

DINÁMICA DE LÍQUIDOS TIXOTRÓPICOS Y DEPENDIENTES DEL TIEMPO (Thixotropic and time dependent fluid dynamics)

Wilmer Peña

Magister Scientiarum en Ingeniería Agroindustrial. Profesor Agregado adscrito al Programa de Ciencias del Agro y del Mar Vicerrectorado de Planificación y Desarrollo Social UNELLEZ. Barinas. Venezuela.
wjpr58@gmail.com

Revisión Bibliográfica

Recibido: 30-03-2020

Aceptado: 04-04-2020

RESUMEN

La investigación consistió en una revisión de la dinámica que rige el comportamiento de líquidos tixotrópicos y dependientes del tiempo, estableciendo algunas definiciones y características de este tipo de fluido. La cinética reológica de los materiales tixotrópicos implica una complejidad que se puede dilucidar sobre la base de una microestructura que es el resultado de las fuerzas de atracción relativamente débiles entre las partículas, en comparación de los esfuerzos mecánicos que producen el flujo. La viscosidad va disminuyendo al aplicar una fuerza y acto seguido vuelve a aumentar al cesar dicha fuerza debido a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio se denomina fenómeno de histéresis. La tixotropía por su definición presenta cambios reversibles de la microestructura dependientes del tiempo y se expresa por el efecto de la historia de cizalla. Finalmente se desarrolla la caracterización de los fluidos tixotrópicos y se indican algunos modelos teóricos y empíricos utilizados en la industria.

Palabras clave: *Tixotropía, caracterización reológica, modelamiento.*

SUMMARY

The research consisted of a review of the dynamics that govern the behavior of thixotropic and time-dependent liquids, establishing some definitions and characteristics of this type of fluid. The rheological kinetics of thixotropic materials implies a complexity that can be elucidated on the basis of a microstructure that is the result of the relatively weak forces of attraction between the particles, compared to the mechanical stresses that produce the flow. Viscosity decreases when a force is applied and then increases again when force ceases due to the reconstruction of its structures and the delay that occurs to adapt to the change is called a hysteresis phenomenon. Thixotropy by its definition presents reversible changes in the time-dependent microstructure and is expressed by the effect of shear history. Finally, the characterization of thixotropic fluids is developed and some theoretical and empirical models used in industry are indicated.

Keywords: *Thixotropy, rheological characterization, modeling.*

INTRODUCCIÓN

Los fluidos no newtonianos son aquellos en los que la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad no es constante. En este caso en lugar de coeficiente de viscosidad o viscosidad newtoniana se habla de coeficiente de viscosidad aparente.

Los líquidos tixotrópicos pertenecen a una categoría de fluidos clasificados conforme a su comportamiento reológico como no newtonianos y dependientes del tiempo, esto debido a que su viscosidad disminuye al aplicar un esfuerzo cortante.

Con base a su dependencia o no con el tiempo de cizalla impuesto, los fluidos pueden clasificarse en dos grandes grupos: fluidos independientes del tiempo y fluidos dependientes del tiempo.

En este trabajo se presenta una revisión sobre la tixotropía en líquidos, alcanzando temas relativos a la reología de líquidos, clasificación, definición, comportamiento y modelamientos.

Aun cuando el análisis y tratamiento de los fluidos no-newtonianos es menos preciso matemáticamente que el de los newtonianos, el estudio de este tipo de materiales tiene características muy interesantes y un espectro de aplicación práctico mucho más amplio.

Conocer el comportamiento tixotrópico de los alimentos en las operaciones unitarias de los procesos a los cuales son sometidos y los efectos asociados por la interacción de sus componentes permite aumentar el espectro de investigación y los modos de experimentación del fenómeno tixotrópico para nuevos productos.

Reología

Es la ciencia de la deformación y flujo de la materia, o sea, la manera como los materiales responden a un esfuerzo o tensión aplicada (Quintáns, 2008). En otras palabras...

” la reología estudia cómo se deforma y fluye la materia cuando se le somete a una presión. Esta puede ser una tensión, una compresión o una fuerza de cizalla. Aunque en general los sistemas dispersos y coloidales se comportan de forma muy similar a los líquidos cuando son sometidos a una tensión o una compresión, su comportamiento es, en cambio, muy diferente cuando se les aplica fuerzas de cizalla” (García 2010, p. 5).

Viscosidad

Se define la viscosidad como la resistencia a fluir, es decir, es la propiedad del fluido que da lugar a las fuerzas que se oponen al movimiento relativo en el

fluido. Se debe a las fuerzas de atracción entre las distintas moléculas de un fluido que, al fluir, hace que se produzca una cierta fricción. Los líquidos tienen una viscosidad más alta que los gases. Para determinar lo que es la viscosidad se somete a deformación un líquido aplicándole una tensión tangencial. Se comprueba que la velocidad con la que fluye una capa del líquido respecto a otra adyacente es uniforme y origina una fuerza tangencial F proporcional al área de las capas A y al gradiente de dv/dz en dirección normal a la que avanza el fluido (Ramírez, 2006) citado por Domínguez (2018, p.7).

$$F=A\eta dv / dz$$

Donde η es la constante de proporcionalidad llamada viscosidad.

La viscosidad de un fluido está directamente relacionada con la interacción entre las moléculas que la conforman. Además de las interacciones existentes entre las partículas y el medio de dispersión, el comportamiento reológico de un sistema disperso, va a depender de la viscosidad, propiamente dicha, del medio de dispersión, la concentración de la fase dispersa, y la forma y el tamaño de las partículas.

Clasificación de los fluidos

Según la respuesta que tengan los fluidos ante un esfuerzo cortante, estos pueden clasificarse en newtonianos o no newtonianos. La relación entre esfuerzos cortantes y velocidades de deformación se puede expresar del siguiente modo: $\tau = \mu\dot{\gamma}$, si se verifica que existe proporcionalidad lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, se está en presencia de fluidos newtonianos, si por el contrario, no hay proporcionalidad lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación, el fluido es no newtoniano.

La Ley de la viscosidad de Newton establece que en movimientos fluidos laminares existe una relación lineal entre las tensiones tangenciales y los gradientes de velocidad, siendo la constante de proporcionalidad una propiedad física del fluido llamada viscosidad dinámica o absoluta (μ).

$$\sigma = \mu dv/dx = \mu\dot{\gamma}$$

Muchos fluidos comunes tanto líquidos como gaseosos se comportan siguiendo la relación anterior. Existen sustancias industrialmente importantes que no se comportan siguiendo la Ley de Newton de la viscosidad, ya que su viscosidad a una temperatura y

presión dadas es función del gradiente de velocidad o velocidad de deformación (Ibarrola, s/f).

Clasificación de los fluidos No newtonianos.

Chhabra y Richardson (2008), citado por Crespi (2015., pp.25-26), clasifica los fluidos no newtonianos en: 1) Independientes del tiempo: 1.1) Sin esfuerzo umbral: 1.1.1.) Pseudoplástico, producen una disminución de su viscosidad, y de su esfuerzo cortante, con la velocidad de deformación. 1.1.2) Dilatantes, se produce un aumento de su viscosidad, y de su esfuerzo cortante, con la velocidad de deformación. 1.2) Con esfuerzo umbral: 1.2.1) Plásticos, se comportan como sólidos hasta que sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo (esfuerzo umbral) y a partir de dicho valor se comportan como un líquido. 2) Dependientes del tiempo: 2.1) Tixotrópicos, se produce una disminución de la viscosidad al aplicar un esfuerzo cortante y recupera su viscosidad inicial tras un tiempo de reposo (Armstrong, Beris y Wagner, s.f., p. 1). 2.2). Reopécticos, se produce un aumento de la viscosidad al aplicar un esfuerzo cortante y recupera su viscosidad inicial tras un tiempo de reposo. 3) Viscoelásticos, se comportan como líquidos y sólidos, presentando propiedades de ambos, y con propiedades tanto viscosas como elásticas (Figuras 1 y 2).

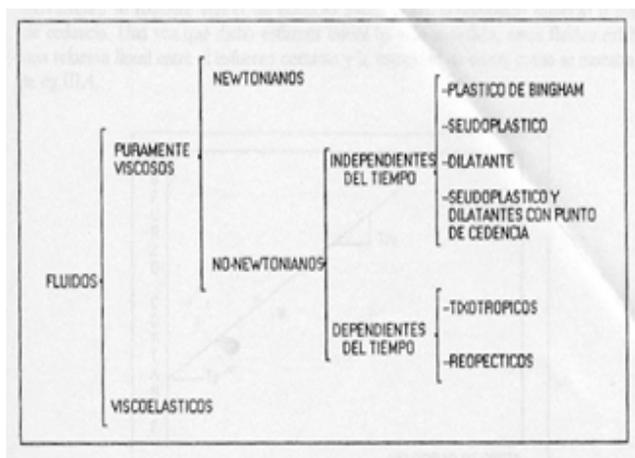


Figura 1. Clasificación de los fluidos.

No obstante, tanto la tixotropía como la reopexia pueden ser irreversibles, reversibles o parcialmente reversibles. Generalmente, existe el acuerdo de considerar a la tixotropía como un fenómeno reversible y darle el nombre de reomalaxis, o Steffe (1996) citado por Chiralt, Martínez, González, Talens y Moraga (2012, p. 150 eodestrucción cuando el comportamiento es el mismo, pero se trata de un fenómeno irreversible”).)

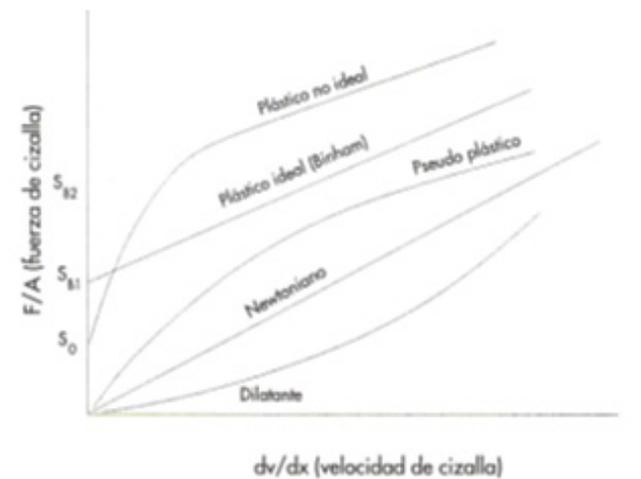


Figura 2. Reograma correspondientes a flujos newtonianos y no newtonianos. “S” representa el valor de la fuerza de ruptura para los diferentes casos (So, SB1, SB2).

Fluidos tixotrópicos

La viscosidad aparente de los fluidos tixotrópicos es una función tanto de la tensión tangencial como de la velocidad de deformación:

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

Al actuar una tensión tangencial en este fluido desde el estado de reposo, sufre un proceso de fraccionamiento a escala molecular seguido de una reconstitución estructural a medida que transcurre el tiempo. Eventualmente y en ciertas circunstancias, se logra un estado de equilibrio donde el fraccionamiento molecular iguala a la reconstitución. Si la tensión tangencial cesa, el fluido se recupera lentamente y vuelve a adquirir su consistencia original en un proceso que se caracteriza por su reversibilidad (Armstrong, Beris, Norman Wagner s/f, p.1.). En la Figura 3 se muestra la tensión tangencial en función de la velocidad de deformación de un fluido tixotrópico cuando se lo somete a una tensión y luego de sucesivos tiempos de reposo. Inicialmente la curva que se muestra es la de un fluido newtoniano, pero esta no es la regla, y puede inicialmente ser no newtoniano. Otra característica de los tixotrópicos es que cuando se la aplica una tensión tangencial creciente, dan una curva cerrada similar a un lazo de histéresis como se muestra en la Figura 4 para un fluido pseudoplástico tixotrópico.

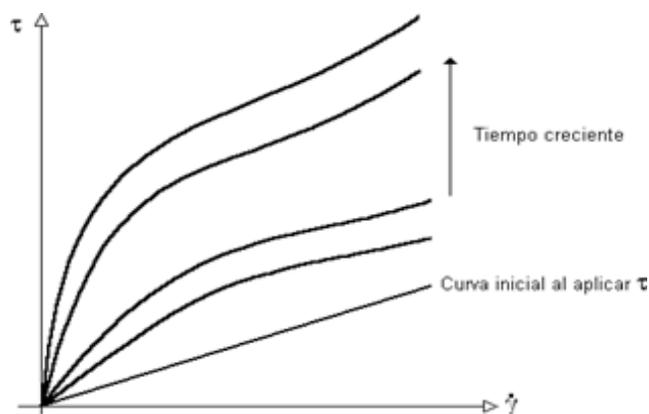


Figura 3. Comportamiento de un fluido tixotrópico en el tiempo.

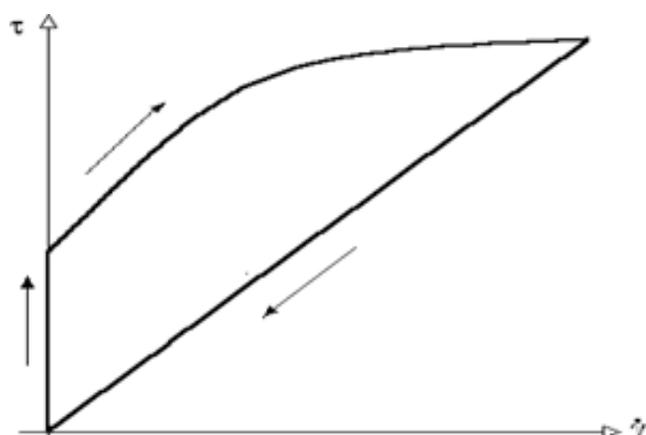


Figura 4. Histéresis de un fluido pseudoplástico tixotrópico.

Algunos plásticos de Bingham tienen comportamiento tixotrópico, pero si la tensión tangencial es suficientemente alta se fraccionan molecularmente y posteriormente van reconstruyendo paulatinamente su estructura molecular, y terminan comportándose como fluidos newtonianos. A estos se los denomina **plástico de Bingham tixotrópico verdadero** y su diagrama tensión – velocidad de deformación se muestra en la Figura 5. Sin embargo, algunas sustancias llamadas cuerpos **falsos**, retienen una tensión de fluencia cuando cesa la deformación, y luego de transcurrido cierto tiempo recuperan su resistencia de fluencia original como se muestra en la Figura 6. (Ibarrola, s/f). Ejemplos de alimentos con comportamiento tixotrópico son algunos zumos concentrados, mieles, leche condensada o Este grupo incluye aquellos materiales que poseen una estructura cuya descomposición es función tanto del tiempo como del esfuerzo aplicado. A velocidad de cizallamiento constante, el valor de la tensión de corte disminuye con el tiempo. En la comportamiento

reológico de tres tipos de fluidos mientras la estructura se derrumba.

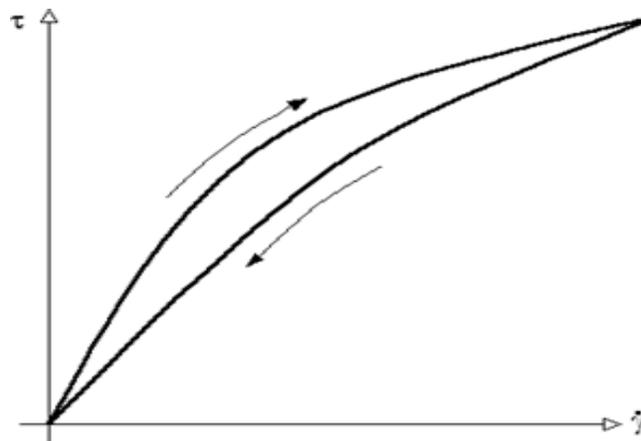


Figura 5. Plástico de Bingham tixotrópico verdadero. mostaza entre otros.

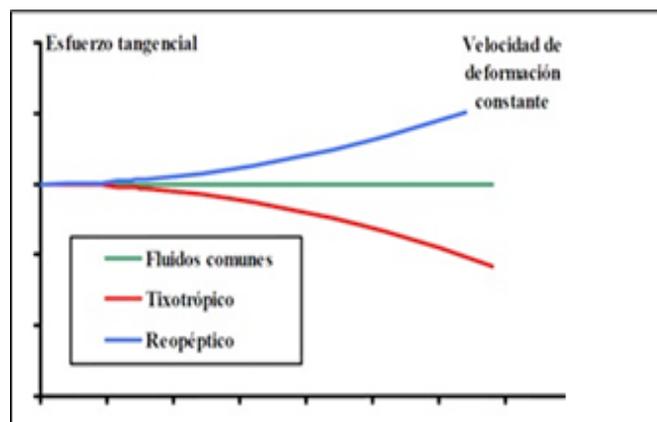


Figura 7. Diagrama típico del comportamiento de tres fluidos incluyendo el tixotrópico (Valentas 1997).

RhaV(1978), citado por Barbosa, Ibarz y Peleg (1993) afirma que su viscosidad aparente y el esfuerzo de corte disminuyen con el tiempo al mantener una velocidad de deformación constante debido al cambio continuo de la estructura del material que puede ser en cualquier caso reversible o irreversible. La tixotropía indica una continua ruptura o reorganización de la estructura dando como resultado una disminución de la resistencia al flujo. Ramírez (2006) explica que los fluidos tixotrópicos se caracterizan por un cambio de su estructura interna al aplicar un esfuerzo. Esto produce la rotura de su larga cadena que forman sus moléculas. Dichos fluidos, una vez aplicado el esfuerzo cortante, solo se puede recuperar su Figura viscosidad inicial tras un tiempo de reposo. La viscosidad va disminuyendo al aplicar una fuerza y acto seguido vuelve a aumentar

al cesar dicha fuerza debido a la reconstrucción de sus estructuras y al retraso que se produce para adaptarse al cambio se denomina fenómeno de histéresis. Entonces, los fluidos tixotrópicos son aquellos cuya viscosidad disminuye con el tiempo manteniendo el esfuerzo de corte constante, por tanto, la viscosidad aparente depende no solo de la relación de la deformación, sino también de la duración (tiempo) de la deformación. La estructura de estos fluidos es destruida debido al esfuerzo de corte aplicado, regenerándose dicha estructura cuando deja de actuar el esfuerzo de corte.

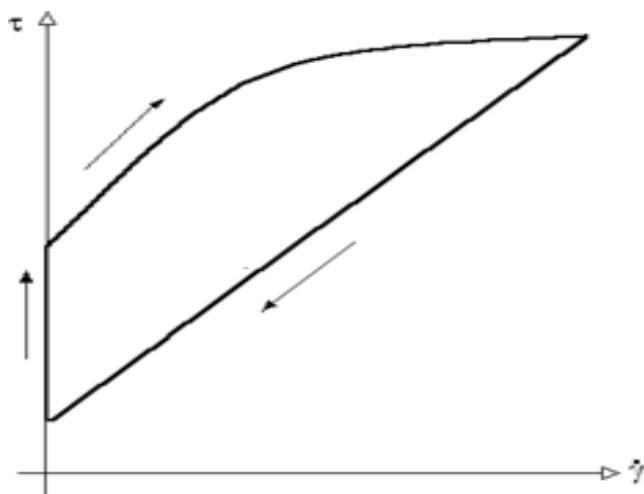


Figura 6. Comportamiento de un cuerpo falso.

Cuando se recupera el valor de la viscosidad inicial se habla de tixotropía reversible y si no se alcanza de nuevo el valor original se habla de tixotropía irreversible (jugo concentrado de naranja) llamada también reomalaxia o reodestrucción.

Según García (2010), el comportamiento del fluido tixotrópico es similar al de pseudoplásticos y dilatantes, aunque estos fluidos presentan un comportamiento viscoso independiente del tiempo. Es importante tener en cuenta la diferencia entre un fluido tixotrópico y otro pseudoplástico. El primero muestra una disminución de la viscosidad a lo largo del tiempo a una velocidad de corte constante, mientras que en la última muestra esta disminución al aumentar la velocidad de corte. A los fluidos que exhiben la propiedad opuesta, en la que la agitación a lo largo del tiempo provoca la solidificación, se les llama reopéticos, a veces anti-tixotrópicos, y son mucho menos comunes.

Tixotropía vs pseudoplasticidad

Los factores que contribuyen a la tixotropía también contribuyen a la pseudoplasticidad, y los factores causantes de la reopexia también causan la dilatancia. La tixotropía es debida a la dependencia del tiempo, semejante a la dependencia de cizalla, y es el resultado de la reorganización estructural, con una disminución de la resistencia al flujo. (Barbosa, Ibarz y Peleg, 1993, pp. 39). Este comportamiento se debe a fuerzas de tipo electroestático que originan un cambio de iones dentro del fluido, provocando atracciones y repulsiones que dan lugar a cambios estructurales. Estos cambios estructurales son los que hace que disminuya la viscosidad con el tiempo. Hay tres tipos de estructuras para la fase dispersa, la formada por una serie de capas denominada Card House, si se forman diferentes varillas se denomina armadura y si la fase dispersa toma formas esféricas se denomina estructura de perlas encadenadas (Ramírez, 2006., p. 13). Representaciones de estos comportamientos se pueden ver en la Figura 8.

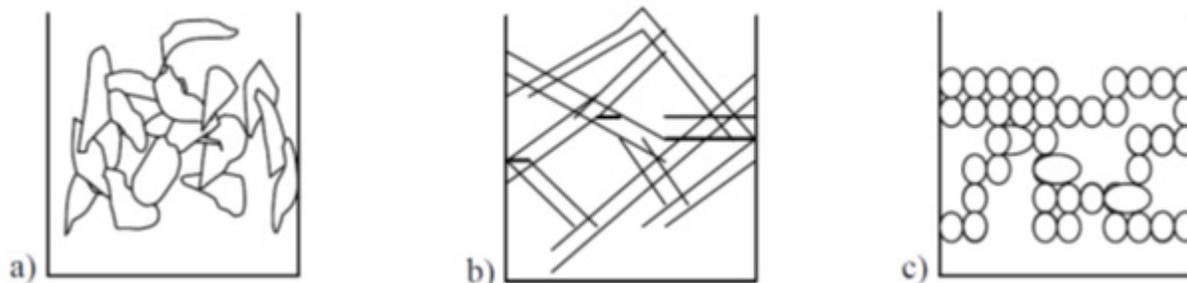


Figura 8. a) Estructura tipo Card House o “Castillo de cartas”. b) Estructura tipo armadura. c) Estructura tipo perlas encadenadas. [1].

Caracterización de un alimento fluido tixotrópico

La forma de identificar si un fluido sigue un comportamiento tixotrópico se consigue aumentando la velocidad de cizalladura durante ciertos intervalos hasta un máximo, y luego haciéndola descender del mismo modo hasta alcanzar el valor inicial. Cuando la velocidad de deformación descende el fluido se espesa hasta su comportamiento inicial. Si esta representación depende del tiempo se forma un ciclo de histéresis, es decir que en la representación los valores obtenidos durante la carga y los obtenidos durante la descarga son distintos, por tanto, se debe tener en cuenta a la hora de realizar la representación gráfica de estos fluidos los intervalos de tiempo en que son realizadas las mediciones (Muller 1977), citado por Domínguez (2018, p.13). Si estos barridos se realizan varias veces, se puede llegar al comportamiento a tiempo infinito, cuando el tiempo ya no influye. Talens (s.f., p. 2) afirma que en los fluidos tixotrópicos... "el comportamiento no se debe a un retardo en la respuesta del producto al esfuerzo o deformación aplicados, la cual es instantánea, sino que se debe a cambios en la estructura del material como consecuencia de la cizalla. Estructuralmente, el área de histéresis se relaciona con el grado de ruptura estructural del producto".

Modelamiento de fluidos tixotrópicos

Se han propuesto diferentes enfoques para la incorporación de la tixotropía en modelos reológicos. Mewis y Wagner, (2009), citado por Alvarado, (2014), argumentaron que este enfoque de modelos tixotrópicos se basa en una ecuación constitutiva en la que los parámetros reológicos son función de un parámetro λ .

Este parámetro expresa el grado instantáneo de estructura (t) y no se refiere a un aspecto físico específico de la estructura. La mayoría de los investigadores lo utilizan como un parámetro escalar que varía entre los valores de 0 de una estructura totalmente desglosada y 1 para la estructura completamente desarrollada.

Los modelos cinéticos estructurales se pueden clasificar de acuerdo a:

la ecuación constitutiva básica;

la manera en que los parámetros reológicos han sido vinculados al parámetro estructural;

la ecuación cinética para λ .

Chiralt, Martínez, González, Talens y Moraga (2012, p. 151-153), establecen algunos modelos

que se utilizan para caracterizar la degradación estructural en productos dependientes del tiempo a un gradiente de velocidad constante:

a) Modelos teóricos

a.1.) Modelo de Tiu y Boger

$$\sigma = \lambda(\sigma_y + K\dot{\gamma}^n) \quad \text{Ec.1}$$

K y n son las constantes reológicas que se determinan a tiempo cero. es un parámetro de ruptura estructural, función del gradiente de velocidad empleado y que depende del tiempo según una ecuación cinética de segundo orden

$$\frac{d\lambda}{dt} = k_1(\lambda - \lambda e)^2 \quad \text{Ec. 2}$$

despejando de la ecuación anterior, derivando y sustituyendo en la ecuación cinética se llega a la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{\sigma - \sigma_e} - \frac{1}{\sigma_0 - \sigma_e} + at \quad \text{Ec. 3}$$

Donde a está relacionada con K_1 . De los datos experimentales a gradiente de velocidad constante, representando $1/(\sigma - \sigma_e)$ frente a t , se obtiene el valor de K_1 , que permite predecir el valor de a a un tiempo dado de flujo.

a.2) Modelo de Figoni y Shoemaker

Se suponen la acción simultánea de arios mecanismos (i) de rotura estructural de primer orden, con constantes de velocidad diferentes (K_i). A un gradiente de velocidad constante, la variación del esfuerzo en función del tiempo viene dada por la siguiente ecuación.

$$\sigma = \sum_i \sigma_{ei} + \sum_i (\sigma_{0i} - \sigma_{ei}) e^{-k_i t} \quad \text{Ec. 4}$$

En la práctica la ecuación se aplica con solo dos términos de la sumatoria, ajustándose a los datos experimentales mediante ajuste no lineal.

b) Modelos empíricos para el ajuste de las curvas a gradiente de velocidad constante.

b.1) Modelo de Weltman

$$\sigma = A - B \ln t \quad \text{Ec. 5}$$

Aguarda relación con el esfuerzo a tiempo cero y B con la velocidad de ruptura estructural, amos son función del gradiente de velocidad.

b.2) Modelo de Hahn

Asume una cinética de primer orden para la ruptura estructural, para lo que asimila la ruptura estructural a la variación de desde tiempo cero hasta un tiempo determinado.

$$\ln (\sigma - \sigma_e) = a - pt \quad \text{Ec. 6}$$

siendo p la constante de velocidad específica de ruptura estructural y el valor del esfuerzo en la situación de flujo de equilibrio. La constante a se corresponde con el ln de la diferencia entre el esfuerzo a t=0 y el valor de equilibrio.

c) Modelos empíricos para el ajuste de las curvas a gradientes de velocidad obtenidas a diferentes tiempos de cizalla.

Estos modelos requieren la obtención de reogramas a diferentes tiempos de cizalla y el ajuste de cada uno de ellos para obtener los correspondientes parámetros reológicos (ej. $\tau(t)$, $K(t)$ n $\tau(t)$). Ahora hay que buscar un modelo que permita ajustar la variación de estos parámetros en función del tiempo. Algunos de estos modelos son los siguientes:

c.1) Modelo de Herschel- Bulkley modificado introduciendo t

$$\sigma = \sigma_0 + K \gamma^n t^{-P} \quad \text{Ec. 7}$$

P: índice tixotrópico

c.2) Ley de Potencia modificad introduciendo t

$$\sigma = K \gamma^n t^{-P} \quad \text{Ec. 8}$$

Un modelo utilizado para definir el comportamiento tixotrópico de alimentos es el de Pauletti y colaboradores (1986), citado por (Alvarado, 2014 p. 196)

$$\tau = (AT) - (BT) \ln t \quad \text{Ec. 9}$$

Donde (AT) es la presión tangencial necesaria para iniciar el cizallamiento [N/m²] y (BT) es el coeficiente de ruptura tixotrópico [N.s/m²], que representa el valor de la disminución de la presión tangencial ocurrida durante un determinado período de cizallamiento, a un gradiente de deformación constante.

CONCLUSIONES

El estudio de la tixotropía en líquidos, bajo diversas condiciones, provee un conocimiento científico específico sobre el comportamiento reológico que permite diferenciarlos con respecto a otros materiales; además su análisis provee información básica para la tecnología industrial y en particular para la de alimentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alvarado, M. (2014). “Comportamiento tixotrópico en alimentos fluidos”. Universidad Nacional de Trujillo. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial. Tesis de pregrado. Trujillo. Perú. Recuperado de : http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:hUh12r6iKh4J:dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/870/3Forder%3DASC%26rpp%3D20%26sort_by%3D2%26etal%3D1%26offset%3D40%26type%3Ddateissued+%&cd=2&hl=es&ct=clnk&gl=ve&client=firefox-b-d. [Consultado el 03/04/2020]

Alvarado, J. (2014). Principios de ingeniería aplicados en alimentos. Segunda edición. Secretaría de la Organización de los Estados Americanos. Programa regional de desarrollo científico y tecnológico. Proyecto multinacional de biotecnología y tecnología de alimentos. Ecuador. Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/302119863>. Consultado el [02/04/2020]

Armstrong, M., Beris, A. y Wagner, N. (s.f.). Dynamic Shear Rheology of Thixotropic Suspensions: Comparison of Structure-Based Models with Large Amplitude Oscillatory Shear Experiments. Center for Molecular and Engineering Thermodynamics, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Delaware, Newark, DE 19716. Submitted to Journal of Rheology.

Barbosa, G., Ibarz, A., y Peleg, M. (1993). Propiedades Reológicas de los Alimentos Fluídos. Revisión. Alimentaria, 242: 39-89. https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/3481/0630_D%C3%ADaz.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Consultado el 03/04/2020]

- Barnes, H. A. (1997). Thixotropy a review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mech.* 70: 1-33. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0257\(97\)00004-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-0257(97)00004-9)
- Chiralt, A., Martínez, N., González, Ch., Talens, P. y Moraga, G. (2012). *Propiedades físicas de los alimentos (Reimpresión 2012)*. España. Editorial UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA.
- Crespí, D. (2015). *Comportamiento de fluidos no newtonianos en intercambiadores de calor tubulares con rascador alternativo*. TESIS DOCTORAL. Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4888/dcl.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Consultado el 01/04/2020]
- Domínguez, I. (2018). “Caracterización del comportamiento de fluidos dilatantes a diferentes temperaturas”. Trabajo de fin de grado. Universidad Carlos III de Madrid. España. Recuperado de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/29542>. [Consultado el 28/03/2020]
- García, R.S., (2010). *Sistemas heterogéneos: Reología*. Universidad Central de Venezuela (UCV). Facultad de farmacia. Departamento de tecnología farmacéutica. Tecnología farmacéutica II. Recuperado de <http://saber.ucv.ve/bitstream/123456789/295/1/Guia%20Reolog%C3%ADa2010RG.pdf>. [Consultado el 02/04/2020].
- García, G. (2006). *Reología básica aplicada, Petroquim.* [Consultado el 03/04/2020].
- Ibarrola, E. (s.f.). *Introducción a los fluidos no newtonianos*. Documento en preparación. Cátedra de Mecánica de los Fluidos- UNCor. [Consultado el 28/03/2020]
- Mewis, J y Wagner, N. (2009). Thixotropy. *Journal of Advances in Colloid and Interface Science* 147–148; 214–227. [https://www.scrip.org/\(S\(lz5mqp453edsnp55rrgjt55\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1530483](https://www.scrip.org/(S(lz5mqp453edsnp55rrgjt55))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1530483). [Consultado el 03/04/2020]
- Muller, H. (1973). *Introducción a la reología de los alimentos*. Editorial Acribia. Zaragoza. España
- Quintáns, L. 2008. *Reología de Productos Alimentarios*. Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad Santiago de Compostela: Disponible en http://dspace.usc.es/bitstream/10347/2556/1/9788498872187_content.pdf. [Consultado el 02/04/2020]
- Ramírez, J. (2006). *Fundamentos de la reología de alimentos, Introducción a la reología*, E-books, Colombia.
- Rha, C. (1978). Rheology of foods, *Food Technol.* 22, 77-82. https://www.researchgate.net/publication/284594190_Rheology_of_fluid_foods. [Consultado el 30/03/2020]
- Steffe, J. (1996). *Rheological Methods in Food. Procees engineering*. Segunda edición. East land sing. USA. Freeman Press Michigan State University. <https://www.coursehero.com/file/14656418/Rheological-methods-in-food-processing-engineering/>. [Consultado el 30/03/2020]
- Talens, P. (2007). *Caracterización del comportamiento reológico de un alimento fluido tixotrópico*. Universitat Politècnica de Valencia. Departamento Tecnología de los Alimentos. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/68327/Talens%20-%20Caracterizaci%C3%B3n%20del%20comportamiento%20reol%C3%B3gico%20de%20un%20alimento%20fluido%20pseudopl%C3%A1stico.pdf?sequence=1>. [Consultado el 03/04/2020]
- Velásquez, H. J. (2006). *Reología de fluidos y su aplicación en el área de los alimentos*. Bdigital. Repositorio institucional. SINAB. Sistema Nacional de Bibliotecas-Vri. Vicerrectoría de investigación. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/57124/>. [Consultado el 28/03/2020]
- Velásquez F., y Velezmoro C. (2018). *Propiedades reológicas y viscoelásticas de almidones de tubérculos andinos*. *Scientia Agropecuaria* vol.9 no.2 Trujillo abr. /jun. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.02.03>