

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVIII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**ENSAYOS DE REOLOGÍA A LODOS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA DE
UNIDADES INDUSTRIALES**

**FERNANDO CALLE GARDELLA¹
RAMÓN FUENTES AGUILAR²**

RESUMEN

Durante el proceso de tratamiento de aguas servidas se suceden diversos cambios físicos-químicos-biológicos que van transformando las características reológicas del fluido en cuestión. Estas transformaciones dependen del método de tratamiento implementado y la etapa en la que se encuentre.

A solicitud de Aguas Andinas, y con el fin de conocer el comportamiento fluido-dinámico en las unidades de digestión anaeróbica de los actuales reactores de digestión anaeróbica de la planta La Farfana (Santiago, Chile) utilizando un modelo físico a escala 1/20, JRI efectuó dos campañas de ensayos de reología efectuadas durante los meses de Enero y Marzo del año 2006, tanto a la alimentación de los reactores como al efluente del proceso anaeróbico ocurrido en el digestor.

El presente trabajo contiene la descripción de los trabajos realizados, los datos obtenidos y conclusiones finales con respecto al comportamiento reológico que presentan los lodos en la fase de digestión anaeróbica.

Los ensayos de reología a los lodos de la planta La Farfana muestran que estos presentan un comportamiento del tipo Bingham, con magnitudes de esfuerzos de fluencia en torno a algunas unidades de Pascal y la viscosidad Bingham de un orden de magnitud superior con respecto a la viscosidad absoluta del agua.

¹ Ingeniero Civil. JRI Ingeniería. fcalle@jri.cl

² Ingeniero Civil. Doctor en Física. JRI Ingeniería. rfuentes@jri.cl

1 INTRODUCCIÓN

Durante el proceso de tratamiento de aguas servidas se suceden diversos cambios físicos-químicos-biológicos que van transformando las características reológicas del fluido en cuestión. Estas transformaciones dependen del método de tratamiento implementado y la etapa en la que se encuentre.

La planta de aguas servidas La Farfana, de propiedad de Aguas Andinas, ha sido construida para dar servicio al 50% de las aguas servidas de la ciudad de Santiago, sirviendo a 3 millones de personas el 2003. Para el tratamiento de las aguas servidas se escogió utilizar lodos activados.

Para el proceso de digestión anaeróbica se instalaron ocho reactores. Estos reactores tienen forma cilíndrica, con una base de 34 m de diámetro y 16 m de altura. Los ritmos de tratamiento máximo diario y promedio anual por unidad son de 780 m³/día y 530 m³/día, respectivamente.

El presente estudio muestra los resultados de las campañas de ensayos de reología efectuadas realizadas por JRI Ingeniería durante los meses de Enero (primera campaña) y Marzo (segunda campaña) del 2006, tanto a la alimentación de los reactores como al efluente del proceso anaeróbico ocurrido en el digestor.

Esta información fue requerida para determinar los factores de escalas de diseño del modelo físico de los digestores anaeróbicos de la planta la Farfana de Aguas Andinas para el estudio de su comportamiento fluido-dinámico. El modelo físico finalmente fue modelado a escala 1/20 (Figura 1).

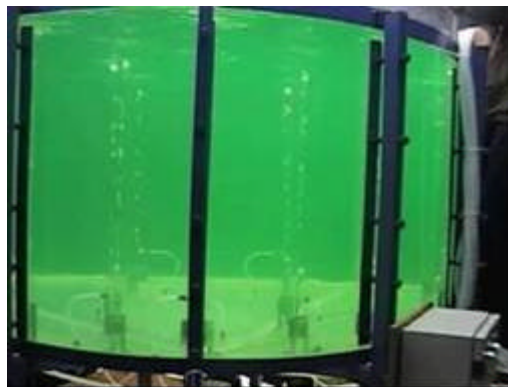


Figura 1

2 PROCESO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICO

El proceso de Digestión Anaeróbica tiene como objetivo estabilizar los lodos mixtos y reducir la biomasa a través de la remoción de materia orgánica, utilizando procesos biológicos que requieren ausencia de oxígeno, obteniendo como resultado final un lodo con bajo contenido de materia orgánica y patógenos, y no putrefacta.

En términos generales, esta reducción de biomasa a través de procesos anaeróbicos, es el resultado de tres etapas que confluyen en una unidad: Hidrólisis, Acidogénesis y Metanogénesis, las que en operaciones óptimas encuentran un equilibrio dinámico entre sus procesos.

En el caso de la planta La Farfana, la digestión anaeróbica se efectúa mediante el uso de reactores de Alta Tasa. Para ello, se ha implementado un sistema de calentamiento de lodos para mantenerlo a una temperatura adecuada, y un sistema de mezclado permanente de lodos al interior del reactor. Las principales condiciones físico-químicas que demandan los organismos que actúan en el proceso de digestión anaeróbica son:

- pH : 6,5 a 7,5
- Alcalinidad : 1.500 a 5.000 mg CaCO³/l
- Concentración Ácidos Volátiles : < 400 mg/l
- Temperatura : 30 a 38°C
- Tiempo de Retención : 23 – 28 días
- Sistema de mezclado : 14 unidades Cannon Mixer ®

El circuito del proceso de digestión anaeróbica se presenta en la Figura 2.

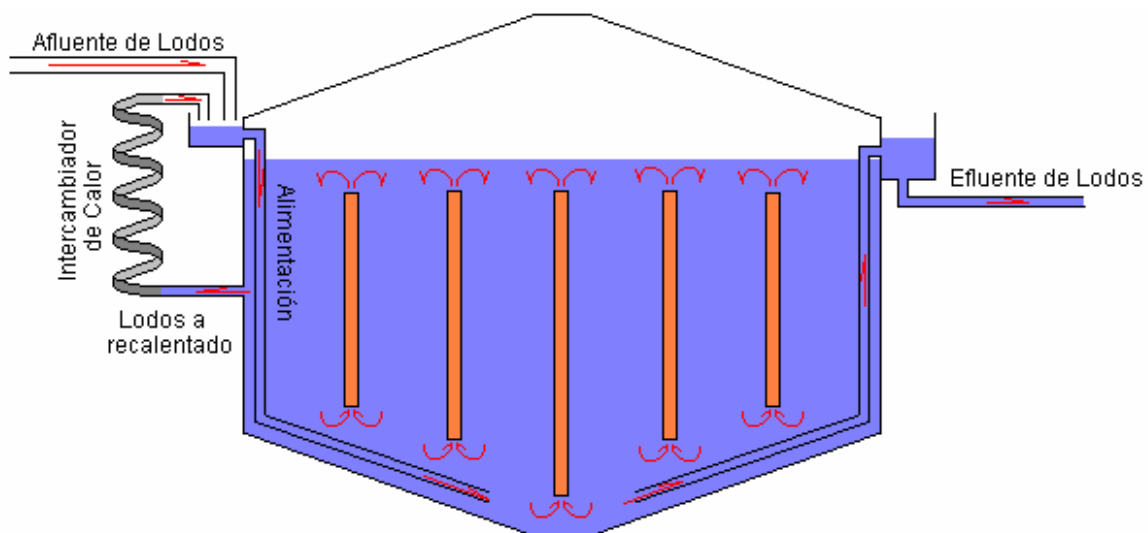


Figura 2

La magnitud media de los flujos del sistema es la siguiente:

Afluente/Efluente de lodos : 781 m³/día
Lodos a recalentados : 6.960 m³/día

Los ensayos de reología se efectuaron a los lodos correspondientes a la alimentación del reactor (afluente de lodos + lodos recalentados) y al efluente de lodos.

3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La campaña de experimentación se efectuó en dos etapas: (1) inicialmente se realizaron ensayos de reología a dos reactores (Nº 1 y 3, según la nomenclatura de la planta) y (2) luego se extendió a todas las unidades de la planta.

La primera etapa de experimentación consistió en tomar muestras en la alimentación y efluente de los lodos de los reactores Nº1 y Nº3, dos veces al día (9:00 y 12:00 horas), con una extensión de 4 días (62 ensayos). La campaña fue efectuada entre los días 23 y 27 de enero del 2006, con una previa serie de prueba del equipo (10 ensayos). Los ensayos se efectuaron utilizando un viscosímetro rotacional (cilindros concéntricos) HAAKE VT550, sensor MV II P. Cada muestra se ensayó a velocidad variable, entre 11,4 y 500 RPM y con dos tiempos de prueba, 30 y 60 segundos.

La segunda etapa consistió en efectuar ensayos de reología a los ocho reactores, tomando una única muestra tanto en la alimentación como en el efluente de lodos (16 ensayos). La campaña fue efectuada los días 20 y 21 de marzo del 2006. Los ensayos se efectuaron utilizando el mismo equipo y configuración de la primera etapa (HAAKE VT550, sensor MV II P). Cada muestra se ensayó a velocidad variable, entre 10 y 500 RPM y con un tiempo de prueba de 60 segundos.

Pruebas similares con los lodos de aguas servidas indican que éstos siguen un comportamiento reológico no newtoniano, siendo especialmente sensible a la concentración de sólidos.

Para el objetivo de las pruebas, se consideró aceptable realizarlas a temperatura ambiente siempre y cuando las muestras no estuviesen a menos de 25°C. Esta decisión se basa en que la variación del esfuerzo de fluencia del lodo no varía considerablemente luego de superado los 25°C y la viscosidad Bingham no se ve mayormente afectada a este parámetro físico (Manoliadis y Bishop, 1984) (Krylów y Fryzlewicz-Kozax, 2005).

Las caracterización de los lodos en el proceso anaeróbico durante el proceso de digestión anaeróbico se resumen en las Tabla 1 y Tabla 2.

Identificación		Afluente de Lodos			Digestor		
Nº Reactor	Día	Caudal de Lodos	Tiempo de Retención	Concentración Materia Sólido	Concentración Materia Sólido	pH	Temperatura
[]	[]	[m ³ /día]	[día]	[mg/l]	[mg/l]	[°C]	[]
Reactor 1	23-ene-06	260	58	51.35	30.52	7.28	34.7
	24-ene-06	253	59	56.58	30.07	7.23	34.9
	25-ene-06	240	63	55.78	29.67	7.20	35.1
	26-ene-06	251	60	56.80	29.29	7.24	34.9
	27-ene-06	252	60	62.67	29.54	7.18	35.0
Reactor 3	23-ene-06	655	23	51.35	33.52	7.30	35.3
	24-ene-06	633	24	56.58	33.40	7.24	35.2
	25-ene-06	615	24	55.78	33.50	7.11	35.3
	26-ene-06	638	24	56.80	33.10	7.22	34.8
	27-ene-06	622	24	62.67	33.78	7.16	35.1

Tabla 1 – Primera Campaña

Identificación		Afluente de Lodos			Digestor		
Nº Reactor	Día	Caudal de Lodos	Tiempo de Retención	Concentración Materia Sólido	Concentración Materia Sólido	pH	Temperatura
[]	[]	[m ³ /día]	[día]	[mg/l]	[mg/l]	[]	[°C]
Reactor 1	20-mar-06	319	47	55.41	28.74	7.40	35.4
	21-mar-06	327	46	53.69	29.17	7.39	35.3
Reactor 2	20-mar-06	314	48	55.41	30.93	7.39	35.3
	21-mar-06	297	51	53.69	31.00	7.38	35.3
Reactor 3	20-mar-06	651	23	55.41	31.22	7.38	35.0
	21-mar-06	665	23	53.69	31.04	7.36	35.1
Reactor 4	20-mar-06	308	49	55.41	30.00	7.38	35.1
	21-mar-06	333	45	53.69	30.72	7.35	35.2
Reactor 5	20-mar-06	644	23	55.41	33.45	7.36	35.2
	21-mar-06	658	23	53.69	29.53	7.38	35.2
Reactor 6	20-mar-06	566	27	55.41	31.74	7.37	35.3
	21-mar-06	578	26	53.69	31.00	7.39	35.3
Reactor 7	20-mar-06	330	45	55.41	31.46	7.38	35.4
	21-mar-06	339	44	53.69	30.86	7.38	35.4
Reactor 8	20-mar-06	361	42	55.41	29.44	7.36	35.4
	21-mar-06	370	41	53.69	29.77	7.38	35.4

Tabla 2 – Segunda Campaña

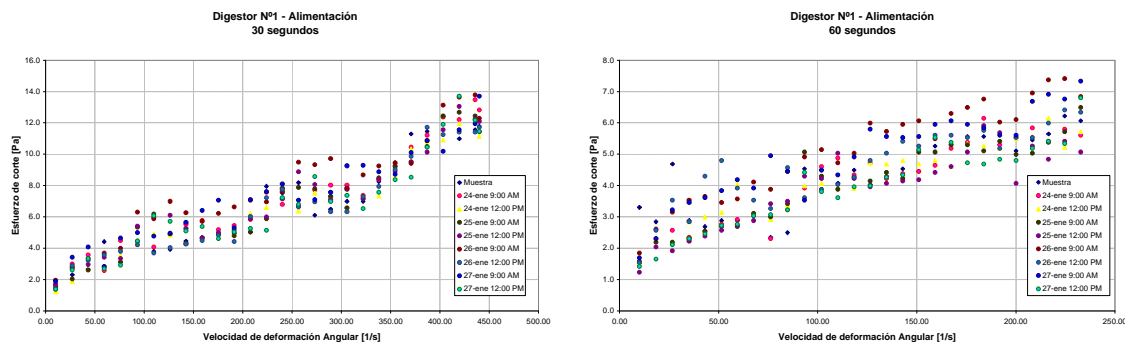
De acuerdo a estos datos, los reactores se encontraron operando dentro de los rangos aceptados de temperaturas y pH. El caudal de operación estuvo entorno al medio anual y por debajo del máximo diario. Es decir, se encontraron dentro de los rangos de diseño.

4 DISCUSIÓN

Existen registros de ensayos de reología para lodos activados antes y después del proceso de digestión anaeróbica. Estos indican que los lodos presentan un comportamiento del tipo Bingham, con tensiones de fluencia en el rango de algunas décimas a unidades de pascales [Pa]. La magnitud de la tensión de fluencia estaría relacionada con la concentración de sólidos totales, temperatura, sólidos orgánicos y COD.

La primera etapa efectuada arrojó como resultados que la reología de los lodos actuales sigue un comportamiento tipo Bingham, tanto en el flujo de alimentación como en el efluente de lodos.

Los registros de los ensayos de reología se muestran en las Figura 3 y Figura 4.



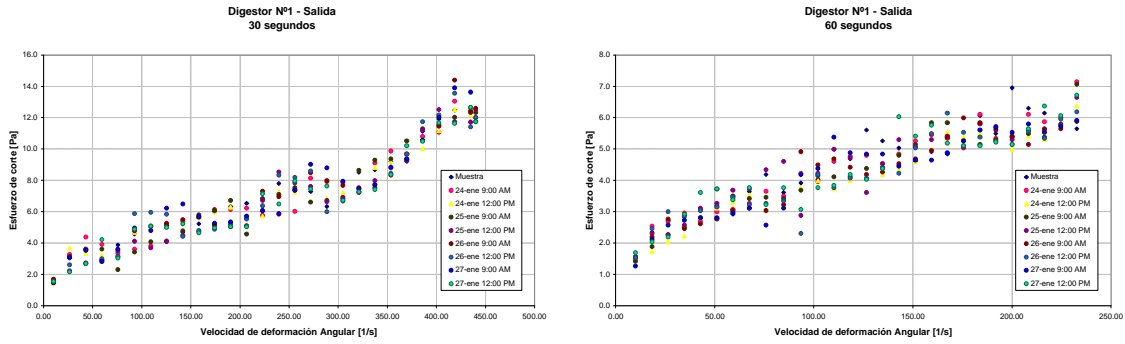


Figura 3 – Ensayos de Reología en Reactor N°1

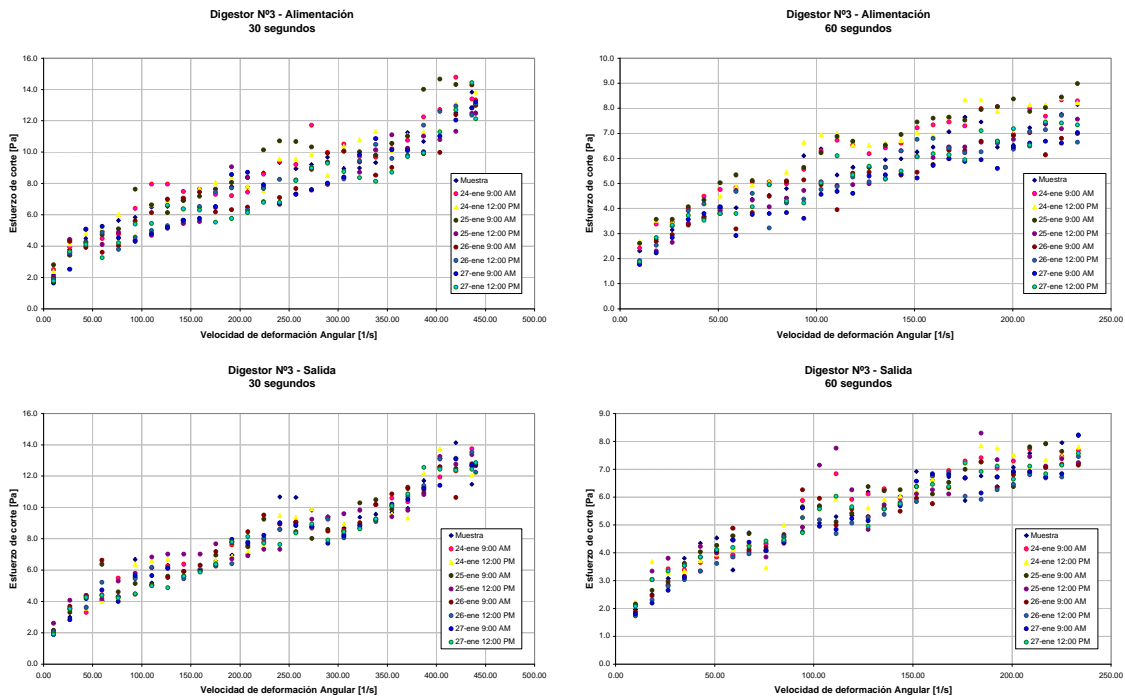


Figura 4 – Ensayos de Reología en Reactor N°3

Los valores medios de la tensión de fluencia (τ_f) y viscosidad Bingham (μ_B) se resumen en la Tabla 3.

Digestor 1	Tensión de Fluencia	Viscosidad Bingham	Coefficiente de Correlación Lineal (r)
	[Pa]	[mPa·s]	[]
Entrada	1,753	21,628	0,961
Salida	1,680	21,717	0,963
Digestor 8	Tensión de Fluencia	Viscosidad Bingham	Coefficiente de Correlación Lineal (r)
	[Pa]	[mPa·s]	[]
Entrada	1,753	21,628	0,961
Salida	1,680	21,717	0,963

Tabla 3 – Valores medios de parámetros reológicos – Primera Campaña

La segunda etapa de pruebas entregó resultados similares a los obtenidos en la primera. Las Tabla 4 y Tabla 5 muestran los valores obtenidos al ajuste de los datos con respecto a un modelo reológico tipo Bingham.

Alimentación Digestores			
Digestor	Tensión de Fluencia	Viscosidad Bingham	Coefficiente de Correlación Lineal (r)
[]	[Pa]	[Pa·s]	[]
Nº1	2.29	0.014	0.87
Nº2	1.72	0.017	0.95
Nº3	2.45	0.018	0.92
Nº4	2.52	0.018	0.97
Nº5	2.56	0.016	0.87
Nº6	2.36	0.016	0.95
Nº7	1.89	0.016	0.93
Nº8	1.91	0.015	0.95
Promedio	2.212	0.016	0.93
Desv. Estándar	0.32	0.001	0.04

Tabla 4 – Valores medios de parámetros reológicos – Alimentación

Efluente de Lodos Digeridos			
Digestor	Tensión de Fluencia	Viscosidad Bingham	Coefficiente de Correlación Lineal (r)
[]	[Pa]	[Pa·s]	[]
Nº1	1.99	0.017	0.95
Nº2	2.05	0.017	0.95
Nº3	2.56	0.017	0.94
Nº4	2.11	0.018	0.96
Nº5	2.57	0.017	0.96
Nº6	2.47	0.017	0.96
Nº7	2.42	0.015	0.85
Nº8	2.14	0.016	0.94
Promedio	2.289	0.017	0.94
Desv. Estándar	0.24	0.001	0.04

Tabla 5 - Valores medios de parámetros reológicos – Efluente de Lodos

Los resultados obtenidos permiten efectuar las siguientes conjeturas:

- Los ajustes de mínimos cuadrados efectuados a las pruebas reológicas de los diferentes lodos muestran un aceptable nivel de correlación (coeficiente de correlación lineal r cercano a 0,94).
- Los parámetros reológicos característicos son muy semejantes en todos los digestores. Esta semejanza se puede observar tanto entre los flujos de entrada como en los de salida de los digestores.
- Las tensiones de fluencia para los lodos estudiados variaron entre de 2,0 a 2,6 [Pa] y la viscosidad Bingham entre 0,015 a 0,018 [Pa·s]. Los valores medios fueron 2,3 [Pa] y 0,017 [Pa·s] respectivamente.

Al comparar estos resultados con otras pruebas efectuadas se encuentra que las tensiones de fluencia obtenidas se ajustan satisfactoriamente a las estimadas por Manoliadis y Bishop bajo condiciones de concentración de sólidos y temperatura.

Al comparar las viscosidades Bingham de los lodos con la viscosidad absoluta del agua, es posible observar que las primeras tienen un orden de magnitud mayor que la segunda. Dado que el esfuerzo de fluencia es muy pequeño en los lodos, la viscosidad aparente presenta una magnitud semejante a la viscosidad Bingham. Por lo que también, este parámetro es un orden de magnitud mayor que la del agua.

5 CONCLUSIONES

Los ensayos de reología a los lodos activados de la planta La Farfana muestran un comportamiento del tipo Bingham. Este comportamiento es semejante al determinado en ensayos de reología efectuada a otras unidades de digestión anaeróbicas.

El esfuerzo de fluencia de los ensayos realizados presenta valores comparables a los realizados en otras plantas de tratamiento en iguales condiciones de temperatura y concentración.

Así también, el esfuerzo de fluencia podría ser algo menor en los reactores debido a la mayor temperatura en la que se encuentra el lodo, en comparación con las condiciones en que fueron efectuadas las pruebas.

Por último, la viscosidad Bingham de los lodos medida es de un orden de magnitud superior con respecto a la viscosidad absoluta del agua.

6 REFERENCIAS

EMOS S.A.: “Resumen Ejecutivo”. E.I.A. Planta de Tratamiento de Aguas Servidas La Farfana. Presentación al SEIA. Noviembre, 2000.

Krylów, M y B. Fryzlewicz-Kozak, B: “Rheological Properties of Wastewater Sludge”. Proceedings of Polish-Swedish seminars, Cracow March 17-18, 2005.

Metcalf and Eddy: “Ingeniería de Aguas Residuales”. Ed. McGraw-Hill. Tercera Edición. México, 1980.

Manoliadis, O. y Bishop, P.: “Temperature Effect on Rheology of Sludges”. Journal of Environmental Engineering. Vol 110. N°1, January/February 1984, pp. 286-290.