (2003) se desprende que

Es evidente que en la práctica existe una tensión de fluencia en los sistemas de lodos concentrados.

Se utiliza como indicador de resistencia estructural para describir la red de diferentes materiales.

fortaleza.

Del trabajo de Spinosa y Lotito (2003), se puede apreciar la importancia del valor del esfuerzo de fluencia.

Se puede observar en diferentes aplicaciones de tratamiento, como estabilización, deshidratación y almacenamiento y transporte, etc. En su trabajo, el límite elástico también se confirma como un indicador de lodos. fluidez.

Existen dos tipos de tensión de fluencia que se pueden observar en el comportamiento del flujo, incluyendo:

lodo: tensión de fluencia estática que se refiere a la transición de tensión entre elástica y viscoelástica comportamiento y tensión de fluencia dinámica que corresponde a la transición de tensión entre comportamiento viscoelástico y viscoso. La tensión de fluencia dinámica es coherente con la definición Se utiliza en sistemas de lodos y mediciones (Eshtiaghi et al., 2013a).

Existen diferentes métodos experimentales para obtener el valor del esfuerzo de fluencia. Entre ellos,

Se puede utilizar una medición de flujo para graficar un reograma a partir del cual se extrapola el valor.

a partir de la curva de flujo a tensión cortante cero utilizando modelos reológicos como Herschel-Bulkley, explicado en el capítulo 2.5.5 (Slatter, 1997). Otro método moderno se basa en la dinámica

Medidas a partir de las cuales se puede determinar el parámetro utilizando el módulo complejo.

y valores de deformación críticos, como se observa en la Figura 10. (Ayol, Dentel y Filibeli, 2006).

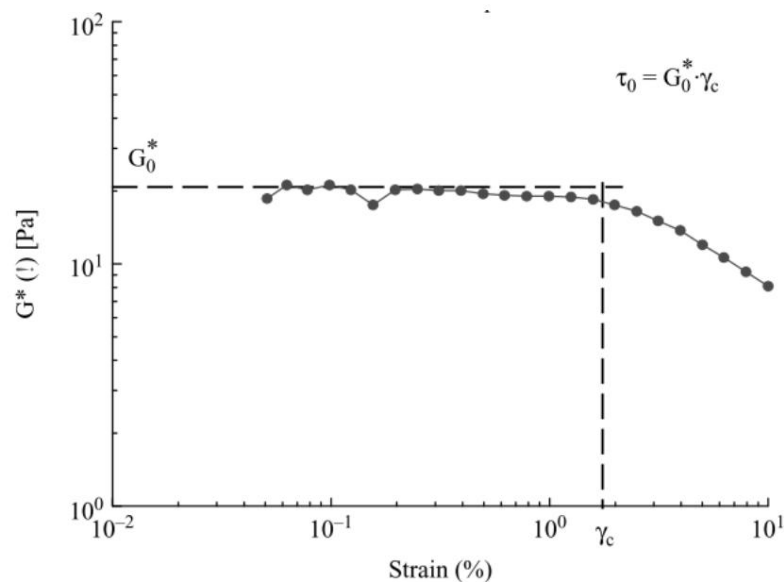


Figura 10: Determinación de la tensión de fluencia utilizando datos de barrido de deformación, donde G_0^* es el módulo complejo y γ_c es la cepa crítica (Ayol, Dentel y Filibeli, 2006).

2.5 Reología de lodos

2.5.3. Viscoelasticidad de los lodos

El lodo se puede definir como un material viscoelástico ya que se ha demostrado que se comporta como un sólido elástico y como líquido. Cuando se aplica tensión, el lodo se comportará como un sólido. inicialmente y finalmente como líquido debido a la descomposición de la estructura del flóculo. Además, Cuando la tensión aplicada (por debajo del punto de fluencia) se reduce a cero, se produce una recuperación elástica parcial. Se puede percibir que puede estar relacionado con el almacenamiento de energía en enlaces entre partículas (Eshtiaghi) et al., 2013).

Generalmente, las propiedades viscoelásticas en los lodos se obtienen mediante métodos dinámicos como Pruebas de barrido de frecuencia y amplitud en las que se mide la tensión sinusoidal en respuesta a una deformación sinusoidal aplicada. Los efectos de los módulos de almacenamiento y pérdida resultantes de Las mediciones se combinan en el módulo complejo, lo que da una idea general de Resistencia a la deformación (Ayol, Dentel y Filibeli, 2006).

Wang y Dentel (2011) trabajaron con barridos de frecuencia y observaron que $G' > G''$, lo que implica un comportamiento elástico dominante sobre el viscoso hasta alcanzar un punto crítico. Después de este punto, el comportamiento viscoso se volvió dominante ($G'' > G'$). Esta transición presenta En el sistema de lodos se sugirió una similitud con la transición entre sólidos y pastas. La tendencia persistió en el lodo acondicionado, aunque se extendió a la región viscosa. Este cambio sugiere que el lodo acondicionado tenderá a aumentar su comportamiento elástico mientras disminuye capacidad de retención de agua.

Ayol, Dentel y Filibeli (2006) observaron la misma tendencia al realizar pruebas dinámicas. Tanto para los lodos acondicionados como para los no acondicionados, el módulo de almacenamiento (G') fue mayor que Se mantuvo el módulo de pérdida (G'') como rango viscoelástico lineal. Para no lineal comportamiento viscoelástico, el módulo de almacenamiento tendió a disminuir mientras que el módulo de pérdida tendió a aumentar.

Chen, Lee y Lee (2005) demostraron que la adición de polímero coagulante Afectó significativamente el módulo complejo del lodo. A medida que se agrega el polímero, se forman lodos "más fuertes". Se forman sólidos que resultan en un aumento del módulo de almacenamiento. Se explicó que el El aumento de la fuerza de la red de flóculos podría ser causado por la formación de puentes entre catiónicos polímeros y partículas de lodos con carga negativa. Esto es coherente con trabajos posteriores de Wang y Dentel (2011) y Ayol, Dentel y Filibeli (2006).

Otro fenómeno observado por Wang y Dentel (2011) fue que para baja viscosidad, a altas tasas de cizallamiento, el lodo tuvo un comportamiento similar al de un gel en la región viscoelástica lineal. Esto sólo era cierto para el lodo acondicionado, lo que sugiere que se almacena más energía en el lodo rígido. estructura que se forma cuando se añade el polielectrolito.

Eshtiaghi et al., (2013) revisaron que "la aplicación de la medición dinámica en lodos La caracterización se ha restringido a la evaluación de las propiedades viscoelásticas, así como determinación de la tensión de fluencia. Además de eso, la fiabilidad de estos trabajos experimentales es No estoy seguro porque hay muy pocos estudios o resultados que se puedan utilizar para la evaluación. Dinámico La medición ha demostrado ser un método de análisis útil para determinar las propiedades elásticas. de lodos, lo que puede proporcionar una visión significativa de las cuestiones técnicas, como la mezcla y bombeo, en el proceso de tratamiento de aguas residuales".

2.5.4 Tixotropía de lodos

Uno de los efectos que dificulta la investigación debido a la complejidad de los sistemas de lodos es la tixotropía. Como se definió anteriormente, se refiere a la descomposición dependiente del tiempo resultante del lodo. estructura a partir de la aplicación de esfuerzo cortante. Esto fue observado por muchos investigadores que estudiaron la tixotropía en sistemas de lodos (Battistoni, 1997; Tixier, Guibaud y Baudu, 2003).

Baudez (2008) observó dos fenómenos por debajo de una tensión de corte crítica: "Rejuvenecimiento por corte" que ocurre cuando las fuerzas de corte tienden a romper la estructura de los sólidos y el "envejecimiento físico" Esto ocurre cuando las fuerzas coloidales tienden a reconstruir la estructura de los sólidos. Cuando la temperatura crítica Se alcanza el estrés y la estructura sólida no tiene tiempo suficiente para reconstruirse por completo. colapsa cuando el fluido comienza a fluir.

Eshtiaghi et al. (2013) revisaron que existe baja consistencia en los protocolos de laboratorio y en parámetros confiables o establecidos para caracterizar adecuadamente la tixotropía.

2.5.5. Modelos reológicos de lodos

Se revisó la elección de diferentes modelos reológicos no newtonianos para ser ampliamente... subjetivo y dependiente de diversas condiciones experimentales, como velocidades de corte o tensión. rangos para diferentes muestras de lodos (Seyssieq, Ferrasse y Roche, 2003).

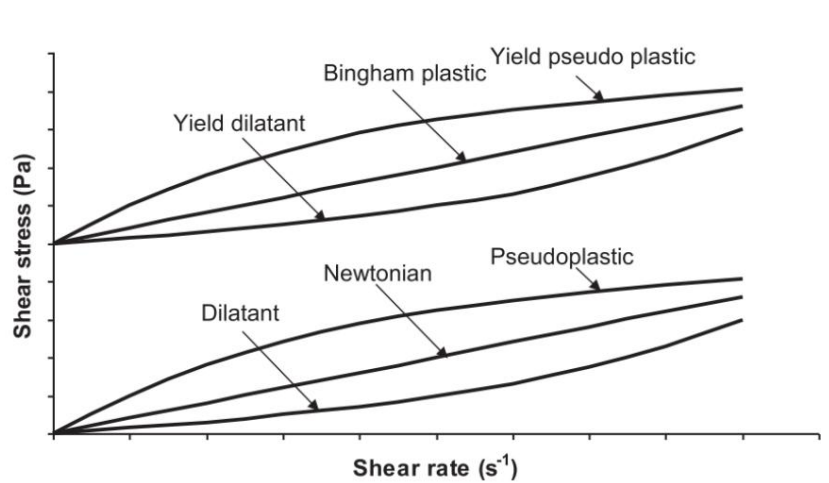


Figura 11: Modelos reológicos (Eshtiaghi et al., 2013).

Los modelos son varios (algunos básicos se pueden visualizar en la Figura 11 y se han utilizado para diferentes propósitos. El más comúnmente utilizado para describir el comportamiento de los lodos se basa en un A continuación se presenta un artículo de revisión de Eshtiaghi et al. (2013).

La ley de potencia simple o modelo de Ostwald

Se utiliza comúnmente para describir la viscosidad en un rango de cizallamiento bajo, aunque no es confiable para modelar.

El comportamiento del fluido no newtoniano a altas velocidades de corte donde la viscosidad medida permanece mayor que la viscosidad del agua.

Ecuación 10

$$= \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$$

El modelo de Bingham

Se utiliza frecuentemente para caracterizar lodos diluidos.

Ecuación 11

$$= \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$$

El modelo Herschel-Bulkley

Es la forma general del modelo de Bingham, modificada para complementar el flujo no lineal.

Curva. Normalmente se utiliza para caracterizar lodos concentrados en concentraciones bajas y altas.

También se describe a este último como un material pseudoplástico.

Ecuación 12

$$= \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$$

El modelo acoplado Bingham + Herschel-Bulkley

Ambos modelos están acoplados para lograr la modelización del comportamiento de los lodos en todo el rango.

de velocidades de corte.

Ecuación 13

$$\tau = \tau_0 + (\eta_0 \dot{\gamma}^{n-1} + 0) \dot{\gamma}$$

El modelo Sisko

Ecuación 14

$$\tau = \tau_\infty + \eta_0 \dot{\gamma}^{n-1}$$

El modelo de fluido de viscosidad cruzada

Ecuación 15

$$\frac{\tau - \tau_\infty}{\tau_0 - \tau_\infty} = \frac{1}{1 + (\dot{\gamma})^m}$$

Otros modelos son:

- El modelo Casson
- La ley de potencia truncada

Dónde:

τ_0 es la tensión de fluencia,

η es la viscosidad,

m es una constante empírica menor que uno (índice de comportamiento de flujo),

k es una constante empírica (índice de consistencia del fluido).

η_0 es la viscosidad aparente a cizallamiento cero.

η_∞ es la viscosidad aparente a velocidad infinita.

λ es la constante de tiempo.

Los factores "m" y "k", que controlan la curvatura del reograma, se han correlacionado entre

entre sí en diferentes intentos por diversas investigaciones. Por ejemplo, mediante un polinomio

función (Slatter, 1997), una función exponencial (Mori, Seyssiecq y Roche, 2006) o una

análisis de regresión (V.Lotito, L.Spinosa, G.Mininni, 1997).

La tensión de fluencia inicial " τ_0 " en todos los modelos representa la resistencia inicial de los sólidos del lodo.

a la deformación hasta que se aplique una tensión suficiente para superar el límite elástico de la fase sólida

resistencia. El fenómeno aparece en lodos con alto contenido de sólidos y disminuye cuando

Las estructuras de partículas se alteran. Una característica importante cuando se utiliza en lodos

condicionamiento (Dentel, 1997).

Además de las dificultades de medir la reología está la naturaleza tixotrópica de los lodos.

Al tener una respuesta reológica que varía con el tiempo, la historia previa de un lodo es importante.

2.5 Reología de lodos

para comprender adecuadamente su comportamiento real, ya que las partículas pueden estar bien floculadas o interrumpido con el consiguiente aumento o disminución de la viscosidad respectivamente (Dentel, 1997).

El problema más evidente en el área de la reología de lodos es el hecho de que los datos reológicos son rara vez comparables ya que no existe un protocolo estándar para la caracterización. Cada variable

Desde el manejo o almacenamiento de muestras hasta propiedades tixotrópicas y dependientes del tiempo, todas tienen impacto significativo en la reología del lodo (Eshtiaghi et al., 2013).

2.5.6 Relación entre parámetros reológicos y clásicos

Concentración de sólidos en viscosidad y tensión de fluencia

La relación entre la viscosidad y la concentración de sólidos para una suspensión diluida podría se puede describir mediante la ecuación de Einstein, suponiendo que los sólidos suspendidos en el fluido sigue siendo newtoniano y no hay interacción partícula-partícula (Sanin, 2002).

$$\text{Ecuación 16} \quad \eta = \eta_0 (1 + 2.5 \phi)$$

Dónde:

η : viscosidad

η_0 : viscosidad de la fase fluida

ϕ : fracción de volumen de partículas

En realidad, sin embargo, los lodos tienen generalmente una alta fracción de suspensión y las partículas interactúan entre sí, lo que significa que no se puede aplicar la ley de Einstein (Sanin, 2002).

Las ecuaciones empíricas basadas en correlaciones han sido las herramientas para describir la relación por todos los investigadores en la materia.

Tixier, Guibaud y Baudu (2003) encontraron que la viscosidad límite aumenta con la solidificación.

contenido. A medida que aumenta el contenido de sólidos, es más probable que las partículas se vuelvan más grandes y estén más cerca de entre sí, lo que transmite una interacción entre partículas más fuerte y, por lo tanto, una aparente elevada

Respuesta de la viscosidad del sistema de lodos. Este comportamiento fue común en otras investigaciones.

obras enumeradas en la revisión de Eshtiaghi et al. (2013b), como Abu-Jdayil, Banat y Al-

Sameraiy (2010) y Khalili Garakani et al. (2011). La ecuación 17 describe lo mencionado

comportamiento con una función exponencial.

Ecuación 17

$$= \times (') ^{-}$$

Dónde:

p: sólidos suspendidos en licor mixto

 γ' : velocidad de corte

“a” y “b” son los coeficientes empíricos.

La mayoría de los investigadores, como se muestra en el artículo de revisión de Eshtiaghi et al. (2013), también se reúnen en el hecho de que la tensión de fluencia tiende a aumentar a medida que aumenta la concentración de sólidos en el lodo.

Entre los modelos obtenidos al ajustar los datos se encuentran Slatter (1997) (Ecuación 18) y

Mori, Seyssiecq y Roche (2006) (Ecuación 19). La primera se basó en la extrapolación

de la curva de flujo utilizando el modelo de Bingham, mientras que este último utilizó una correlación exponencial basado en el modelo ajustado de datos de Herschel-Bulkley a través de medición dinámica.

Ecuación 18

$$= \frac{3}{-}$$

Ecuación 19

$$= (\times [\quad])$$

Donde TSS significa sólidos suspendidos totales.

Contenido de agua ligada en la viscosidad y el límite elástico

Aunque se han realizado pocas investigaciones, se acepta que el agua ligada tiene un efecto sobre viscosidad limitante debido a cambios en la estructura del flóculo y presencia de polímeros extracelulares sustancias (Eshtiaghi et al., 2013). Por ejemplo, Sozanski (1997), observó que el aumento

El contenido de agua provocaría una disminución de la viscosidad del lodo. El comportamiento se describe a continuación. con una función exponencial (Ecuación 20).

Ecuación 20

$$= [(-)]$$

Dónde:

W_{kr}: contenido crítico de agua

W: contenido de agua de las muestras

 η_B : la viscosidad plástica η : viscosidad aparente del modelo de Bingham

“a” y “b” son los coeficientes empíricos.

2.5 Reología de lodos

Sozanski (1997) también relacionó el contenido crítico de agua con el límite elástico con una ecuación exponencial.

$$\text{Ecuación 21} \quad = \quad [(-)]$$

Dónde:

W_{cr}: contenido crítico de agua de la muestra

τ_y : tensión de fluencia del modelo de Bingham

"c" y "d" son los coeficientes empíricos.

2.5.7. Acondicionamiento de lodos y su relación con la reología

El acondicionamiento de lodos es la operación en el tratamiento de lodos en la que se realiza un control directo de los lodos. Se consigue una reología muy buena. Los polímeros que se utilizan habitualmente para este fin tienen un alto peso molecular y por lo tanto ejercen un efecto profundo sobre la viscosidad, aumentando tanto los flóculos volumen y fuerza de los flóculos (Dentel, 1997).

Campbell y Crescuolo (1982) observaron que aumentar la adición de polímero también

Aumentar el límite elástico hasta alcanzar la dosis óptima. En su trabajo, el reograma

Se utiliza para representar curvas de lodos con diferentes dosis de polímeros. La solución óptima

La dosis corresponde a una altura específica del pico que a su vez corresponde al gel o

Fuerza de la red entrelazada. En la Figura 12, también se puede observar la relación CST.

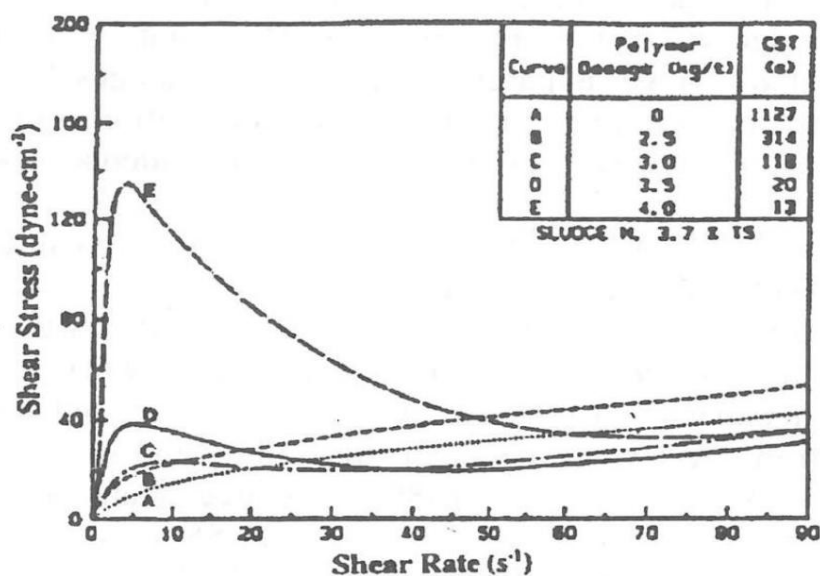


Figura 12: Reograma de Campbell y Crescuolo (1982).

La sugerencia de Campbell y Crescuolo (1982) fue que la derivada de la fuerza cortante

La curva de tensión versus velocidad de corte (es decir, viscosidad instantánea) podría usarse como parámetro de control.

Aunque estos hallazgos establecieron una relación consistente entre la adición de polímeros y

respuesta reológica, se atenuó por no ser lo suficientemente precisa por evaluaciones posteriores de

investigadores como Dentel y Abu-Orf (1995).

Investigaciones como la de Dentel (2011) continuaron sugiriendo que la dosis de polímero es el factor principal.

parámetro que controla la reología del sistema de lodos. En muchos trabajos CST

Las mediciones se han utilizado como indicador del rendimiento de deshidratación, mientras que la reología fue

utilizado para determinar las propiedades mecánicas de los flóculos (Hong et al., 2018). Trabajos de diferentes

Investigadores como Houghton y Stephenson (2002) encontraron que aumentar el polímero

La dosis resultó en un aumento del tamaño de los flóculos. Además, cuando se aplicó la dosis óptima de polímero

Se logra, aunque todavía se puede ver un impacto en las propiedades del lodo líquido, el lodo

Las estructuras no experimentan más cambios (Hong et al., 2018).

Ayol, Dentel y Filibeli, (2006) además coincidieron en que una vez que se introduce un floculante

En el sistema de lodos, los enfoques básicos del modelo reológico, como el plástico de Bingham o

Herschel-Bulkley no describe el lodo acondicionado final. Centrarse en el

La caracterización de este último se considera el enfoque principal para comprender la deshidratación.

ya que es el material procesado en sí. Los parámetros considerados en su trabajo son los

la resistencia de la red de lodos y la tensión de fluencia de los lodos. La primera define la condición en la que

en el que se altera la cohesión a gran escala, mientras que el segundo implica el punto inmediato

donde comienza el flujo. Por lo tanto, el método utilizado para medir ambos parámetros se basa en

reología dinámica.

2.6. Dispositivos para el análisis de la reología de lodos

Eshtiaghi et al. (2013) revisaron que los reómetros rotacionales y capilares eran los más

Dispositivos comunes utilizados para la aplicación de lodos. Las pruebas se realizan generalmente en un rango de

tensiones de corte o velocidades de corte en flujo en estado estacionario en la región laminar y luego extrapoladas

para regímenes turbulentos.

Los reómetros capilares, también conocidos como viscosímetros de tubo, se utilizan comúnmente debido a su

relativa simplicidad mecánica, que puede compararse con la del flujo por tuberías, ya que

comparten una geometría similar. Otras ventajas se basan en el hecho de que las tasas de tensión de corte son mayores.

Se pueden obtener en función de la velocidad del flujo, se pueden obtener reogramas en función de la velocidad.

y caída de presión y se pueden realizar pruebas in situ, entre otras. Por otro lado,

Las desventajas incluyen que se requieren grandes volúmenes de muestra para realizar el mediciones y la incapacidad de medir efectos dependientes del tiempo como la tixotropía (Slatter, 1997; Seyssiecq, Ferrasse y Roche, 2003).

Los reómetros rotacionales son los dispositivos más frecuentes en la reología de lodos, ya que ofrecen

Características únicas para estudiar las propiedades reológicas de los lodos, no disponibles en otros tipos.

de reómetros. El dispositivo relaciona el par con el esfuerzo cortante y la velocidad angular con la velocidad de corte.

Esto permite la evaluación de las características reológicas del lodo como el tiempo.

propiedades dependientes o métodos más simples para la determinación del límite elástico.

Las ventajas incluyen la necesidad de sólo un pequeño volumen de muestra y la comodidad de uso ya que

La mayoría de las variables se pueden modificar fácilmente (ajustes de la duración de la velocidad de corte, intervalos). entre mediciones, etc.) y los reogramas se pueden obtener directamente mediante transferencia de datos a un

PC. Los reómetros rotacionales también presentan algunos inconvenientes en forma de fenómenos

que pueden producirse en el espacio entre las superficies de contacto. Las fuerzas centrífugas pueden provocar cambios sobre la distribución del tamaño del sólido y el gradiente de concentración en el espacio de medición, mientras que

La sedimentación puede provocar errores de medición. Por último, el espacio libre en sí debe ser de al menos 10

veces más grande que la partícula más grande de la muestra (Eshtiaghi et al., 2013; Slatter, 1997;

Seyssiecq, Ferrasse y Roche, 2003; Dick y Ewing, 1967).

Según Eshtiaghi et al. (2013), la mayoría de los investigadores emplearon reómetros rotacionales para

Examinar la influencia de las condiciones de operación y las propiedades físico-químicas en la viscosidad de lodos de depuradora. Además, una descripción completa de 42 publicaciones

En relación con la reología de lodos, se puede encontrar la metodología, los parámetros y los resultados especificados en el trabajo de Ratkovich et al., (2013).

Ratkovich et al. (2013) concluyen en su trabajo que, aunque existen referencias en la literatura

sobre la reología de lodos están disponibles en grandes cantidades, la falta de un protocolo de medición,

la descripción parcial de la recopilación de datos experimentales y otras dificultades relacionadas con

La modelización ha limitado el intercambio de datos y la comparación de resultados. Los autores

Insiste en el desarrollo de un diseño de proceso estándar que debería estar basado en modelos y

en conjunto con experimentos dedicados, donde se consideran todos los factores importantes.

Además, las variaciones de las muestras de lodos complican aún más las circunstancias, ya que

Las características físico-químicas y las propiedades dependientes del tiempo están lejos de ser constantes.

3. Materiales y métodos

3.1 Muestras de lodos

Los investigadores en general toman muestras de lodos a la salida de los clarificadores secundarios.

La razón es que representa la etapa final del proceso de lodos activados y, por lo tanto, la etapa principal.

material de entrada para el proceso de tratamiento de lodos. Además, en esta etapa se realizan tres

funciones diferenciadas, actuando como clarificador, espesador de lodos y zona de almacenamiento de lodos y a menudo es considerado como el principal cuello de botella en el proceso de lodos activados. (Weiss et al., 2007).

Siguiendo la misma idea, las muestras para este trabajo se tomaron a la salida de la secundaria.

clarificadores, después del proceso de espesamiento. En la Tabla 2 se muestran las características generales y

Parámetros de las cuatro EDAR seleccionadas para el muestreo.

Tabla 2: Información general y características de las muestras de lodos tomadas de las cuatro EDAR.

No.	Población equivalente atendida	Dosificación de polímeros	Tratamiento de deshidratación mecánica	DS	VS/DS SEEC	Masa de deshidratada lodos producidos	Ruta de eliminación
	EN	g/kgDS		%	% Wh/kgH2O	Tonelada/año	
1	47.080	5.3 SACERDOTES 645 a.C.	Prensa de banda	18.1	76.0	1.7	2.458 Incineración Vertedero
2	308.646	15.4 REBADA ADICIONAL CL1480	Centrífugo	24.1	60.0	0,4	13.808 Agricultura
3	59.312	11.2 REBADA ADICIONAL CL1480	Centrífugo	19.5	72.0	1.7	6.041 Agricultura
4	33.722	15.0 FLOQUEO ADICIONAL CL1480	Centrífugo	19.0	80.0	3.8	1.674 Agricultura

3.2 Caracterización de lodos

Se requiere una caracterización preliminar del lodo para tener una mejor comprensión de

Las propiedades reológicas y de deshidratación del material. Cambios en las características básicas

3.2 Caracterización de lodos

del lodo siempre provoca una alteración del comportamiento del sistema. En el laboratorio, el lodo

La caracterización consistió en la medición del contenido de sólidos como sólidos secos (DS), relación de sólidos volátiles a sólidos secos (VS/DS), sólidos suspendidos totales (TSS), etc. Adicional Se realizaron mediciones para obtener valores de pH, conductividad, CST y potencial zeta.

Se determinaron todas las características para lodos espesados no acondicionados (TU) así como para muestras de lodos acondicionados espesados (TC).

3.2.1. Contenido de sólidos

El contenido de sólidos de las muestras de lodo se midió de acuerdo con los métodos estándar.

(APHA/AWWA/WEF, 2012). Para medir el DS, se toma una pequeña cantidad de lodo (alrededor de 8 ml).

se vierte en un crisol vacío previamente pesado para que se pueda medir la masa del lodo.

A continuación, el crisol con el lodo se introduce en el horno a 105 °C durante 12 horas.

Después del paso de evaporación inicial, el crisol se coloca en el desecador durante aproximadamente 30 minutos.

que proporciona una atmósfera de 0% de humedad, para evitar errores debidos a la atmósfera.

La humedad se transfiere a la muestra mientras se enfría a temperatura ambiente.

Luego se mide la masa del lodo y del crisol. El contenido de DS se calcula a partir de

Ecuación 22:

$$\text{Ecuación 22} \quad \text{DS} = \left(\frac{m_A - m_B}{m_C - m_B} \right) \times 100$$

Dónde:

- m_A: masa del crisol y de la muestra después del horno (g).
- m_B: masa del crisol vacío (g).
- m_C: masa del lodo antes del secado en el horno (g).

Los sólidos volátiles (SV) se pueden medir luego encendiendo la muestra de lodo seco en la mufla.

horno a 500 °C durante 6 horas. La masa del crisol y del lodo después de la incineración,

Con los 30 minutos adicionales en el desecador se registra finalmente la relación entre VS

y DS se puede calcular mediante la ecuación 23:

$$\text{Ecuación 23} \quad \text{VS} = \left(\frac{m_A - m_B}{m_C - m_B} \right) \times 100$$

Dónde:

- mA: masa del crisol y de la muestra después del horno (g).
- mB: masa del crisol vacío (g).
- mD: masa del crisol y del lodo después del horno de mufla (g).

Para medir los TSS, se filtra al vacío una pequeña cantidad de lodo (alrededor de 4 ml) a través de un Filtro Whatman GF/A previamente ponderado. El agua filtrada (que contiene sólidos disueltos) se descarta, mientras que la muestra no filtrada se coloca en un recipiente vacío previamente pesado. crisol. A continuación, el crisol con el filtro y el lodo se introduce en el horno a 105 °C durante 12 horas. Después del paso de evaporación inicial, el crisol se coloca en el desecador durante aproximadamente 30 minutos mientras se enfría a temperatura ambiente. La masa final del lodo, filtrar. Luego se miden los sólidos disueltos en el crisol. El contenido de TSS se calcula a partir de la ecuación 24:

$$\text{Ecuación 24} \quad \quad \quad = \frac{(\quad) - \quad}{\quad} 1000$$

Dónde:

- mA: masa del crisol, filtro y muestra después del horno (g)
- mB: masa del crisol vacío y del filtro (g)
- V: volumen de lodo de muestra (ml)

Los sólidos suspendidos volátiles (VSS) se pueden medir luego encendiendo la muestra de lodo seco. en el horno de mufla a 500 °C durante 6 horas. La masa del crisol, el filtro y el El lodo después de la incineración, con los 30 minutos adicionales en el desecador, es finalmente registrado. La relación entre VSS y TSS se puede calcular mediante la ecuación 25:

$$\text{Ecuación 25} \quad \quad \quad \quad = \frac{(\quad) - \quad}{\quad} 1000$$

Dónde:

- mA: masa del crisol, filtro y muestra después del horno (g)
- mB: masa del crisol, filtro y muestra después del horno mufla (g)
- V: volumen de lodo de muestra (ml)

3.2.2. pH y conductividad

La conductividad eléctrica se midió utilizando un medidor de conductividad (B&C Electronics-C 125,2) mientras que el pH se determinó con un medidor de pH Metrohm 827 pH. Las sondas forman ambas Se insertaron dispositivos de medición en un vaso de precipitados de 250 ml donde se vertieron 150 ml de lodo líquido. vertido y mezclado mediante un agitador magnético.

3.2.3. Tiempo de succión capilar (CST)

El instrumento CST estándar consta básicamente de dos bloques de plástico, un bloque de acero inoxidable Embudo cilíndrico, papel de filtro Whatman No. 17, tres electrodos fijados en el bloque superior y conectado a un temporizador eléctrico. La instalación del equipo se puede observar en la Figura 13. El procedimiento de prueba requiere que se vierta una pequeña cantidad de lodo en el tubo cilíndrico. Luego, La presión capilar asegurará un flujo radial a través del filtro de abajo hasta que el filtrado alcance los dos primeros sensores de electrodos fijos radialmente (32 mm de diámetro) que activan el temporizador. Finalmente, el temporizador se detiene cuando el flujo llega al tercer sensor fijado en el segundo circunferencia concéntrica (45 mm de diámetro). No se tiene en cuenta la presión hidrostática. consideración ya que la presión de succión capilar es mucho mayor.



Figura 13: Dispositivo de tiempo de succión capilar utilizado en el laboratorio.

El procedimiento estándar utilizado para medir el CST se puede resumir de la siguiente manera:

1. Se vierten 100 ml de muestra de lodo no acondicionado en un vaso de precipitados de 250 ml sobre un soporte magnético.
agitador;
2. Se añaden 20 ml de agua al lodo y, después de 10 s de agitación, se agita el vaso.
se elimina y se mide el CST;
3. El procedimiento de agitación se repite durante 30 s y 60 s más y se registra la CST;
4. Se calcula el CST promedio de tres valores.

Para los lodos acondicionados, el procedimiento sigue siendo el mismo pero no se añaden 20 ml de agua.
en el paso 2, ya que se reemplaza con una cantidad conocida de acondicionador.

3.2.4 Potencial Zeta

El potencial zeta (ζ) representa el potencial eléctrico de las dispersiones coloidales.

La magnitud del potencial zeta determina la capacidad de los flóculos microbianos para agregarse y

Por lo tanto, se considera un indicador clave de la estabilidad de dichas dispersiones coloidales.

Los valores absolutos del potencial zeta indican un sistema coloidal eléctricamente estable debido a la
fuerzas repulsivas entre flóculos. Mientras que los valores cercanos a cero fomentarán la agregación o
floculación ya que la fuerza eléctrica repulsiva representada entre flóculos es menor que
otras fuerzas de atracción. Con el objetivo de eliminar el agua que rodea el lodo
partículas, se necesita una magnitud baja de potencial zeta.

Para determinar el valor del potencial zeta, las muestras se filtraron primero al vacío.

a través de un papel de filtro Whatman No. 42 (tamaño de poro de 2,5 μm). El agua filtrada se utilizó para

Determinar el valor final con el instrumento Malvern Zetameter ZS90. La cubeta,

requerido por el instrumento, se enjuagó con metanol y agua desionizada y se llenó con

el filtrado. Posteriormente se introdujo en la cámara de visualización del zetámetro donde se colocó un

Se activa el campo eléctrico. La velocidad de movimiento resultante de los coloides es proporcional a

su potencial zeta, con carga positiva o negativa dependiendo de la dirección de la
desplazamiento.

Es importante señalar que las muestras de las EDAR tienen un valor negativo para el potencial zeta.

que corresponde a un comportamiento no agregativo causado por una repulsión electrostática
entre las partículas de lodo. En el caso de lodos TC, los valores del potencial zeta fueron

Se espera que sea menor que el lodo TU. Esto es resultado de una disminución de las fuerzas repulsivas cuando se añade el polielectrolito, lo que permite la agregación debido a fuerzas de atracción de corto alcance.

3.3. Acondicionamiento de lodos

El proceso de acondicionamiento se introduce para neutralizar la carga negativa.

Red polimérica de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) y para mejorar la relación sólido-líquido. separación. Esto se logra proporcionando polímeros orgánicos o inorgánicos cargados positivamente, en forma de polielectrolitos, que disminuyen el efecto estabilizador del EPS y aumentan la coagulación de partículas y EPS en el lodo.

En el laboratorio se utilizó el dispositivo de prueba de jarra para acondicionar el lodo con el polielectrolito Praestol 645 a. C. (1-Propanaminio, N, N, N-Trimetil-3-[(1-Oxo-2-Propenil)Amino]-, Cloruro, Polímero Con 2-Propenamida). La dosis de laboratorio fue calculado en función del contenido de DS de cada muestra, lo que dio una cantidad diferente de masa de polielectrolito y volumen de agua para mezclar. Esto significa que para un mayor contenido de DS, un Se necesitó mayor cantidad de agua y polielectrolito para el mismo volumen de muestra. El procedimiento se inició vertiendo 1.000 ml de muestra de lodo TU y se obtuvo el resultado deseado. Concentración de polielectrolito en un vaso de precipitados de 2000 ml. La solución se agitó a 200 rpm. Durante los primeros 30 segundos para una mezcla rápida y completa, seguido de 15 minutos a 20 rpm. para mejorar la formación de agregados.



Figura 14: Dispositivo de prueba de jarra utilizado para acondicionar las muestras de lodo

Con el fin de estudiar el efecto del proceso de acondicionamiento para fines de deshidratación, así como Para las respuestas reológicas, se agregaron diferentes dosis al lodo TU (4, 6, 8, 10, 12 g/kgDS).

3.4. Dispositivos de medición

En este trabajo se utilizaron dos dispositivos reómetros para caracterizar la reología.

Propiedades de las diferentes muestras: El viscosímetro digital Brookfield DVE y el Anton

Reómetro Paar MCR 502. Para simplificar el esfuerzo del lector y del autor, en este y en el

En los siguientes capítulos, el primero se denominará “viscosímetro”, mientras que el segundo se denominará denominado “reómetro”.

3.4.1. Viscosímetro digital Brookfield DVE

El Brookfield DVE se puede definir como un viscosímetro estándar, capaz de medir fluidos

viscosidad a velocidades de corte determinadas. El funcionamiento del DVE se basa en la rotación de un husillo.

a través de un resorte calibrado mientras está completamente sumergido en la muestra de prueba. A medida que el husillo gira, cambia de posición debido al arrastre viscoso de la muestra contra él. Esto provoca la desviación

del resorte que se mide ópticamente en relación con la posición del husillo. La medición

El rango está determinado por el tamaño y la forma del husillo, la velocidad de rotación del husillo,

el recipiente en el que gira el husillo y el par de escala completa del calibrado

resorte. Por lo tanto, a medida que aumenta el par del resorte, también aumenta el rango de medición (Brookfield Ingeniería, 2015).



Figura 15: Viscosímetro digital Brookfield DVE

3.4.2. Reómetro Anton Paar MCR 502

La geometría utilizada en este trabajo para definir matemáticamente la velocidad de corte y el esfuerzo cortante es la Sistema de medición de placas paralelas (Figura 16). Estos sistemas son muy comunes para probar Propiedades viscoelásticas para fluidos con altos valores de rendimiento y para realizar elasticidad. También se realizan mediciones de semisólidos. La determinación se basa en el radio de la placa "R" y la distancia "h" entre las placas, también denominada "espacio libre". Aunque la distancia "h" puede variar entre 0,3 mm y 3 mm, es una práctica común que el sistema de lodos logre al menos 10 veces la partícula más grande del sistema, lo que generalmente significa una brecha entre 1 mm y 2 mm (Dick y Ewing, 1967). El cálculo de la velocidad de corte " $\dot{\gamma}$ " (Ecuación 26) es se basa en el radio exterior y debe corregirse para fluidos no newtonianos. La deformación " γ " (Ecuación 27) se da por la relación entre la geometría del sistema de medición y la deflexión medida. La tensión cortante " τ " (Ecuación 28) es proporcional al par y El factor de geometría angular. Además, sabiendo que el lodo muestra una geometría no newtoniana comportamiento, la tensión cortante debe corregirse de acuerdo con el factor de Weissenberg (Schramm, 1994).

$$\text{Ecuación 26} \quad \dot{\gamma} = \frac{R}{h} \omega$$

$$\text{Ecuación 27} \quad \gamma = \frac{R}{h} \phi$$

$$\text{Ecuación 28} \quad \tau = \frac{3M}{4\pi R^3}$$

Dónde,

M: es el factor de geometría igual a "R/h"

$\Omega = 2\pi n$: depende de la velocidad del rotor "n"

ϕ : es el ángulo de deflexión

Md: es el torque

A: ¿el factor de geometría angular es igual a " $2/\pi R^3$ "?

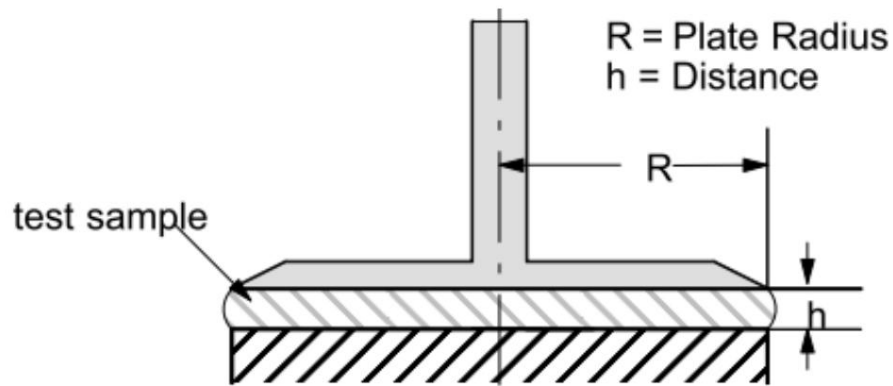


Figura 16: Sistema de medición de placas paralelas (Schramm, 1994).

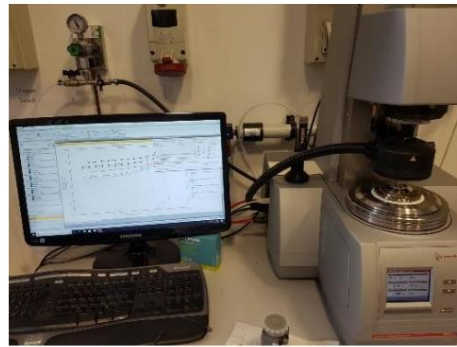


Figura 17: Reómetro Anton Paar MCR 502.

3.5. Pruebas preliminares

Dado que la metodología se consideró el aspecto más importante de este trabajo, se realizó una gran cantidad de mediciones y pruebas preliminares para establecer un procedimiento estándar para realizar mediciones adicionales y lograr un parámetro mejorado de calibración para pruebas posteriores.

3.5.1. Viscosimetría

El viscosímetro DVE fue diseñado para la caracterización reológica preliminar de muestras de lodos. Las mediciones se realizaron siguiendo el procedimiento estándar proporcionado por el manual del usuario en un vaso de precipitados de 1.000 ml como recipiente para muestras de lodos.

3.5 Pruebas preliminares

La selección de los husillos fue el primer y más importante paso al probar materiales con propiedades desconocidas. Una selección adecuada debe dar como resultado mediciones entre 10-100 en la escala de torque del instrumento.

Se probaron diferentes husillos mediante ensayo y error en una sola muestra para determinar correctamente verificar el rango de viscosidad y por ende las adecuadas, teniendo en cuenta que El rango de viscosidad es inversamente proporcional a la velocidad de rotación y al tamaño del husillo. Básicamente, para medir una viscosidad alta se recomendaba elegir un husillo pequeño o para fijar una velocidad lenta. Al finalizar el proceso, se seleccionaron los husillos LV-1 y LV-2 ya que Actuaron en consecuencia.

Después de la selección del husillo, se realizaron mediciones en un rango de velocidad establecido entre 0,3 y 100 rpm, siendo 0,3 rpm la velocidad mínima permitida por el dispositivo. Además, el Se realizaron mediciones aumentando la velocidad desde el valor mínimo hasta el máximo seguido de la disminución inmediata para evaluar cualitativamente la tixotropía.

El procedimiento de medición se aplicó a lodos espesados no acondicionados con diferentes Contenido sólido (4,20, 4,07, 3,53, 2,92, 2,16, 2,06, 1,72, 1,49 % MS) de la EDAR N° 1. Las diferentes concentraciones de sólidos se lograron diluyendo el lodo con agua del grifo.

El método también se utilizó para lodos espesados no acondicionados con diferentes dosificaciones (0, 6, 8, 10, 12 g/kgDS) de las EDAR N° 1 y 2.

Los resultados se informaron cambiando manualmente la velocidad de rotación cuando se alcanzó la estabilidad. logrado en cada paso y registrando la velocidad de rotación, la viscosidad, la tensión de torsión, mientras manteniendo una temperatura de muestra constante de 25 °C.

3.5.2. Reometría

Previo al inicio de cualquier prueba, se realiza la selección permanente del radio y la separación de las placas paralelas. Era necesario lograr resultados comparables. Una vez seleccionada, se utilizó la misma geometría. Se adoptó en todas las pruebas. Con base en la literatura, se seleccionó una placa de 50 mm para lograr un muestra representativa ya que la cantidad de material necesario es suficiente para tal fin. Además, Se eligió un espacio de 1 mm ya que era suficiente altura para ser más de 10 veces el más grande Partículas en cualquiera de los sistemas de lodos.

La carga de las muestras se realizó vertiendo el lodo entre las placas utilizando plástico pipetas en todos los casos. Sin embargo, para algunos casos de lodos acondicionados, las muestras tuvieron que ser cargado con cuchara ya que las pipetas de plástico no pudieron extraer una muestra homogeneizada debido a Agregación de flóculos más grandes.

3.5.2.1. Pruebas de barrido de amplitud

Es una regla comúnmente aceptada en reología cuando se examina una muestra desconocida por prueba oscilatoria que se debe realizar un barrido de amplitud para determinar el límite de la región viscoelástica lineal (LVE). La medición es necesaria ya que todas las mediciones posteriores Las pruebas oscilatorias se llevan a cabo en niveles de tensión o deformación dentro de la región LVE (Mezger, 2015).

En un barrido de amplitud, la muestra se somete a pequeños ángulos de deformación creciente de manera sinusoidal para determinar qué deformación eventualmente daña la estructura, es decir, el límite LVE. En otras palabras, la amplitud aumenta mientras la frecuencia se mantiene constante. Los resultados se presentan como componentes elásticos (G') y viscosos (G'') en función de la fuerza de corte, deformación o esfuerzo cortante. Información adicional como resistencia estructural, rigidez, Se puede determinar la estabilidad estructural, el punto de rendimiento dinámico y el punto de flujo (Mezger, 2015).

Se realizaron pruebas preliminares en lodos espesados no acondicionados de la EDAR.

Nº 1 con la intención de determinar la región LVE. Una rampa logarítmica para un rango

Se ajustó una deformación cortante entre 0,01 y 100 %, con una frecuencia angular constante de 10 rad/s.

Estos son los valores recomendados para probar cualquier material nuevo (Mezger, 2015).

La duración de cada paso de medición se estableció para depender de lograr un estado estable con un límite tiempo de espera de 10 segundos.

3.5.2.2. Pruebas de barrido de frecuencia

La frecuencia de oscilación se incrementa con la amplitud mantenida constante para observar

La dependencia de la frecuencia del material y su frecuencia característica en caso de que sea dentro del rango investigado. La forma de las curvas G' y G'' sobre la frecuencia puede caracterizar diferentes tipos de materiales (Mezger, 2015).

3.5 Pruebas preliminares

A continuación de las mediciones anteriores, se realizaron pruebas de barrido de frecuencia en espesores

lodos no acondicionados de la EDAR N° 1 con el fin de verificar que la deformación por cizallamiento seleccionada

de la prueba de amplitud estaba efectivamente en el rango LVE. Una rampa logarítmica para un rango

Se estableció una frecuencia angular entre 1 y 300 rad/s, con una deformación cortante constante del 0,1 %.

La duración de cada paso de medición se estableció para depender de lograr un estado estable con un límite tiempo de espera de 60 segundos.

Se realizaron pruebas de frecuencia adicionales con el fin de lograr repetibilidad mediante

introduciendo una fuerza de corte preliminar para homogeneizar cada muestra al mismo estado.

Se probaron diferentes velocidades de corte para diferentes duraciones: 10 s-1 durante 30 s, 10 s-1 durante 60 s, 100 s-1

para 30 s y 100 s-1 para 60 s. No se observó evidencia sólida que sugiriera discrepancias entre todos los casos y, por lo tanto,

se seleccionó un "pre-corte" de 10 s-1 para 60 s para todos los casos posteriores.

pruebas.

3.5.2.3. Pruebas de velocidad de corte constante

Esta prueba tenía como objetivo asegurar el tiempo de espera mínimo necesario para que las muestras alcanzaran un

Condición de estado estable a diferentes tasas de tensión y cizallamiento para poder leer correctamente

los valores relevantes. Esto se logró estableciendo una velocidad de corte escalonada (1, 5, 10, 50, 100 1/s)

con una duración de 180 segundos por cada intervalo.

3.5.2.4. Pruebas de fluencia y recuperación

El método también se considera generalmente como una primera aproximación a materiales desconocidos que son

Se espera que sea viscoelástica y se divide fundamentalmente en dos fases. Inicialmente, en la

fase de fluencia, se aplica una tensión constante preestablecida mientras se mide la deformación. Después de un cierto tiempo

Con el tiempo, el estrés se revierte a cero y comienza la fase de recuperación para otro período establecido.

período de tiempo, mientras aún se mide la deformación.

Se realizaron mediciones preliminares en lodos espesados no acondicionados de la

EDAR N° 1, con el fin de establecer el rango de tiempo para cada fase en el que se produce la viscoelástica

El comportamiento fue observable y representativo de la muestra. Incluida la fase de fluencia:

el paso de deformación instantánea que describe una respuesta puramente elástica, el comportamiento no lineal

relacionado con la respuesta viscoelástica y finalmente el comportamiento lineal asociado con la viscosidad.

flujo. Mientras que para la fase de recuperación: la recuperación elástica después de la liberación instantánea de el estrés y la tensión irreversible restante.

Para ello, se estableció una rampa logarítmica de puntos de datos en función del rango de tiempo.

Evaluated y con un estrés constante definido desde el LVE, el no LVE y el viscoso puro.

o comportamiento de flujo.

Además, con la finalidad de observar variaciones a largo plazo, se realizó una medición nocturna.

Se realizó un ensayo que consistió en ocho repeticiones sobre la misma muestra con el siguiente

parámetros en cada repetición: Para la fase de fluencia inicial, una rampa logarítmica de 185 datos

Se establecieron puntos que iban desde 0,01 a 25 segundos para lograr un tiempo de ejecución total de 600 segundos.

Se estableció un acuerdo similar para la fase de recuperación para alcanzar 900 segundos adicionales con un

tiempo total de ejecución de 1500 segundos (25 minutos).

3.6 Metodología de medición final

Después de las pruebas preliminares, se seleccionaron todos los parámetros calibrados para ejecutar el

Se necesitaban mediciones para caracterizar correctamente la reología de las muestras de lodos de cuatro

Diferentes EDAR.

La metodología estándar para el manejo preliminar de todas las muestras de lodos se basó en un

Homogeneización manual mientras aún se encuentra en el envase original para evitar sedimentos o sedimentos.

muestras y, por lo tanto, se evita la posibilidad de un comportamiento no representativo. Este procedimiento también

mejoró la repetibilidad. Además, el esfuerzo cortante preliminar seleccionado de 10 s⁻¹ para 60 s

Se aplicó a todas las mediciones con excepción de las pruebas de fluencia.

3.6.1. Pruebas de flujo y viscosidad

Para representar ambas curvas, se realizó una CSR con un rango logarítmico en rampa de 1 a 100.

1/s. El número de pasos seleccionados fue 11, cada uno con un tiempo de espera seleccionado de 60 segundos que

Se demostró que era suficiente para que la muestra alcanzara una condición de estado estable para leer correctamente

estrés y viscosidad.

3.6 Metodología de medición final

3.6.2. Pruebas de barrido de amplitud

Las pruebas se realizaron en lodos TU y TC de las tres EDAR con la intención de determinar el comportamiento de los lodos después del acondicionamiento. Una rampa logarítmica para un rango de deformación cortante entre 0,01 y 100 %, con una frecuencia angular constante de 10 rad/s, cuyos parámetros se encontraban en el rango LVE según las pruebas preliminares. La duración de cada paso de medición se estableció para depender de lograr un estado estable con un límite tiempo de espera de 60 segundos.

3.6.3. Pruebas de barrido de frecuencia

Se realizaron pruebas de barrido de frecuencia en lodos TU y TC de las tres EDAR en para verificar cualquier respuesta reológica significativa del procedimiento de acondicionamiento. Se estableció una rampa logarítmica para un rango entre 1 y 300 rad/s de frecuencia angular, con una deformación cortante constante de 0,1 %. La duración de cada paso de medición se estableció para depender de logrando un estado estable con un tiempo de espera límite de 60 segundos.

3.6.4. Pruebas de fluencia y recuperación

Para la fase de deslizamiento inicial, se estableció una rampa logarítmica de 185 puntos de datos que van desde 0,01-25 segundos para lograr un tiempo de ejecución total de 600 segundos. Se estableció una disposición similar para que la fase de recuperación alcance 900 segundos adicionales con un tiempo de ejecución total de 1500 segundos (25 minutos). La tensión se mantuvo constante y se seleccionó entre diferentes rangos de la LVE, el no-LVE y el comportamiento viscoso o de flujo puro, para diferentes repeticiones.

3.6.5. Pruebas con geometría de cono y placa

La geometría de cono y placa se utilizó como medio para contrastar los resultados obtenidos con el placas paralelas con el fin de sugerir un nuevo contexto de fondo para una futura expansión basada en Este trabajo se realizó con base en la metodología explicada en el capítulo 3.6.1,

Mientras que las pruebas dinámicas se realizaron siguiendo el método descrito en el capítulo 3.6.2. Muestras fueron extraídos del mismo lote utilizado en mediciones anteriores para la PTAR N° 4.

3.7. Aplicación de modelos y relación de las características de los lodos con parámetros reológicos

Para ajustar los datos resultantes de las pruebas de viscosimetría y reología, se realizó lo siguiente:

Se utilizaron los modelos que se muestran en el Capítulo 2.5.6:

- Modelo Herschel-Bulkley
- modelo Sisko
- Modelo cruzado

El Herschel-Bulkley se basa en la curva de flujo y a partir de la cual se puede determinar el límite elástico.

extrapolados. Mientras que los modelos Sisko y Cross se basan en la curva de viscosidad y son

Se utiliza cuando solo se necesita el comportamiento de la viscosidad.

Se realizó un análisis de datos adicional para relacionar las características clásicas de los lodos y los lodos.

deshidratación, como contenido de sólidos secos (DS), sólidos suspendidos totales (TSS) y capilar

tiempo de succión (CST), a los parámetros reológicos como la viscosidad límite y el límite elástico utilizando

Los modelos de ecuaciones también se describen en el Capítulo 2.5.6.

3.7 Aplicación de modelos y relación de las características de los lodos con los parámetros reológicos

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización y acondicionamiento de lodos

En esta sección se presentan los resultados de la caracterización de lodos no acondicionados y acondicionados correspondientes a las diferentes EDAR estudiadas. En la Tabla 3 se enumeran los valores medios que representan las principales características y comportamiento obtenido de las cuatro EDAR elegidas para Este trabajo.

Tabla 3: Principales características de las muestras de lodos de las cuatro EDAR.

No. de identificación	Dosificación de polímeros	DS	VS/DS	pH	Conductividad	Potencial zeta	CST	
		g/kgDS	% en peso	% en peso	-	mS/cm	mV	s
1	TU	0	2,93 ± 0,35	65,39 ± 6,16	6,91 ± 0,34	1,20 ± 0,14	-11,45 ± 1,50	22,06 ± 4,38
	TC	6	2,67 ± 0,32	64,95 ± 6,11	6,88 ± 0,30	1,30 ± 0,11	-8,79 ± 1,71	10,40 ± 2,20
2	TU	0	3,87 ± 0,67	60,00 ± 2,75	7,21 ± 0,17	4,07 ± 0,47	-11,92 ± 0,89	122,09 ± 34,42
	TC	6	3,35 ± 0,89	61,39 ± 1,71	7,01 ± 0,01	4,36 ± 0,59	-10,30 ± 0,89	75,78 ± 28,40
3	TU	0	2,78	68,78	7,12 ± 0,02	1,59 ± 0,08	-13,80 ± 0,89	23,47 ± 0,35
	TC	6	2.52	72,82	7,13 ± 0,02	1,57 ± 0,05	-12,23 ± 0,38	16,27 ± 0,91
4	TU	0	3,79	73,41	6,43 ± 0,02	2,41 ± 0,11	-12,67 ± 0,15	37,57 ± 1,33
	TC	6	3.47	73.05	6,25 ± 0,02	2,36 ± 0,15	-5,18 ± 0,62	10,67 ± 0,97

Los resultados espesados no acondicionados (TU) representan las muestras de lodo que se tomaron directamente de la EDAR correspondiente. Mientras que los resultados acondicionados espesados (TC) se refieren a lodo que fue acondicionado en el laboratorio a través de la prueba de jarra, dosificando la misma cantidad de Polielectrolito Praestol 645 BC para cada muestra. La dosis de polímero informada corresponde a la concentración de polielectrolitos de las muestras que fueron sometidas a Caracterización reológica.

La Tabla 4 muestra la variación de las diferentes características básicas de los lodos TU, incluido el pH, conductividad, potencial zeta y CST, en función del contenido de sólidos secos. Estos resultados se obtuvieron diluyendo dos muestras diferentes de la EDAR N° 1. Mientras que la "muestra B" representa el comportamiento promedio de los lodos en la EDAR N°1, la "muestra A" fue

4.1 Caracterización y acondicionamiento de lodos

recolectados en un momento en el que el espesador de la planta operaba de manera diferente, lo que resultó en un mayor contenido de sólidos.

Tabla 4: Características de las muestras diluidas con TU de la PTAR N°1.

Muestra	DS	VS/DS	gr/mo de agua libre	pH	Conductividad	Zeta potencial	CST
	% en peso	% en peso	gr/mo de agua libre	-	mS/cm	mV	s
Original (A)	4.20	57,24	35,90	7.30	1.17	-12.13	35,20
	4.07	55,83	40,58	7.15	1.35	-10,67	34,77
Diluido (A)	3.53	55,97	31.25	7.20	1.24	-10,70	25,97
	2.92	55,53	27.43	7.26	1.14	-10,20	17,93
Original (B)	2.16	-	20,87	7.28	0,97	-12,50	12.43
	2.06	-	20.43	7.29	0,97	-12,80	11,97
Diluido (B)	1,72	-	17.15	7.31	0,95	-11,80	9.73
	1.49	-	15,65	7.34	0,87	-11,77	8.67

Si bien el pH y el potencial zeta permanecen constantes a medida que disminuye el contenido de sólidos secos, está claro que el CST devuelve resultados decrecientes mientras que el DS disminuye en un 65% desde el valor inicial (4,20-1,49 % en peso). La adición de agua para la dilución de las muestras contribuye a un aumento del contenido de agua libre. Como resultado, una mayor cantidad de agua libre en la muestra tiene un impacto positivo en la filtración, ya que se extraerá un mayor volumen de agua. más rápido a través del filtro por capilaridad en el dispositivo de medición de CST. Por lo tanto, el CST reduce en un 75%. La figura 18 muestra la tendencia de un DS creciente, que podría ajustarse con una función exponencial con un $R^2 = 0,9985$; aunque se necesitan más datos para confirmarlo.

Por otra parte, dado que la capacidad del agua para pasar el flujo eléctrico es menor que en lodos concentrados, la conductividad eléctrica global disminuye en un 26%.

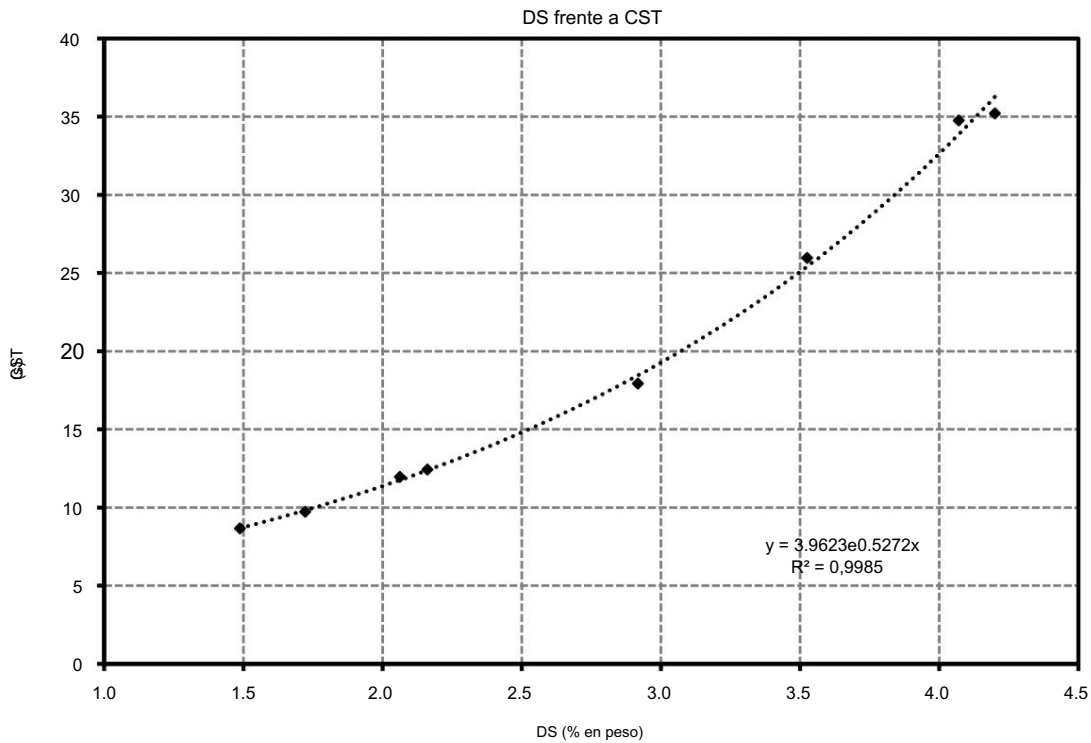


Figura 18: Variación del CST por efecto del DS para lodos TU de la EDAR N°1.

Los resultados que se muestran en la Tabla 5 muestran las características de los lodos en respuesta a la variación de dosificación de polímeros en el proceso de acondicionamiento. El análisis se realizó en muestras procedentes de las EDAR N° 1 y N° 2.

Tabla 5: Características de las muestras de las EDAR N° 1 y 2 en función de la dosis de polímero.

PTAR N°		Dosificación de polímeros	DS	VS/DS TSS		Conductividad del pH		Potencial zeta	CST
		g/kgDS	% en peso	% en peso	gravelito	-	mS/cm	mV	s
1	TU	0.0	3.41	56.13	34.02	7.10	0,99	-11,43	15,90
	TC	6.0	2.86	56,24	43,25	7.11	1.19	-8,51	10,13
	TC	8.0	2.81	56,77	25,68	7.12	1.24	-9,19	9.03
	TC	10.0	2.68	66,82	30,84	7.11	1.19	-7,40	7.27
	TC	12.0	2.01	55,96	29.30	7.13	1.27	-7,59	7.37
2	TU	0.0	3.52	58,85	32,83	7.01	4.30	-11,55	103,83
	TC	6.0	2.72	60,18	32,90	7.01	3,95	-10,93	55,70
	TC	8.0	2,70	60.37	29,55	7.04	4.00	-10,87	28.37
	TC	10.0	2.09	60,20	45,20	7.04	4.00	-8,76	7.63
	TC	12.0	2.06	60,98	49,35	7.03	3.92	-7,77	7.60

4.1 Caracterización y acondicionamiento de lodos

La Tabla 5 muestra claramente que para ambas EDAR, con una mayor adición de polielectrolito

Se produce una reducción del CST, lo que sugiere una mejor floculación de las partículas de lodo.

La floculación de partículas debido al acondicionamiento parece tener el mismo efecto que la dilución con agua, en el sentido de que aumenta el contenido de agua libre y, por tanto, mejora la filtrabilidad correspondientemente. La principal diferencia es que, con la floculación, el agua también se filtra parcialmente liberado de la fase intersticial y superficial de la interacción sólido-agua.

Es importante indicar dos factores para la respuesta del CST utilizando la Figura 19. Primero, la

La transición de TU a TC por el proceso de acondicionamiento da como resultado la reducción más evidente de CST: casi el 50% de la reducción total de CST ocurre en este paso para ambas EDAR.

En segundo lugar, en dosis más altas (8 a 12 g/kgDS), el efecto se reduce continuamente hasta que se alcanza un Se alcanza un valor aparente constante. Esta eficacia decreciente evidencia la

importancia en el equilibrio de la dosificación del polímero y los costos operativos. Cabe señalar que

Para todas las muestras de lodos, la dosis utilizada en el laboratorio fue menor en comparación con la utilizados en las EDAR correspondientes.

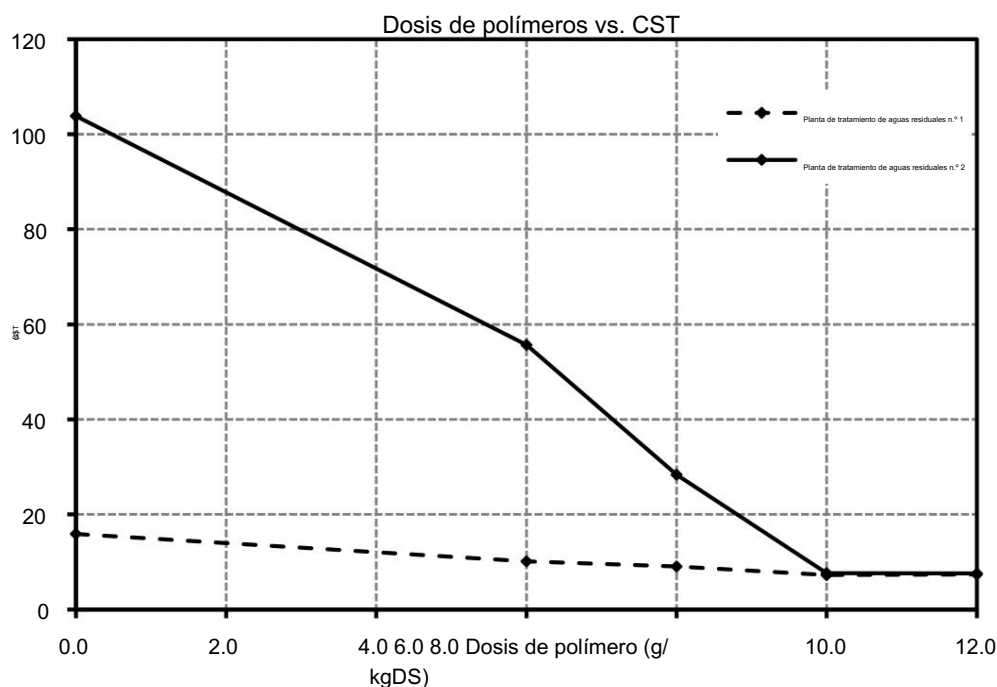


Figura 19: Variación del CST debido al polímero para muestras de lodos de las EDAR N° 1 y 2.

La floculación mejorada también se puede observar con la disminución del 30% del valor absoluto.

valor del potencial zeta para ambos casos de plantas. Como se explica en la Sección 2.2.2, los valores de la

Los índices "ζ" que tienden a cero fomentan la agregación debido a la disminución de la repulsión.

fuerzas eléctricas entre los flóculos. Además, también se observaron efectos decrecientes a medida que Se aumentó la dosis de polielectrolitos.

A partir de estos resultados y debido a que se necesitaba una dosis estándar para todas las muestras de EDAR, En las pruebas reológicas posteriores se seleccionó un valor único, que se fijó en 6 g/kgDS, ya que Se considera suficientemente representativo, desde el punto de vista económico, para todos los casos. al diferenciar entre muestras TU y TC.

Finalmente, la Tabla 6 muestra los resultados de caracterización de los modelos incondicionados y condicionados. muestras (con una dosis de 6 g/kgDS) que se utilizaron para mediciones reológicas.

Tabla 6: Principales características de las muestras de lodos utilizadas para la medición reológica.

No.		Dosificación de polímeros	DS	VS/DS TSS		Conductividad del pH		Potencial zeta	CST
				% en peso	granulitos	-	mS/cm		
1	TU	0.0	2,85	62.32	29,45	7.29	1.38	-9,59	20.53
	TC	6.0	2,98	60,72	10.13	7.21	1.40	-5,70	9.13
2	TU	0.0	4,50	61,15	39,70	7.01	4.87	-10,61	151.03
	TC	6.0	3,98	62,60	36,83	7.00	4,78	-9,67	95,87
3	TU	0.0	2,78	68,78	26,80	7.12	1,59	-13,80	23.47
	TC	6.0	2.52	72,82	24.05	7.13	1.57	-12.23	16.27
4	TU	0.0	3,79	73,41	33.17	6.43	2.41	-12,67	37,57
	TC	6.0	3.47	73.05	32,90	6.25	2.36	-5,18	10.67

El comportamiento de cada parámetro sigue los mismos patrones descritos en las tablas anteriores.

4.2. Resultados reológicos preliminares

4.2.1. Viscosimetría

Dado que el lodo es un fluido no newtoniano, la viscosidad cambió a medida que giraba el husillo.

La velocidad y, por lo tanto, la velocidad de corte aumentaron. Como resultado, en la mayoría de los casos, los husillos Se modificó la prueba en curso porque se excedió la escala de par porcentual. Esto fue un gran problema. restricción ya que se debía parar el motor para poder cambiar el husillo y por lo tanto limitar la sensibilidad de la medición con un error aumentado. Sin embargo, incluso con esto limitación, las repeticiones dieron resultados similares con un error muy bajo. Además, antes

inicializando cada repetición, fue necesaria una homogeneización manual debido a la

Se observó sedimentación al final de cada prueba. Este proceso también ayudó a probar la reproducibilidad.

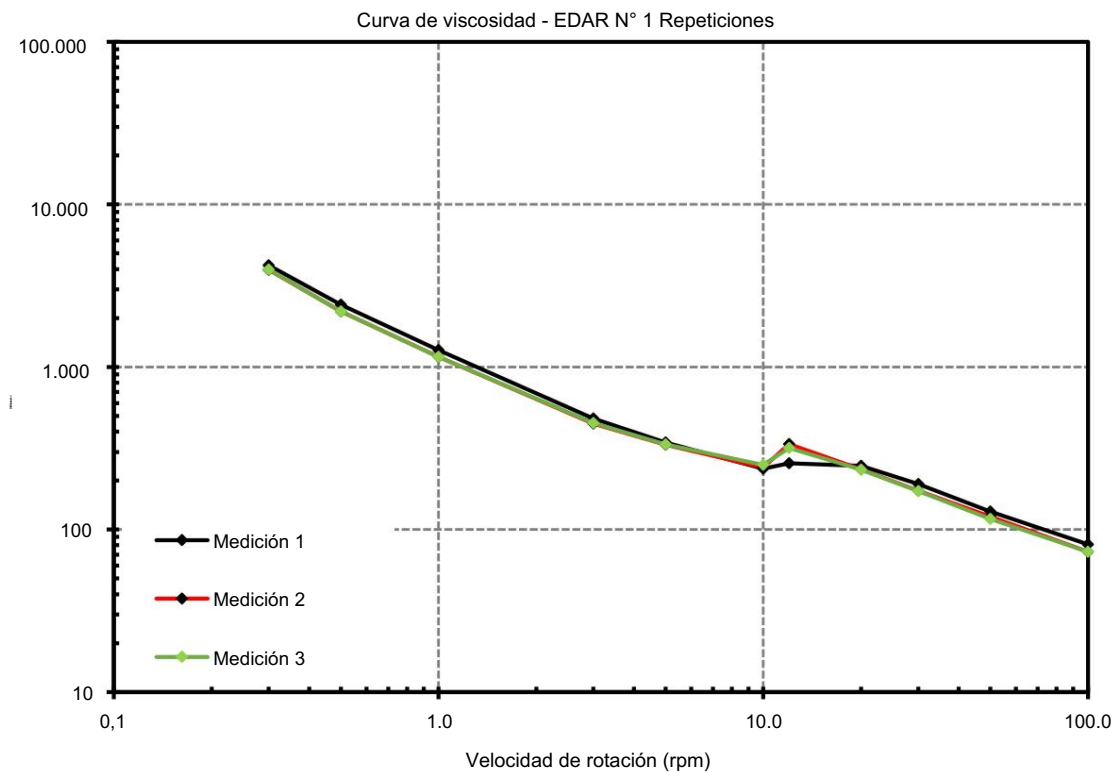


Figura 20: Repeticiones de curvas de viscosidad con el viscosímetro DVE.

La figura 20 muestra gráficos de viscosidad para cada repetición realizada en una sola muestra de lodo.

La desviación estándar nunca es superior al 10% con respecto a los valores medios, lo que es una

Resultado aceptable dadas las características complejas de los lodos. La variación o “escalón” en el

Se produce una pendiente continua cuando se intercambian los husillos.

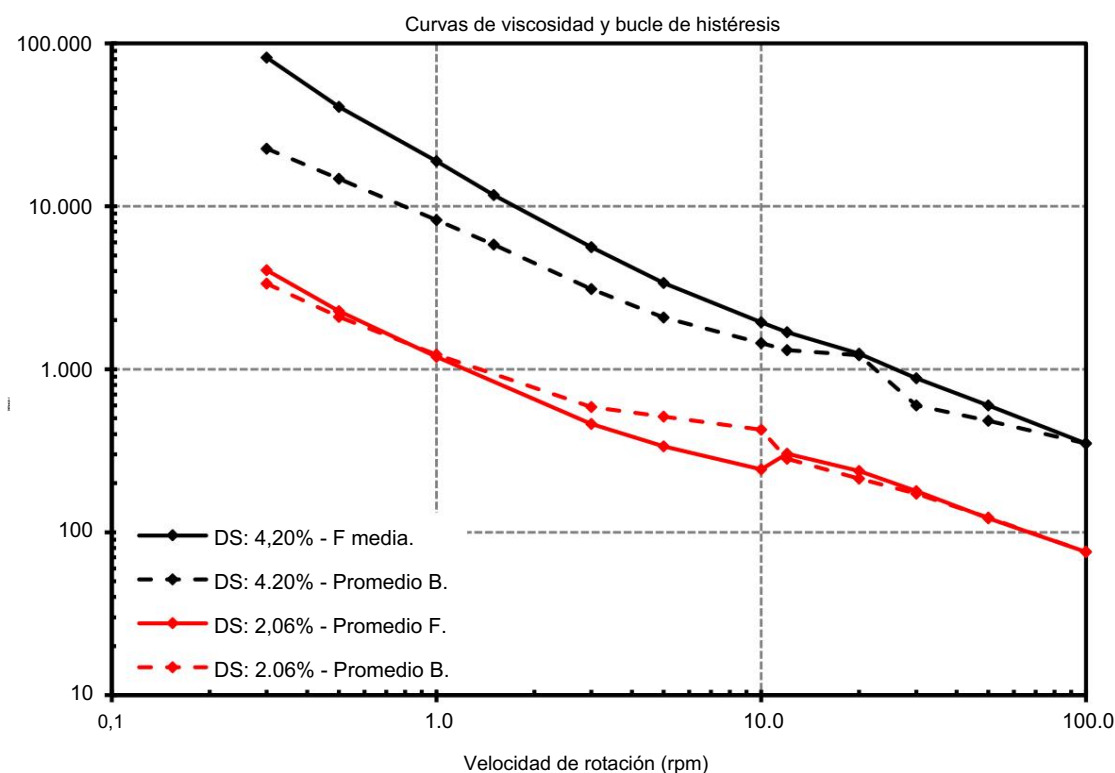


Figura 21: Curvas de viscosidad crecientes y decrecientes de la velocidad rotacional para muestras TU de la PTAR N° 1.

La figura 21 muestra la trayectoria de los valores de viscosidad cuando se aumenta la velocidad, seguida de una disminución inmediata. Es probable que se haya alcanzado una tensión crítica ya que la respuesta de la viscosidad

El comportamiento fue diferente cuando se redujo la velocidad con respecto a los valores iniciales.

Podría referirse a una descomposición dependiente del tiempo de la estructura del lodo y, por lo tanto, a la presencia de comportamiento tixotrópico, como lo describen Battistoni (1997) y Tixier, Guibaud y Baudu

(2003). Por ejemplo, en el caso de la muestra con un contenido de DS de 4,20%, el lapso de tiempo

Es posible que la medición no haya sido suficiente para reconstruir la estructura interna de los sólidos.

También se observó que este comportamiento tuvo menos impacto en la variación de la viscosidad a medida que el sólido

El contenido disminuyó, como en el caso reportado de la muestra de 2,06% DS.

4.2.2. Reometría

4.2.2.1. Velocidad de corte constante

Para evaluar la reproducibilidad de las pruebas reológicas, se realizó una prueba de esfuerzo cortante constante.

Se realizó por triplicado sobre la misma muestra de lodo tomada de la EDAR N° 1. Figura 22

muestra el comportamiento de las muestras cuando se someten a una velocidad de corte constante escalonada en el tiempo.

Al comienzo de la prueba, las fuerzas de corte tendían a romper la estructura de los sólidos, lo que da como resultado una alta variación inicial en la viscosidad. Esta observación ya dio la idea de un “pre-corte” que se aplicará a la muestra antes de la medición principal para lograr la misma condición de estado estable con cada repetición. Además, se consideraron 60 segundos suficiente para alcanzar una condición de estado estable como la representada para todas las velocidades de corte en la Figura 22. Cuando la prueba comienza, la estructura del flóculo cede y la viscosidad disminuye hasta alcanzar un valor constante. En tensiones de corte posteriores, la condición estable o viscosidad constante es alcanzado. Se mantuvieron. Estas observaciones fueron necesarias para alcanzar adecuadamente los valores pertinentes y mejorar la repetibilidad.

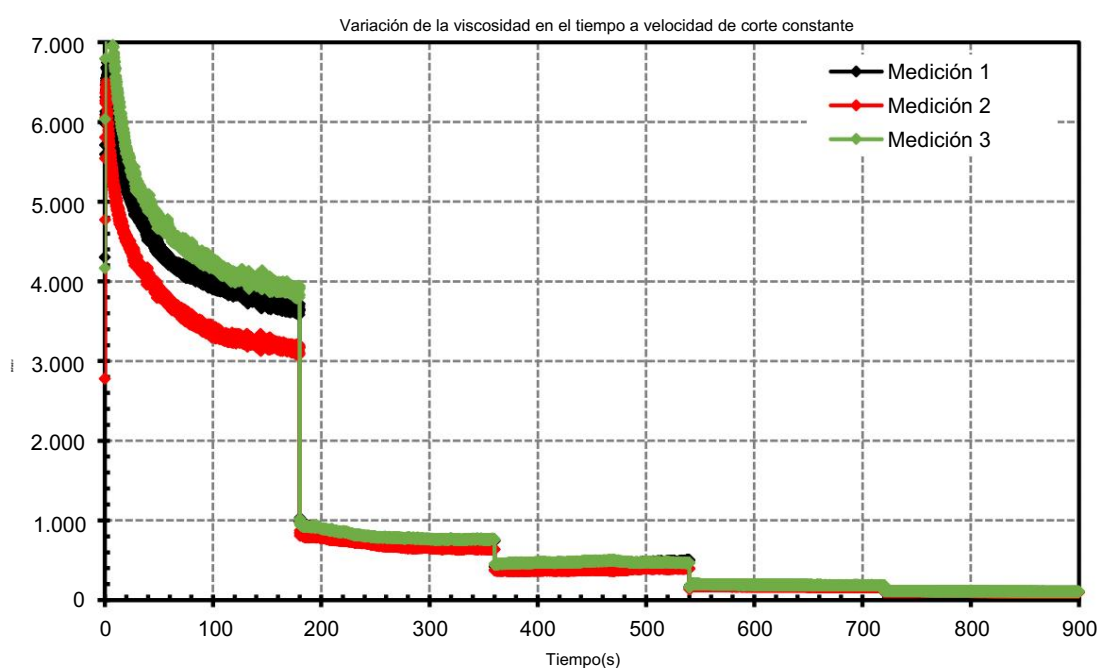


Figura 22: Variación de la viscosidad en el tiempo con la velocidad de corte escalonada para tres muestras diferentes de lodos TU de

Planta de tratamiento de aguas residuales No. 1.

4.2.2.2. Pruebas dinámicas

La figura 23 representa los resultados de una prueba de barrido de amplitud realizada por triplicado en el misma muestra de lodo tomada de la EDAR N° 1. La observación más destacada es Se describe la diferencia en los módulos de almacenamiento y pérdida resultantes (G' y G'' respectivamente). En la región LVE ambos son constantes pero G' es un orden de magnitud mayor que G'' , lo que se puede describir mejor con el ángulo de fase. La tangente del ángulo de fase ($\tan \delta$) o “pérdida El factor de crecimiento se calculó mediante la relación G''/G' . En la región LVE este valor fue constante y

alrededor de 0,12, lo que indica que el material tiene un comportamiento prominente similar al de un sólido.

La amplitud aumentó, se aplicó una mayor tensión al material. El flóculo debilitado

El sistema de estructura resultó en un comportamiento más viscoso en el rango no LVE hasta que el flujo

Se observó el punto de flujo. El punto de flujo se puede visualizar como la intersección entre G' y

G'' . A partir de este punto, el comportamiento del lodo pasa a ser líquido y es

se considera "fluyente", como explica Paroline (2016).

Para los fines de este trabajo, la tensión de fluencia se puede definir como la tensión medida en el

valor de deformación crítica que separa las regiones LVE y no LVE, como lo muestra Ayol,

Dentel y Filibeli (2006).

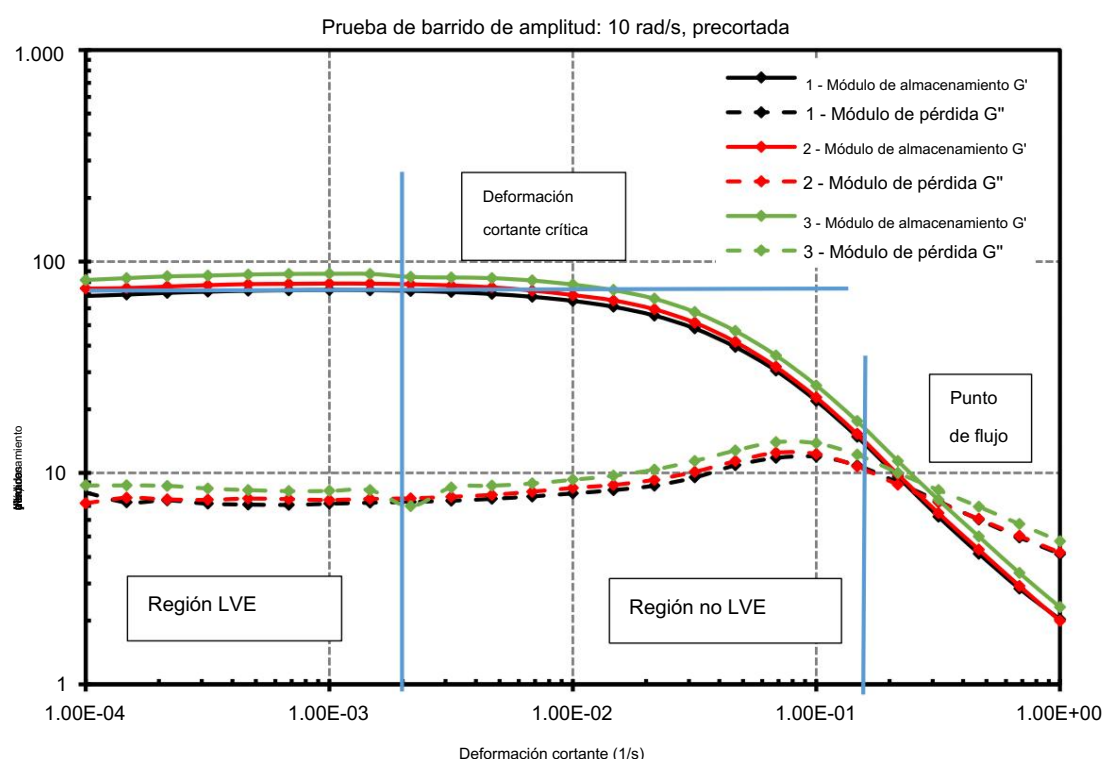


Figura 23: Resultados preliminares de las pruebas de barrido de amplitud para lodos TU de la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 1. Donde 1, 2 y 3 se refiere a tres repeticiones con diferentes muestras.

Finalmente, dado que las repeticiones no se desviaron más del 10% de los valores promedio,

Se consideró que la repetibilidad era lo suficientemente consistente. Esto se logró mediante el corte previo de la muestras durante 60 segundos a una velocidad de 10 1/s.

Como se describe en la Sección 3.5.2.2, se llevaron a cabo diferentes barridos de frecuencia preliminares

en la región LVE (10 rad/s), variando los parámetros de "pre-cizallamiento". Dado que no hay datos significativos

Se encontraron diferencias en los resultados, se seleccionó un pre-corte de 10 1/s durante 60 segundos y

4.2 Resultados reológicos preliminares

Se aplicó a todas las mediciones posteriores. Además, se comprobó la fiabilidad de las repeticiones.

Se consideró suficiente ya que la desviación estándar para cada reiteración fue inferior al 10%.

La figura 24 muestra una de las pruebas de barrido de frecuencia para realizar dos pruebas adicionales.

observaciones. En primer lugar, está el hecho de que al acercarse a una velocidad angular de 100 rad/s, la

La medición sufre el efecto de deslizamiento de la pared (curvas negras y rojas). Este aparente

La lubricación se produce en la interfaz o límite entre la placa y la muestra,

disminuyendo la viscosidad y fomentando así un comportamiento similar al de un líquido que da como resultado la

reducción de G' (Barnes, 2000). En segundo lugar, hasta la velocidad a la que se produce el deslizamiento de la pared, la forma

de las curvas G' y G'' son características de un material con comportamiento tipo gel (Guan et al.,

2019).

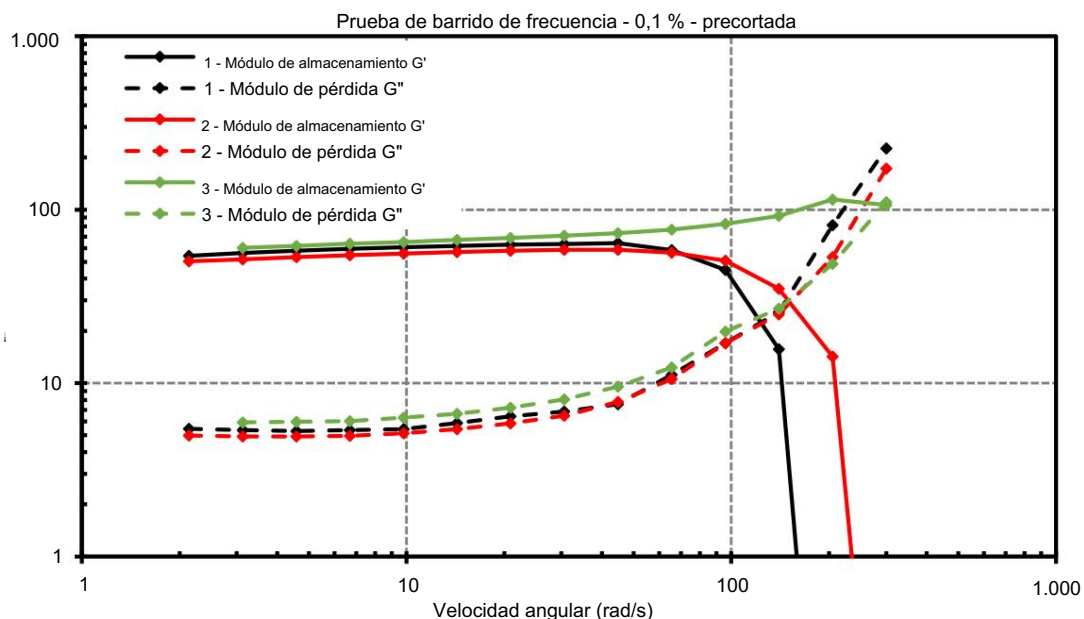


Figura 24: Resultados preliminares de las pruebas de barrido de frecuencia para lodos TU de la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 1. Donde 1, 2 y 3 se refiere a tres repeticiones con diferentes muestras.

4.2.2.3. Prueba de fluencia

Antes de mostrar los resultados de fluencia, es importante tener en cuenta la variabilidad entre curvas

era bastante alto y por lo tanto sólo se pudo realizar un análisis cualitativo.

La figura 25 muestra el comportamiento de fluencia de dos muestras que fueron sometidas a fluencia y

recuperación para diferentes tiempos. Los rangos seleccionados para todas las pruebas de fluencia posteriores fueron 600

segundos para la fase de arrastre y 900 segundos para la fase de recuperación, ya que fueron

Se consideró lo suficiente para mostrar cada característica del comportamiento viscoelástico. En particular, Estos rangos permitieron visualizar el estado estacionario que define la viscosidad pura lineal. comportamiento en la fase de fluencia y la deformación irreversible restante en la fase de recuperación.

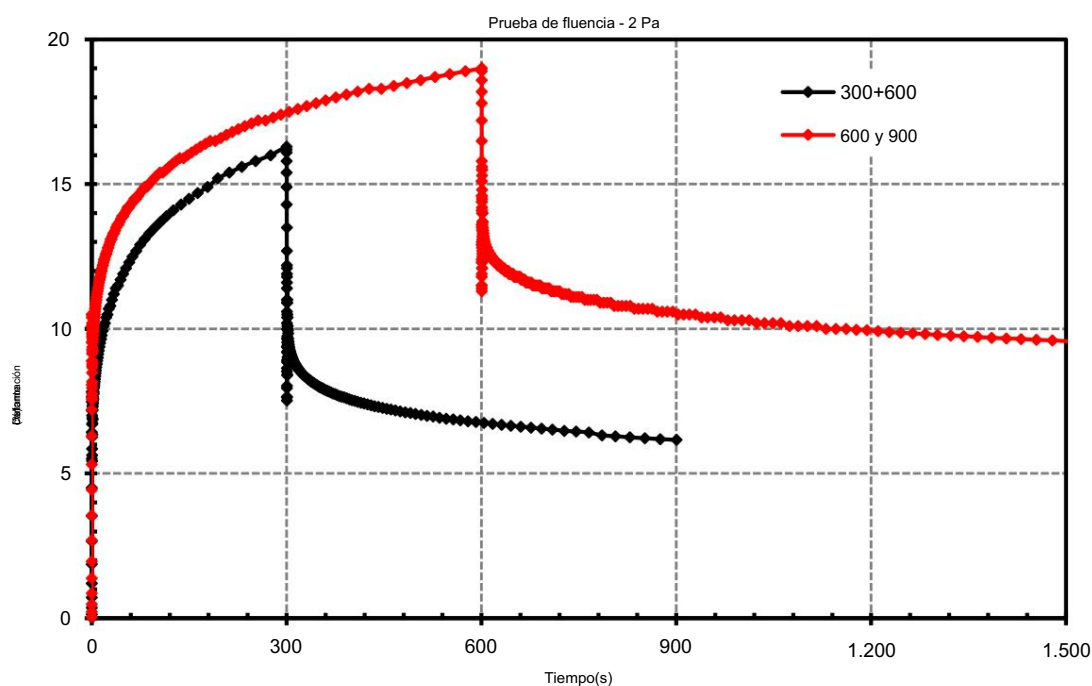


Figura 25: Resultados preliminares de la prueba de fluencia para lodos TU de la planta de tratamiento de aguas residuales N° 1 a una tensión de corte de 2 Pa.

Variación del rango de tiempo.

En la Figura 26 se muestran las diferentes características del comportamiento viscoelástico de los lodos para tanto en la fase de fluencia como en la de recuperación. Se puede observar fácilmente que cuando se aplica tensión, la El lodo se comporta inicialmente como un sólido y eventualmente como un líquido debido a la descomposición de la estructura de flóculos. Además, cuando la tensión aplicada (por debajo del punto de flujo) se reduce a cero, se observa una recuperación elástica parcial que puede estar relacionada con el almacenamiento de energía en límites entre partículas (Eshtiaghi et al., 2013).

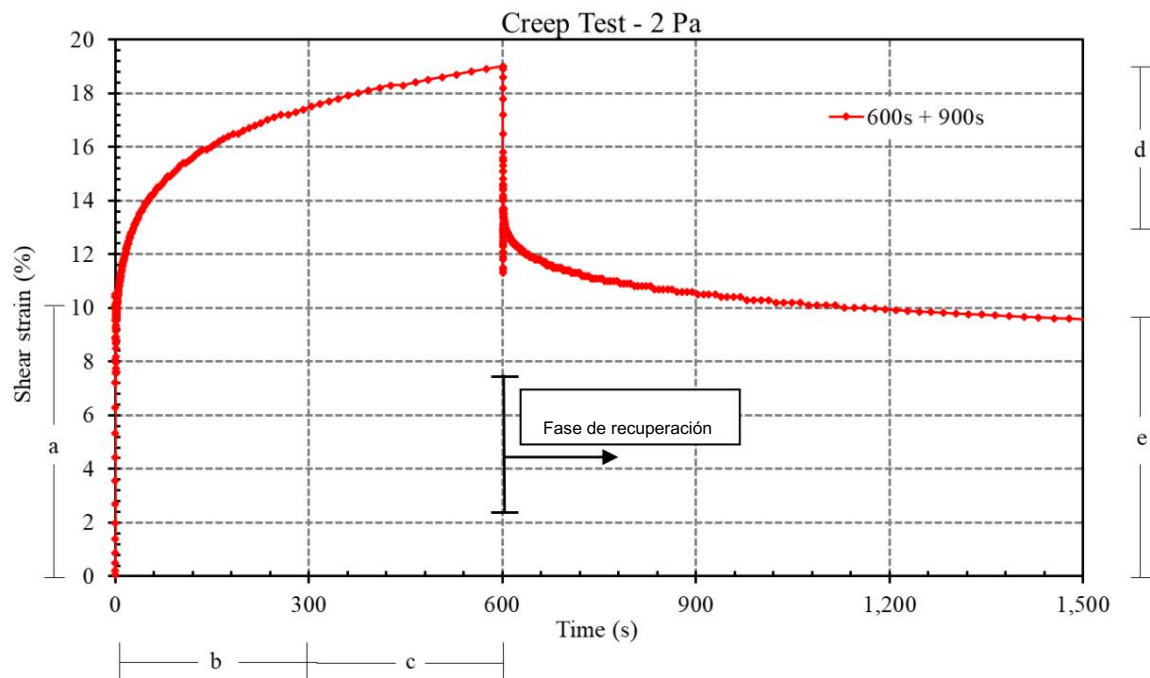


Figura 26: Ensayo de fluencia con esfuerzo cortante de 2 Pa. Definición de porciones.

- a: Paso de deformación instantánea que describe una respuesta puramente elástica.
- b: Comportamiento no lineal relacionado con la respuesta viscoelástica.
- c: Comportamiento lineal asociado al flujo viscoso.
- d: Liberación instantánea que representa la recuperación elástica.
- e: Tensión irreversible restante.

La Figura 27 y la Figura 28 muestran, en escalas logarítmica-lineal y logarítmica-logarítmica respectivamente, la presencia de un punto de flujo. Dado que la deformación cortante se volvió órdenes de magnitud más alta, está claro que Entre 3 Pa y 3,5 Pa el material alcanzó un punto donde el comportamiento cambió de de sólido a líquido. La observación más evidente que apoya esta afirmación es el hecho que a partir de 3,5 Pa no hay recuperación elástica después de liberar la tensión. Además, aunque las curvas de 2 Pa y 3 Pa todavía siguen un comportamiento viscoelástico, es Es evidente que hubo una reducción de la recuperación elástica a mayor tensión cortante.

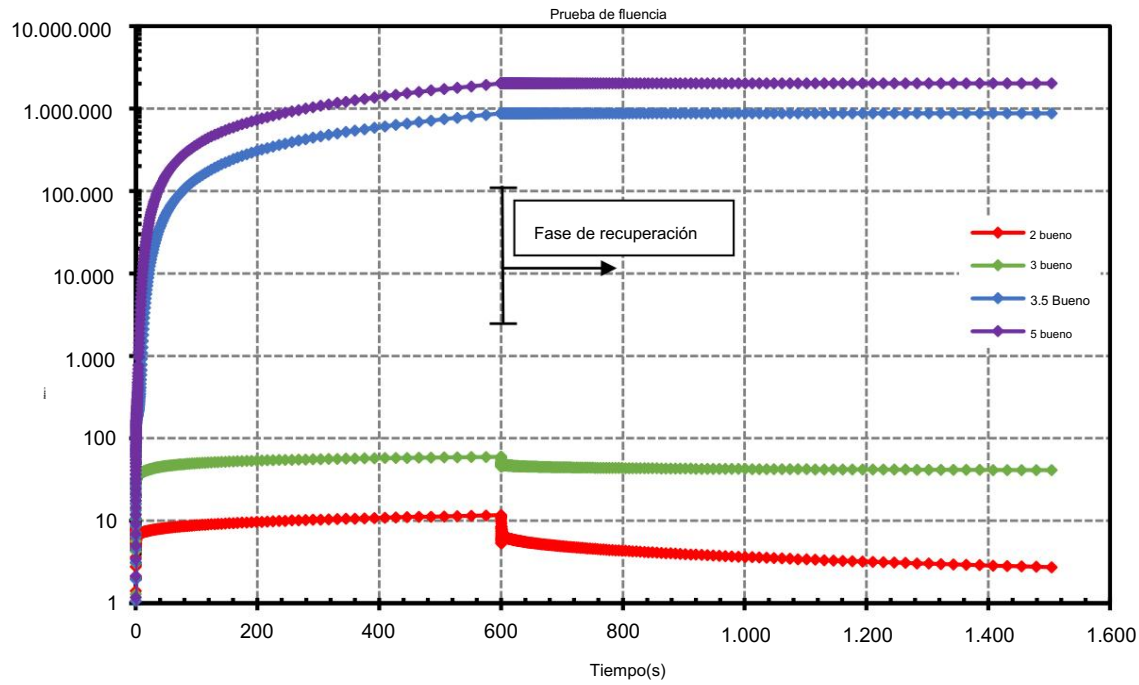


Figura 27: Resultados preliminares de la prueba de fluencia a diferentes esfuerzos cortantes (logaritmo-lineal).

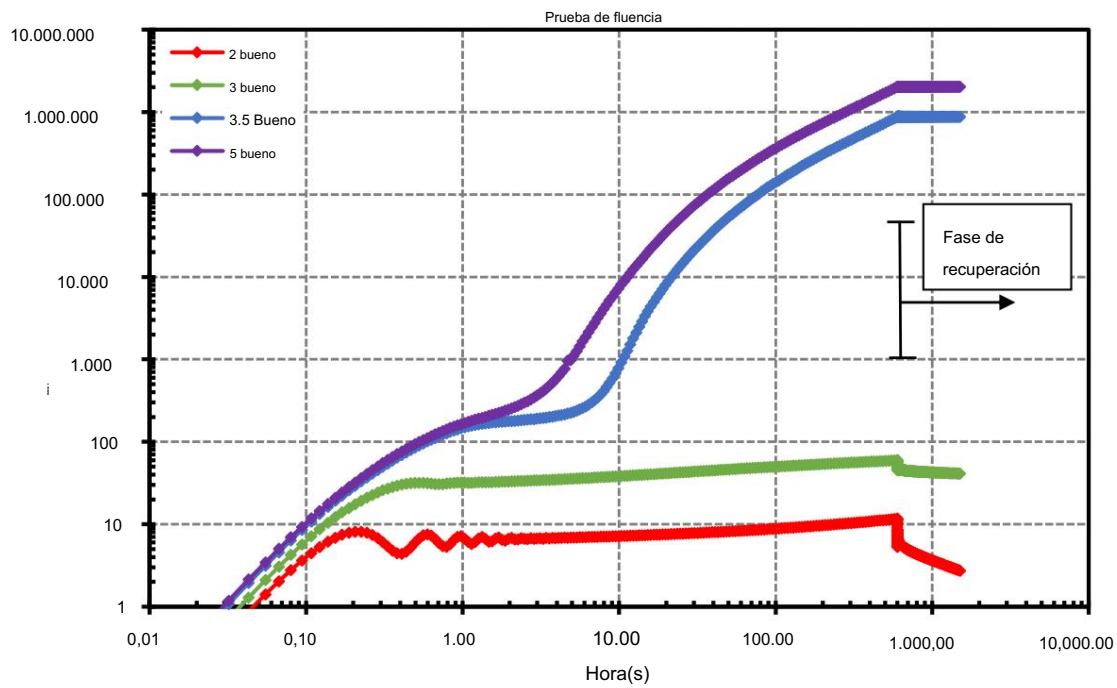


Figura 28: Resultados preliminares de la prueba de fluencia a diferentes esfuerzos cortantes (log-log).

4.3. Curvas de caudal y viscosidad

En esta sección se pueden distinguir dos partes diferenciadas. La primera sección informa de los resultados del viscosímetro DVE que se caracterizan por la variación de la concentración de sólidos y en Variación de la dosificación de polímeros para dos EDAR diferentes. La segunda sección muestra el flujo y curvas de viscosidad obtenidas del reómetro Anton Paar, para cuatro EDAR diferentes.

4.3.1. Curvas de viscosidad del viscosímetro

La figura 29 muestra la tendencia de viscosidad resultante cuando la concentración de sólidos secos varió Dilución de muestras de lodos de la EDAR nº 1.

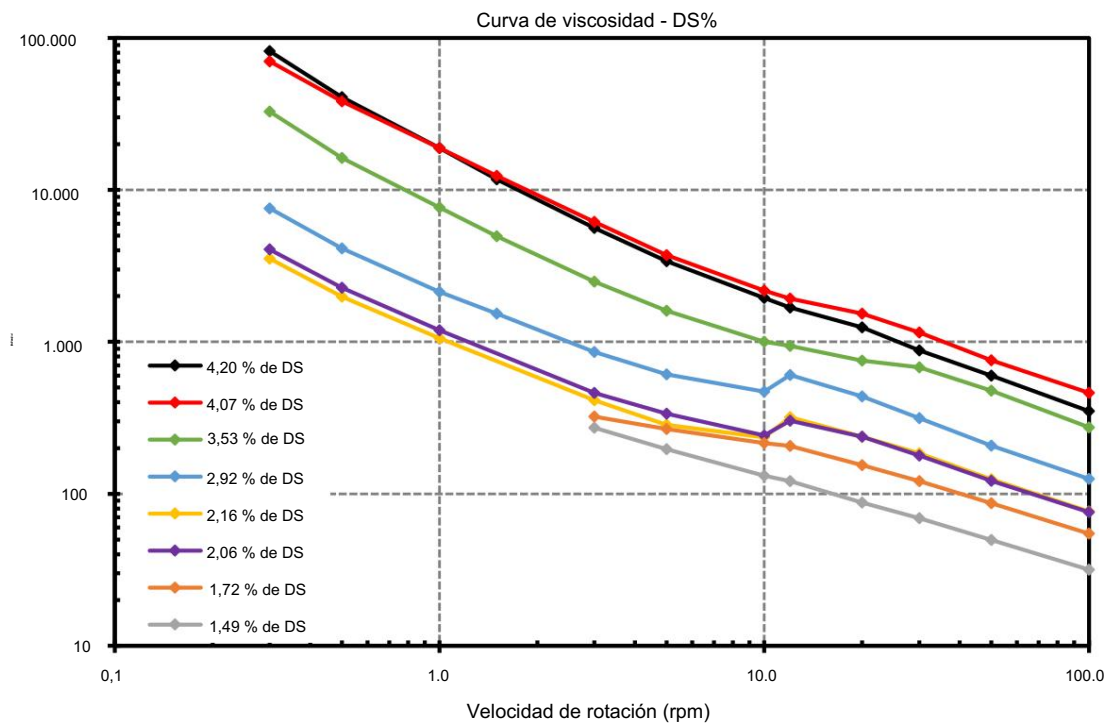


Figura 29: Variación de la viscosidad debido al contenido de sólidos secos para muestras de la PTAR N° 1.

Está claro que la viscosidad se reduce a medida que disminuye el porcentaje de DS. Este es el comportamiento esperado.

Las partículas tienden a alejarse unas de otras, lo que debilita la interacción entre partículas en el sistema de lodos. Esta aparente tendencia a la viscosidad también se observó mediante mediciones de Tixier et al. (2003) y otros investigadores.

El resultado numérico más cercano para representar la viscosidad límite explicada por Tixier et al.

(2003) (Capítulo 2.5.1) sólo se pudo extraer de la viscosidad aparente de las muestras en el velocidad de corte de 100 rpm ya que es el valor más alto alcanzado por el viscosímetro DVE.

Aunque esto es una suposición ya que no hay suficiente información para determinar la realidad

Valores de viscosidad límite constantes, se consideró que era lo suficientemente cercano para servir como tal. Figura 30 muestra el comportamiento de la viscosidad límite a medida que aumenta la concentración de sólidos secos.

El ajuste exponencial podría describir la relación entre los dos parámetros con una buena aproximación ($R^2 = 0,9747$), aunque se requieren más datos para confirmarlo.

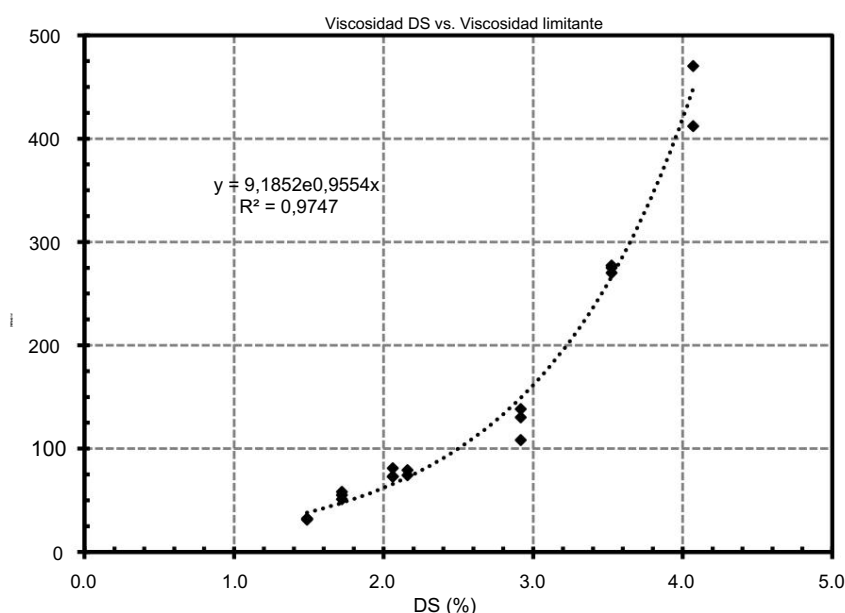


Figura 30: Variación de la viscosidad límite debido a la concentración de sólidos secos de las muestras de lodos de la PTAR N° 1.

También es importante señalar el hecho de que por debajo del 2,00 % de contenido de DS, la viscosidad para baja. No fue posible medir las velocidades de rotación debido a la falta del husillo requerido.

La Figura 31 y la Figura 32 muestran cómo cambió la viscosidad con respecto a la dosis de polímero.

para las EDAR N° 1 y 2 respectivamente. Valores de viscosidad de la muestra TU de la EDAR

El rango para la EDAR N° 1 va desde 43,233 a 298 mPa·s, mientras que para la EDAR N° 2 el rango va desde 21,767 a 225 mPa·s. Esto da como resultado pendientes más pronunciadas en el caso de las muestras de lodos de

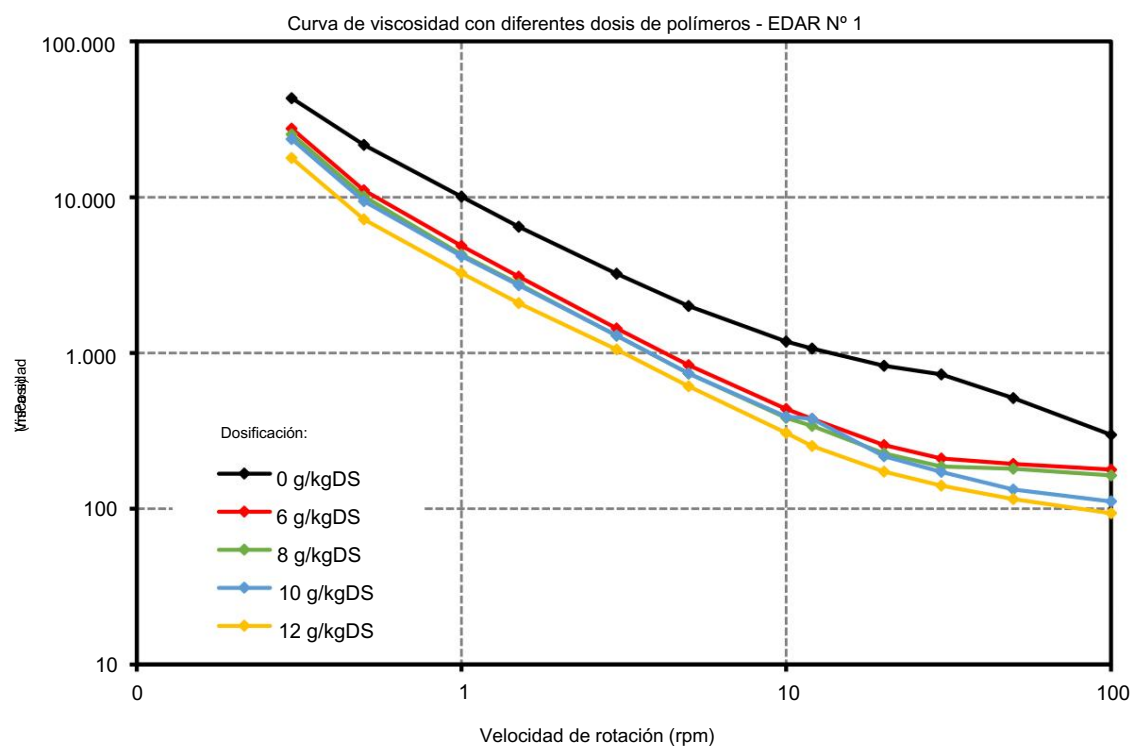


Figura 31: Comportamiento de la viscosidad debido a la dosificación de polielectrolito para muestras de la EDAR N°1

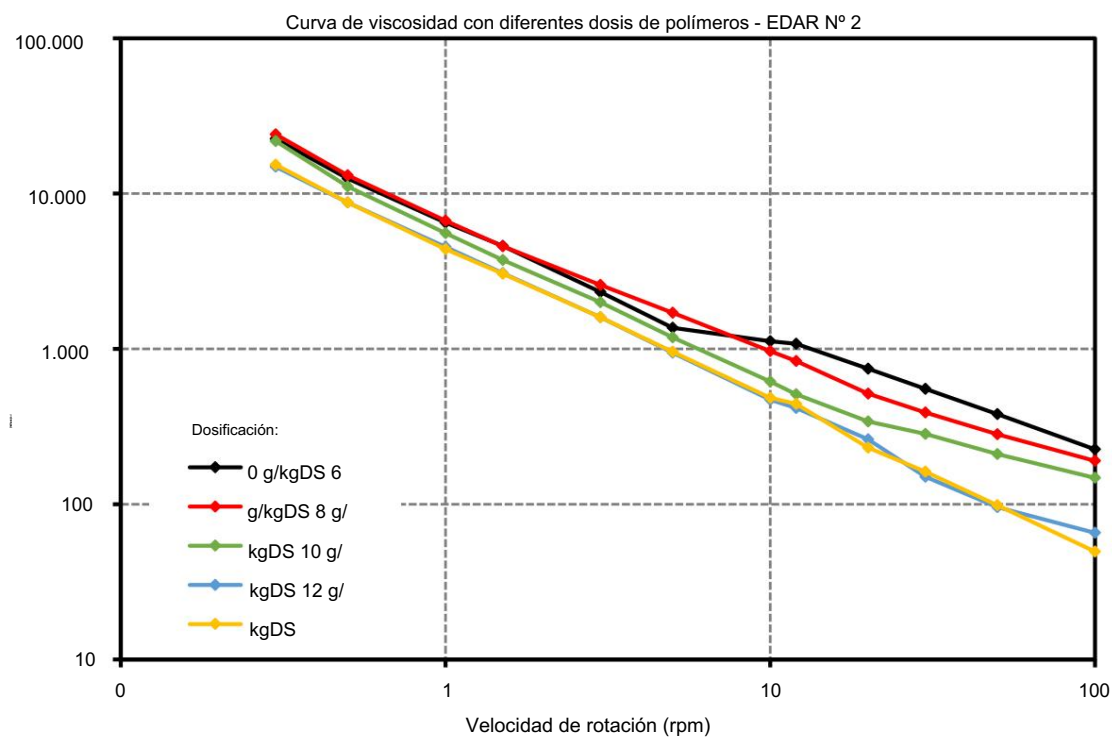


Figura 32: Comportamiento de la viscosidad debido a la dosificación de polielectrolito para muestras de la EDAR N°2.

Una observación clara en el caso de la EDAR N° 1 es que la reducción más evidente en

La viscosidad se produce entre la transición TU y TC, mientras que un aumento adicional del polímero

La dosificación hace que la viscosidad disminuya en menor medida, lo que marca un comportamiento que es Análogo a la respuesta CST en las mismas dosis, lo que implica una conexión entre la dos variables. Para el caso de la PTAR N° 2, se necesitan dosis más altas para lograr El mismo comportamiento que ya se observó para los valores CST. Una gráfica La representación de estas observaciones se puede ver en la Figura 33, en la que no se puede establecer una tendencia clara. observado aparte de la disminución de la viscosidad limitante a medida que aumenta la dosis de polímero.

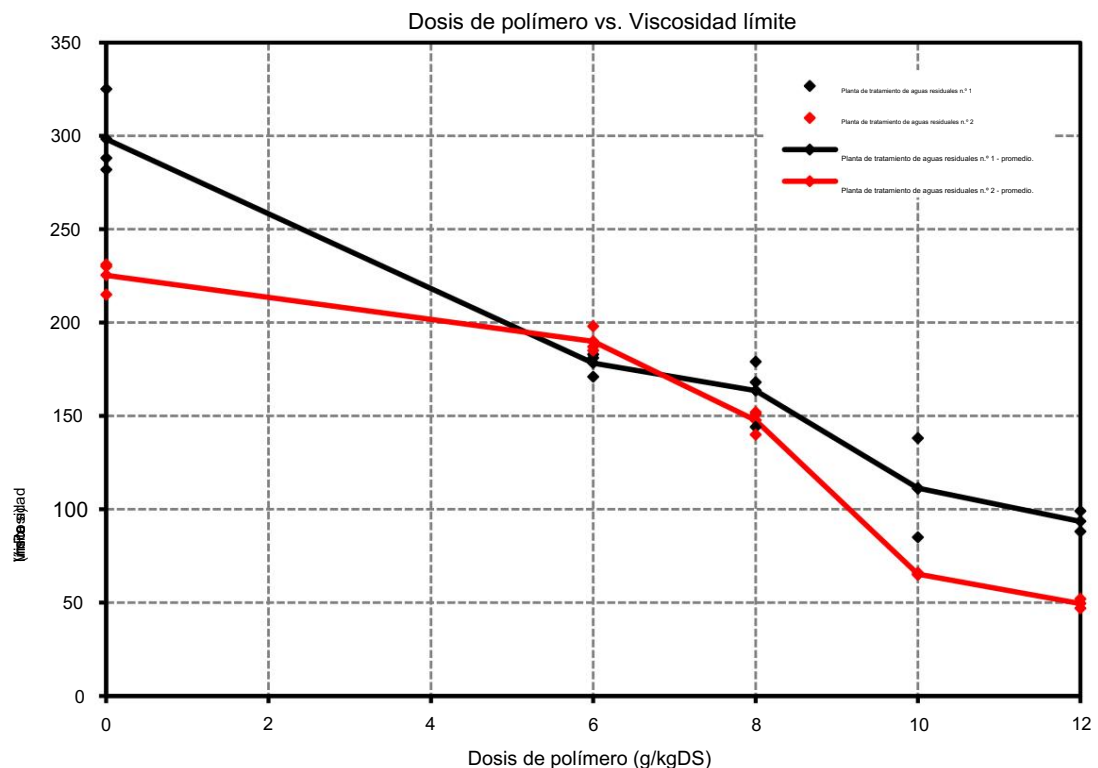


Figura 33: Variación de la viscosidad límite debido a la dosificación de polímeros en muestras de lodos de las EDAR N° 1 y 2.

4.3.2. Curvas de caudal y viscosidad del reómetro

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones de caudal y viscosidad para las cuatro EDAR. Se muestran los resultados estudiados, siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 3.6.1. A modo de ejemplo, El efecto "pre-cizallamiento" sobre las muestras de lodos de la EDAR N°1 se puede observar en la Figura 34.

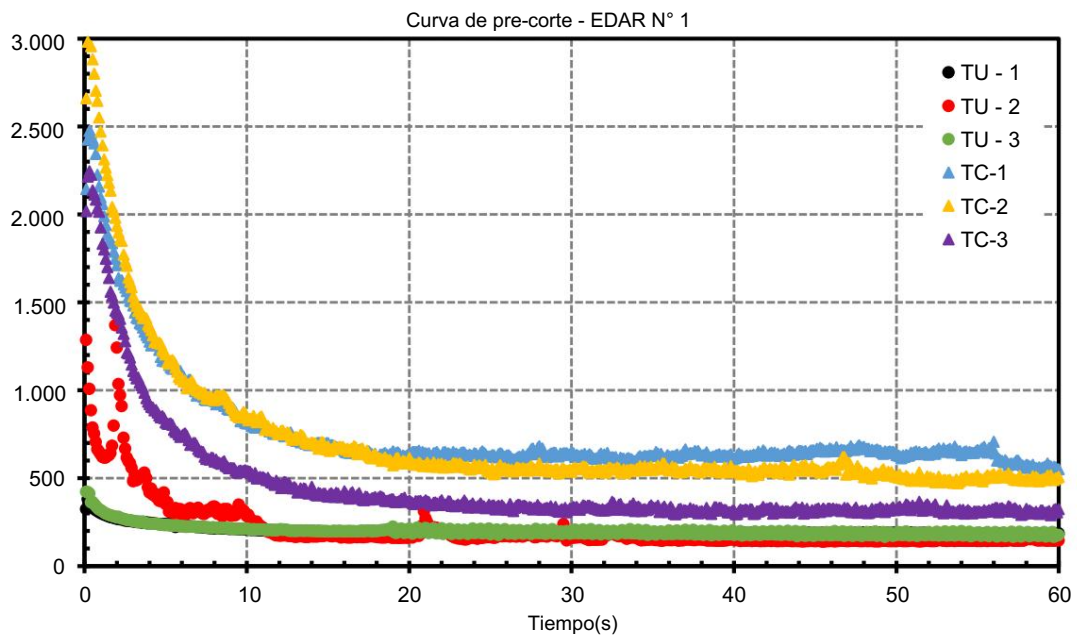


Figura 34: Curvas de pre-corte para muestras de lodos de la PTAR N° 1 (tres repeticiones para TU y TC).

Se puede observar que, aunque los valores para todas las EDAR son diferentes, el comportamiento permanece igual. Se alcanza una condición de estado estable en todos los casos y esto justifica la Repetibilidad de los ensayos que siguen al pre-corte. El mismo comportamiento ocurre para todas las muestras de las diferentes EDAR estudiadas. Además, se puede observar que las muestras de lodos de TC tienden a tener una viscosidad inicial más alta que tarda más tiempo en homogeneizarse en comparación con TU samples.

Los siguientes gráficos (Figura 35 a Figura 38) ilustran el flujo y la viscosidad promedio.

Comportamiento de las muestras de lodos antes y después del proceso de acondicionamiento para todas las EDAR estudió.

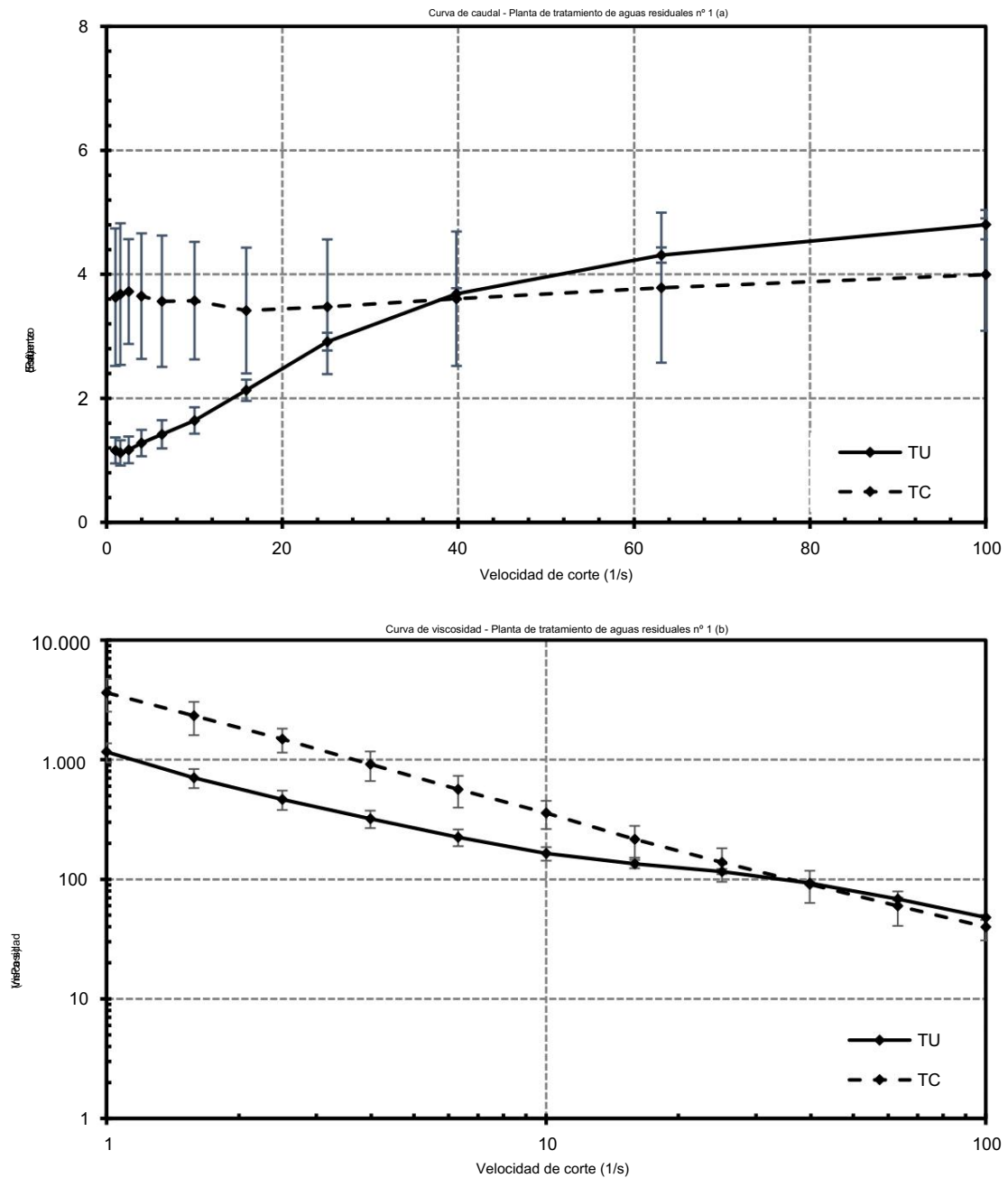


Figura 35: Curvas de caudal medio (a) y viscosidad (b) de lodos TU y TC de las muestras de la PTAR N° 1.

La figura 35 (a) muestra que la forma de la curva de flujo de las muestras de TU de la EDAR

El n° 1 sigue el comportamiento de un material pseudoplástico flexible con baja variabilidad y

Buena reproducibilidad. Por otro lado, las muestras de TC muestran una alta variabilidad, probablemente debido al deslizamiento del material, sin una forma clara. La figura 35 (b) muestra en cambio un comportamiento similar entre muestras TU y TC. La viscosidad aparente de TC es mayor a tasas bajas, mientras que es menor a tasas altas, en comparación con las muestras de TU.

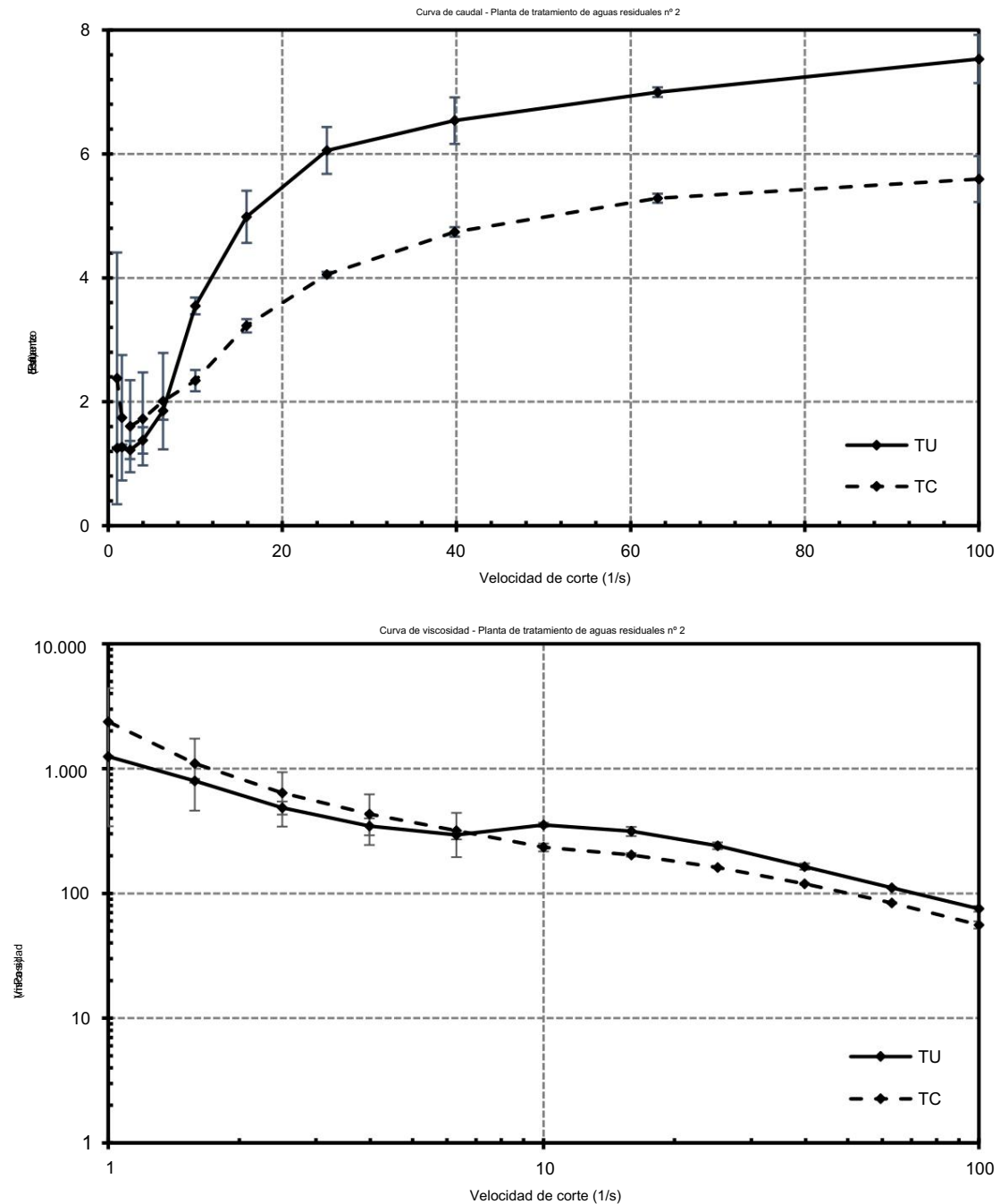


Figura 36: Curvas de caudal medio (a) y viscosidad (b) de lodos TU y TC de las muestras de la PTAR N° 2.

La Figura 36 (a) muestra la forma de la curva de flujo de las muestras de TU de la PTAR N° 2

Sigue el comportamiento de un material pseudoplástico flexible con baja variabilidad y buena

reproducibilidad. Las muestras de TC en este caso muestran el mismo comportamiento, aunque en un nivel inesperado.

Disminución de la tensión de corte general. Esto podría estar relacionado con un mayor contenido de agua o

Una dosis insuficiente de polímero. La figura 36 (b) muestra un comportamiento similar entre TU y TC.

muestras. La viscosidad aparente de TC es mayor a tasas bajas, mientras que es menor a tasas altas, cuando

en comparación con las muestras de TU.

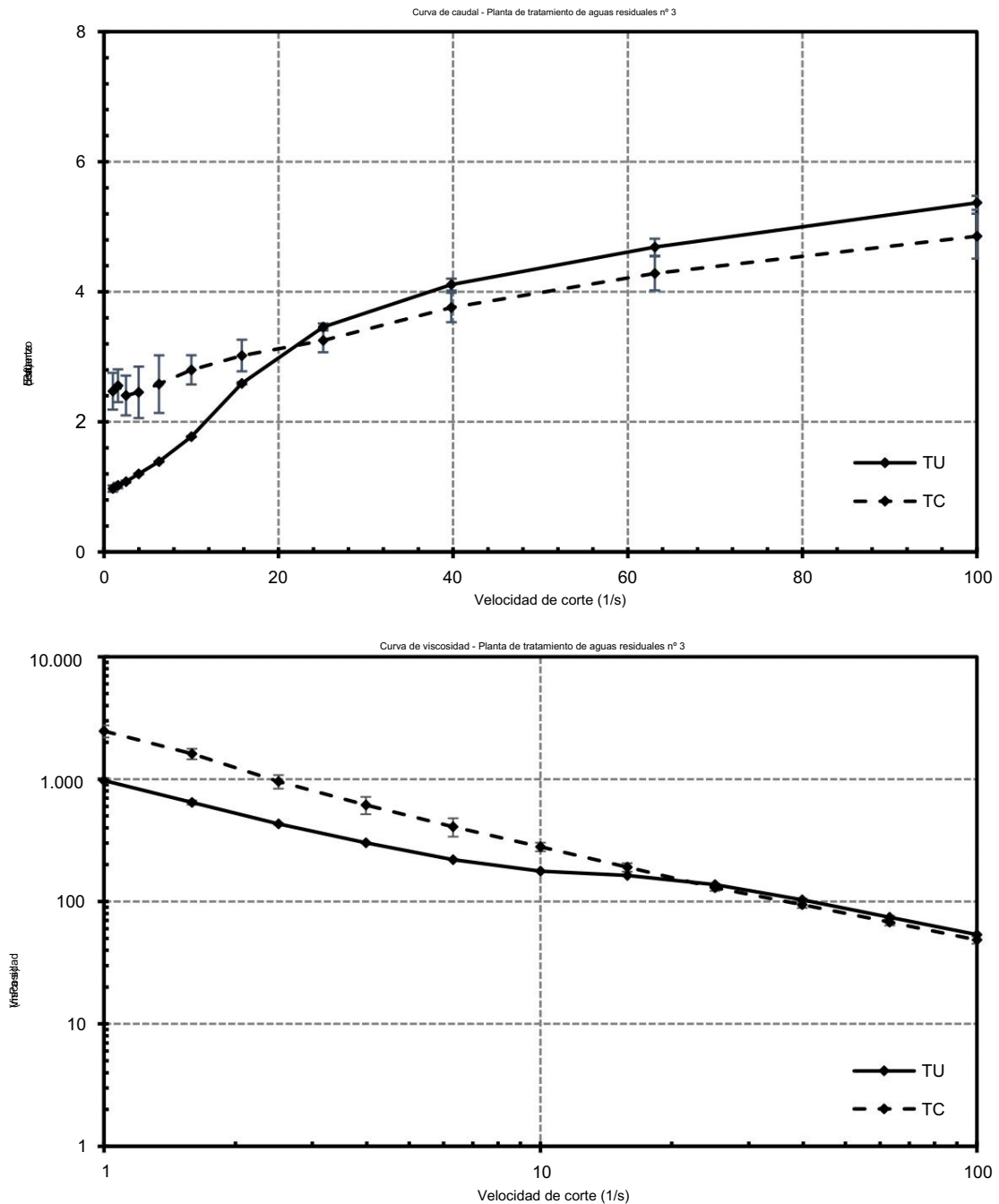


Figura 37: Curvas de caudal medio (a) y viscosidad (b) de lodos TU y TC de las muestras de la PTAR N° 3.

La Figura 37 (a) muestra las curvas de flujo de las muestras TU y TC de la PTAR N° 3 seguir el comportamiento de un material pseudoplástico flexible con baja variabilidad y buena reproducibilidad. En este caso, se puede leer un punto de rendimiento claramente superior para las muestras TC en comparación con los de TU. La figura 37 (b) muestra un comportamiento similar entre TU y TC muestras. La viscosidad aparente de TC es mayor a tasas bajas, mientras que es menor a tasas altas, cuando en comparación con las muestras de TU.

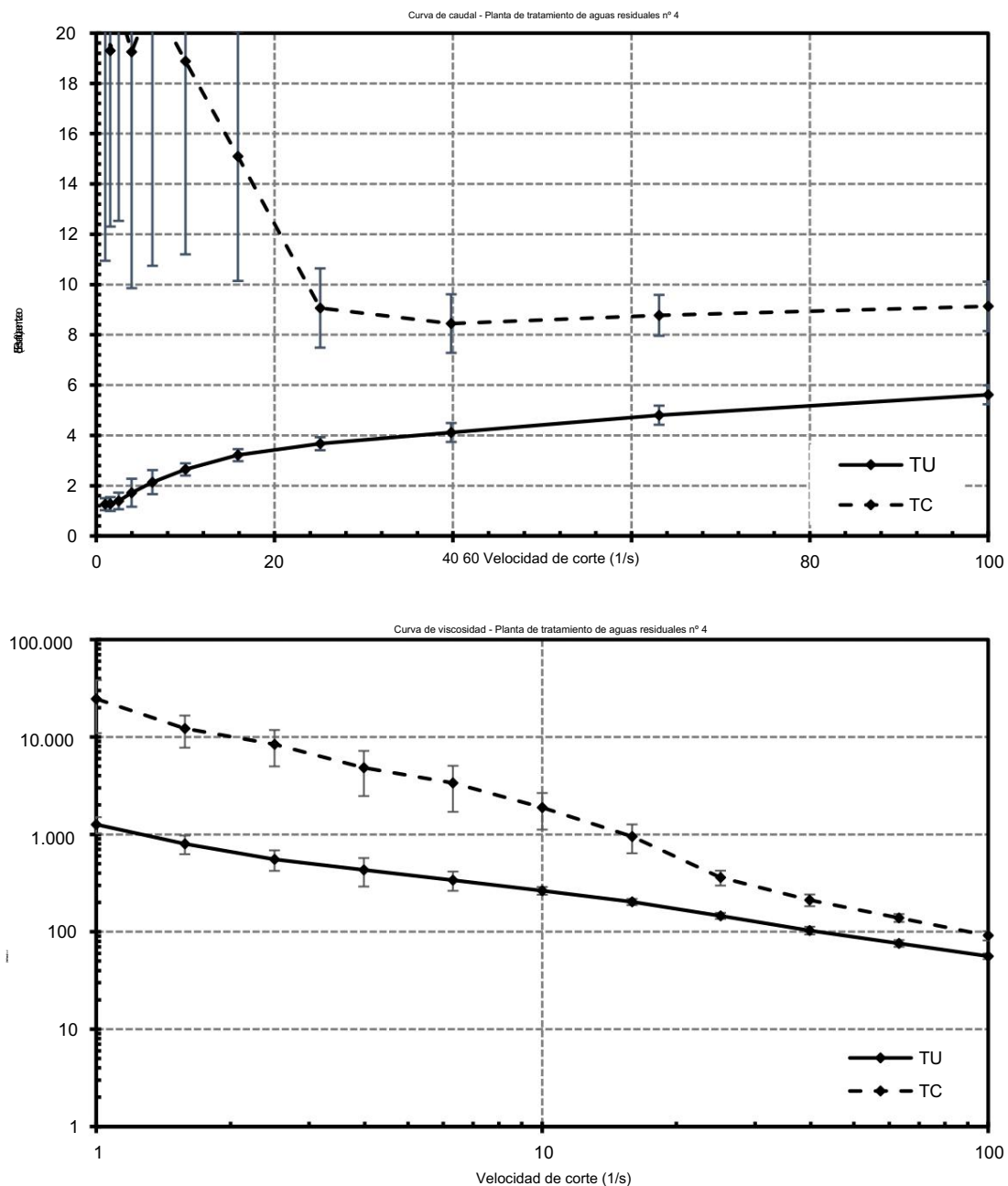


Figura 38: Curvas de caudal medio (a) y viscosidad (b) de lodos TU y TC de las muestras de la PTAR N° 4.

La Figura 38 (a) muestra que las curvas de flujo de las muestras de TU de la PTAR N° 4 siguen el comportamiento de un material pseudoplástico flexible con baja variabilidad y buena reproducibilidad. Por otro lado, las muestras de TC muestran una alta variabilidad, probablemente debido a deslizamiento del material, sin una forma clara. La figura 38 (b) muestra un comportamiento similar entre Muestras de TU y TC. La respuesta de la tensión de corte y la viscosidad aparente de las muestras de TC es órdenes de magnitud superiores a los de TU. Esta muestra mostró una respuesta diferente de las tres plantas anteriores.

La primera observación general que hay que señalar es el hecho de que a bajas velocidades de corte ($< 5 \text{ 1/s}$)

El comportamiento de la curva fue opuesto al esperado (convexa en lugar de cóncava).

Esto se acentuó en el caso de las muestras de TC.

A partir de las muestras no acondicionadas, se puede observar que los lodos presentan cizallamiento.

comportamiento de aclareo o pseudoplástico (ver Sección 2.3.3) con un rendimiento aparente independientemente de los diferentes procesos o características en las distintas EDAR. A medida que la velocidad de corte aumenta, la viscosidad aparente disminuye, lo que confirma lo que se observa generalmente.

comportamiento de los lodos por la mayoría de los investigadores, como Chaari et al. (2003), Tixier, Guibaud y Baudu (2003), etc. Este también es un efecto esperado de una suspensión compuesta de partículas.

que puede cambiar de orientación, deformarse, desenredarse, etc. en la dirección del flujo para facilitar resistencia (Schramm, 1994; Barnes, 2000).

La "viscosidad límite" estudiada por Tixier et al. (2003) no se observó, dado que el rango de velocidad de corte utilizado en este trabajo no incluía los rangos altos (800 s^{-1}) utilizados por el investigadores. Este parámetro podría ser útil para describir la dispersión máxima de flóculos en el lodo resultante del impacto de alta velocidad de corte y también comparar la viscosidad de diferentes muestras y como indicador de resistencia interna. Sin embargo, para comparación Para efectos de medición, se seleccionó la viscosidad aparente a una velocidad de corte de 100 1/s junto con la Viscosidad a muy baja velocidad de corte. El resumen se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7: Principales parámetros de viscosidad de las muestras de lodos de las cuatro EDAR.

PTAR N°	Viscosidad aparente a baja velocidad de corte		Viscosidad límite a una velocidad de corte de 100 1/s	
	TU	TC	TU	TC
	[mPa·s]	[mPa·s]	[mPa·s]	[mPa·s]
1	$1,161 \pm 209$	3.633 ± 1.110	$48,0 \pm 2,4$	$40,0 \pm 9,1$
2	1.250 ± 15	2.378 ± 2.033	$75,3 \pm 3,9$	$55,9 \pm 3,7$
3	975 ± 49	2.472 ± 282	$53,7 \pm 1,1$	$48,6 \pm 3,4$
4	1.263 ± 239	24.640 ± 13.693	$56,1 \pm 3,8$	$91,3 \pm 9,8$

Al observar la Figura 35 a la Figura 38 con la ayuda de la Tabla 7, es evidente que, al comparar

datos de lodos TU de todas las EDAR, la diferencia no es alta ya que los valores se mantienen en el mismo rango y orden de magnitud. Además, la viscosidad de las muestras de lodos de TC

es mayor a bajas tasas de cizallamiento en comparación con las muestras de TU para todas las plantas de tratamiento de aguas residuales. Esto puede ser explicado por el hecho de que el polímero utilizado tiene un peso molecular muy alto y por lo tanto tiene un efecto significativo en la estructura de los sólidos, aumentando tanto el volumen como la resistencia de los flóculos,

como lo explica Dentel (1997). Lo opuesto ocurre a altas velocidades de corte ya que la viscosidad de muestras de TC es menor que la de muestras de TU. Esto podría explicarse por el aumento de la contenido de agua. Aunque en el caso de la EDAR nº 4, el incremento de la viscosidad fue mayor pronunciado y se mantuvo más alto en todos los puntos.

El proceso de acondicionamiento tuvo diferentes efectos en las curvas de flujo de las muestras. Inicialmente, Todas las muestras de las EDAR N° 1 y 3 tuvieron un comportamiento similar, lo cual era de esperar ya que ambas son producto de un tratamiento aeróbico similar. Para las EDAR mencionadas (Figura 35 y Figura 37), se puede observar que para velocidades de corte muy bajas, la tensión de corte medida es mayor para la curva de flujo acondicionado. Esto tiene sentido ya que la adición del polímero aumentaría la resistencia de los flóculos al estimular la agregación, como ya se explicó. Sin embargo, El efecto también podría explicarse por el efecto de deslizamiento de las paredes, especialmente en la EDAR nº 1. y 4 curvas de flujo, donde se pueden observar grandes variaciones en los resultados. Este resultado se traduce a las curvas de viscosidad con el mismo efecto. Por otra parte, ya en rangos medios, y especialmente a altas velocidades de corte, el comportamiento cambia y las muestras acondicionadas muestran Valores más bajos de esfuerzo cortante. Este es el resultado esperado de un aumento en el agua libre. contenido resultante del proceso de acondicionamiento. Finalmente, dado que la tensión de corte permanece Relativamente independiente de la velocidad de corte a baja velocidad, podría ser una indicación de pared comportamiento de deslizamiento y por tanto una mayor variabilidad.

Además, Ayol et al. (2006) coincidieron en que una vez que se introduce un floculante en el sistema de lodos, los enfoques básicos del modelo reológico, como el plástico de Bingham o Herschel-Bulkley no describe el lodo acondicionado final. Esto es visible en todos curvas de caudal de las muestras, especialmente para la PTAR nº 4. Además, Campbell y Las observaciones de Crescuolo (1982) de un pico en el reograma no se pudieron reproducir en este trabajo. Incluso si un cambio es notable para tasas de corte bajas, es más probable que esta diferencia deriva de otras causas como el efecto wall-slip, dada la alta variabilidad de los resultados.

4.4. Pruebas de barrido de amplitud

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones de amplitud dinámica para las cuatro EDAR Se muestran los resultados estudiados, siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 3.6.2.

La primera observación que se debe tener en cuenta en todas las muestras (Figura 39 a Figura 42) es el hecho de que El módulo de almacenamiento G' es mayor que el módulo de pérdida G'' en el LVE y no LVE

regiones. Dado que G' caracteriza el módulo elástico del material, es evidente que la

Los lodos actúan con un comportamiento similar al de un sólido, como se observa en los resultados preliminares (Capítulo 4.2.2.2).

Además, un valor de orden de magnitud constante para la región LVE separa G' y G''

para todas las muestras con un factor de pérdida entre 0,12 y 0,17, lo que indica un sólido similar

comportamiento.

Además, tanto para las muestras acondicionadas como para las no acondicionadas, el módulo de almacenamiento (G')

fue mayor que el módulo de pérdida (G'') ya que se mantuvo el rango viscoelástico lineal.

comportamiento viscoelástico no lineal, el módulo de almacenamiento tendió a disminuir mientras que la pérdida

El módulo tendió a aumentar, como lo explicaron Ayol et al. (2006).

Además, cuando el módulo complejo G^* (que representa la resistencia total de la

material de muestra contra la tensión aplicada), es fácil ver por qué sigue el

mismo comportamiento que el módulo de almacenamiento. Dado que el equilibrio viscoelástico tiende a G' por un

orden de magnitud superior a G'' , el vector resultante G^* está más estrechamente relacionado con G' .

Finalmente, para cada muestra analizada, se puede observar un cambio claro en la respuesta dinámica.

cuando se añade el polielectrolito. Se puede describir como un desplazamiento de las curvas ya que la pérdida

El factor (G''/G') permanece constante en todos los casos respectivos.

Las figuras 39 a 42 muestran los resultados de las muestras de lodos de todas las EDAR.

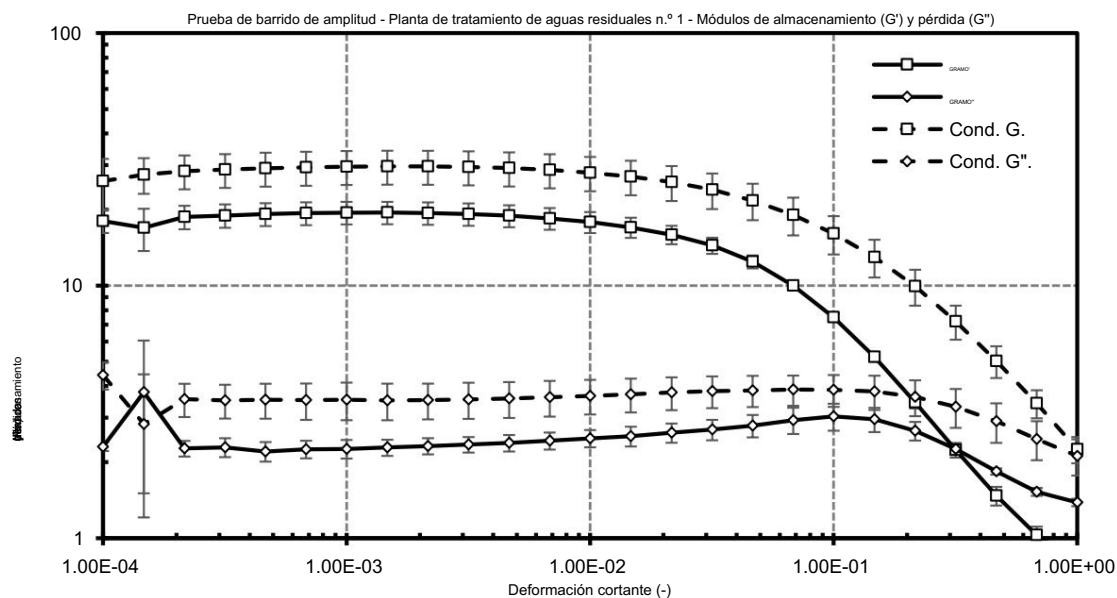


Figura 39: Resultados de la prueba de barrido de amplitud. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 1.

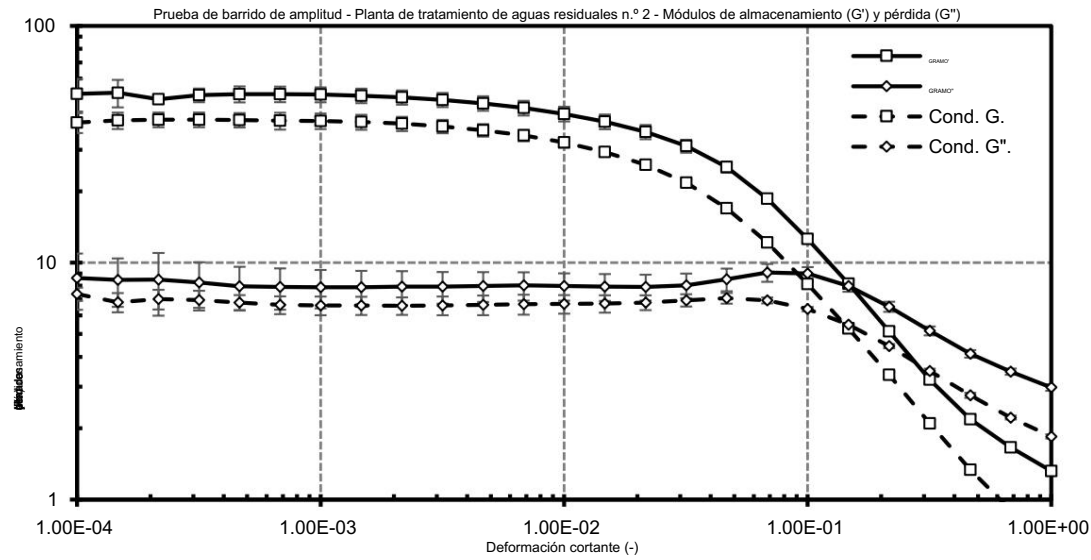


Figura 40: Resultados de la prueba de barrido de amplitud. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 2.

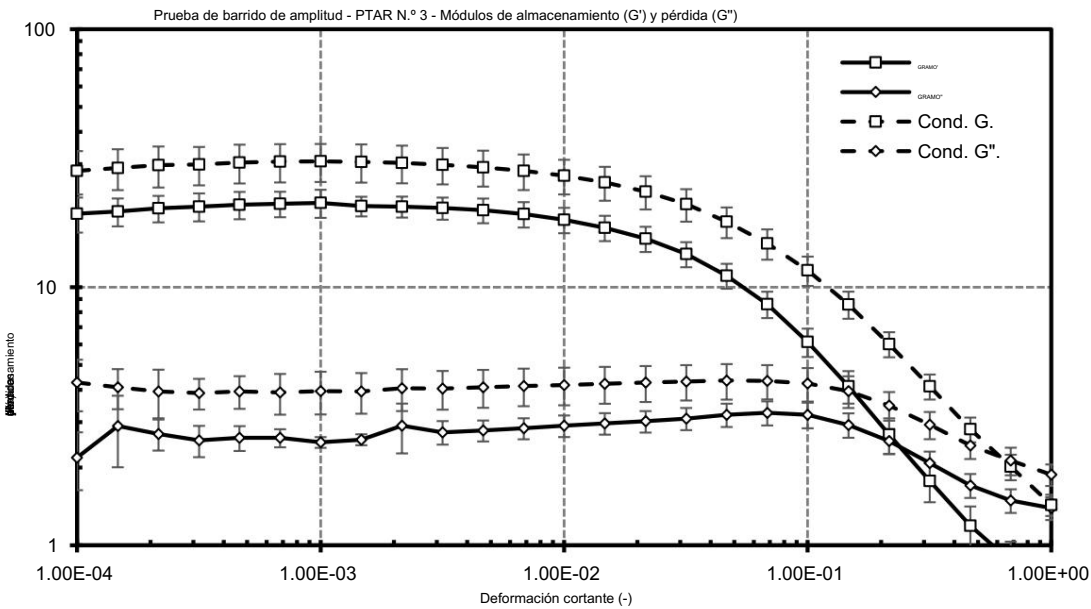


Figura 41: Resultados de la prueba de barrido de amplitud. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 3.

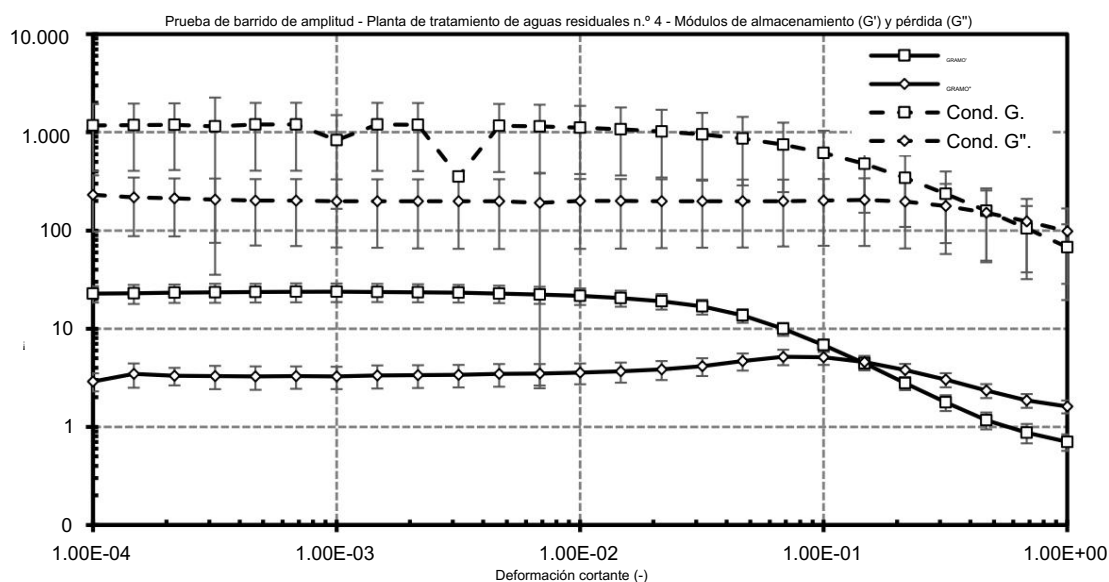


Figura 42: Resultados de la prueba de barrido de amplitud. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 4.

Se puede observar que el módulo complejo G^* de las muestras condicionadas (con el excepción de la EDAR N°2) aumentaron en relación con las no acondicionadas. Chen et al. (2005), explicó que el aumento de la fuerza de la red de flóculos podría ser causado por la formación de puentes. entre polímeros catiónicos y partículas de lodo cargadas negativamente, lo cual es consistente con observaciones adicionales de Wang y Dentel (2011) y Ayol et al. (2006). Además, El punto de flujo presente en el sistema de lodos sugirió una similitud con la transición entre sólidos y pastas para Wang y Dentel (2011). La tendencia persistió en lodos acondicionados aunque se extendió a la región viscosa. Este desplazamiento o traslación observado sugiere que Los lodos acondicionados tenderán a aumentar su comportamiento elástico mientras disminuyen el agua. capacidad de retención. Esto último también explicaría por qué la viscosidad cae más rápido para el muestras acondicionadas.

Por otra parte, las muestras acondicionadas para la PTAR N° 2 que se muestran en la Figura 40 dieron como resultado: misma respuesta explicada en los párrafos anteriores, pero en "dirección opuesta". Puede Se observa que el módulo de almacenamiento G' de las muestras TC es menor que en las TU contrapartes. Esto representaría una contradicción ya que significaría que la adición de El polielectrolito tuvo efectos deficientes o desfavorables sobre el lodo. La razón de esto El comportamiento podría depender de las propiedades internas del lodo. Dado que las muestras de La planta de tratamiento de aguas residuales n.º 2 contiene un mayor contenido de DS, por lo que se necesita un mayor volumen de agua. se vierte en la solución de polielectrolito. Con una dosis de 6 g/kgDS, el agua añadida a la

La muestra podría haber superado el efecto del polielectrolito. Añadiendo agua libre a la

La muestra tendría el mismo resultado que el explicado en la Sección 4.3.1.

El efecto condicionante sobre la muestra de la EDAR N° 4 fue significativo con un valor de dos órdenes de Diferencia de magnitud. La figura 43 muestra gráficamente la diferencia, frente al comportamiento de las demás EDAR, que eran relativamente similares entre sí.

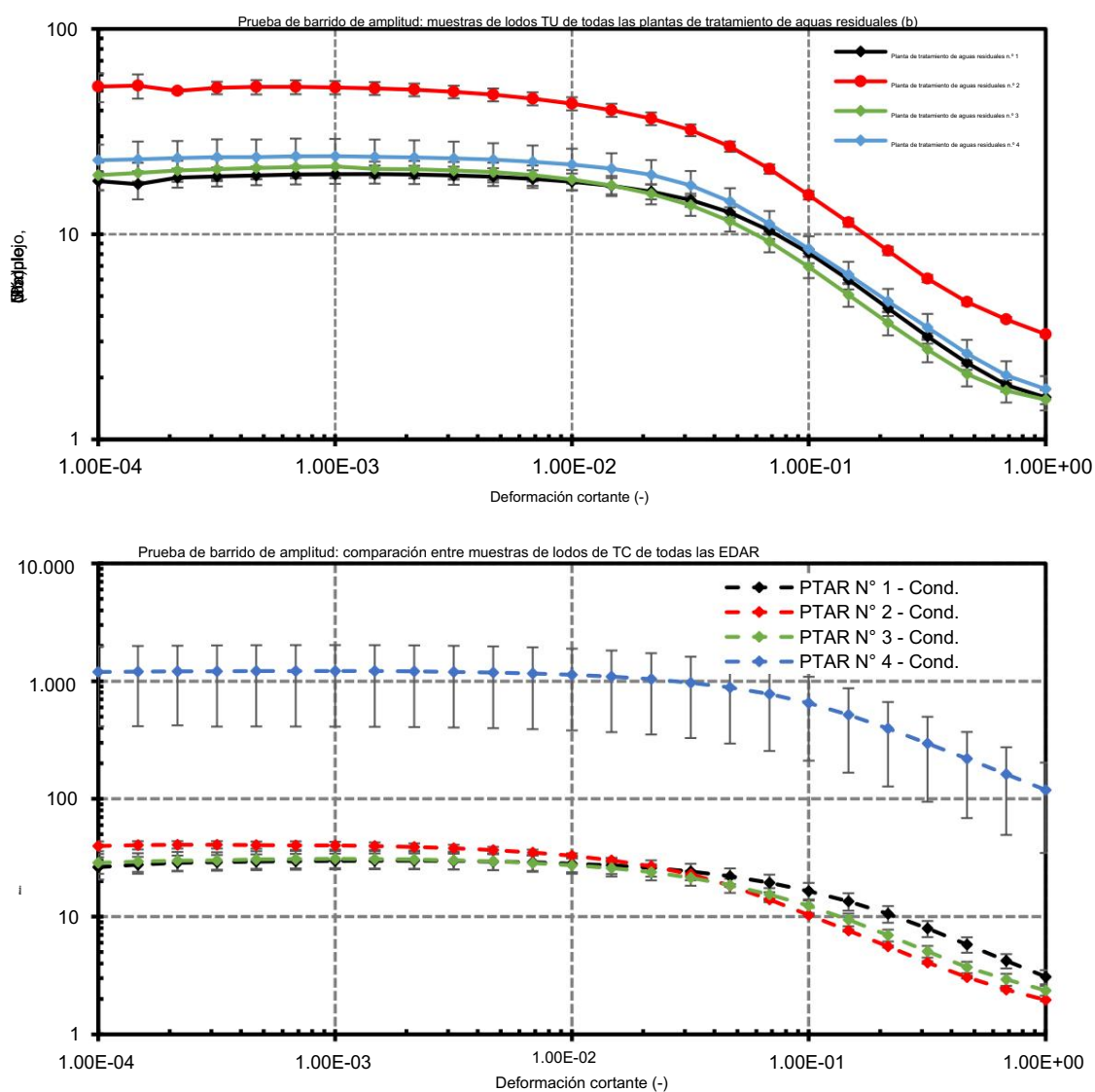


Figura 43: Comparación de pruebas de amplitud entre muestras de lodos TU(a) y TC(b) de todas las EDAR.

Por último, los resultados mostraron consistencia en cada muestra analizada, lo que hace que el dinamismo metodología de medición preferible a otros métodos. Como describen Ayol, Dentel y Filibeli (2006), el método proporciona un conjunto de datos robusto con una reproducibilidad superior cuando

en comparación con los métodos rotacionales. Además, es un método rápido para caracterizar el LVE.

región, incluyendo el límite elástico y el punto de fluencia.

Para encontrar el límite elástico, se estableció un rango de tolerancia alrededor del valor de meseta con una desviación de $\pm 5\%$ según las normas ISO 6721-10 y EN/DIN EN 14770. Cuando esto

Si se supera la tolerancia, se registra la tensión de fluencia. Para encontrar el punto de fluencia, por otro lado,

Se puede leer fácilmente como la intersección entre los módulos de almacenamiento (G') y pérdida (G'').

El resumen tanto del límite elástico como del punto de fluidez se puede ver en la Tabla 8, que también es representado gráficamente en la Figura 44.

Tabla 8: Límite de fluencia y punto de flujo de muestras de lodos de las cuatro EDAR.

Estrés de fluencia						
Punto de tratamiento de aguas residuales	TU			TC		
	G^* crítica.	c crítico.	t crítico.	G^* crítica.	c crítico.	t crítico.
	(Bien)	(-)	(Bueno)	(Bueno)	(-)	(Bueno)
1	19.07	0,0047	0,09	29.41	0,0047	0,14
2	51.37	0,0015	0,08	40.14	0,0015	0,06
3	20.45	0,0032	0,06	30.12	0,0032	0,10
4	23.07	0,0047	0,11	1186.20	0.00	5.52

Punto de flujo						
Punto de tratamiento de aguas residuales	TU			TC		
	GRAMMO*	do	t	GRAMMO*	do	t
	(Bueno)	(-)	(Bien)	(Bueno)	(-)	(Bueno)
1	4.36	0,2160	0,94	10.59	0,2160	2.29
2	15.49	0,1000	1,55	10.24	0,1000	1.02
3	3.70	0,2160	0,80	6.96	0,2160	1,50
4	8.49	0,1000	0,85	1186.20	0,1000	118,62

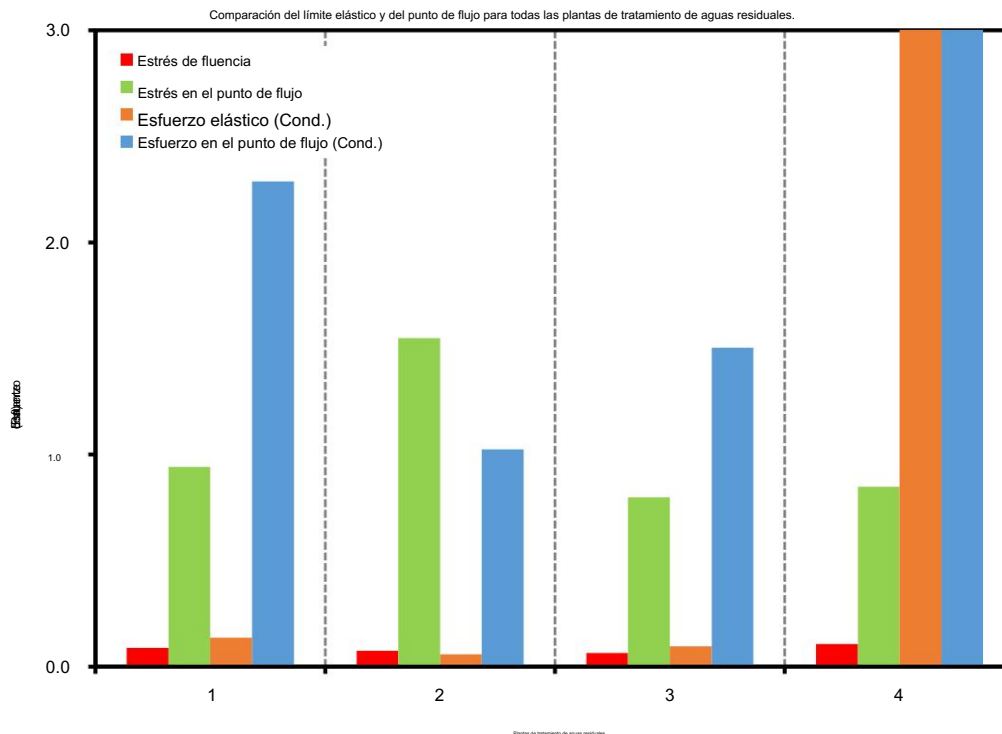


Figura 44: Comparación de la tensión de fluencia y el punto de flujo para todas las plantas de tratamiento de aguas residuales.

4.5. Pruebas de barrido de frecuencia

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones de frecuencia dinámica para las cuatro EDAR

Se muestran los resultados estudiados, siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 3.6.3.

Se observa en todas las muestras analizadas (Figura 45 a Figura 48) un comportamiento similar al de un sólido.

consistente con las mediciones de amplitud anteriores. Para tasas bajas, un comportamiento constante es

Se observa en G' y G'' , mientras aumenta gradualmente a alta velocidad angular. La forma de G'

y las curvas G'' pueden caracterizar una dispersión concentrada con un comportamiento similar al de un gel como

descrito por Guan et al. (2019). A medida que aumenta la velocidad angular, la resistencia interna

de la matriz de sólidos también aumenta.

La adición de polielectrolito no tuvo un impacto significativo en las muestras mientras estaban en el LVE.

gama, a excepción de la EDAR nº 4.

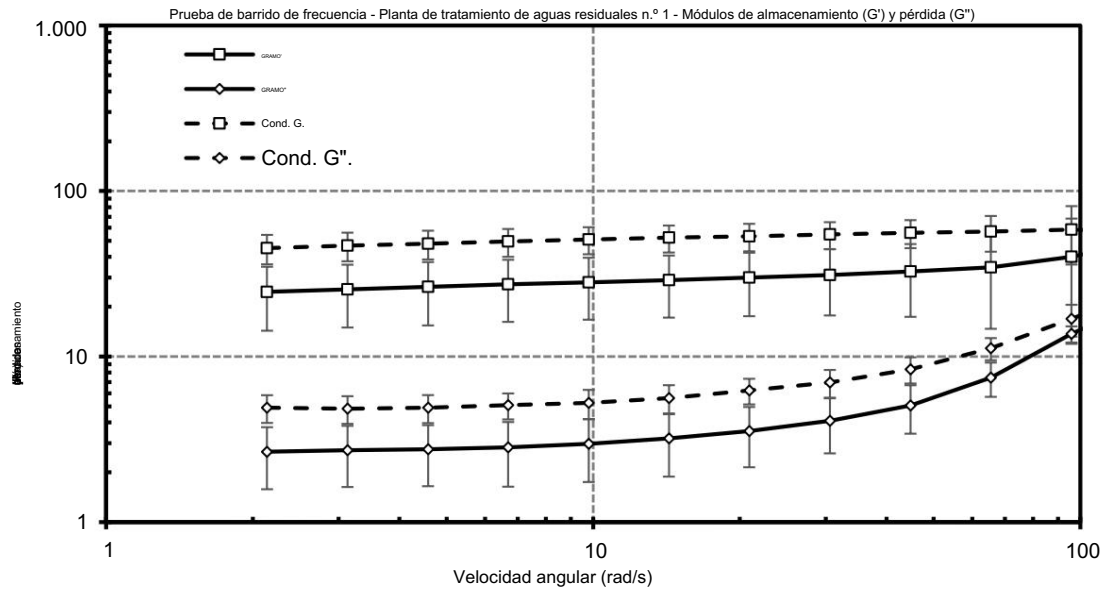


Figura 45: Resultados de la prueba de barrido de frecuencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 1.

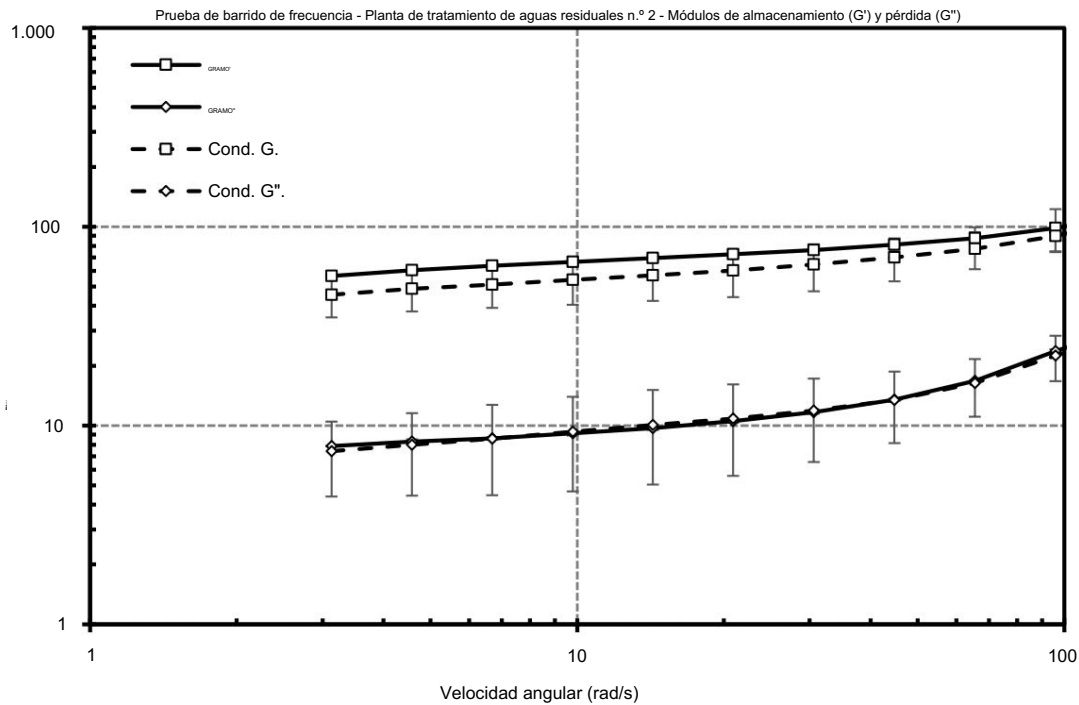


Figura 46: Resultados de la prueba de barrido de frecuencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 2.

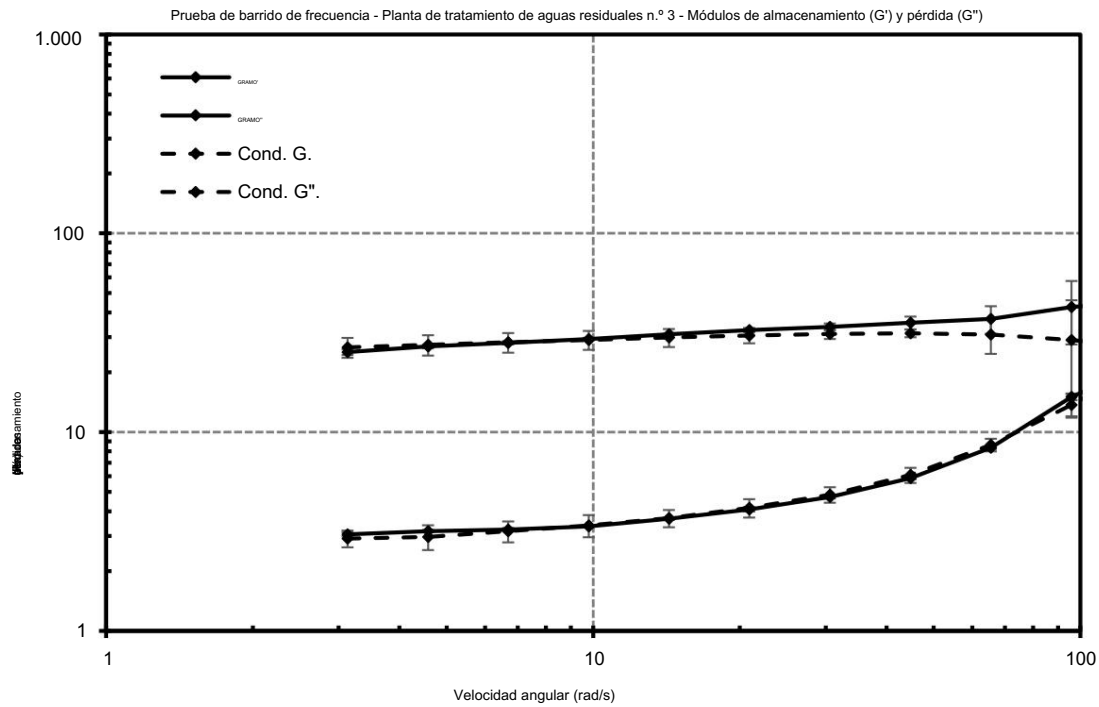


Figura 47: Resultados de la prueba de barrido de frecuencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 3.

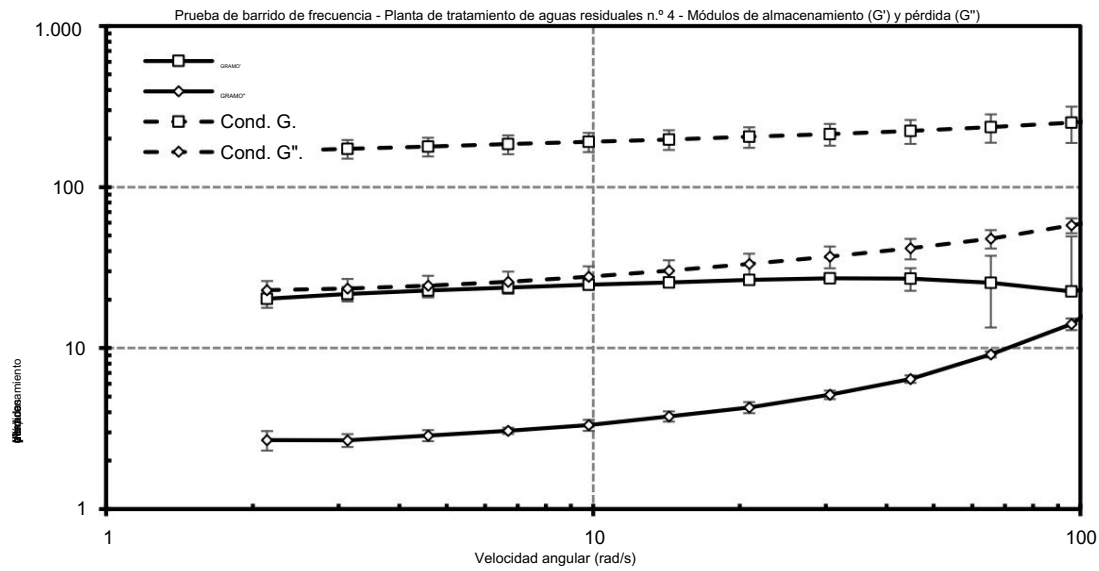


Figura 48: Resultados de la prueba de barrido de frecuencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 4.

Dado que tanto las pruebas de amplitud como las de frecuencia se realizaron con el mismo lote de muestras de lodos de cada EDAR, se puede obtener una confirmación adicional de la precisión de las pruebas. Comprobado. Como las pruebas de frecuencia se llevaron a cabo en la región LVE con un esfuerzo cortante constante deformación del 0,1%, los módulos de almacenamiento y pérdida resultantes a 10 rad/s deberían teóricamente coincidir con los datos de la prueba de barrido de amplitud para la misma deformación cortante cuando se ejecuta a una velocidad constante 10 rad/s. Para ello, en la Tabla 9 se muestra la comparación del módulo complejo de TU y TC. muestras.

Tabla 9: Comparación de pruebas de frecuencia y amplitud para muestras de lodos de las cuatro EDAR.

PTAR N°	Prueba de frecuencia Valores G^* (Pa)		Prueba de amplitud Valores G^* (Pa)		Diferencia (%)	
	TU	TC	TU	TC	TU	TC
1	28,29 ± 11,49	51,56 ± 9,55	19,60 ± 2,00	29,79 ± 4,58	30.7	42.2
2	67,16 ± 2,40	54,84 ± 14,12	51,90 ± 3,89	40,22 ± 3,04	22.7	26.7
3	29,60 ± 0,41	29,60 ± 3,20	21,37 ± 2,64	31,00 ± 5,22	27.8	4.7
4	24,96 ± 1,68	192,87 ± 26,40	23,95 ± 5,16	1218,85 ± 808,55	4.0	532.0

La diferencia encontrada entre las pruebas de frecuencia y amplitud podría atribuirse a Error experimental. Además, la dispersión experimental podría estar ocultando la pequeña diferencias observadas en el caso de pruebas de barrido de amplitud, hasta el punto de que la adición de El polielectrolito no parece tener un efecto estadísticamente significativo sobre el comportamiento del lodo. en el caso de las EDAR N° 1, 2 y 3 para una dosificación de polímero de 6,0 g/kgDS. Se muestra una gráfica La representación de la Tabla 9 se puede observar en la Figura 49.

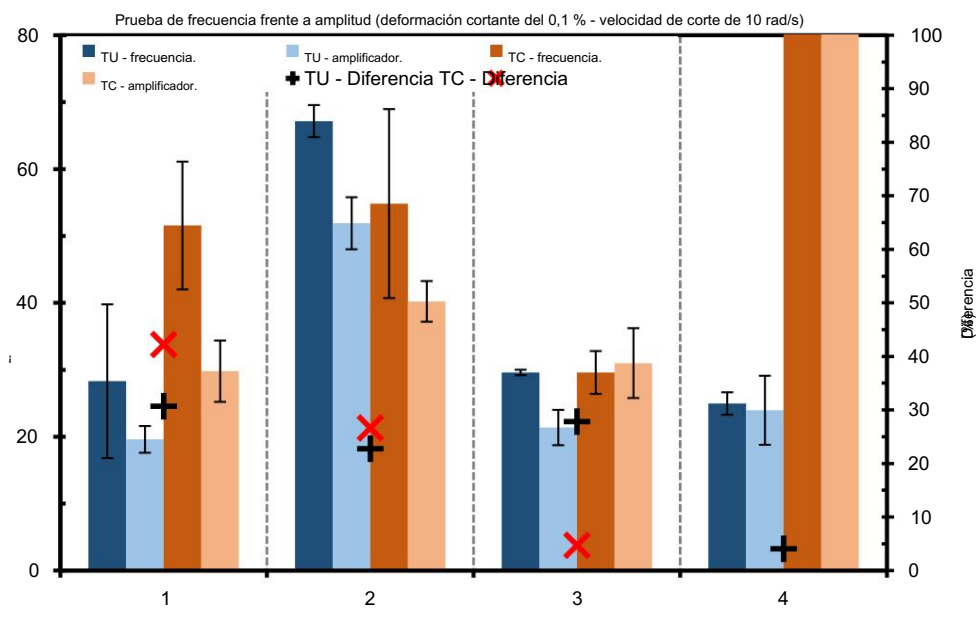


Figura 49: Diferencia entre pruebas de frecuencia y amplitud en el punto común

deformación cortante (0,1 %) – velocidad de corte (10 rad/s) para muestras de TU y TC de las cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales.

4.6. Prueba de fluencia y recuperación

En esta sección se presentan los resultados de las mediciones de fluencia y recuperación para las cuatro EDAR

Se muestran los resultados estudiados, siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3.6.4. Además, se

Las mismas observaciones realizadas en 4.2.2.3 siguen siendo válidas para todos los ensayos de fluencia posteriores.

Las figuras 50 a 53 muestran resultados incongruentes al observar la diferencia entre

muestras condicionadas y no condicionadas en el rango no LVE. En el caso de la Figura 50 TU

El lodo sufre una tensión de corte mayor que cuando se añade el polímero, mientras que lo opuesto

ocurre en la Figura 51. Esto probablemente se debe a la alta variabilidad en las mediciones de prueba.

Además, podría implicar que la diferencia real es intrascendente ya que no había

Es necesario ajustar la tensión cortante aplicada a las muestras para obtener las curvas.

Además, incluso si las mediciones no son lo suficientemente sensibles como para expresar la diferencia,

Es evidente que el cambio de comportamiento de sólido a líquido permanece dentro del

mismo rango entre lodos TU y TC.

Finalmente, en la Figura 53 se puede observar un fuerte cambio para la muestra de lodos de EDAR.

Nº 4 después de añadir el polielectrolito. Para conseguir la misma deformación, la fuerza de corte

La tensión tuvo que ser elevada de 2 Pa a 80 Pa, lo que indica una transformación significativa de la

estructura del floculo.

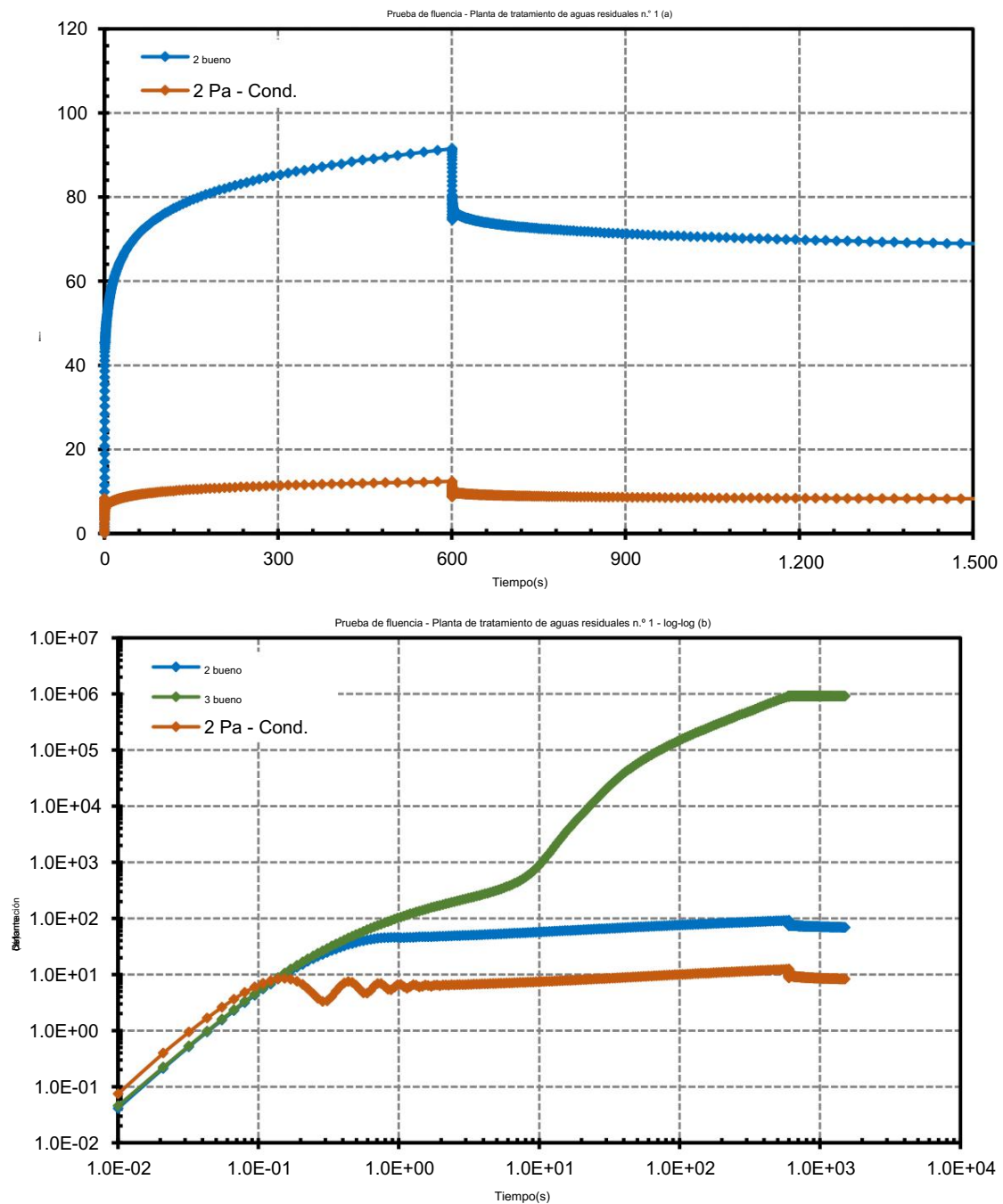


Figura 50: Resultados de la prueba de fluencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 1.

Por debajo del punto de tensión de fluencia (a). Por encima del punto de fluencia (b).

La Figura 50 (a) muestra que la muestra de TC de la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 1 presenta una respuesta elástica menor que el lodo de TU. Este es un resultado inesperado ya que el proceso de acondicionamiento aumenta la resistencia de la red de flóculos. De la Figura 50 (b) se desprende el comportamiento del lodo cuando se somete a 3 Pa indica que se alcanzó el punto de flujo, ya que se observó un comportamiento similar al de un líquido sin recuperación.

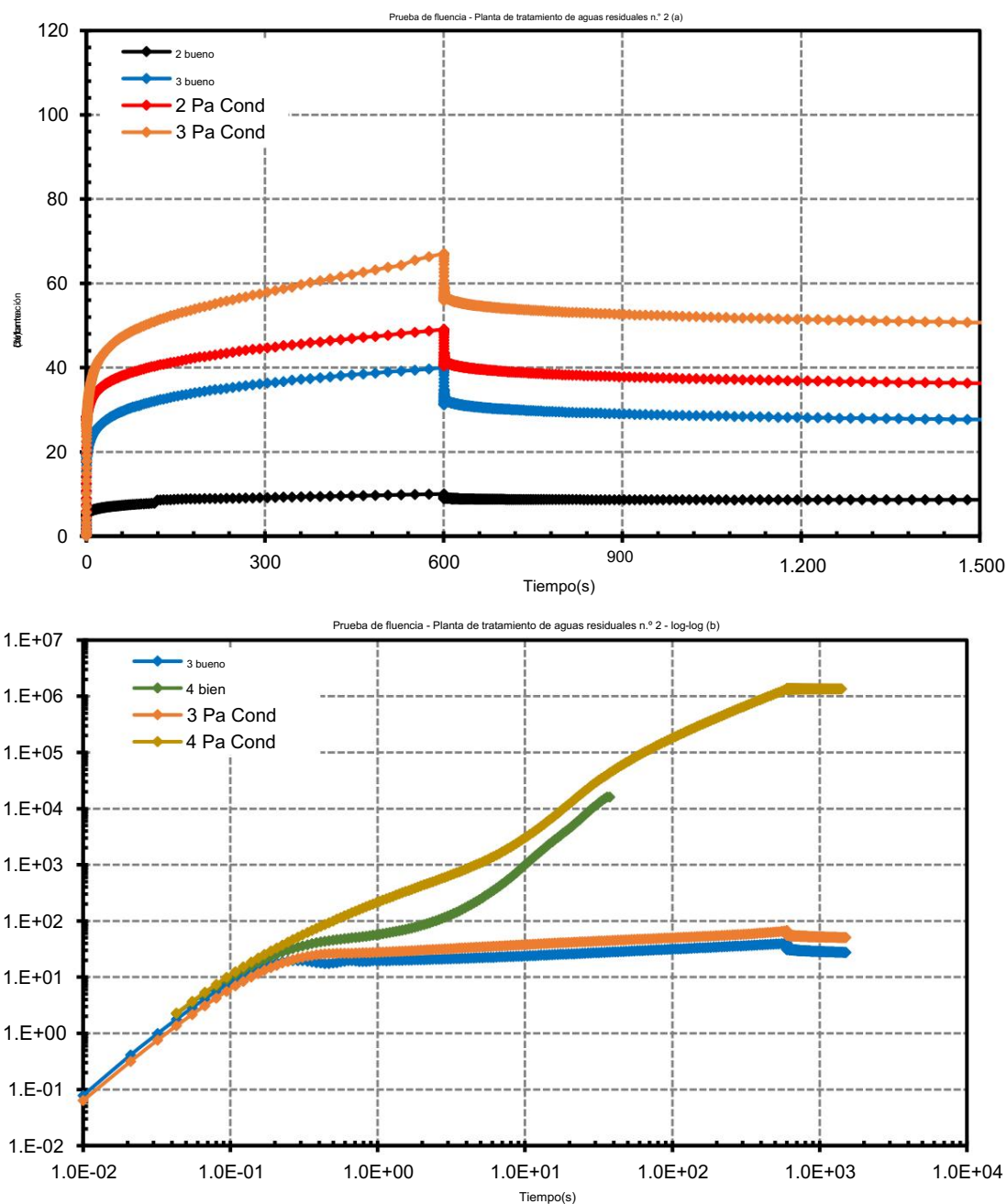


Figura 51: Resultados de la prueba de fluencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 2.

Por debajo del punto de tensión de fluencia (a). Por encima del punto de fluencia de fluencia (b).

La Figura 51 (a) muestra que las muestras de TC de la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 2 dan una respuesta elástica más alta que el lodo de TU. Este es el resultado esperado después del proceso de acondicionamiento. De la Figura 51 (b) El comportamiento de los lodos TU y TC cuando se someten a 4 Pa indica que el punto de flujo fue alcanzado, ya que se observó un comportamiento similar al líquido sin recuperación. La curva TU de 4 Pa Tuvo que ser recortado debido a un mal funcionamiento en el experimento. Sin embargo, ya estaba Está claro que se alcanzó un punto de flujo.

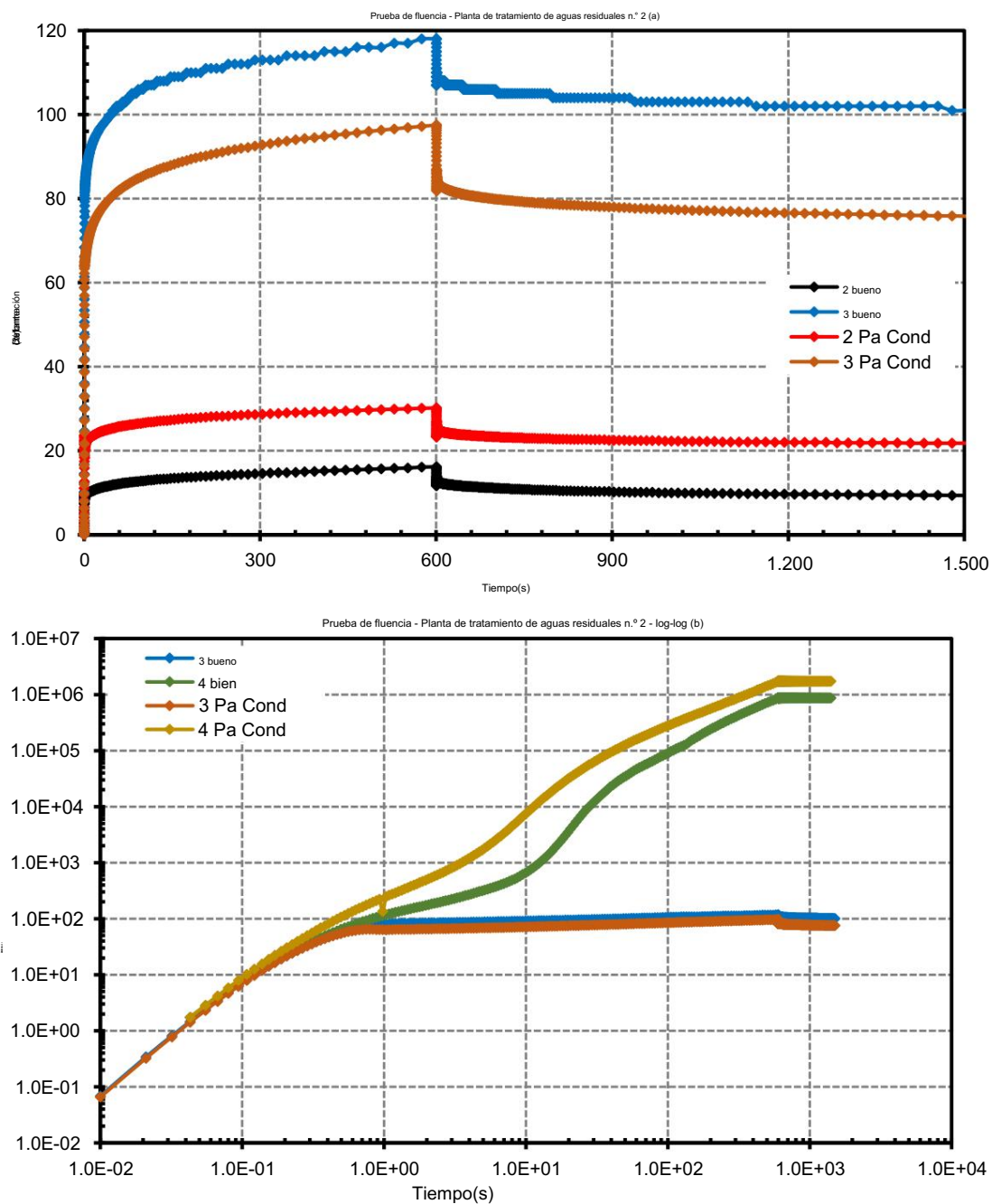


Figura 52: Resultados de la prueba de fluencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 3.

Por debajo del punto de tensión de fluencia (a). Por encima del punto de fluencia de fluencia (b).

La Figura 52 (a) muestra que las muestras de TC de la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 3 arrojan resultados mixtos en relación con la respuesta elástica. De la Figura 52 (b) se muestra el comportamiento de los lodos TU y TC cuando se someten a 4 Pa indican que se alcanzó el punto de flujo, ya que se observó un comportamiento similar al de un líquido sin recuperación.

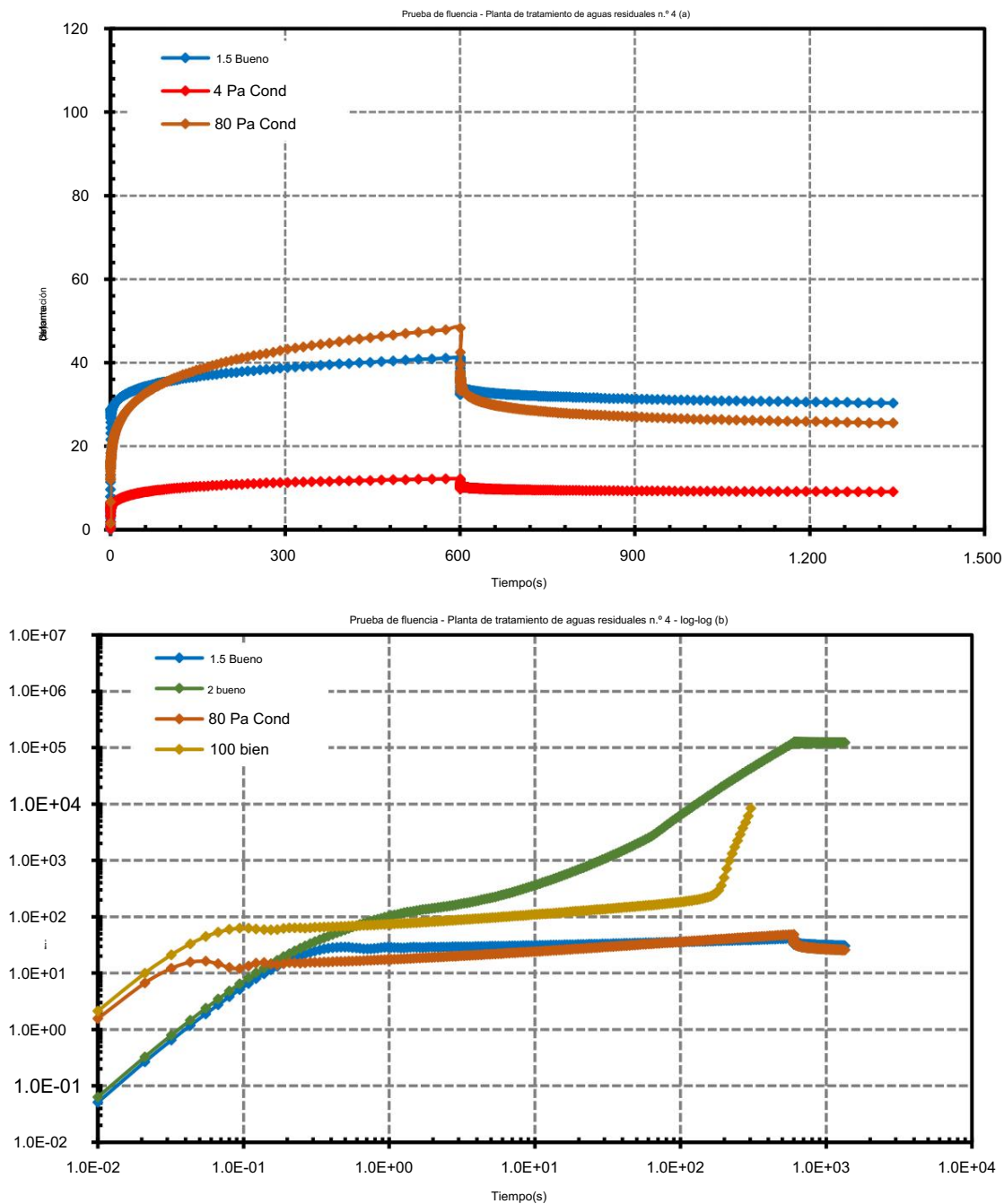


Figura 53: Resultados de la prueba de fluencia. Comparación de lodos TU y TC para la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 4.

Por debajo del punto de tensión de fluencia (a). Por encima del punto de fluencia de fluencia (b).

La Figura 53 (a) muestra que las muestras de TC de la planta de tratamiento de aguas residuales n.º 4 arrojan resultados mixtos en relación con la respuesta elástica. De la Figura 53 (b) se muestra el comportamiento del lodo TU cuando se somete a 2 Pa, lo que indica que se alcanzó el punto de flujo, ya que se observó un comportamiento similar al de un líquido sin recuperación. En el caso del lodo TC, se necesitó una tensión de corte más alta (alrededor de 100 Pa). En otros casos, para alcanzar el punto de flujo, el umbral se alcanzó justo antes de que la muestra se deslizara. Alejándose de la geometría, esta es una respuesta diferente a las tres plantas anteriores.

Se puede realizar una comparación adicional entre los valores del punto de flujo de ambos flujos.

y pruebas de amplitud. Para ello, se introduce la Tabla 10. Para las pruebas de fluencia, solo se utilizan valores de rango

Se pueden reportar valores de esfuerzo cortante, que representan el esfuerzo cortante antes y después del flujo.

Se alcanza el punto.

Tabla 10: Comparación de pruebas de fluencia y amplitud para muestras de lodos de las cuatro EDAR.

PTAR N°	Prueba de amplitud Valores del punto de flujo (Pa)		Prueba de fluencia Valores del punto de flujo (Pa)	
	TU	TC	TU	TC
1	0,94	2.29	(2-3)	(2-3)
2	1,55	1.02	(3-4)	(3-4)
3	0,80	1,50	(3-4)	(3-4)
4	0,85	118,62	(1.5-2)	(80-100)

Aunque el orden de magnitud es el mismo, las diferencias leídas en la Tabla 10 podrían ser

Esto se explica por el hecho de que ambas pruebas se basan en metodologías muy diferentes. La geometría en

En una prueba de fluencia, el motor gira constantemente en una dirección a velocidades muy bajas, mientras que en la prueba dinámica

En la prueba de amplitud, la geometría sigue una vibración sinusoidal a velocidades más rápidas. La diferencia en

La velocidad de ambas pruebas podría significar que la estructura del flóculo puede ceder a un corte diferente.

estrés.

4.7. Pruebas de comparación utilizando geometría de cono y placa

En esta sección se muestran los resultados con el uso de la geometría de cono y placa, siguiendo

la metodología descrita en el Capítulo 3.6.5. Además, los resultados se comparan con los

mediciones de los Capítulos 4.3.2 y 4.4 ya que el mismo lote de muestras de la EDAR

Se utilizó el número 4.

La figura 54 muestra la comparación de las curvas de flujo y viscosidad. Las muestras de TU utilizadas con

Las placas paralelas muestran valores de viscosidad y tensión de corte más altos en comparación con las placas cónicas.

En el caso de las muestras de TC, no es aceptable ninguna comparación debido a la alta variabilidad presente. que podría ser causado por el efecto de deslizamiento de la pared. Además, a bajas velocidades de corte ($< 20 \text{ 1/s}$) El comportamiento de la curva fue opuesto al esperado (convexa en lugar de cóncava). En este caso, por último, utilizando el cono y la placa, se puede observar un pico aparente en el caso de muestras de TC como se explica en el Capítulo 2.5.7. Sin embargo, la variabilidad de los resultados es Alto y por lo tanto no confiable.

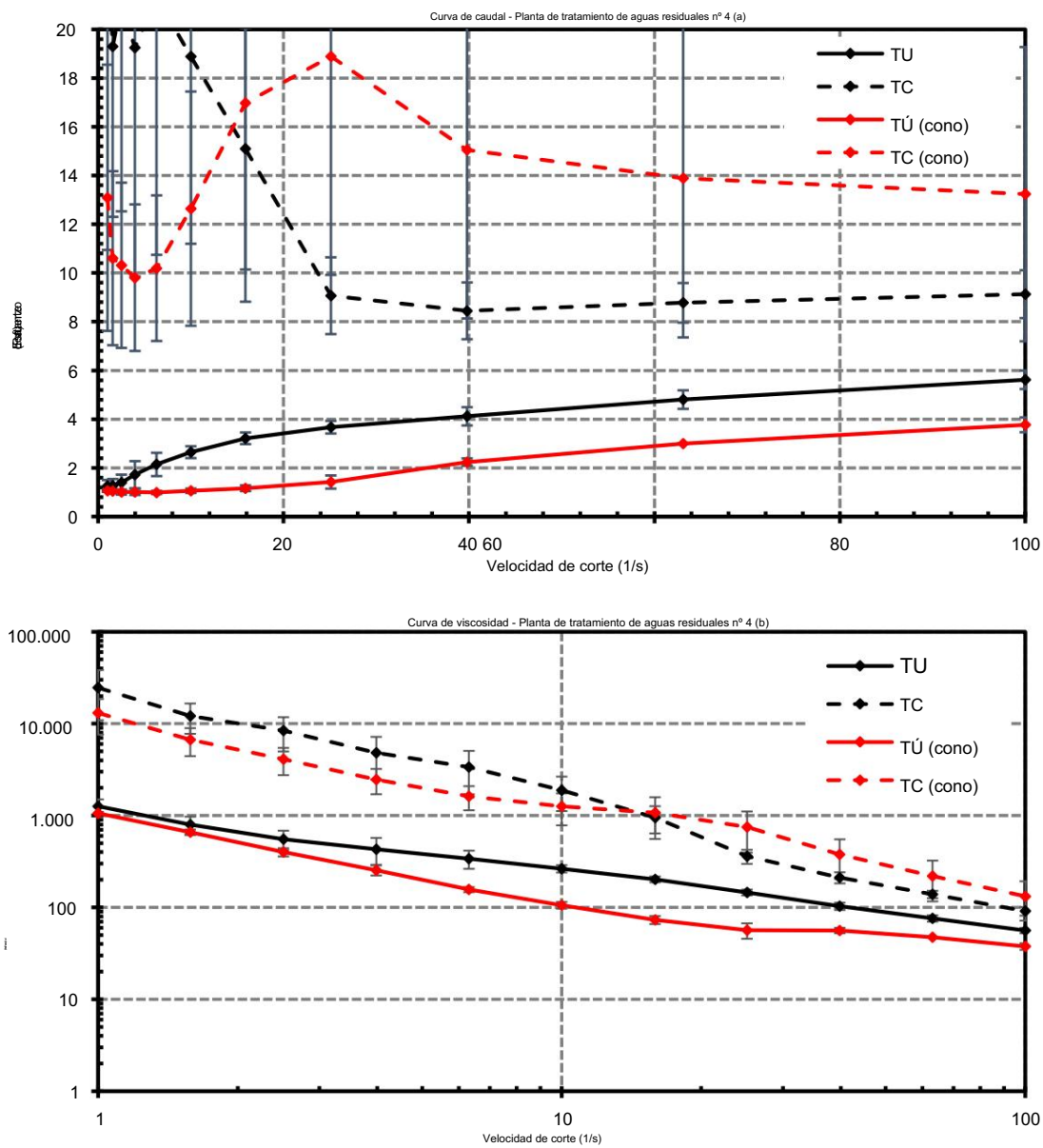


Figura 54: Curvas de flujo (a) y viscosidad (b). Comparación de la geometría de placas paralelas y de cono y placa para

Planta de tratamiento de aguas residuales nº 4.

Una descripción similar podría realizarse en el caso de la comparación de la prueba de amplitud (Figura 55),
Dado que las muestras TU que utilizan la geometría de placas paralelas dan como resultado módulos complejos más altos (G^*). Las muestras de TC que utilizan geometría de cono y placa muestran una variabilidad menor que su contrapartida.

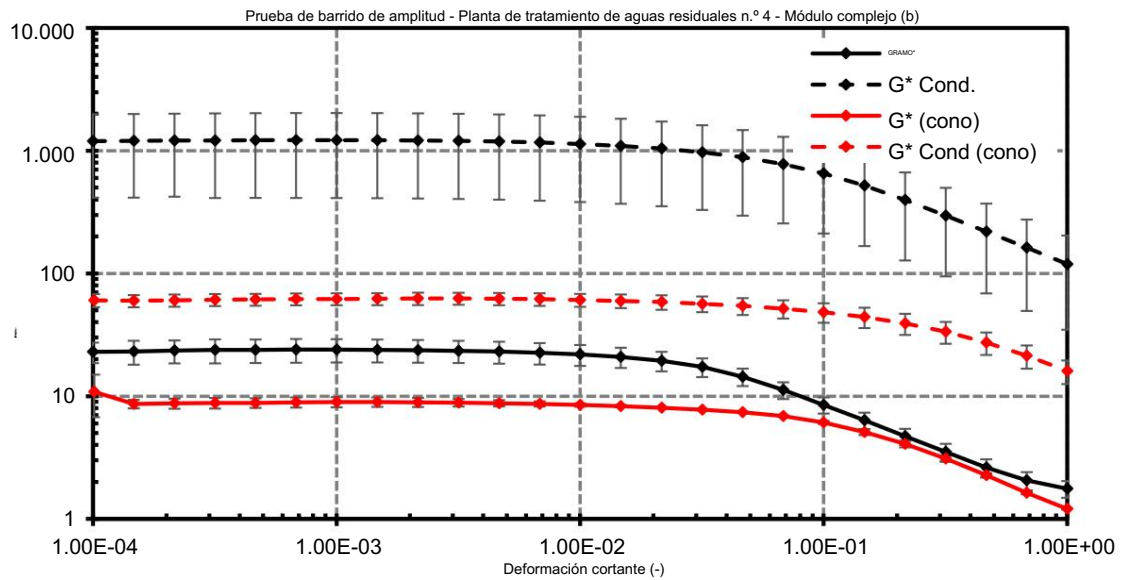


Figura 55: Prueba de barrido de amplitud dinámica. Comparación de geometría de placas paralelas y de cono y placa para

Planta de tratamiento de aguas residuales n.º 4.

Aunque se puede observar una similitud general en la tendencia entre ambas geometrías (Figura 54 y Figura 55), es evidente que los valores divergen lo suficiente como para dificultar una comparación de los Medición de prueba si se utilizan placas con geometrías diferentes. Por lo tanto, el uso de una geometría única Se recomienda para todos los experimentos.

4.8. Aplicación de modelos y relación de las características de los lodos con los parámetros reológicos

En esta sección se presenta la aplicación del modelo y la relación entre los parámetros clásicos y reológicos.

para las cuatro EDAR estudiadas se muestran, siguiendo la metodología descrita en el Capítulo

3.7.

4.8.1. Modelos de curvas de flujo y viscosidad

Se seleccionaron dos tipos de modelos. Un tipo depende de la velocidad de corte y la tensión y, por lo tanto,

se basa en la curva de flujo, y el otro tipo depende de la velocidad de corte y la viscosidad y

Por lo tanto, se basa en la curva de viscosidad. Para la primera clase, el modelo Herschel-Bulkley, de

Se seleccionó el tipo en el que se puede encontrar la tensión de fluencia. Para el segundo tipo, se utilizaron los modelos Sisko y Cross.

Se eligieron modelos para describir el comportamiento de la viscosidad.

Para mayor claridad, las ecuaciones de los tres modelos utilizados (descritos en la Sección 2.5.5) son reportado aquí también:

Herschel-Bulkley: ecuación 29

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

Sisko:

Ecuación 30

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{1 + (\dot{\gamma} \lambda)^2}$$

Cruz:

Ecuación 31

$$\eta = \frac{\eta_{\infty}}{1 + (\dot{\gamma} \lambda)^2} = \frac{1}{1 + (\dot{\gamma} \lambda)^2}$$

El modelo de Herschel-Bulkley se ajustó a las curvas de flujo que se muestran en el Capítulo 4.3, utilizando el datos de las tres repeticiones realizadas para cada muestra de lodo y para las cuatro EDAR.

Dado que la tensión de corte, obtenida experimentalmente a baja velocidad de corte, mostró una diferencia comportamiento del esperado (ver Capítulo 4.3), el rango de velocidad de corte va desde 6,31 1/s hasta 63,10

Se seleccionó 1/s. Este problema también podría estar relacionado con el tipo de geometría, ya que es similar

Se encontró comportamiento tanto para placas paralelas como para geometría de cono y placa.

La Tabla 11 muestra que con el rango de datos seleccionado, no hay un ajuste adecuado con un valor de límite elástico fue posible aparte de la muestra 3-TC.

Tabla 11: Resultados del ajuste del modelo Herschel-Bulkley y los parámetros clave para las cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales. utilizando únicamente datos de curvas de flujo de: 6,31 1/s a 63,10 1/s y extrapolando τ_0).

Planta de tratamiento de aguas residuales		Parámetros del modelo Herschel-Bulkley				
	t0	Km	Ecuación		R2	
	Bien					
1-TU	0	0,58	0,5	$\tau = 0 + 0,58$	' 0,5	0,997
1-TC	No se encontró ningún ajuste					
2-TU	0	1,77	0,39	$\tau = 0 + 1,77$	' 0,39	0,845
2-TC	0	1.06	0,4	$\tau = 0 + 1,06$	' 0,4	0,953
3-TU	0	0,69	0,47	$\tau = 0 + 0,69$	' 0,47	0,958
3-TC	1.87	0,27	0,52	$\tau = 1,87 + 0,27$	' 0,52	0,922
4-TU	0	1.29	0,32	$\tau = 0 + 1,29$	' 0,32	0.940
4-TC	No se encontró ningún ajuste					

El modelo Sisko se ajustó a las curvas de viscosidad que se muestran en el Capítulo 4.3, utilizando los datos de las tres repeticiones realizadas para cada muestra de lodo y para todas las EDAR.

La tasa de viscosidad aparente " η_∞ " utilizada para ajustar el modelo se seleccionó como la viscosidad aparente observado a una velocidad de corte de 100 1/s.

Tabla 12: Resultados del ajuste del modelo Sisko y los parámetros clave para las cuatro EDAR.

Planta de tratamiento de aguas residuales		Parámetros del modelo Sisko			
	η^∞ m mPa·s	K	Ecuación		R2
1-TU	48,00 0,08	1108.7	= 48,00 + 1108,7	'0,08-1	1.000
1-TC	39,95 0,05	5516.4	= 39,95 + 5516,4	'0,05-1	0,997
2-TU	75,30 0,29	901.8	= 75,30 + 901,8	'0,29-1	0,948
2-TC	55,93 0,27	764.3	= 55,93 + 764,3	'0,27-1	0,988
3-TU	53,70 0,13	888.8	= 53,70 + 888,8	'0,13-1	0,996
3-TC	48,57 0,04	2409.0	= 48,57 + 2409,0	'0,04-1	0,999
4-TU	56.13 0,30	727.0	= 56,13 + 727,0	'0,30-1	0,990
4-TC	91.30 0,03	20116,7	= 91,30 + 20116,7	'0,03-1	0,997

Aunque la Tabla 12 muestra buenos resultados de R² para todas las EDAR (excepto la muestra de 2 TU), indicando un buen ajuste, la variación del parámetro es alta, especialmente para los valores del fluido índice de consistencia "K". Esto significaría que el modelo encontrado sólo sería aplicable para la misma planta. La representación gráfica de cada accesorio se puede ver en la Apéndice.

4.8 Aplicación de modelos y relación de las características de los lodos con los parámetros reológicos

El modelo Cross se ajustó a las curvas de viscosidad tomadas en cuenta para el modelo Cross.

La viscosidad aparente de tasa infinita " η_{∞} " utilizada para ajustar el modelo se seleccionó como la viscosidad

observado a una velocidad de corte de 100 1/s. En el caso de la viscosidad aparente de corte cero " η_0 ", la

El valor se seleccionó a una velocidad de corte de 1 1/s.

Tabla 13: Resultados del ajuste del modelo Cross y los parámetros clave para las cuatro EDAR.

	Parámetros del modelo cruzado				R2
	h_0 mPa·s	η_{∞} mPa·s	metro λ	Ecuación	
1-TU	1160,6	48,00	1,33	$\frac{-48,00}{1160,6 - 48,00} = \frac{1}{1 + (0,54 \cdot \dot{\gamma})^{1,33}}$	0,996
1-TC	4276,4	39,95	1,54	$\frac{-39,95}{4276,4 - 39,95} = \frac{1}{1 + (0,51 \cdot \dot{\gamma})^{1,54}}$	0,994
2-TU	1250,4	75,30	0,89	$\frac{-75,30}{1250,4 - 75,30} = \frac{1}{1 + (0,63 \cdot \dot{\gamma})^{0,89}}$	0,930
2-TC	2377,9	55,93	0,94	$\frac{-55,93}{2377,9 - 55,93} = \frac{1}{1 + (0,74 \cdot \dot{\gamma})^{0,94}}$	0,982
3-TU	974,5	53,70	1,28	$\frac{-53,70}{974,5 - 53,70} = \frac{1}{1 + (0,49 \cdot \dot{\gamma})^{1,28}}$	0,988
3-TC	2471,7	48,57	1,57	$\frac{-48,57}{2471,7 - 48,57} = \frac{1}{1 + (0,48 \cdot \dot{\gamma})^{1,57}}$	0,994
4-TU	1263,3	56,13	0,96	$\frac{-56,13}{1263,3 - 56,13} = \frac{1}{1 + (0,57 \cdot \dot{\gamma})^{0,96}}$	0,985
4-TC	24639,7	91,30	1,58	$\frac{-91,30}{24639,7 - 91,30} = \frac{1}{1 + (0,48 \cdot \dot{\gamma})^{1,58}}$	0,998

Los resultados que se muestran en la Tabla 13 muestran buenos valores de R2 para todas las EDAR (excepto la

muestra de 2 TU), lo que indica un buen ajuste. Además, dado que la variación del parámetro es baja,

implicaría que el modelo Cross es adecuado para las diferentes EDAR. La representación gráfica

La representación de cada accesorio se puede ver en el Apéndice.

En conclusión, el modelo que mejor se ajusta entre los tres utilizados es el modelo Cross ya que tiene un buen R2, con

baja variación de parámetros para las diferentes EDAR. El modelo Sisko también dio

buenos resultados de ajuste, pero con grandes variaciones dentro de los parámetros para cada planta. Finalmente,

Para el modelo Herschel-Bulkley se necesitan mejores datos, especialmente a bajas tasas de corte,

Un ajuste apropiado.

4.8.2. Relación de la concentración de sólidos con la viscosidad y el límite elástico

El modelo seleccionado para relacionar la concentración de sólidos y la viscosidad fue el exponencial. función:

Ecuación 17

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{C}{C_0} \right)^n$$

utilizado por diferentes investigadores enumerados en la revisión de Eshtiaghi et al. (2013), como Abu-Jdayil, Banat y Al-Sameraiy (2010) y Khalili Garakani et al. (2011). Por otro lado,

El modelo utilizado para relacionar la tensión de fluencia con el contenido de sólidos fue la ecuación exponencial:

Ecuación 19

$$\tau = \tau_0 \left(\frac{C}{C_0} \right)^m$$

implementado por Mori et al. (2006).

En este último, en lugar de utilizar los valores TSS, se seleccionaron los valores DS ya que eran más confiable y sufrió una menor variabilidad experimental. Además, cuando el lodo es

A medida que aumenta la concentración de sólidos y espesados, el DS y el TSS tienden a converger a un valor similar. y por lo tanto pueden considerarse intercambiables.

Utilizando los datos de las características de las muestras de lodos de la Tabla 4 y el límite

Viscosidad obtenida por el viscosímetro Brookfield (Figura 29), la ecuación exponencial 17 fue

equipado.

Tabla 14: Resultados de ajuste de la función exponencial que relaciona el contenido de sólidos con la viscosidad y la clave Parámetros de la EDAR N° 1, utilizando el viscosímetro Brookfield y con contenidos de sólidos variables.

Viscosidad límite DS de la EDAR			Brookfield - Viscosidad vs. TSS		R2	
			a	b		
	mPa·s	(g/l)		Ecuación		
1 - TU	461,67	40,20	584,9	0,94	norte = $584,9 \times \left(\frac{40.200.94}{C} \right)$	0,999
1 - TU	350,00	40,07	601,2	0,94	norte = $601,2 \times \left(\frac{40.070.94}{C} \right)$	0,999
1 - TU	274,00	35,30	640,9	0,71	norte = $640,9 \times \left(\frac{35.300.71}{C} \right)$	0,999
1 - TU	125.33	29,20	607,3	0,37	norte = $607,3 \times \left(\frac{29.200.37}{C} \right)$	0,995
1 - TU	76,55	21,60	607,0	0,17	norte = $607,0 \times \left(\frac{21.600.17}{C} \right)$	0,997
1 - TU	75,67	20,60	641,3	0,20	norte = $641,3 \times \left(\frac{20.600.20}{C} \right)$	0,997
1 - TU	54,67	17,20	641,3	0,35	norte = $641,3 \times \left(\frac{17.200.35}{C} \right)$	0,885
1 - TU	31,67	14,90	641,3	0,22	norte = $641,3 \times \left(\frac{14.900.22}{C} \right)$	0,973

4.8 Aplicación de modelos y relación de las características de los lodos con los parámetros reológicos

La Tabla 14 muestra los resultados del ajuste mencionado. El R calculado ² y la baja variación de los coeficientes empíricos sugieren un buen ajuste.

Aplicando la Ecuación 19 a las propiedades DS obtenidas en la Tabla 6 y la viscosidad límite obtenido mediante el reómetro Anton Paar (Tabla 8) se obtuvieron los siguientes resultados:

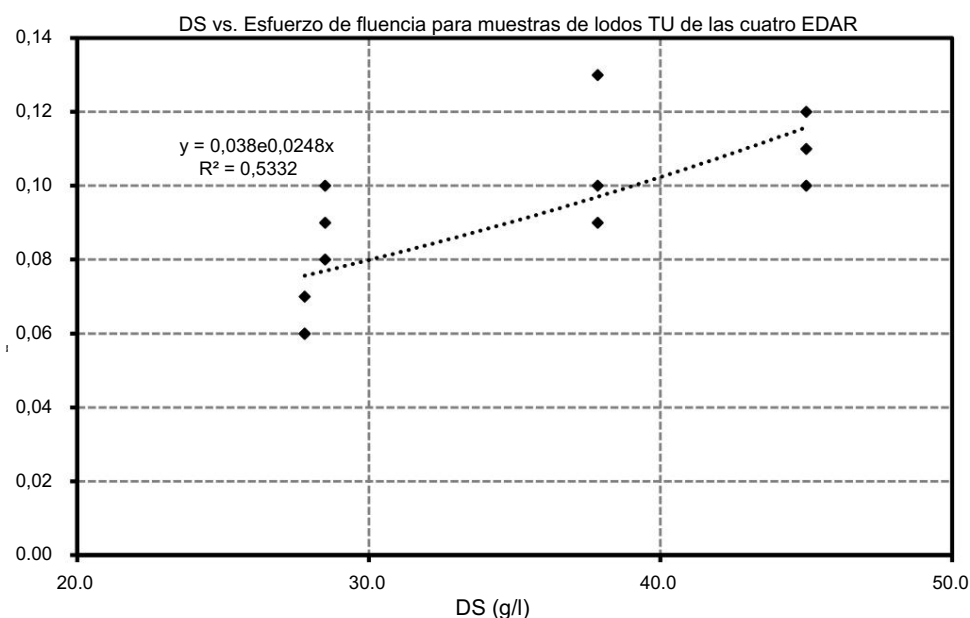


Figura 56: Relación entre el DS y el esfuerzo de fluencia para lodos TU tomados de las cuatro EDAR.

Aunque se puede observar una tendencia ascendente del límite elástico para las muestras de lodos TU en la Figura 56, no se sigue la ecuación 19. Se necesitan datos adicionales para diferentes valores de DS.

Por otra parte, dado que la respuesta del esfuerzo de fluencia del TC fue diferente para cada EDAR, no se pudo determinar con claridad Se encontró relación con DS.

4.8.3. Influencia de la dosificación del polímero en la viscosidad

En el caso de diferentes dosificaciones de polímeros, la función exponencial:

Ecuación 17
$$= x (') \text{ —}$$

Se utilizó para evaluar la diferencia entre lodos TU y TC y entre diferentes

Dosis de polímeros. Utilizando los datos de las características de las muestras de lodos de la Tabla 5 y

la viscosidad límite obtenida por el viscosímetro Brookfield (Figura 31 y Figura 32), la

Se ajustó la ecuación exponencial 17 .

Tabla 15: Resultados de ajuste de la función exponencial que relaciona el contenido de sólidos con la viscosidad y la clave Parámetros de la EDAR N° 1, utilizando el viscosímetro Brookfield y con dosis variables de polímero.

Punto de tratamiento de aguas residuales	Dosis de polímero	Viscosidad límite	DS Brookfield - Viscosidad vs. TSS - Dosis de polímero variable			
			a	b	Ecuación	R2
	g/kgDS	mPa·sg/l				
1 - TU	0	298,33	34,1	596,27	$\eta = 596,27 \times (34,1^{\frac{0,83}{x}})$	0,998
1-TC	6	178,33	28,6	603,28	$\eta = 603,28 \times (28,6^{\frac{0,65}{x}})$	0,998
1-TC	8	163,67	28,1	645,31	$\eta = 645,31 \times (28,1^{\frac{0,60}{x}})$	0,998
1-TC	10	111,33	26,8	607,88	$\eta = 607,88 \times (26,8^{\frac{0,61}{x}})$	0,994
1-TC	12	93,50	20,1	607,95	$\eta = 607,95 \times (20,1^{\frac{0,58}{x}})$	0,995

Tabla 16: Resultados de ajuste de la función exponencial que relaciona el contenido de sólidos con la viscosidad y la clave Parámetros de la EDAR N° 2, utilizando el viscosímetro Brookfield y con dosis variables de polímero.

Punto de tratamiento de aguas residuales	Dosis de polímero	Viscosidad límite	DS Brookfield - Viscosidad vs. TSS - Dosis de polímero variable			
			a	b	Ecuación	R2
	g/kgDS	mPa·sg/l				
2 - TU	0	225,33	35,2	603,64	$\eta = 603,64 \times (35,2^{\frac{0,71}{x}})$	0,981
2 – TC	6	190,00	27,2	607,44	$\eta = 607,44 \times (27,2^{\frac{0,72}{x}})$	0,999
2 – TC	8	147,67	27,0	648,10	$\eta = 648,10 \times (27,0^{\frac{0,65}{x}})$	0,994
2 – TC	10	65,33	20,9	611,00	$\eta = 611,00 \times (20,9^{\frac{0,65}{x}})$	0,999
2 – TC	12	49,50	20,6	608,96	$\eta = 608,96 \times (20,6^{\frac{0,65}{x}})$	0,991

La Tabla 15 y la Tabla 16 muestran el ajuste resultante para las EDAR N° 1 y 2 respectivamente en diferentes dosis de polímeros (que van desde 0 a 12 g/kgDS). El R2 calculado y el bajo

La variación de los coeficientes empíricos sugiere un buen ajuste en ambos casos. No se puede establecer una relación clara.

Se puede observar entre los coeficientes del modelo y la dosificación de polímero del lodo.

Finalmente, utilizando los datos de las características de las muestras de lodos de la Tabla 6 y el límite

Viscosidad obtenida por el reómetro Anton Paar (Tabla 7), la ecuación exponencial 17 fue

equipado.

Tabla 17: Resultados de ajuste de la función exponencial que relaciona el contenido de sólidos con la viscosidad y la clave Parámetros para las cuatro EDAR, utilizando el reómetro Anton Paar y con una dosificación de 6,0 g/kgDS para TC muestras.

Planta de tratamiento de aguas residuales	Dosis de polímero g/kgDS	Viscosidad límite mPa·s	DS Anton Paar - Viscosidad vs. TSS - Para cuatro plantas de tratamiento de aguas residuales		Ecuación	R2
			a	b		
1-TU	0	48,00	28,5	2,59 1,84	$\eta = 2,59 \times (28,5^{\frac{1,84}{x}})$	0,997
1-TC	6	39,95	29,8	4,30 3,09	$\eta = 4,30 \times (29,8^{\frac{3,09}{x}})$	0,998
2-TU	0	75,30	45,0	2,59 1,70	$\eta = 2,59 \times (45,0^{\frac{1,70}{x}})$	0,942
2-TC	6	55,93	39,8	2,59 1,68	$\eta = 2,59 \times (39,8^{\frac{1,68}{x}})$	0,978
3-TU	0	53,70	27,8	2,60 1,85	$\eta = 2,60 \times (27,8^{\frac{1,85}{x}})$	0,992
3-TC	6	48,57	25,2	2,60 2,16	$\eta = 2,60 \times (25,2^{\frac{2,16}{x}})$	0,999
4-TU	0	56.13	37,9	2,59 1,72	$\eta = 2,59 \times (37,9^{\frac{1,72}{x}})$	0,976
4-TC	6	91.30	34,7	3,85 2,45	$\eta = 3,85 \times (34,7^{\frac{2,45}{x}})$	0,997

La Tabla 17 muestra el ajuste resultante para todas las EDAR para muestras de lodos TU y TC (6,0 g/kgDS) . El R2 calculado y la baja variación de los coeficientes empíricos sugieren una Buen ajuste en todos los casos, con excepción de la muestra de 2 TU. No se puede establecer una relación clara. observado entre los coeficientes del modelo y la dosificación de polímero del lodo.

Resumiendo, la Ecuación 17 ajusta el comportamiento de todas las EDAR cuando el DS varía y con Diferentes dosis de polímeros. No fue el caso de algunas muestras de la EDAR N° 2.

Esto podría explicarse por el hecho de que el contenido sólido de las muestras de lodos de la La planta fue la más alta en relación con las demás. En la literatura, la mayoría de los modelos se generan con muestras de lodos que no han sido digeridos ni espesados, lo que da como resultado sólidos muy bajos concentración. Por lo tanto, un mayor contenido de DS podría resultar un factor limitante para tal modelos.

4.8.4. Relación de la CST con la viscosidad al variar la concentración de sólidos y dosificación de polímero

Utilizando los datos de las características de los lodos de la Tabla 5 en la que el contenido de DS tiene una relación con CST, y los resultados obtenidos por el viscosímetro Brookfield (Figura 31 y Figura 32) donde la viscosidad tiene una relación con el DS, el paso final es relacionar la viscosidad con el CST. Para ello, se graficó la viscosidad límite frente a los valores del CST para los diferentes Contenido del DS (Figura 57).

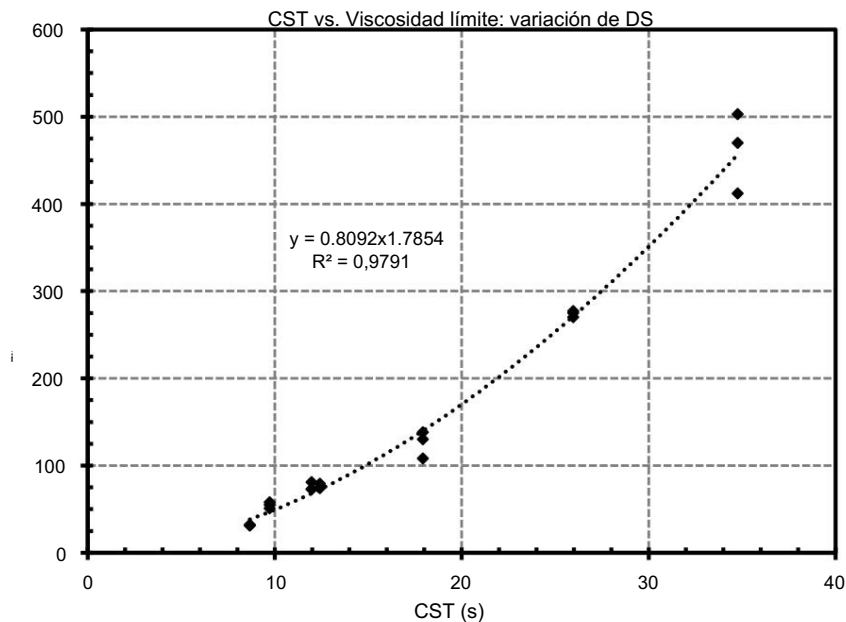


Figura 57: Relación entre la viscosidad y el CST para lodos TU tomados de la EDAR N°1. Cada punto tiene un contenido DS diferente.

Se puede observar que se puede ajustar una relación de potencia entre la viscosidad y los valores de CST con un R^2 aceptable de 0,9791. Sin embargo, se necesitan datos adicionales para confirmar esta tendencia, especialmente para el contenido DS de mayor nivel.

De la misma manera que en la Figura 57 anterior, se graficó la viscosidad límite frente a la CST Valores para las diferentes dosificaciones de polímeros para las EDAR N° 1 y 2. (Figura 58).

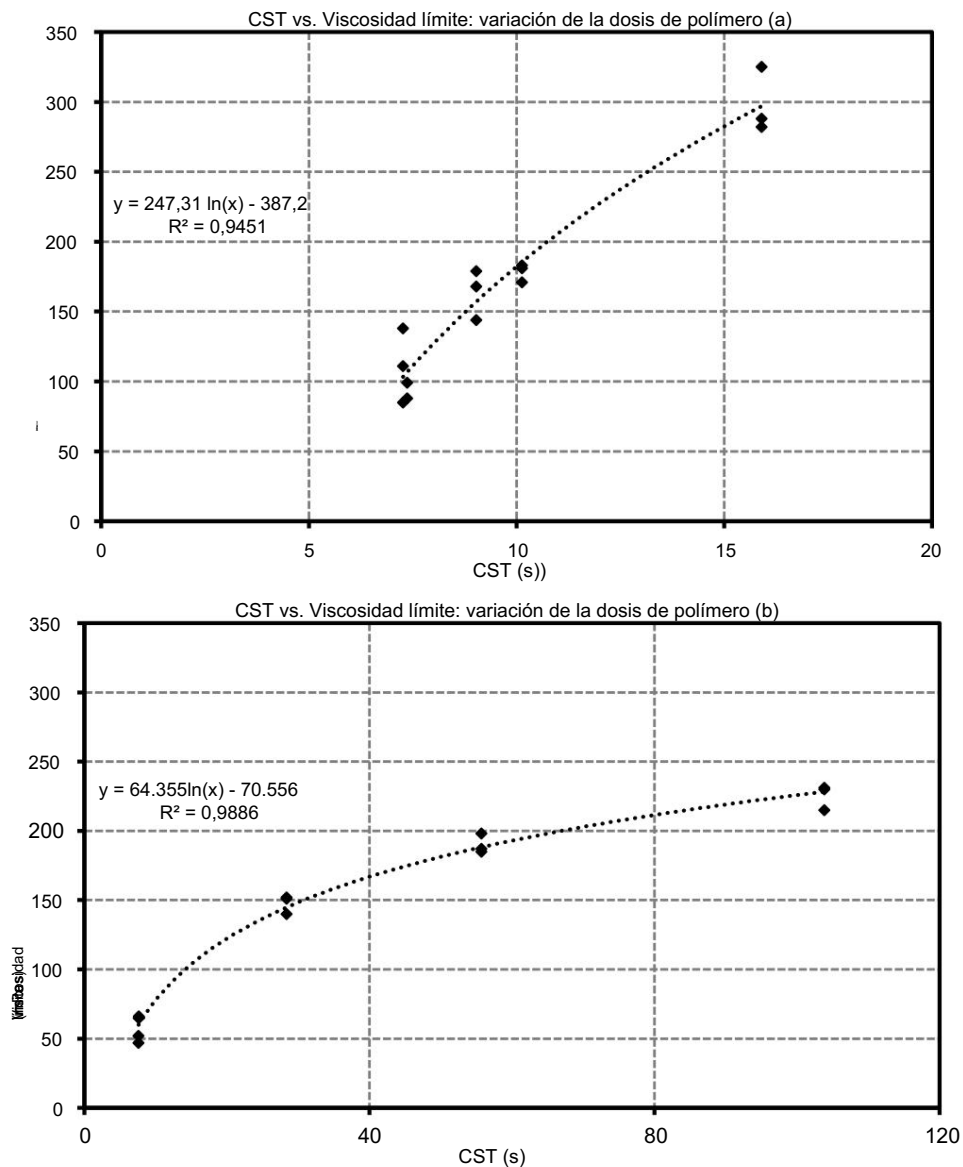


Figura 58: Relación entre la viscosidad y la CST con dosis de polímero variable para la PTAR N.º 1 (a) y EDAR N.º 2 (b). Cada punto tiene una dosificación de polímero diferente.

Se puede observar que se pudo ajustar una relación logarítmica entre la viscosidad y los valores de CST con un R^2 de 0,9451 para las muestras de la PTAR N.º 1 y un R^2 de 0,9886 para las PTAR N.º 2. También se puede observar que el rango de CST varía considerablemente entre las plantas para la misma dosis de polímero. Por último, se necesitan datos adicionales para confirmar la tendencia. En resumen, de los resultados obtenidos de la Figura 57 y la Figura 58, hay una Relación aparente entre la viscosidad límite del lodo y la CST.

5. Conclusiones

En este trabajo se evaluó el comportamiento reológico de los lodos de depuradora.

Muestras de lodos no acondicionados (TU) y lodos acondicionados espesados (TC) de cuatro

Se caracterizaron las plantas de tratamiento de aguas residuales en términos de propiedades básicas. Dos mediciones con reómetro

Se utilizaron dispositivos para caracterizar las propiedades reológicas de los diferentes

muestras, estableciendo el marco de medición necesario para las diferentes reologías

Pruebas: el viscosímetro digital Brookfield DVE y el reómetro Anton Paar MCR 502.

Con esta metodología se estudia la influencia del DS y del proceso de condicionamiento en la

Se estudió la reología de lodos a través de diferentes métodos reométricos. Finalmente, se estableció una relación

entre las características de los lodos y los parámetros reológicos para aplicaciones de deshidratación.

Se realizaron pruebas preliminares importantes para mejorar la reproducibilidad. El estándar

La desviación encontrada para la repetición de todas las mediciones (aparte de la fluencia y la recuperación) fue

nunca por encima del 10% respecto a los valores medios. Se aplica un "pre-shear" a las muestras

antes de que la medición principal alcanzara una condición de estado estable para cada repetición. Esto

Podría utilizarse como base para estudios posteriores sobre muestras de lodos de las EDAR consideradas.

en este trabajo.

A partir de las curvas de viscosidad obtenidas con el viscosímetro Brookfield con muestras de lodos TU

A partir de la EDAR N°1, la viscosidad límite aumentó proporcionalmente al contenido de sólidos.

El ajuste exponencial podría describir la relación entre los dos parámetros con una buena

aproximación ($R^2 = 0,975$), aunque se requieren más datos para confirmarlo.

Además, cuando estas mediciones se realizaron con una rampa ascendente seguida de una

rampa descendente, aparentemente se alcanzó una tensión crítica ya que el comportamiento de respuesta de la viscosidad era

diferente. Esto podría referirse a una descomposición dependiente del tiempo de la estructura del lodo y, por lo tanto,

a la presencia de un comportamiento tixotrópico. Este efecto se vio potenciado por el aumento de DS

contenido. Un inconveniente del viscosímetro Brookfield era el hecho de que se utilizaban husillos diferentes.

necesario dada la alta variación de viscosidad debido a las diferentes concentraciones de DS. En relación

Debido a la adición de polímeros, la viscosidad de las muestras de lodos de TC fue mayor a bajas velocidades de corte. en comparación con las muestras de TU de todas las plantas de tratamiento de aguas residuales. Lo opuesto ocurrió con alta cizalladura. tasas ya que la viscosidad de las muestras TC era menor que la de las muestras TU.

A partir de las curvas de flujo obtenidas con el reómetro Anton Paar, aunque de manera confiable reproducibles, los resultados a bajas velocidades de corte ($< 5 \text{ 1/s}$) mostraron un comportamiento opuesto al esperado (convexo en lugar de cóncavo). Este efecto se acentuó en el caso de TC muestras. Además, esto fue perjudicial para el ajuste del modelo Herschel-Bulkley ya que No se pudieron utilizar todos los puntos experimentales de la curva. Este problema podría estar relacionado con la geometría. Además, las muestras de TC expresaron una mayor variación que los lodos de TU. Además, dificulta cualquier ajuste del modelo.

Las pruebas de barridos de amplitud dinámica demostraron ser un método confiable para la evaluación reológica. Caracterización. En la región LVE, tanto los módulos de almacenamiento como los de pérdida (G' y G'' respectivamente) son constantes pero G' es un orden de magnitud mayor que G'' con una relación que varió entre 0,12 y 0,17 para todas las muestras de lodos TU y TC de las cuatro EDAR. El material se caracteriza por un comportamiento sólido y los resultados muestran consistencia en cada muestra analizada, lo que hace que la metodología de medición dinámica preferible a otros métodos. Además, es un método rápido para determinar la tensión de fluencia y punto de flujo. Al comparar muestras TU y TC, el módulo complejo G^* de la Las muestras acondicionadas (con excepción de la EDAR N°2) aumentaron en relación con la Además, el efecto del condicionamiento en la muestra de la PTAR N.º 4 fue significativo con una diferencia de dos órdenes de magnitud.

Con la prueba de barrido de frecuencia, a tasas bajas, se observa un comportamiento constante para G' y G'' , mientras aumenta gradualmente a alta velocidad angular. La forma de las curvas G' y G'' caracteriza una dispersión concentrada con un comportamiento similar al de un gel. Además, es bastante Se encontraron resultados consistentes con las mediciones de amplitud anteriores, donde la pequeña Las discrepancias podrían atribuirse a un error experimental o a la naturaleza difícil del lodo. material.

Se descubrió que las mediciones de fluencia y recuperación consumían mucho tiempo y no eran precisas. suficiente ya que la dispersión experimental oculta cualquier variación que pudiera ser causada por el polímero suma.

Al comparar las geometrías de placas paralelas y de cono y placa, se observa una diferencia sustancial Se observó que los valores divergían lo suficiente como para impedir que se pudiera realizar cualquier medición de prueba.

Conclusiones

compatible si se utiliza más de una geometría. Por lo tanto, el uso de una geometría única para todos

Se recomienda realizar experimentos.

Para los modelos aplicados, el de mejor ajuste entre los tres utilizados fue el modelo Cross ya que tiene un buen R^2 con un valor mínimo de 0,982 en todas las EDAR (a excepción de la muestra TU).

de la EDAR N° 2 con un valor de 0,930). Además, la baja variación de parámetros para el

Se han encontrado diferentes plantas de tratamiento de aguas residuales. El modelo de Sisko también ha dado buenos resultados de ajuste en todas ellas.

EDAR (mín. $R^2 = 0,988$) con excepción de la muestra de TU de la EDAR N° 2 ($R^2 =$

0,948), pero también se evidenció una alta variación dentro de los coeficientes para cada planta. Finalmente,

para el modelo Herschel-Bulkley, ya que el rango de velocidad de corte se acortó debido a la

comportamiento diferente a velocidades de corte bajas de lo esperado, no fue posible un ajuste adecuado.

Además, no se pudieron extrapolar valores de tensión de fluencia. Se necesita más precisión para valores bajos.

mediciones de velocidad de corte.

Finalmente, relaciones entre las características de los lodos y los parámetros reológicos para la deshidratación.

Se establecieron aplicaciones. En primer lugar, la ecuación 17 ajusta el comportamiento de todas las EDAR cuando la

El DS varía con diferentes dosis de polímeros, aunque no fue el caso de algunas TU.

muestras de la EDAR n° 2, ya que un mayor contenido de DS podría resultar un factor limitante

cundo se utilizan modelos generados con muestras de lodos que no han sido digeridos ni espesados.

Además, se leyó una tendencia ascendente del límite elástico para las muestras de lodos TU, aunque

no siguió la ecuación 19. Se necesitan datos adicionales para diferentes valores de DS.

Por otra parte, dado que la respuesta del esfuerzo de fluencia del TC fue diferente para cada planta de tratamiento de aguas residuales, no existe una relación clara

con DS se encontró. En segundo lugar, existe una relación aparente entre el límite de lodos

La relación responde a la variación de DS (se podría ajustar una relación de potencia entre la viscosidad y los valores de

CST con un R^2 de 0,979) y la dosis de polímero (una

Se podría ajustar una relación logarítmica entre la viscosidad y los valores CST con un

R^2 aceptable de 0,945 para las muestras de la PTAR N° 1 y un R^2 de 0,989 para la PTAR N°

2.

Recomendaciones adicionales para futuras investigaciones basadas en este trabajo podrían incluir:

- Ajuste adicional de la metodología para disminuir aún más el efecto de deslizamiento de la pared y otros comportamientos no deseados.
- La repetición de las mediciones de variación de DS y de variación de polímero realizadas con el Viscosímetro Brookfield, pero realizado utilizando el reómetro Anton Paar.
- La extensión del análisis reológico a más muestras de lodos y EDAR, en con el fin de mejorar el análisis estadístico y el ajuste de diferentes modelos.
- El estudio de muestras de lodos con un contenido de DS superior, >10% y más (lodos deshidratados), con el fin de observar los cambios que se producen durante la deshidratación. proceso.

6. Bibliografía

ABU-JDAYIL, B., BANAT, F. y AL-SAMERAIY, M. (2010) 'Propiedades reológicas constantes de los lodos de contactores biológicos rotatorios (RBC)', *Journal of Water Resource and Protection*. doi: 10.4236/jwarp.2010.21001.

APHA/AWWA/WEF (2012) 'Métodos estándar para el análisis de agua y aguas residuales. Parte 1000', *Métodos estándar*. doi: ISBN 9780875532356.

Ayol, A., Dentel, SK y Filibeli, A. (2006) 'Hacia un procesamiento eficiente de lodos utilizando nuevos parámetros reológicos: pruebas reológicas dinámicas', *Water Science and Technology*. doi: 10.2166/wst.2006.542.

Barnes, HA (2000) *Un manual de reología elemental*.

Baskerville, R. y Gale, R. (1968) 'Un instrumento automático simple para determinar la filtrabilidad de los lodos de depuradora', *Water Pollution Control*, (67), págs. 233–241.

Battistoni, P. (1997) 'Procedimiento de medición y características de los residuos en la reología de lodos de depuradora y fracción orgánica digerida de residuos sólidos urbanos', en *La reología de los lodos*. Bari, Italia: Istituto di ricerca sulle acque - CNR, p. 18.

Baudez, JC (2008) 'Envejecimiento físico y tixotropía en la reología de lodos', *Applied Rheology*. doi: 10.1007/978-3-642-24653-1.

Instrucciones de funcionamiento del viscosímetro digital Brookfield modelo DV-E (2015) .

Campbell, HW y Crescuolo, PJ (1982) 'El uso de la reología para la caracterización de lodos', *Ciencia y tecnología del agua*.

Chaari, F. et al. (2003) 'Comportamiento reológico de lodos de depuradora y deshidratación inducida por tensión', *Rheologica Acta*, 42(3), págs. 273–279. doi: 10.1007/s00397-002-0276-5.

Chen, BH, Lee, SJ y Lee, DJ (2005) 'Características reológicas del lodo de aguas residuales floculado con polielectrolitos catiónicos', *Water Research*, 39(18), págs. 4429–4435. doi: 10.1016/j.watres.2005.08.035.

Christensen, R. et al. (1993) 'Mecanismos de sobredosis en el acondicionamiento de lodos', 119(1), págs. 159-171.

Coakley, P. y Jones (1956) 'Filtración de lodos al vacío de Jones', *Aguas residuales y desechos industriales*, 28(10).

Dentel, SK (1997) 'Evaluación y función de las propiedades reológicas en la gestión de lodos', en *La reología de los lodos*. Bari, Italia: Istituto di ricerca sulle acque - CNR, p. 14.

Dentel, SK (2011) 'Acondicionamiento de lodos: impacto de los polímeros en la estructura de los flóculos', 8(3), págs. 101–108.

Dentel, SK y Abu-Orf, MM (1995) 'Estudios de laboratorio y a escala real de la viscosidad de la corriente de líquido y la corriente de flujo para la caracterización y el monitoreo de la deshidratabilidad', *Water Research*. doi: 10.1016/0043-1354(95)00142-8.

Dick, RI y Ewing, BB (1967) 'La reología del lodo activado', Revista (Water Pollution Control Federation). doi: 10.2307/25035907.

Eshtiaghi, N. et al. (2013a) 'Caracterización reológica de lodos municipales: una revisión', Water Research, págs. 5493–5510. doi: 10.1016/j.watres.2013.07.001.

Eshtiaghi, N. et al. (2013b) 'Caracterización reológica de lodos municipales - Una revisión del material complementario'. Water Research, pág. 7.

Feng, J., Wang, YL y Ji, XY (2014) 'Cambios dinámicos en las características y componentes del lodo activado y el filtrado durante el proceso de deshidratación electroosmótica presurizada', Tecnología de separación y purificación. doi: 10.1016/j.seppur.2014.07.019.

Graham, TM (1999) 'Predicción del rendimiento de las prensas de filtro de banda utilizando la prensa Crown para simulación de laboratorio'. Carolina del Sur: Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad de Clemson, pág. 23.

Guan, Z. et al. (2019) 'Análisis de la relación de las sustancias poliméricas extracelulares con la deshidratabilidad y las propiedades reológicas de los lodos tratados mediante acidificación y digestión mesófila anaeróbica', Journal of Hazardous Materials. Elsevier, 369 (octubre de 2018), págs. 31–39. doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.02.012.

Hong, E. et al. (2018) 'Una revisión exhaustiva de los estudios reológicos de lodos de varias secciones de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales para mejorar el rendimiento del proceso', Advances in Colloid and Interface Science, 257, págs. 19-30. doi: 10.1016/j.cis.2018.06.002.

Houghton, JI y Stephenson, T. (2002) 'Efecto del contenido orgánico influente sobre el contenido de polímero extracelular y la deshidratabilidad del lodo digerido', Water Research. doi: 10.1016/S0043-1354(02)00055-6.

Khalili Garakani, AH et al. (2011) 'COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES MODELOS PARA LA CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LODOS ACTIVADOS', J. Environ. Health. Sci. Eng. doi: 10.1515/jwld-2017-0053.

Kholisa, B., Fester, VG y Haldenwang, R. (2018) 'Investigación y diseño de ingeniería química: predicción de sólidos suspendidos en el filtrado y captura de sólidos en función de los parámetros operativos para filtros prensa de banda', Chemical Engineering Research and Design. Institution of Chemical Engineers, 134, págs. 268–276. doi: 10.1016/j.cherd.2018.04.005.

Mahmoud, A. et al. (2010) 'Campo eléctrico: una revisión histórica de su aplicación y contribuciones en la deshidratación de lodos de aguas residuales', Water Research, 44(8), págs. 2381–2407. doi: 10.1016/j.watres.2010.01.033.

Metcalf y Eddy (2014) Ingeniería de tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos. 5.^a ed. Nueva York, NY 10121: McGraw-Hill Education.

Mezger, TG (2015) Reología aplicada. 1.^a ed., Reología aplicada. 1.^a ed. Antom Paar GmbH.

Mori, M., Seyssiecq, I. y Roche, N. (2006) 'Medidas reológicas de lodos de depuradora para diversas concentraciones de sólidos y geometría', Process Biochemistry, 41(7), págs. 1656–1662. doi: 10.1016/j.procbio.2006.03.021.

Neyens, E. y Baeyens, J. (2003) 'Una revisión de los procesos de pretratamiento de lodos térmicos para

- mejorar la deshidratabilidad', *Journal of Hazardous Materials*, 98(1–3), págs. 51–67. doi: 10.1016/S0304-3894(02)00320-5.
- Novak, JT et al. (1999) 'Acondicionamiento, filtrado y expresión de lodos activados residuales', *Journal of Environmental Engineering*. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1999)125:9(816).
- Novak, JT (2006) 'Deshidratación de lodos de depuradora', *Drying Technology*. doi: 10.1080/07373930600840419.
- Örmeci, B. y Ahmad, A. (2009) 'Medición de la cizalladura adicional durante el acondicionamiento y la deshidratación de lodos', *Water Research*. Elsevier Ltd, 43(13), págs. 3249–3260. doi: 10.1016/j.watres.2009.04.049.
- Pan, JR et al. (2003) 'Correlación entre el índice de deshidratación y el rendimiento de deshidratación de tres dispositivos mecánicos de deshidratación', *Advances in Environmental Research*, 7(3), págs. 599–602. doi: 10.1016/S1093-0191(02)00052-7.
- Paroline, G. (2016) 'Fundamentos de reología aplicada', págs. 21–29. Disponible en: <http://web.engr.oregonstate.edu/~rochefow/Polymer Course Notes 2016/Applied Rheology by Anton Paar.pdf>.
- Ratkovich, N. et al. (2013) 'Reología de lodos activados: una revisión crítica sobre la recopilación y modelado de datos', *Water Research*. Elsevier Ltd, 47(2), págs. 463–482. doi: 10.1016/j.watres.2012.11.021.
- Sanin, FD (2002) 'Efecto de la fisicoquímica de la solución en las propiedades reológicas del lodo activado', *Water SA*, 28(2), págs. 207–211. doi: 10.4314/wsa.v28i2.4886.
- Schramm, G. (1994) 'Un enfoque práctico de la reología y la reometría', *Reología*. 2.^a ed., pág. 291. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Seyssiecq, I., Ferrasse, JH y Roche, N. (2003) 'Estado del arte: caracterización reológica de lodos de tratamiento de aguas residuales', *Biochemical Engineering Journal*, 16(1), págs. 41–56. doi: 10.1016/S1369-703X(03)00021-4.
- Slatter, PT (1997a) 'La caracterización reológica de los lodos', en *Ciencia y tecnología del agua*. doi: 10.1016/S0273-1223(97)00663-X.
- Slatter, PT (1997b) 'La caracterización reológica de los lodos', en *La reología de los lodos*. Bari, Italia: Istituto di ricerca sulle acque - CNR, p. 15.
- Sozanski, M. (1997) 'El experimento reológico en la investigación de las propiedades de los lodos', en *La reología de los lodos*. Bari, Italia: Istituto di ricerca sulle acque - CNR, p. 15.
- Spinosa, L. y Lotito, V. (2003) 'Un método simple para evaluar la tensión de fluencia del lodo', 7, págs. 655–659.
- Tixier, N., Guibaud, G. y Baudu, M. (2003) 'Determinación de algunos parámetros reológicos para la caracterización de lodos activados', 90, págs. 215–220. doi: 10.1016/S0960-8524(03)00109-3.
- Tixier, N., Guibaud, G. y Baudu, M. (2003) 'Determinación de algunos parámetros reológicos para la caracterización de lodos activados', *Bioresource Technology*. doi: 10.1016/S0960-8524(03)00109-3.
- Para, VHP et al. (2016) 'Una revisión sobre los índices de deshidratación de lodos', *Water Science and*

Tecnología. doi: 10.2166/wst.2016.102.

Tsang, KR y Vesilind, PA (1990) 'Distribución de humedad en lodos', en Ciencia y tecnología del agua. doi: 10.2166/wst.1990.0108.

V.Lotito, L.Spinosa, G.Mininni, RA (1997) 'La reología de los lodos de depuradora en diferentes etapas de tratamiento', Ciencia y Tecnología del Agua, 36(11), págs. 79–85.

Vaxelaire, J., Bongiovanni, JM y Puiggali, JR (1999) 'Deshidratación mecánica y secado térmico de lodos residuales', Environmental Technology (Reino Unido). doi: 10.1080/09593332008616789.

Visigalli, S. et al. (2017) 'Revista de Ingeniería Química Ambiental Evaluación de la deshidratación electrolítica impulsada por presión como tratamiento de una sola etapa para lodos de depuradora estabilizados', Revista de Ingeniería Química Ambiental. Elsevier, 5(6), págs. 6122–6131. doi: 10.1016/j.jece.2017.11.034.

Wang, YL y Dentel, SK (2011) 'El efecto de las dosis de polímero y la intensidad de mezcla extendida en las características geométricas y reológicas del lodo digerido anaeróbico acondicionado (ADS)', Chemical Engineering Journal. Elsevier BV, 166(3), págs. 850–858. doi: 10.1016/j.cej.2010.11.055.

Weiss, M. et al. (2007) 'Eliminación de lodos por succión-elevación y comportamiento del flujo no newtoniano en clarificadores secundarios circulares: modelado numérico y mediciones', Chemical Engineering Journal, 132(1–3), págs. 241–255. doi: 10.1016/j.cej.2007.01.004.

Yu, GH et al. (2008) 'Estructura de estratificación de flóculos de lodo con implicaciones para la deshidratabilidad', Environmental Science and Technology. doi: 10.1021/es8016717.

Zhan, TLT et al. (2015) 'Deshidratación electrocinética de lodos de depuradora con electrodos fijos y móviles: mecanismo de atenuación y enfoque de mejora', Journal of Environmental Engineering. doi: 10.1061/(asce)ee.1943-7870.0001016.