

29. PRODUCCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LODOS

i. Consideraciones teóricas

29.1. Origen de los lodos

Los lodos o fangos son residuos que se generan en las estaciones depuradoras de aguas y consisten en una mezcla de agua y sólidos separada del agua tratada. Las características, así como las cantidades de lodos producidos, que puede ser expresada en términos de masa (base seca) o en volumen (base húmeda), dependen de diversos factores tales como el tipo y caudal de agua tratada, la climatología, el diseño de la instalación, y sobre todo del tipo de proceso del que procedan. Así, en una estación depuradora de aguas residuales urbanas (EDARU), se denominan lodos primarios a aquellos procedentes de la decantación primaria, secundarios al lodo en exceso retirado del tratamiento biológico, y mixtos a la mezcla de ambos. Otras posibles procedencias de los lodos son, por ejemplo, tratamientos anaerobios, lagunas de estabilización, procesos de espesamiento y deshidratación, lavado de filtros de arena y procesos de ablandamiento de aguas.

29.2. Composición química

Dependiendo del origen, los lodos pueden ser de naturaleza orgánica o inorgánica y diferir en cuanto al contenido en sólidos y composición. En general, los lodos procedentes de EDARUs, se caracterizan por tener un elevado contenido en agua (92-98%) y las materias suspendidas o disueltas están constituidas fundamentalmente por materia orgánica en forma compleja (lípidos, proteínas y carbohidratos), conteniendo en mucha menor cantidad, sales inorgánicas y metales pesados.

29.2.1. Sustancias poliméricas extracelulares (SPE)

En el caso de los lodos biológicos, tienen especial interés las sustancias poliméricas extracelulares (SPE). Este término engloba la compleja mezcla de compuestos de alto peso molecular secretados por los microorganismos, los productos de la hidrólisis de macromoléculas y la materia orgánica adsorbida por estas sustancias poliméricas y pueden encontrarse en forma soluble o ligadas a las células. Las SPE tienen un papel clave en los procesos de depuración de aguas residuales, ya que intervienen en procesos de bioadsorción, floculación y adhesión. Por tanto, el estudio de las SPE es de gran importancia a la hora de caracterizar los lodos biológicos, ya que definen en gran medida sus propiedades al actuar como agentes estructurantes y condicionar la hidrofobicidad,

la filtrabilidad, la electronegatividad, la capacidad de adsorción, la biodegradabilidad y la sedimentabilidad de estos agregados.

29.3. Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los lodos resultan determinantes para el adecuado diseño de los sistemas de tratamiento y transporte.

29.3.1. Contenido en sólidos y densidad

El contenido en sólidos puede variar desde concentraciones del 0,5% en algunos lodos secundarios procedentes de lodos activos, hasta concentraciones del 20% que pueden encontrarse en lodos de lagunas anaerobias. Los sólidos totales (ST) se dividen en sólidos suspendidos (SS) y sólidos disueltos (SD). Habitualmente, cuando se indica el contenido de sólidos de un lodo, se refiere a los sólidos suspendidos. Tanto los SS como los SD se dividen en sólidos fijos (SF) y sólidos volátiles (SV). La relación SV/ST es un buen indicador de la fracción orgánica de los sólidos contenidos en los lodos y de su grado de digestión. Esta relación varía de 0,75 a 0,80 para lodos no digeridos y de 0,60 a 0,65 para lodos digeridos. La gravedad específica de los sólidos del lodo (densidad sólidos/densidad del agua) depende de estas relaciones, y a partir de este valor puede estimarse la gravedad específica del lodo (agua más sólidos) según las siguientes ecuaciones:

$$\text{Gravedad específica sólidos} = \frac{1}{\left(\frac{(SF/ST)}{2,5} + \frac{(SV/ST)}{1,0}\right)} \quad [29.1]$$

$$\text{Gravedad específica lodo} = \frac{1}{\left(\frac{\text{fracción de sólidos en el lodo}}{\text{gravedad específica sólidos}} + \frac{\text{fracción de agua en los lodos}}{1,0}\right)} \quad [29.2]$$

29.3.2. Deshidratabilidad

La fase acuosa de los lodos se puede dividir en dos categorías, el agua libre y el agua ligada. El agua libre no se encuentra unida a los sólidos del lodo y puede ser separada fácilmente por gravedad, mientras que el agua ligada se encuentra asociada a los sólidos y para ser liberada deben de emplearse tratamientos mecánicos, como la centrifugación, o químicos. Las características de deshidratabilidad de un lodo pueden ser mejoradas por adición de acondicionantes químicos. Una de las maneras de evaluar la eficacia de estos reactivos es mediante la determinación del tiempo de succión capilar (TSC) de los lodos mediante el empleo de dispositivos comerciales. A partir de esta medida, la deshidratabilidad del lodo puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\chi = \phi \frac{\eta C}{TSC} \quad [29.3]$$

Siendo χ el parámetro que define la filtrabilidad ($\text{kg}^2/\text{m}^4 \text{s}^2$), ϕ constante característica del equipo empleado en la medida (adimensional), η la viscosidad del fluido ($\text{kg}/\text{m s}$) y C la concentración de sólidos en los lodos (kg/m^3).

29.3.3. Propiedades reológicas y transporte

El estudio de las propiedades reológicas de los lodos resulta de gran utilidad ya que están estrechamente relacionadas con diferentes operaciones como el bombeo, la hidrodinámica de los biorreactores o la transferencia de oxígeno.

El comportamiento reológico de los lodos puede ser analizado empleando el modelo de Herschel-Bulkley:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad [29.4]$$

Siendo τ el esfuerzo cortante (Pa), τ_0 el límite de fluencia (Pa), K el parámetro de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$), n el índice de flujo (adimensional) y $\dot{\gamma}$ la velocidad de deformación (s^{-1}).

Tabla 29.1. Modelo de Herschel-Bulkley y sus diferentes casos.

Tipo de comportamiento	K	n	τ_0
Herschel-Bulkley	> 0	$0 < n < \infty$	> 0
Newtoniano	> 0	1	0
Pseudoplástico	> 0	$0 < n < 1$	0
Dilatante	> 0	$1 < n < \infty$	0
Plástico de Bingham	> 0	1	> 0

Los lodos de origen biológico han sido frecuentemente descritos como fluidos pseudoplásticos o como plásticos de Bingham. Por otra parte, las partículas que se encuentran en suspensión interactúan entre sí originando una estructura supramolecular. Estas interacciones son las responsables de las propiedades viscoelásticas de los lodos y pueden ser modelizadas según las siguientes ecuaciones:

$$G^* = A\nu^{1/z} \quad [29.5]$$

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad [29.6]$$

Siendo ν la frecuencia (Hz), G^* el módulo complejo (Pa), G' el módulo elástico (Pa), G'' el módulo viscoso (Pa), z un parámetro que refleja el número de unidades reológicas correlacionadas con otras en la red tridimensional y A un parámetro que indica la fuerza de interacción entre esas unidades ($\text{Pa}\cdot\text{s}^{1/z}$).

Para el transporte de los lodos se pueden emplear distintos tipos de bombas (centrífugas, de desplazamiento positivo...). El cálculo de la potencia de la bomba requiere conocer las pérdidas de carga a lo largo de la tubería, que dependen del comportamiento reológico del lodo. Un lodo que se comporte como un plástico de Bingham queda definido mediante los valores del límite de fluencia (τ_0) y del índice de

consistencia (K). Estos valores pueden ser estimados de manera aproximada a partir del contenido en sólidos de los lodos empleando la figura 29.1.

Figura 29.1

De la misma manera, el factor de fricción que para calcular las pérdidas de carga se puede obtener de la figura 29.2 a partir del valor de los números de Reynolds y de Hedstrom para el lodo y la tubería considerada:

$$Re = \frac{\rho \langle v \rangle D_t}{K} \quad [29.7]$$

$$He = \frac{D_t^2 \tau_0 \rho}{K^2} \quad [29.8]$$

Siendo Re el número de Reynolds (adimensional), ρ la densidad del lodo (kg/m^3), $\langle v \rangle$ la velocidad media (m/s), D_t el diámetro de la tubería (m) y He el número de Hedstrom (adimensional).

Figura 29.2

29.4. Contenido en patógenos

El contenido en patógenos de un lodo es especialmente importante cuando su destino es la aplicación en suelos de uso agrícola. La UE establece que los lodos que van a ser aplicados al terreno deben de haber sido previamente tratados, de manera que los riesgos de transmisión de enfermedades hayan sido considerablemente reducidos (86/278/EEC). En lo que respecta a los EEUU, la USEPA establece dos tipos de lodos según su calidad microbiológica. Los lodos de Clase A son aquellos que han sido tratados adecuadamente, de manera que su contenido en organismos esté por debajo de los límites de detección, pudiendo ser usados sin restricciones. Por el contrario, los lodos de Clase B son aquellos que proceden de procesos de estabilización convencionales y cuentan con ciertas restricciones en su aplicación.

La inactivación de los patógenos se puede conseguir mediante procesos térmicos, químicos y/o biológicos. En el caso de los tratamientos térmicos, la efectividad del proceso viene determinada por el tiempo de residencia y la temperatura. Las propiedades térmicas del lodo dependen de su contenido en sólidos, empeorando la transferencia de calor cuanto más concentrado esté el lodo. La figura 29.3 permite determinar de manera aproximada la combinación tiempo-temperatura que permite obtener un lodo de Clase A. En el caso de que el contacto entre el lodo y los gases calientes sea indirecto, se recomiendan tiempos de retención de al menos 20 min (0,014 días).

Figura 29.3

Aplicando la teoría desarrollada para la esterilización de alimentos y considerando $65,6^\circ\text{C}$ como temperatura de referencia, la relación temperatura-tiempo mostrada en la figura 29.3 se puede expresar según la siguiente ecuación:

$$F' = t \cdot 10^{\frac{T-65,6}{Z}} \quad [29.9]$$

Siendo F' los días para lograr un lodo de Clase A a 65,6°C, t el tiempo en días, T la temperatura en °C y Z los grados Celsius necesarios para reducir en una unidad logarítmica el tiempo de tratamiento.

En la práctica, los lodos no alcanzarán de manera inmediata la temperatura de tratamiento y tampoco volverán a temperatura ambiente de manera inmediata, con lo que la temperatura de los lodos evolucionará con el tiempo siguiendo una campana de Gauss. Este tratamiento equivaldrá a exponer el material a 65,6°C durante un tiempo F , que se puede calcular resolviendo la siguiente integral:

$$F' = \int_{t_0}^{t_f} 10^{\frac{T-65,6}{Z}} dt \quad [29.10]$$

Si la F' resultante es mayor o igual que el tiempo requerido para la temperatura de referencia se alcanzará el objetivo deseado y los lodos tratados serán de Clase A.

ii. Cálculos

29.1. Cálculo de la producción diaria de lodos en una EDARU.

Una EDARU, que trata 30000 m³/día de agua residual, cuenta con decantación primaria y tratamiento biológico por lodos activos. Calcúlese:

a) El volumen de lodos primarios producido diariamente.

b) El volumen de lodos secundarios producido diariamente suponiendo que el lodo en exceso se retire de la línea de recirculación.

Datos: sólidos suspendidos totales (SST) y DQO a la entrada del decantador primario: 250 mg/L y 400 mg/L; eficacia del decantador primario: 70% para los SST y 25% para la DQO; DQO en el agua tratada: 12 mg/L; rendimiento ($Y_{x/DQO}$): 0,3 kg SSV/kg DQO; constante de respiración endógena (k_d): 0,05 d⁻¹; SST en el lodo primario: 6,5%; sólidos suspendidos volátiles (SSV) en el tanque de aireación y línea de recirculación: 3000 mg/L y 9000 mg/L; volumen del tanque de aireación: 7500 m³

Solución:

a) Se calculan los SST que entran y los que se retiran en el tratamiento primario:

$$SST \text{ que entran} = 30000 \frac{m^3}{d} \times 0.25 \frac{kg}{m^3} = 7500 \frac{kg}{d}$$

$$SST \text{ que se retiran} = 7500 \frac{kg}{d} \times 0.7 = 5250 \frac{kg}{d}$$

A partir de este valor se calcula el volumen de lodos primarios producido:

$$\check{L}_{l_1} = 5250 \frac{kg}{d} \times \frac{1 m^3}{65 kg} = 81 \frac{m^3}{d}$$

b) Se calcula el caudal clarificado que sale del decantador primario y entra en el reactor biológico y su concentración en DQO como sigue:

$$\check{L}_c = 30000 \frac{m^3}{d} - 81 \frac{m^3}{d} = 29919 \frac{m^3}{d}$$

$$C_{DQO_e} = 0,4 \frac{kg}{m^3} \times (1 - 0,25) = 0,3 \frac{kg}{m^3}$$

Se calculan los SSV producidos, teniendo en cuenta la DQO de entrada y salida del tratamiento biológico y sustituyendo en la siguiente ecuación:

$$P_x = \check{L}_c Y_{X/DQO} (C_{DQO_e} - C_{DQO_s}) - k_d X V_R = 1460 \frac{kg}{d}$$

Y a partir de aquí el volumen de lodos secundarios producido

$$\check{L}_{l_2} = 1460 \frac{kg}{d} \times \frac{1 m^3}{9 kg} = 162 \frac{m^3}{d}$$

29. 2. Determinación del contenido en SPE de un lodo.

Se desea conocer el contenido en SPE de un lodo biológico procedente de un reactor de membrana. Para analizar los SPE solubles se mezclan 10 mL del lodo con 10 mL de agua destilada y se centrifuga, retirándose el sobrenadante para su posterior análisis (muestra A). Para los SPE ligados, el sólido recogido en el tubo de centrifuga se resuspende con agua destilada hasta un volumen final de 20 mL, se le añaden 0,12 mL de formaldehído, se agita y se le añaden 8 mL de NaOH. Se centrifuga de nuevo y se retira el sobrenadante para su posterior análisis (muestra B). En las dos muestras se mide el contenido de carbohidratos totales por el método del fenol-sulfúrico y el contenido en proteínas y ácidos húmicos empleando el método de Lowry modificado por Frolund y col. (1995). Los valores obtenidos para las muestras A y B, respectivamente, fueron 10,2 mg/L y 82,3 mg/L para los carbohidratos, 2,1 mg/L y 140,3 mg/L para la proteína y 76,7 mg/L y 150,5 mg/ para los húmicos. Calcúlese la concentración en el lodo de SPE libres y ligados

Solución:

La concentración de SPE libres se obtiene sumando los ácidos húmicos, las proteínas y los carbohidratos presentes en la muestra A y corrigiendo la dilución realizada:

$$SPE = C_{AH} + C_{PROT} + C_{CH}$$

$$SPE_{muestra A} = 76,7 + 2,1 + 10,2 = 89,0 \frac{mg}{L}$$

$$SPE_{libres} = 89,0 \frac{mg}{L} \times \frac{20 mL muestra A}{10 mL lodo} = 178 \frac{mg}{L}$$

De la misma manera se obtiene la concentración de SPE ligadas:

$$SPE_{muestra B} = 150,5 + 140,3 + 82,3 = 376,1 \frac{mg}{L}$$

$$SPE_{ligadas} = 376,1 \frac{mg}{L} \times \frac{28.12 mL muestra B}{10 mL lodo} = 1049 \frac{mg}{L}$$

29.3. Estimación de la densidad de un lodo

La relación SV/ST de unos lodos primarios es de 0,77 y su contenido en sólidos es del 4%. En el caso de unos lodos secundarios aerobios esta relación es de 0,80 y su contenido en sólidos es del 0,7%, mientras que unos lodos anaerobios presentaron valores de SV/ST de 0,6 y un contenido en sólidos del 6%. Calcular en todos los casos la densidad aproximada del lodo.

Solución:

Teniendo en cuenta las ecuaciones [29.1] y [29.2], se calculan las densidades:

Lodo primario

$$Gravedad\ específica\ sólidos = \frac{1}{\left(\frac{0,23}{2,5} + \frac{0,77}{1,0}\right)} = 1,160$$

$$Gravedad\ específica\ lodo = \frac{1}{\left(\frac{0,04}{1,160} + \frac{0,96}{1,0}\right)} = 1,006$$

Lodo aerobio

$$Gravedad\ específica\ sólidos = \frac{1}{\left(\frac{0,20}{2,5} + \frac{0,80}{1,0}\right)} = 1,136$$

$$Gravedad\ específica\ lodo = \frac{1}{\left(\frac{0,007}{1,136} + \frac{0,993}{1,0}\right)} = 1,001$$

Lodo anaerobio

$$Gravedad\ específica\ sólidos = \frac{1}{\left(\frac{0,40}{2,5} + \frac{0,60}{1,0}\right)} = 1,316$$

$$Gravedad\ específica\ lodo = \frac{1}{\left(\frac{0,06}{1,316} + \frac{0,94}{1,0}\right)} = 1,015$$

Las densidades del lodo primario, aerobio y anaerobio serán, respectivamente, 1006 kg/m³, 1001 kg/m³ y 1015 kg/m³.

29. 4. Cálculo de la filtrabilidad de un lodo

Se desea comparar la capacidad de deshidratación de un lodo orgánico antes y después de ser tratado químicamente con un polímero. Para ello, se ha medido en

ambos lodos el tiempo de succión capilar (TSC) para distintas concentraciones de sólidos (C), obteniéndose los resultados recogidos en la tabla.

Sin tratar	<i>C (g/L)</i>	12	27	38	46	51	60	73
	<i>TSC (s)</i>	95	190	273	332	374	432	533
Tratado	<i>C (g/L)</i>	12	24	32	43	58	61	71
	<i>TSC (s)</i>	40	70	101	130	180	193	227

Calcúlese la filtrabilidad en ambos casos y compárense los resultados obtenidos. La constante del equipo utilizado en la medida es 7,26.

Solución:

A partir de la ecuación 29.3 se obtiene:

$$TSC = \frac{\phi \eta}{\chi} C$$

Representando TSC frente a C se obtienen dos rectas de pendiente 7,256 m³s/kg y 3,137 m³s/kg para el lodo antes y después del tratamiento, respectivamente. Considerando $\eta = 10^{-3}$ Pa.s y el valor de la constante del equipo, se obtiene:

$$\chi_{\text{lodo sin tratar}} = 0,0010 \frac{kg^2}{m^4 s^2}$$

$$\chi_{\text{lodo tratado}} = 0,0023 \frac{kg^2}{m^4 s^2}$$

El tratamiento con el polímero consigue que la filtrabilidad se duplique, con la consiguiente mejora en la capacidad de deshidratación del lodo.

29.5. Determinación del comportamiento reológico de un lodo

Un lodo activo es sometido a un tratamiento térmico. Se realiza una curva de flujo a la muestra antes y después de ser tratada, obteniéndose los siguientes resultados:

$\dot{\gamma} (s^{-1})$	2	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Antes: $\tau (Pa)$	0,01	0,01	0,03	0,04	0,05	0,07	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12
Después: $\tau (Pa)$	0,17	0,30	0,42	0,52	0,60	0,68	0,75	0,81	0,88	0,94	0,99

- Obtener la curva de flujo en ambos casos representando el esfuerzo (τ) frente a la velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$).
- Considerando que el límite de fluencia despreciable, calcular los índices K y n antes y después del tratamiento.
- Explicar el tipo de comportamiento presenta esta muestra y la influencia del tratamiento térmico sobre dicho comportamiento.

Solución

a)

Figura 29.4

c) Considerando el límite de fluencia despreciable y tomando logaritmos neperianos en la ecuación 29.4, se obtiene la ecuación de una recta:

$$\ln(\tau) = \ln(K) + n \ln(\dot{\gamma})$$

Con lo que representando $\ln(\tau)$ frente a $\ln(\dot{\gamma})$ y obteniendo el valor de la recta de ajuste, se obtienen los valores de n : 0.48 y 0.82 y de K : 0.1055 (Pa.sⁿ) y 0.0026 (Pa.sⁿ), antes y después del tratamiento, respectivamente.

d) El fluido pasa de tener un comportamiento pseudoplástico a un comportamiento casi newtoniano, debido a la rotura de los flóculos por el tratamiento térmico.

29.6. Caracterización de las propiedades viscoelásticas de un lodo

La misma muestra del problema anterior es sometida a un barrido de frecuencia, antes y después del tratamiento térmico, a fin de analizar sus propiedades viscoelásticas, obteniéndose los resultados de la siguiente tabla:

ν (Hz)	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0	1,5	2,1	3,2	4,6	6,8	10
Antes: G^* (Pa)	818	862	884	904	927	950	975	1002	1031	1063	818	862
Después: G^* (Pa)	374	396	407	417	428	440	453	466	481	497	374	396

a) *Ajustar los datos obtenidos a la ecuación 29.5 y obtener los parámetros A y z antes y después del tratamiento*

b) *¿Se observa algún efecto del tratamiento en la estructura de los lodos?*

Solución:

a) Tomando logaritmos en la ecuación 29.5, se obtiene la ecuación de una recta:

$$\ln(G^*) = \ln(A) + \frac{1}{z} \ln(\nu)$$

De esta manera, representando $\ln(G^*)$ frente a $\ln(\nu)$, se obtienen los valores de A: 952 y 441 (Pa.s^{1/z}) y de z: 15 y 14, antes y después del tratamiento, respectivamente.

b) El tratamiento térmico reduce el número de interacciones en la red tridimensional de la macroestructura y además reduce la fuerza de dichas interacciones aproximadamente a la mitad.

29. 7. Cálculo de la potencia requerida para transportar un lodo

Se deben de transportar 0.005 m³/s de lodo primario desde el tanque 1 al 2 mediante una tubería normalizada de acero (ver figura 29.5). El lodo tiene un contenido en sólidos del 5% y una densidad de 1007 kg/m³. Considerando que se comporta como un plástico de Bingham, ¿cuál será la potencia necesaria para la bomba?

Datos: *velocidad aproximada en la tubería: 1.2 m/s; coeficientes de pérdida de carga de elementos singulares: 0.75 para un codo estándar de 90° y 0.4 para una contracción brusca con gran diferencia entre las secciones; eficacia de la bomba: 60%*

Figura 29.5

Solución:

Se calcula el diámetro de tubería requerido y se selecciona la tubería normalizada de acero más próxima, siendo esta de 3 in (nº catálogo 80) con diámetro interior de 7.366 cm. Se calcula entonces la velocidad real de paso del lodo en la tubería:

$$v = \frac{\hat{L}}{\pi \frac{D^2}{4}} = 1,17 \text{ m/s}$$

Utilizando la figura 29.1, a partir del contenido en sólidos del lodo obtenemos que $\tau_0 = 6,1 \text{ Pa}$ y $K = 0,015 \text{ Pa s}$.

Calculamos ahora los números de Reynolds y Hedstrom (ecuaciones 29.7 y 29.8):

$$Re = \frac{(1007 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) (1,17 \frac{\text{m}}{\text{s}}) (0,0737 \text{ m})}{(0,015 \frac{\text{kg}}{\text{m s}})} = 5789$$

$$He = \frac{(0,0736 \text{ m})^2 (6,1 \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2}) (1007 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})}{(0,015 \frac{\text{kg}}{\text{m s}})^2} = 148289$$

Utilizando la figura 29.2, se obtiene que el factor de fricción es $f = 0.013$

Para el cálculo de la potencia de la bomba requerida se aplica la ecuación de Bernoulli para flujo turbulento ($Re > 4000$) entre los puntos a y b de la figura 29.5:

$$\hat{W}_S = \left[\left(\frac{v_b^2}{2} \right) - \left(\frac{v_a^2}{2} \right) \right] + g (h_b - h_a) + \left(\frac{p_b - p_a}{\rho} \right) + \sum F$$

Siendo \hat{W}_S la energía requerida por unidad de masa de lodo, v_a y v_b las velocidades en a y b (0 y 1,17 m/s, respectivamente), g la gravedad, $(h_b - h_a)$ la diferencia de altura entre a y b (= 5,5 m), $(p_b - p_a)$ la diferencia de presión entre a y b (= 0), ρ la densidad del lodo y $\sum F$ las pérdidas de carga por fricción en el sistema de tuberías (incluyendo las pérdidas de carga menores) que se calculan de la siguiente manera:

$$\sum F = F_{\text{tubería}} + F_{\text{accesorios}} = \frac{2 f L v^2}{D_t} + n e_{v_{\text{codo}}} \frac{v^2}{2} + e_{v_{\text{cont.}}} \frac{v^2}{2} = 9,54 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Siendo L la longitud de la tubería (= 16 m), n el número de codos (= 3) y $e_{v_{\text{codo}}}$ y $e_{v_{\text{cont.}}}$ los coeficientes de pérdida de carga para un codo estándar y una contracción brusca.

Se calcula \hat{W}_S (=64,18 J/kg), y a partir de este valor, multiplicando por el flujo másico ($0,005 \text{ m}^3/\text{s} \times 1007 \text{ kg}/\text{m}^3 = 5,04 \text{ kg}/\text{s}$) y teniendo en cuenta la eficacia de la bomba, se calcula la potencia requerida:

$$P_B = \frac{64,18 \frac{\text{J}}{\text{kg}} 5,04 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{0,6} = 539 \text{ W}$$

29. 8. Determinación de las condiciones temperatura - tiempo para obtener un lodo de Clase A

Se somete un lodo a un tratamiento térmico con el fin de obtener un lodo de Clase A que pueda ser aplicado al terreno sin restricciones.

a) ¿Cuánto tiempo debería estar el lodo a 65,6°C para alcanzar el objetivo?

b) Si el lodo va aumentando y disminuyendo su temperatura gradualmente según se indica en la siguiente tabla, ¿se alcanzará el objetivo deseado?

t (min)	0	20	35	60	80	100	125	140
---------	---	----	----	----	----	-----	-----	-----

T (°C)	20.0	40.0	58.0	65	68	65	56.0	32.0
--------	------	------	------	----	----	----	------	------

Solución:

a) A partir de la Figura 29.3, se obtiene que el tiempo necesario de tratamiento a 65,6°C son 0,1 d (144 min).

b) Se calculan los valores de $10^{\frac{T-65,6}{Z}}$ para cada tiempo, teniendo en cuenta que Z es igual a 7,3, y se representan:

t (días)	0	0,014	0,024	0,042	0,055	0,069	0,087	0,097
$10^{\frac{T-65,6}{Z}}$	$5,67 \times 10^{-7}$	$3,11 \times 10^{-3}$	$9,10 \times 10^{-2}$	$8,28 \times 10^{-1}$	2,13	$8,28 \times 10^{-1}$	$4,84 \times 10^{-2}$	$2,50 \times 10^{-5}$

Figura 29.6

Se calcula el área bajo la curva que nos dará el valor de $F = \int_{t_0}^{t_f} 10^{\frac{T-65,6}{7,3}} dt$

Se obtiene que $F \sim 0,05 d = 72 \text{ min}$

Como 72 min < 144 min, el tratamiento no es suficiente para alcanzar el objetivo deseado y debería de incrementarse el tiempo y/o la temperatura de tratamiento.

Bibliografía

- Andreoli, C.V., von Sperling, M., Fernandes, F., Ronteltap, M., *Sludge Treatment and Disposal* (Vol 6 en Biological Wastewater Treatment Series), IWA Publishing, London, 2007.
- Carthew, G.A., Goehring, C.A., van Teylingen, J.E., *Development of Dynamic Head Loss Criteria for Raw Sludge Pumping*. Journal of the Water Pollution Control Federation, 55, 472-483, 1983.
- Larson, R.G., *The Structure and Rheology of Complex Fluids (Topics in Chemical Engineering)*, Oxford University Press, NY, 1999.
- Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*, McGraw-Hill Education, NY, 2013.
- Vesilind, P.A., Davis, H.A., *Using the capillary suction time device for characterizing sludge dewaterability*, Water Science and Technology, 20, 203-205, 1988.

Pies de figura

Figura 29.1. Curvas para calcular el límite de fluencia y el índice de consistencia en lodos que se comporten como un plástico de Bingham en función de su contenido en sólidos (Carthew y col. 1983)

Figura 29.2. Curvas para calcular el factor de fricción para lodos que se comporten como un plástico de Bingham, en función los números de Reynolds y Hedstrom (Carthew y col. 1983)

Figura 29.3. Relación tiempo-temperatura para obtener lodos de Clase A por tratamiento térmico

Figura 29.4. Curvas de flujo del problema 29.5

Figura 29.5. Esquema del transporte a realizar en el problema 29.7

Figura 29.6. Curva $10^{\frac{T-65,6}{Z}}$ frente al tiempo (problema 29.8)

Figura 29.1

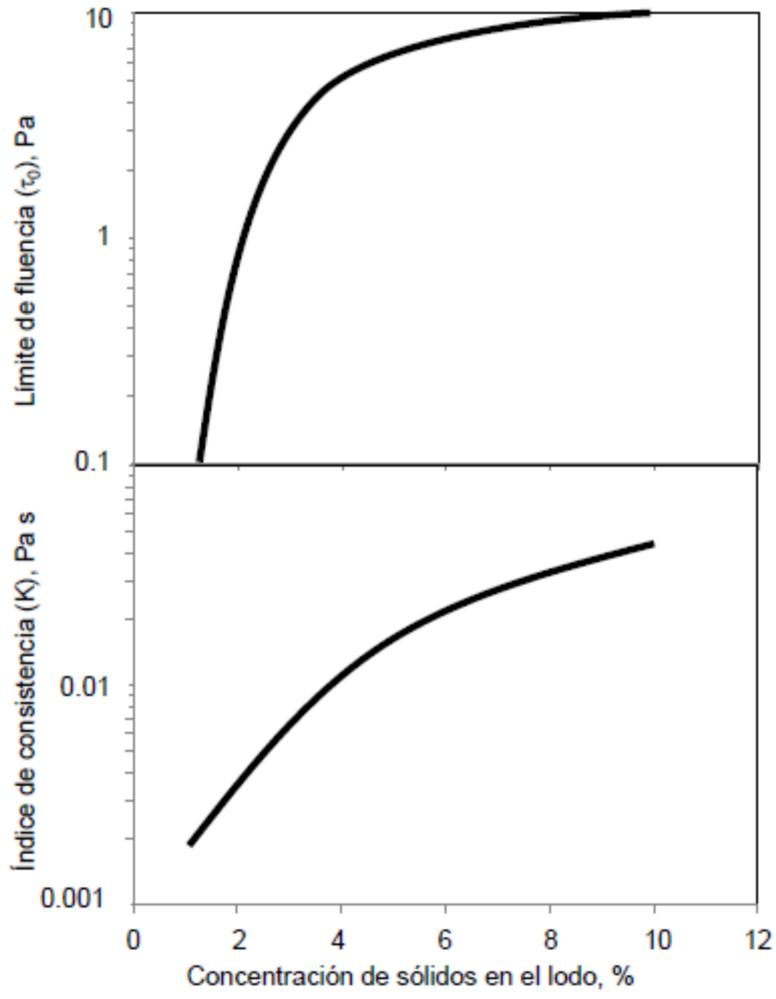


Figura 29.2.

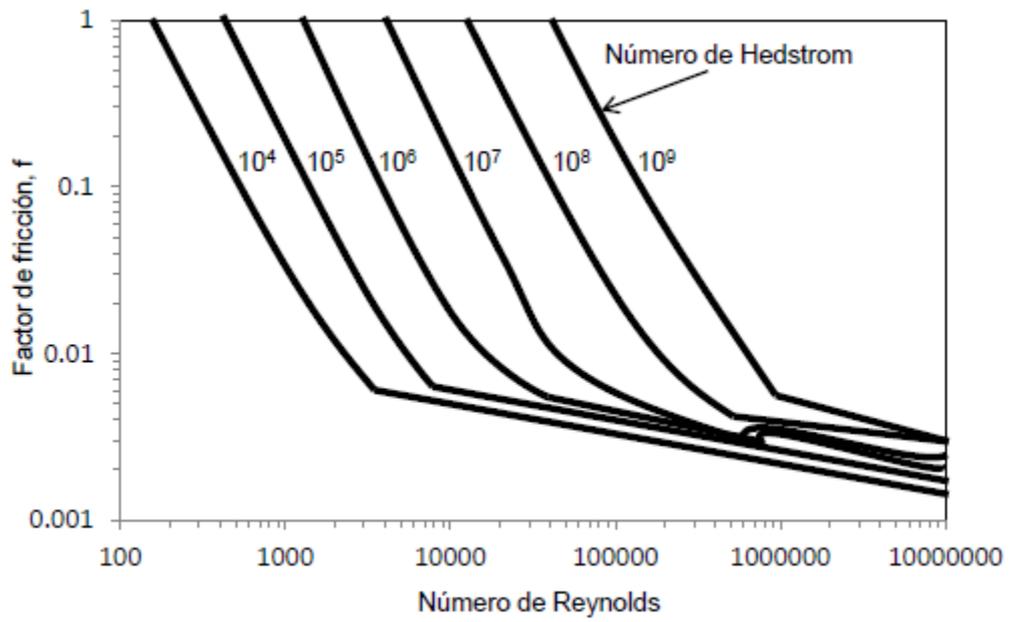


Figura 29.3.

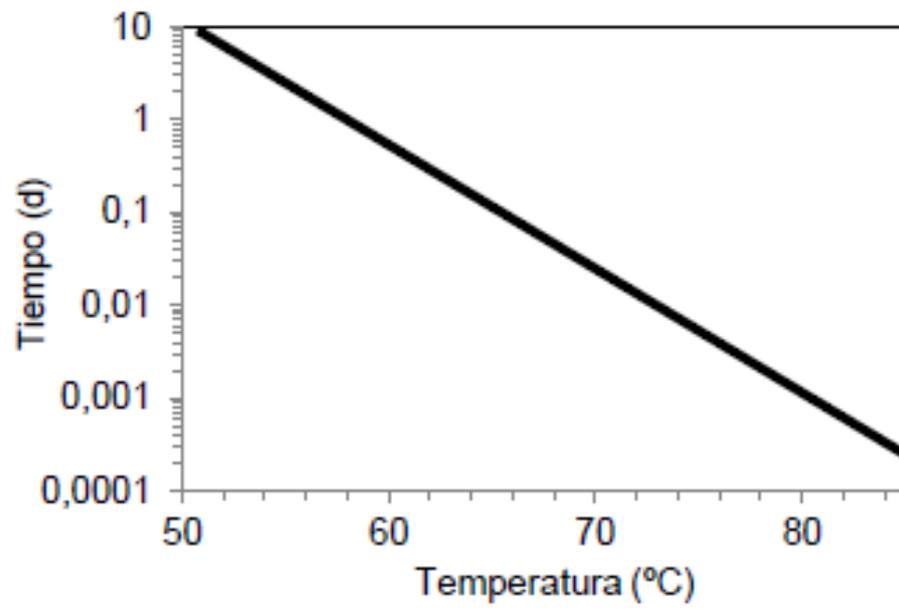


Figura 29.4.

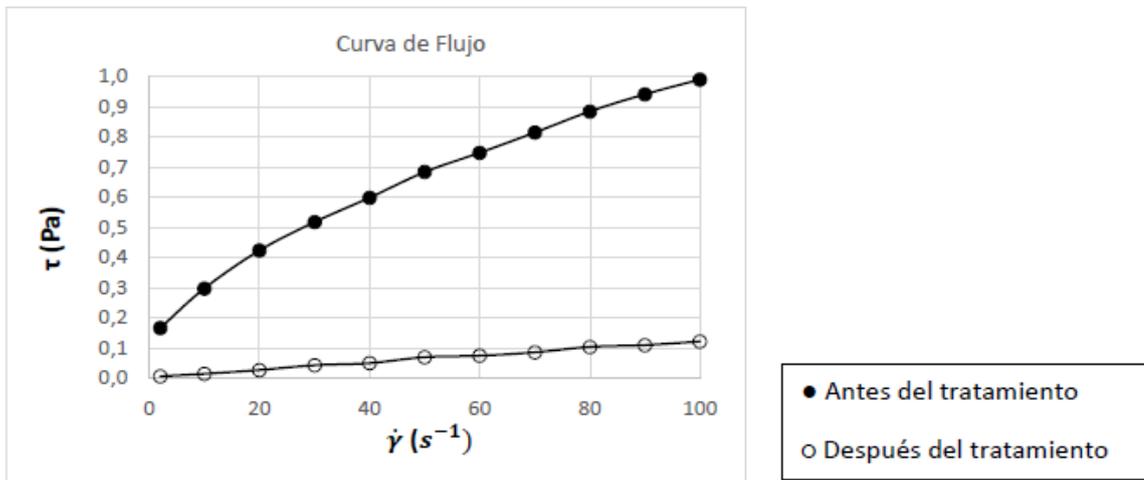


Figura 29.5.

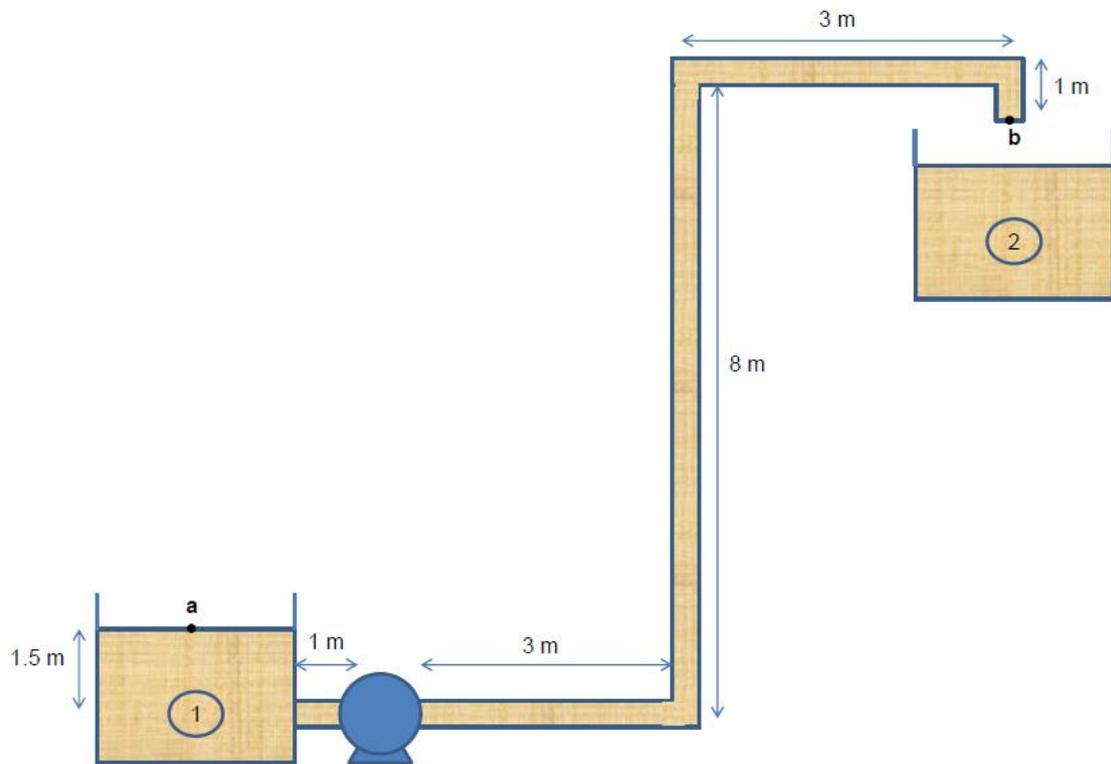
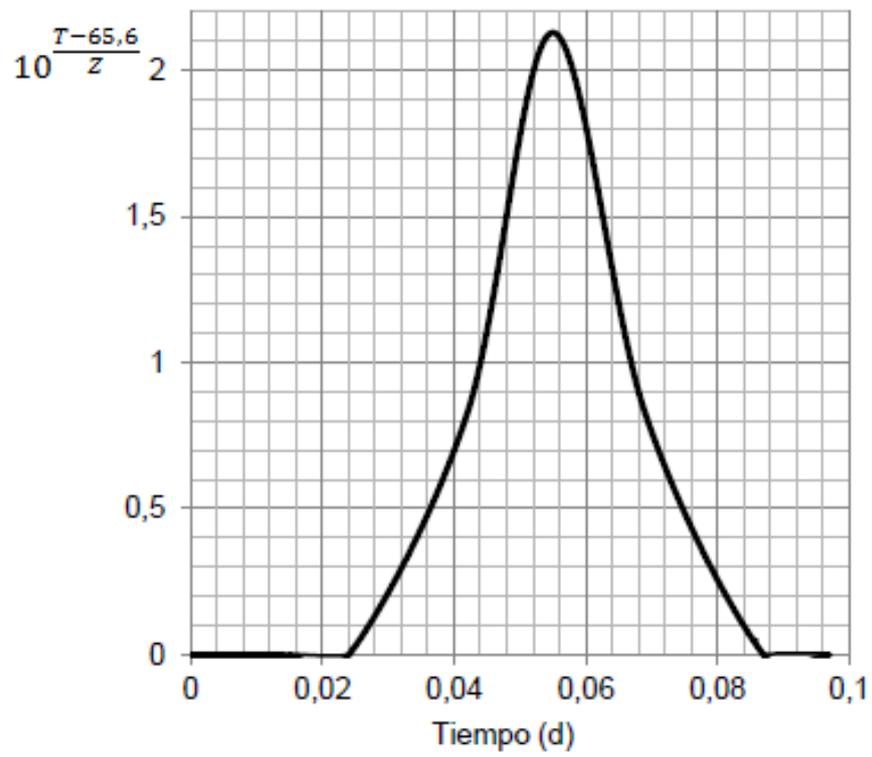


Figura 29.6.



Lista de símbolos

A	Parámetro de la ecuación 29.5, Pa.s ^{1/2} (29)
C	Concentración de sólidos, kg/m ³ (29)
C_{DQO_e}	Concentración de DQO a la entrada del tratamiento biológico, kg/m ³ (29)
C_{DQO_s}	Concentración de DQO a la salida del tratamiento biológico, kg/m ³ (29)
D_t	Diámetro de la tubería, m (29)
e_v	Coefficiente de accesorios en tuberías, (-) (29)
F'	Tiempo para pasteurización de un lodo a 65,6°C (hasta Clase A), d (29)
G^*	Módulo complejo, Pa (29)
G'	Módulo elástico, Pa (29)
G''	Módulo viscoso, Pa (29)
h	Altura, m (29)
He	Número de Hedstrom, (-) (29)
K	Parámetro de consistencia, Pa.s ⁿ (29)
k_d	Constante de respiración endógena, d ⁻¹ (29)
\check{L}	Caudal, m ³ /s (29)
L	Longitud, m (29)
n	Índice de flujo, (-) (29)
p	Presión, Pa (29)
P_B	Potencia de la bomba, W (29)
P_x	Producción de biomasa (SSV) por unidad de tiempo, kg/d (29)
Re	Número de Reynolds, (-) (29)
T	Temperatura, °C (29)
t	Tiempo, d (29)
v	velocidad, m/s (29)
$\langle v \rangle$	Velocidad media, m/s (29)
V_R	Volumen del reactor, m ³ (29)
\widehat{W}_S	Energía requerida por unidad de masa de lodo, J/kg
X	Concentración de SSV, kg/m ³ (29)
$Y_{x/DQO}$	Rendimiento, kg SSV/kg DQO (29)
Z	ΔT que permite reducir 10 veces el tiempo de pasteurización de un lodo (hasta Clase A), °C (29)
z	Número de unidades reológicas correlacionadas con otras en la red tridimensional, (-) (29)
$\dot{\gamma}$	Velocidad de deformación (s ⁻¹) (29).
η	Viscosidad, kg/m s (29)

ν	Frecuencia, Hz (29)
ρ	Densidad, kg/m ³ (29)
τ	Esfuerzo cortante, Pa (29)
τ_0	Límite de fluencia, Pa (29)
ϕ	Constante característica del equipo de medida del TSC (-) (29)
χ	Parámetro de filtrabilidad, kg ² /m ⁴ s ² (29)

Lista de abreviaturas

EDARU	Estación depuradora de aguas residuales urbanas
DBO	Demanda Biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
SD	Sólidos disueltos
SF	Sólidos fijos
SPE	Sustancias poliméricas extracelulares
SS	Sólidos suspendidos
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos volátiles
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos volátiles totales
TSC	Tiempo de succión capilar
USEPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos