

Raúl Díaz Ocampo

Reología aplicada a sistemas alimentarios



compAs

Grupo de capacitación e investigación pedagógica



**Reología aplicada
a sistemas alimentarios**

Autor:
Raúl Díaz Ocampo

Reología aplicada a sistemas alimentarios

Autor.
Raúl Díaz Ocampo



Primera edición: noviembre 2018

© Universidad Técnica Estatal de Quevedo 2018
© Ediciones Grupo Compás 2018

ISBN: 978-9942-33-068-0

Diseño de portada y diagramación: Grupo
Compás

Este texto ha sido sometido a un proceso de evaluación por pares externos con base en la normativa del editorial.

Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

Guayaquil-Ecuador 2018

Cita.
O, Campo, (2018) Reología aplicada a sistemas alimentarios , Editorial Grupo Compás,
Guayaquil Ecuador, 102 pag

NOTA DE AGRADECIMIENTO

Al Dr José María Franco Gómez, Director del Grupo de Investigación “Ingeniería de Fluidos Complejos” de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Huelva UHU-España, por su valiosa ayuda en la elaboración de este texto y, a todos aquellos que de alguna manera han contribuido para mejorar el contenido de este libro.

PREFACIO

El objetivo de este texto es introducir al lector en los conceptos básicos que conforman la base de la disciplina científica denominada Reología.

La reología se ocupa preferentemente de la deformación de los cuerpos, pero con frecuencia trata también de la fricción entre sólidos, del flujo de líquidos e incluso de la reducción a partículas. La reología alimentaria es la extensión de esta disciplina a los productos alimentarios.

Se pretende que el lector que se introduce en esta disciplina consiga en este manual los elementos esenciales para comprender las ecuaciones constitutivas o modelos de flujo más sencillos, los cuales son los más utilizados en la práctica. Los contenidos que se desarrollan en el presente trabajo están directamente relacionados con los contemplados en la unidad de aprendizaje “Reología y Fenómenos de Transporte” de la Carrera de Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

Como se podrá apreciar, el libro está dividido en seis capítulos. El primero trata acerca de los antecedentes históricos, definiciones, clasificación, aplicaciones de la reología, así como la caracterización reológica de un material. Se presentan y discuten las principales aplicaciones de la reología en la industria alimentaria.

En el segundo capítulo se describen conceptos básicos fundamentales de la reología, cizalla simple, deformación y velocidad de deformación, tensor esfuerzo y se dedica especial atención a las características fundamentales de la viscosidad, una propiedad de transporte que cuantifica la conductividad de cantidad de movimiento a través de un medio conductivo o fluido. Puede también interpretarse como la resistencia que ofrecen los fluidos a ser deformados, cuando son sometidos a un esfuerzo.

El tercer capítulo se centra en la descripción de los tipos de fluidos: newtonianos y no newtonianos y los diferentes comportamientos reológicos enmarcados en este último concepto.

El cuarto capítulo trata acerca de los modelos reológicos, el quinto sobre la viscoelasticidad y el último sobre aplicaciones reológicas en frutas y hortalizas.

Se presentan las más importantes técnicas reométricas utilizadas para las evaluaciones reológicas, cuyo objetivo es abarcar tanto ensayos tecnológicos como científicos, entre los cuales se incluyen medidas de viscosidad, curvas de flujo, determinación de propiedades viscoelásticas y la evaluación de los módulos de pérdida y almacenamiento.

El autor expone además algunas experiencias como resultado de investigaciones en caracterización reológica de alimentos, que pueden ser de interés práctico para estudiantes, ingenieros y especialistas en el área de alimentos.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO	Pág.
NOTA DE AGRADECIMIENTO	2
PREFACIO	3
CAPITULO 1	8
1.1 Introducción	8
1.2 La Reología como ciencia	8
1.3 Antecedentes Históricos	9
1.4 Definiciones	11
1.5 Clasificación de la reología	12
1.7 Aplicaciones de la reología de los alimentos.....	13
1.8 Caracterización reológica de un material	17
1.9 Bibliografía	18
CAPITULO 2	19
2. Conceptos Básicos.....	19
2.1. Tensor esfuerzo	19
2.2. Esfuerzo de cizalla σ	20
2.3. Deformación v y velocidad de deformación Y	21
2.4. Cizalla simple.....	23
2.5. Ley de newton	24
2.6. Viscosidad	26
2.7. Tipos de viscosidad	28
2.7.1. Viscosidad dinámica o absoluta	28
2.7.2. Viscosidad aparente “ η ”	28
2.7.3 Viscosidad cinemática, v ,	29
2.8. Curvas de flujo y viscosidad.....	29
2.9. Variables que influyen en la viscosidad	30
2.9.3. Variación de la viscosidad con la presión.....	32
2.10. Bibliografía.....	32
CAPITULO 3	33
3. Tipos de fluidos.....	33
3.1. Fluidos, concepto y clasificación	33
3.2. Fluidos newtonianos.....	36

3.3.	Fluidos no newtonianos.....	38
3.4.	Fluidos independientes del tiempo	43
3.5.	Fluidos seudoplásticos.....	43
3.6.	Fluidos dilatantes.....	49
3.7.	Fluidos plásticos de Bingham.....	50
3.8.	Fluidos dependientes del tiempo.	51
3.9.	Tixotropía.....	52
3.10.	Reopexia.....	53
3.11.	Fluidos viscoelásticos.....	54
3.12.	Bibliografía.....	56
CAPITULO IV.....		57
4.	Modelos reológicos de flujo	57
4.1.	Modelos reológicos de flujo más utilizados en alimentos	57
4.2.	Modelo de Ostwald-de Waele o Ley de la Potencia.....	59
4.3.	Modelo de Ellis	61
4.4.	Modelo de Casson	62
4.5.	Modelo de Sisko.....	63
4.6.	Modelo de Cross.....	63
4.7.	Modelo de Carreau	64
4.8.	Modelo de Herschel Bulkley	64
4.9.	Ajuste a Modelos Reológicos.....	65
4.10.	Bibliografía.....	67
CAPITULO 5.....		68
5.	Viscoelasticidad	68
5.1.	Concepto de viscoelasticidad	68
5.2.	Modelo de Hooke	73
5.3.	Modelos Analógicos.....	73
5.4.	Modelo de Maxwell.....	73
5.5.	Modelo de Kelvin.....	75
5.6.	Región Viscoelástica Lineal.....	75
5.7.	Caracterización de Fluidos Viscoelásticos	77
5.8.	Funciones Viscoelásticas Dinámicas.....	77
5.9.	Ensayos Oscilatorios O Dinámicos	79
5.9.1.	Barrido de Esfuerzo de Cizalla	81

5.9.2.	Barrido de Frecuencia.....	82
5.9.3.	Barrido de Temperatura.....	85
5.10.	Ensayos de relajación	88
5.11.	Ensayo de Fluencia o Creep	88
5.11.1.	Caracterización del comportamiento de flujo independiente del tiempo.....	89
5.11.2.	Barridos de Velocidad de Deformación	90
5.11.3.	Barridos de Tiempo	90
5.12.	Bibliografía.....	91
CAPITULO 6.....		93
6.	Aplicaciones Reológicas en la Industria.....	93
6.1	Factores que influyen en el comportamiento reológico de los alimentos	93
6.2	Aplicaciones Reológicas en Alimentos derivados de Frutas y Hortalizas.....	96
6.3	Bibliografía.....	98
GLOSARIO		100

CAPITULO 1

CAPITULO 1

1.1 Introducción

1.2 La Reología como ciencia

La reología, pese a ser una ciencia relativamente joven, ya que aparece formalmente en 1929, responde a la demanda del desarrollo tecnológico y encuentra muchas aplicaciones en la industria química, farmacéutica y alimentaria, todos los sectores industriales han incursionado en este campo. Con respecto al último aspecto, producir en forma competitiva un yogurt de textura agradable al paladar, un dulce de leche repostero untable en diferentes grados, una mayonesa de firme textura, una mermelada de buen nivel de untuosidad, etc. requiere de conocimientos reológicos.

La reología al estudiar la deformación y el flujo de los materiales, nos permite acceder a información cualitativa y cuantitativa para caracterizar los parámetros reológicos como viscosidad, propiedades elásticas y viscoelásticas, diseñar equipos sobre la base de la caracterización de la materia a procesar y diseñar nuevos productos con respuestas reológicas bien definidas.

La reología se constituye modernamente en piedra angular para la Ingeniería del Producto, enfocada no hacia los procesos de producción como tradicionalmente se ha venido haciendo, sino a las características y propiedades del producto final, los cuales son cada vez más complejos, requiriendo el estudio básico y aplicado de una gran diversidad de materiales, que constituyen sistemas como emulsiones, suspensiones, etc.

La Reología alimentaria está despertando un progresivo interés, tanto desde el punto de vista académico como industrial, ya que sus aplicaciones son numerosas en el control de calidad, textura, ingeniería de procesos, desarrollo de productos y optimización de formulaciones.

La Reología se distingue por su carácter multidisciplinario, ya que un conjunto de profesionales y técnicos utilizan los conocimientos reológicos para entender y modelizar el comportamiento de diversos materiales, facilitar la formulación fisicoquímica, la obtención de comportamientos deseados tales como capacidad de suspensión, textura, facilidad de esparcimiento, etc y permiten determinar los equipos y los instrumentos necesarios para mezclar, agitar, bombear o drenar dichos materiales.

1.3 Antecedentes Históricos

Se considera como antecedentes básicos:

- Canto de Débora “Los montes fluyeron a la vista del señor. Como el monte Sinai delante del Señor Dios. “Biblia, Libro de Jueces, 5, 5 (1.400 años A.C).
- “Todo fluye con el tiempo “Heráclito de Éfeso (S. VI AC).
- "Heráclito, yo creo, dice que todas las cosas van y ninguna permanece, y comparando las existencias con el flujo de un río, dice que usted no puede mojarse dos veces en el mismo río". Platón (Cratylus) (S V-IV AC).
- En 1676 Robert Hooke fue el primero que habló de la reología en su libro “Verdadera teoría de la Elasticidad”. Dicha teoría se resumía en lo siguiente: “Si se dobla (aumenta) la tensión, se dobla la deformación”, la deformación es proporcional a la tensión. La potencia de un muelle es proporcional a la tensión aplicada. Al duplicar la tensión (σ) se duplica la deformación (γ) .El sólido recupera su forma original reversiblemente.
- Nueve años después, Isaac Newton publicó en “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” una hipótesis asociada al estado de cizalla simple: definió el líquido viscoso (luego llamado newtoniano), enunciando que la resistencia que se produce como consecuencia de la falta de deslizamiento, entre las partes de un líquido, es proporcional a la velocidad con la cual dichas partes se separan las unas de las otras. Es decir, la energía suministrada al sistema se disipa en forma de calor, no recuperando ni siquiera parcialmente su forma original. Al duplicar la tensión se duplica el gradiente de velocidad. Nace el término viscoelasticidad:

$$\sigma_{yx} = \mu \left(\frac{du_x}{dy} \right) = \mu \frac{u}{\gamma} \quad (1.1)$$

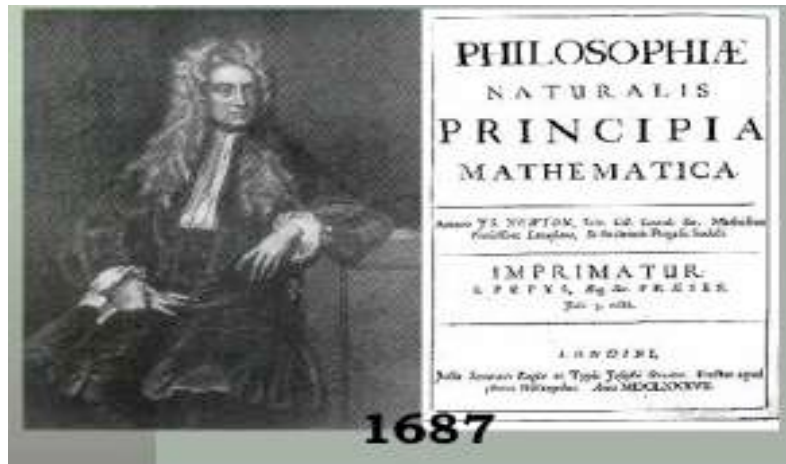


Figura 1.1 Portada del libro “Philosophiae Naturalis Principia Mathematica” de Isaac Newton

- En el siglo XIX, Navier - Stokes y otros, contribuyen al desarrollo de la reología. Teoría tridimensional para describir líquidos newtonianos.
- En 1835, Weber realizando experimentos con hilos de seda comprendió la existencia de un comportamiento intermedio que no podía ser descrito ni por la Ley de Hooke, ni por las definiciones de Newton. Una carga longitudinal producía una extensión inmediata, seguido de un posterior alargamiento con el tiempo. Al eliminar la carga tenía lugar una contracción inmediata, seguida de una contracción gradual hasta recuperar su longitud inicial.
- En 1867, Maxwell propuso un modelo matemático capaz de describir el comportamiento de fluidos con propiedades elásticas.
- En 1906, Albert Einstein, en su tesis doctoral sobre dinámica de suspensiones, demostró teórica y experimentalmente que una suspensión diluida de partículas esféricas posee una viscosidad mayor que la de un líquido como el agua.
- A principios del S XX, Bingham (1922), Herscheld-Bulkley (1926), aparecen modelos que asumen que propiedades como el modelo de rigidez o la viscosidad pueden variar con el esfuerzo aplicado.
- En 1945, Reiner concluye que las sustancias reales pueden presentar comportamiento elástico, viscoso o una combinación de ambos, dependiendo del esfuerzo aplicado y de su duración, todo fluye si se espera el tiempo necesario: Número de Débora De.

- A partir de mediados del siglo XX, Sisko (1958), Cross (1965), Carreau (1972), elaboran modelos que necesitan 4 parámetros y que describen la curva de flujo en general, en un amplio rango de velocidades de deformación.
- El origen de la Reología estuvo ligado al desarrollo de la industria de los polímeros, así como a la cooperación del National Bureau of Standards (Washington) y de American Institute of Physics (Piau, 2001).

1.4 Definiciones

En 1929, el profesor Eugene Bingham, de la Universidad de Lehigh, acuñó el término Reología, con el fin de designar de una forma más precisa la mecánica de los cuerpos deformables, restringida hasta entonces a la elasticidad clásica y la mecánica de fluidos, definiéndola como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia. Esta definición fue aceptada cuando se fundó la Sociedad Americana de Reología (ASR) en 1929.

El término reología proviene del griego ρειν, que significa fluir. Así, la Reología estudia la relación existente entre las fuerzas externas que actúan sobre un cuerpo y la deformación que éstas producen. Dado que el movimiento de cada una de las partículas que forman el cuerpo está sometido a las leyes de la Mecánica, la Reología se basa en dicha rama de la Física.

En 1973, Muller, definió a la Reología como la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia. Ante esta definición cabe la pregunta: ¿Qué es el flujo? En ‘An Introduction to Rheology’, Barnes define al flujo como “una deformación, en la que al menos una parte no es recuperable”. Entonces, el flujo es de hecho una deformación.

En, *Physical Properties of Polymers*, William W. Graessley, en el capítulo titulado “Viscoelasticity and Flow in Polymer Melts”:

Establece que “Deformación significa cambio de forma. Un líquido se deforma mientras fluye por el interior de un tubo, ...”

¿Qué es un fluido? Es aquella sustancia que fluye sin desintegrarse cuando se aplica una presión. Un líquido se deforma mientras fluye por el interior de un tubo, se requiere

diferente esfuerzo de cizalla para permitir que las moléculas de una capa pasen a otra a cierta velocidad. La relación entre esfuerzo y deformación es una propiedad del material.

Por tanto, se puede definir la Reología como el estudio de las relaciones entre esfuerzo y deformación.

Schowaler en 1978 ha definido a la Reología como “el estudio del flujo de materia: principalmente líquidos, pero también sólidos blandos bajo condiciones en las cuales ellos fluyen en vez de deformarse elásticamente.

Según Barnes en 1993, la reología tiene un campo de aplicación muy amplio, ya que abarca casi todos los aspectos de la deformación de los cuerpos bajo la influencia de fuerzas externas. De este modo, la reología puede definirse como la ciencia cuyo objetivo de estudio es la respuesta de la materia bajo la acción de una fuerza, es decir, el estudio de la deformación o el movimiento de la materia causado por las fuerzas de contacto.

Para Rao, en 1999, la Reología es la ciencia encargada de estudiar el flujo y la deformación de la materia, y su campo comprende la aplicación de una fuerza y las propiedades mecánicas de sólidos, semisólidos y líquidos, bajo varios objetivos, que comprenden: conocimiento de las materias primas, productos semiterminados y principalmente, el estudio de las relaciones entre composición, estructura química y propiedades reológicas; análisis de mecanismos fisicoquímicos conducentes a modificaciones de las propiedades reológicas y evaluación instrumental de la textura de los alimentos: dureza, friabilidad, consistencia, adhesión, etc.

Piau en el 2001 define a la Reología como la “ciencia del flujo de la materia que escurre, en respuesta a una fuerza aplicada”.

Como vemos, las definiciones de la Reología son extremadamente vastas: solamente dejan fuera los sólidos indeformables (que en rigor son inexistentes).

1.5 Clasificación de la reología

Markus Reiner en 1956, uno de los fundadores de la Reología, se cuida muy bien en no definirla forma en específica, pero indicó muy claramente las distinciones siguientes:

La **Reología Fenomenológica** trata con materiales homogéneos o casi homogéneos a un nivel fenomenológico, (medios continuos).

La **Macrorreología** mira los materiales tal como ellos aparecen bajo una inspección superficial a ojo desnudo.

La **Microrreología** toma en cuenta la cuasi-homogeneidad y la cuasi-isotropía, deduciendo el comportamiento reológico de los materiales complejos a partir del comportamiento reológico conocido de sus constituyentes.

La **Sicorreología** está relacionada con la percepción sensorial de las propiedades reológicas de los alimentos. Es también la ciencia que se interesa por las relaciones que existen entre las preferencias de los consumidores y las propiedades reológicas de los alimentos.

1.6 Reología de los alimentos

La reología de los alimentos es la extensión de esta disciplina a los productos alimentarios. De esta manera, White en 1970 aportó una definición de la reología restringida a los alimentos: la reología de los alimentos es el estudio de la deformación y flujo de los materiales frescos, productos intermedios y productos finales de la industria alimentaria. El proceso de masticación e ingestión de alimentos implica someter al alimento a una serie de deformaciones y flujos con el fin de descomponer su estructura en una forma más adecuada para su ingestión y posterior digestión. Es por esta razón por la que el estudio de la reología de alimentos ha sido históricamente importante.

1.7 Aplicaciones de la reología de los alimentos

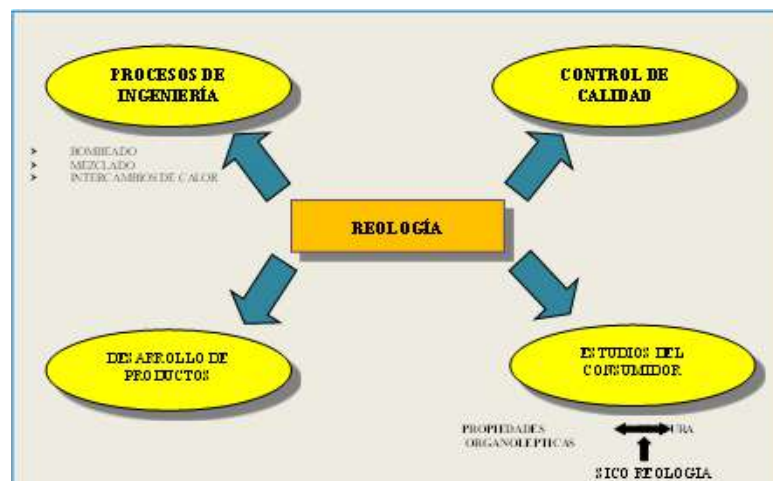


Figura 1.2 Aplicaciones de la Reología en la ingeniería de alimentos (Franco, J.M, 2007)

El conocimiento adecuado de las propiedades reológicas de los alimentos es muy importante por numerosas razones, entre las que destacan las aplicaciones que se detallan a continuación:

- **Obtener información sobre la estructura del alimento:** los datos reológicos pueden aportar información que facilite una mejor comprensión de la estructura o de la distribución de los componentes moleculares de los alimentos, especialmente de los componentes macromoleculares, así como para predecir los cambios estructurales durante los procesos de acondicionamiento y elaboración a los que son sometidos.

Las medidas reológicas se han considerado herramientas analíticas que proporcionan información fundamental sobre la organización estructural de los alimentos, por lo que la respuesta reológica de un material depende de sus interacciones moleculares.

Así pues, los parámetros reológicos medidos en el alimento proporcionan información relativa al comportamiento mecánico de la estructura. La microscopía describe la estructura visible, pero la unión mecánica sólo puede ser conocida intrínsecamente mediante parámetros reológicos, que se ponen de manifiesto bajo la aplicación de tensiones - deformaciones.

Debido a la gran complejidad que presentan las materias primas vegetales y animales, en términos de concentración de sólidos solubles, pH, acidez, la estimación de los parámetros reológicos no es tarea fácil.

Control de calidad: se realiza en la propia línea de producción. Es determinante para la aceptación de productos alimentarios. El comportamiento reológico de los alimentos está relacionado con la estructura del producto y también con la temperatura y la composición.

Las propiedades físicas de las materias primas y los sustratos transformados tienen una gran importancia, tanto por factores intrínsecos de calidad así como por la forma en que tales propiedades condicionan las manipulaciones y manufacturación o transformaciones domésticas que las materias primas experimentan hasta que llegan a ser productos listos para su consumo.

Las medidas de la viscosidad en continuo son cada vez más importantes en muchas industrias alimentarias con objeto de controlar el buen funcionamiento del proceso

productivo, así como la calidad de las materias primas, productos intermedios y acabados.

Por ejemplo, en el caso de productos viscosos o de gelificación débil como los néctares procesados de fruta, mermeladas, jaleas, etc., los componentes solubles e insolubles, en términos de sus tamaños moleculares o bien de sus partículas y su proporción, presentes de forma natural en el producto, determinarán el comportamiento reológico, por lo que deben ser tomados en cuenta en el control de calidad de la formulación de dichos productos.

Pero además, existen diferentes aditivos de uso común en la industria de alimentos para ayudar a conseguir la viscosidad, característica de estos productos utilizando bajos niveles de concentración.

Este es el caso de algunos hidrocoloides, tales como almidón, gelatina, goma guar, goma garrofin, pectina, carragenato, goma xantana, derivados de celulosa arábica, agar, etc. La pectina considerada como fibra dietética soluble es un ingrediente deseable desde el punto de vista nutricional. Sin embargo, también pueden utilizarse otro tipo de fibras no solubles que ayudan a incrementar la viscosidad.

- **Evaluación de la textura de los productos en relación con su aceptabilidad por los consumidores.** Los datos reológicos pueden ser muy interesantes para determinar una serie de parámetros objetivos directamente relacionados con las características sensoriales y subjetivas que definen la textura de un alimento.

Las técnicas sensoriales pueden presentar dificultades para su aplicación (formación y adiestramiento del panel de catadores, obtención de medidas relativas carentes de unidades físicas), puesto que la textura engloba todas las propiedades mecánicas o parámetros reológicos perceptibles por los sentidos, que están relacionados con la aplicación de una deformación, es necesario que se apliquen técnicas reológicas que permitan obtener resultados precisos y reproducibles.

Los atributos texturales son las principales características para el consumidor de un alimento y son la manifestación de sus propiedades reológicas y estructura física. La reología se aplica en la industria alimentaria para caracterizar la consistencia de diferentes productos. Desde el punto de vista reológico, la consistencia se describe

mediante 2 componentes: la viscosidad (lo espeso que es un producto, la dificultad que tiene para fluir) y la elasticidad (“tenacidad” estructural).

Las propiedades relacionadas con la sensación que se percibe al iniciarse la masticación del alimento son de tipo mecánica, entre estas: la dureza, la viscosidad y la fragilidad, muy importantes en la selección y preferencia del alimento, y además reconocidas como el mayor atributo de su calidad.

- **Cálculos en ingeniería de procesos y diseño de equipos.** El conocimiento de las propiedades de comportamiento al flujo y de deformación de los alimentos son imprescindibles en la estimación y cálculo de los fenómenos de transporte de cantidad de movimiento, calor y energía. También es importante conocer la viscosidad para el diseño y dimensionamiento de equipos tales como bombas, extrusores, cintas transportadoras, tuberías, tanques de almacenamiento, pulverizadores para el manejo de alimentos. La viscosidad de las materias primas define las características de tuberías, la necesidad de bombeo y las características mecánicas requeridas.

Por ejemplo, en plantas de procesamiento de naranja existen una serie de etapas unitarias que dependen de la viscosidad.

Así, en la evaporación, las ecuaciones de transferencia de calor contienen un término asociado a la viscosidad. Además, si la viscosidad excede de un valor límite, la concentración del producto que sale debe reducirse para evitar que se queme en el interior del evaporador, produciéndose pérdidas de energía y producto. En la etapa de enfriamiento, generalmente en intercambiadores de calor, la viscosidad se incrementa drásticamente en función de la temperatura final, afectando negativamente a la extracción de calor, consumo de energía y el funcionamiento de la operación. La eficiencia de las bombas necesarias para la circulación del concentrado por la instalación puede también ser optimizada gracias a medidas de viscosidad.

Por lo tanto, el diseño del proceso térmico requiere información precisa del comportamiento del fluido para optimizar las condiciones de proceso que aseguren y mejoren su calidad.

- **Formulación y desarrollo de productos.** Los datos reológicos pueden ser muy interesantes para modificar el proceso de elaboración o la formulación de un producto final de forma tal que los parámetros de textura del producto final se encuentren dentro de los requerimientos del consumidor.

El conocimiento de las propiedades reológicas de una gran cantidad de alimentos son necesarias para diversos propósitos, incluyendo el control de calidad, desarrollo de productos, evaluación sensorial, diseño/optimización y estandarización de procesos y optimización de los saltos de escala desde el lugar de diseño de los productos hasta la línea de producción en planta.

1.8 Caracterización reológica de un material

Darby, en 1976, señala que la caracterización reológica de un material consiste en encontrar la relación en forma de ley matemática, que existe entre el esfuerzo aplicado y la respuesta dinámica resultante en forma de deformación o velocidad de deformación. Dicha expresión matemática puede ser de dos tipos:

Ecuación constitutiva. La ecuación constitutiva o ecuación reológica de estado, relaciona todas las componentes del esfuerzo (volumétrico o desviatorio) y de la deformación. Es una característica única del material y representa el comportamiento reológico más general, definiéndolo para cualquier tipo de deformación o flujo.



Función del material. Es una relación entre ciertos componentes del esfuerzo y la deformación siendo un caso especial de ecuación constitutiva; expresándose como ecuación empírica resultante de un ajuste de datos experimentales.

El conocimiento del comportamiento reológico de un material se puede profundizar si se desarrollan ecuaciones fundamentales que relacionen la composición, la estructura y el material con su procesamiento.

Las funciones materiales y relaciones constitutivas tienen varios usos en la práctica, dependiendo del objetivo del estudio de cada tipo de material. En tal sentido pueden distinguirse dos objetivos principales:

1. Predecir el comportamiento macroscópico del fluido bajo condiciones de proceso para lo cual se hace uso de las relaciones constitutivas y las funciones materiales.
2. Determinar de manera indirecta la microestructura del fluido y evaluar el efecto de varios factores sobre dicha microestructura. Para esto se comparan las funciones materiales o propiedades reológicas.

1.9 Bibliografía

- Barnes, H.A.; Hutton, J.F.; Walters, K.1989. An Introduction to Rheology. Elsevier, Amsterdam.
- Darby, R. 1996. Chemical Engineering Fluid Mechanics. Marcel Dekker, Inc. New York. En cap. 1-2.
- Franco, J.M. 2007. Módulo de Fundamentos de Reología. Master en Formulación y Tecnología del Producto. UNIA-UHU. Huelva.
- Macosko, C.W. 1994. “Rheology: principles, measurements and applications”. VCHPublishers Inc., NY. En cap. 1 a 3.
- Muller, H.G. 1973. Introducción a la reología de los alimentos. Zaragoza: Acribia, p 2-3. Piau, J.-M. 2001. "Comprendre la Rhéologie", Ed. EDP Sciences.
- Reiner (1964) Physics Today volume 17 no 1 page 62 The Deborah Number
- Schowalter, W.R.1978. ” Mechanics of Non-Newtonian Fluids”, Pergamon, citado por Wikipedia –Rheology. ISBN 0-08021778-8.
- White, G.W. 1970. Rheology in food research. En: Journal of food technology. Revista N° 5, p 1-32.

CAPITULO 2

CAPITULO 2

2. Conceptos Básicos

2.1. Tensor esfuerzo

Se define el esfuerzo como una fuerza por unidad de superficie. Tanto fuerza como superficie son magnitudes direccionales que pueden ser representadas por sendos vectores con las tres componentes correspondientes al espacio tridimensional.

Por ello, para definir completamente el esfuerzo es necesario especificar nueve componentes.

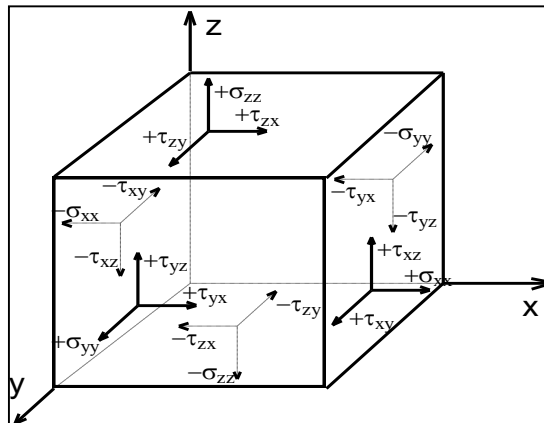


Figura 2.1 Componentes del tensor esfuerzo

$$\overline{\overline{\sigma}}_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

i: orientación de la cara sobre la que actúa la fuerza en elemento material.

j: indica la dirección de la fuerza.

Esfuerzos normales: Actúan sobre una cara en dirección perpendicular a su superficie.

Esfuerzos de cizalla, cortantes o tangenciales: Actúan sobre una cara paralelamente a su superficie.

$$\overline{\overline{\sigma}}_{ij} = -P \overline{\overline{\delta}}_{ij} + \overline{\overline{\tau}}_{ij} \quad (2.2)$$

Es, por tanto, un tensor de segundo orden que se representa por σ_{ij} y se denomina tensor de tensiones.

Cada componente se representa mediante dos subíndices. El primer subíndice se refiere a la orientación de la cara sobre la que actúa la fuerza en el elemento material y el segundo indica la dirección de la fuerza.

Sobre un elemento del material pueden actuar dos tipos de esfuerzo: los esfuerzos normales y los esfuerzos de cizalla (de corte o tangenciales).

2.2. Esfuerzo de cizalla σ

Cuando en este modelo se aplica una fuerza F a la placa superior con la superficie A en la dirección indicada, el líquido contenido en la ranura entre las placas comienza a fluir.

El cociente entre la fuerza F y la superficie de contacto A con el líquido se define como esfuerzo de cizalla (figura 3).

El esfuerzo de cizalla (esfuerzo de corte) es uno de los parámetros más importantes y fundamentales para el cálculo de la viscosidad en un reómetro.

La velocidad de flujo del líquido, que se obtiene por medio del esfuerzo de cizalla efectivo, se determina a través de la resistencia del líquido al flujo, esto es, a través de la viscosidad η .

Se define como la fuerza por unidad de área necesaria para alcanzar una deformación determinada.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

En el sistema cgs las unidades de esta magnitud son Dinás / cm²

$$\tau = \frac{F(\text{Fuerza})}{A(\text{Área})} = \frac{\text{dina}}{\text{cm}^2} \quad (2.4)$$

En el sistema internacional, la unidad “Pascal” sustituye a la antigua unidad.

$$\tau = \frac{F(\text{Fuerza})}{A(\text{Área})} = \frac{N(\text{Newton})}{\text{m}^2} = Pa(\text{Pascal}) \quad (2.5)$$

En el caso de líquidos, la mayor parte de las medidas reológicas son hechas con base en la aplicación de esfuerzos de cizalla.

2.3. Deformación ν y velocidad de deformación $\dot{\gamma}$

2.3.1. Deformación γ

Es generada cuando un material está comprendido entre dos placas paralelas y la placa superior es sometida a una fuerza “F” que le obliga a desplazarse linealmente una distancia “x”, mientras que la placa inferior se mantiene estática. Cada elemento sufrirá una deformación que viene dada por:

$$\gamma = dx/dy \tag{2.6}$$

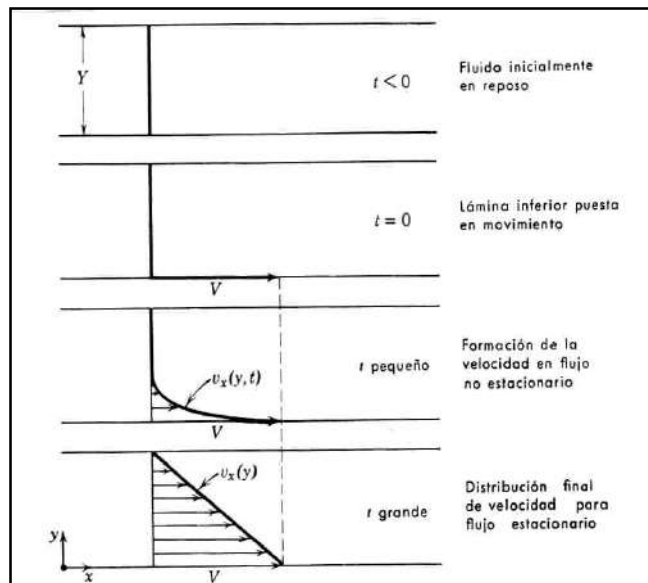


Figura 2.2. Deformación en términos de velocidad

γ que se denomina deformación por cizalla, siendo “dx” el desplazamiento de la superficie superior del elemento con respecto a la superficie inferior en la dirección x, y “dy” la altura del elemento.

En términos de deformación:

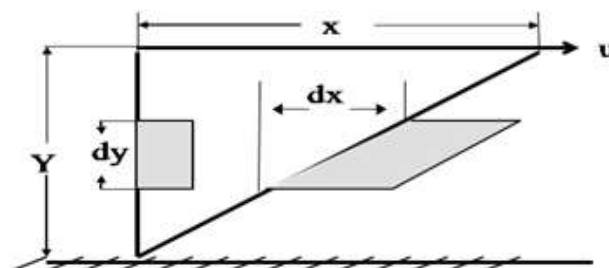


Figura 2.3 Deformación en términos de desplazamiento

Como la deformación es uniforme e independiente del tamaño del elemento, puede representarse también en función de la distancia entre placas, “ h ”, y del desplazamiento de la placa superior, “ x ”:

$$\gamma = x/h \quad (2.7)$$

La deformación es la variación relativa de posiciones en x respecto al espesor de placas (Y).

$$\gamma = \frac{dx}{dy} = \frac{x}{y} \quad (2.8)$$

El gradiente se puede representar en forma diferencial (en estado estacionario).

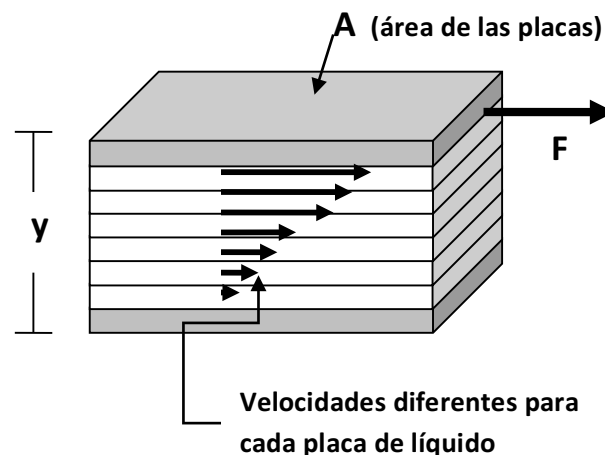
$$\frac{u}{Y} = \left(\frac{du_x}{dy} \right) \quad (2.9)$$

En donde u es la velocidad cuya componente única es x (horizontal).

Símbolo: γ Unidades: Adimensional

2.3.2. Velocidad de deformación $\dot{\gamma}$

El esfuerzo de cizalla σ obliga al líquido a fluir en la ranura obteniéndose una caída de velocidades entre ambas placas, que es diferente según el líquido. La velocidad máxima de flujo V_{max} se obtiene en la superficie límite superior, en cambio la velocidad de flujo decrece oblicuamente hacia la superficie límite inferior que está en contacto con la placa estacionaria.



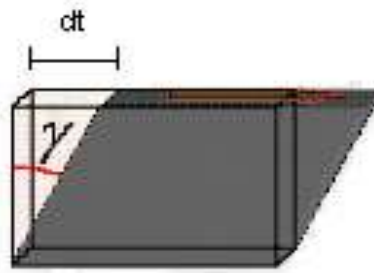


Figura 2.4 Velocidad de deformación entre dos placas.

La velocidad de deformación (de cizalla) nos aporta la velocidad de variación de la deformación, el cambio de velocidad a través de la distancia entre dos placas y la definimos matemáticamente de la siguiente forma:

$$\dot{\gamma} = \frac{dy}{dt} = \frac{d(dx/dy)}{dt} = \frac{d\left(\frac{dx}{dt}\right)}{dy} \frac{du_x}{dy} \quad (2.10)$$

Es decir, en cizalla simple la velocidad de cizalla es constante a través del material. Para producir un movimiento totalmente uniforme por cizalla simple es necesario que las dos placas paralelas sean de extensión infinita.

El gradiente de velocidades equivale a la velocidad de deformación, entre las capas laminares genera un flujo de fuerza mecánica (esfuerzo de cizalla).

Símbolo: $\dot{\gamma}$. Unidades: s^{-1}

Nota: el punto significa que el gradiente de velocidad es la derivada respecto al tiempo de deformación que se produce, debido al esfuerzo de cizalla, en la lámina de fluido.

La relación entre la deformación y la causa de ella es un esfuerzo y es una propiedad intrínseca del material. Por tanto, es esencial en primer término comprender bien las relaciones entre el esfuerzo y la deformación.

La sollicitación mecánica puede venir representada por el esfuerzo, en cuyo caso la respuesta del material se cuantifica mediante la deformación o la velocidad de deformación o viceversa.

El caso más sencillo de deformación es el de “cizalla simple”.

2.4. Cizalla simple

La cizalla simple es uno de los casos más elementales de deformación.

Considérese un material contenido entre dos placas paralelas, una inferior que está inmóvil y otra superior que se desplaza en su propio plano una distancia x al estar sometido a una fuerza F que actúa paralela a la placa

La parte media del fluido entre las capas, se mueve a una velocidad distinta a distintas alturas, creándose un gradiente o perfil de velocidades, donde cada lámina se mueve paralela a las demás, aunque a distintas velocidades. Este gradiente “ Y ” depende del tiempo (régimen transitorio), hasta un momento en el cual ya no varía más, siendo constante.

Cuando la velocidad ya no depende del tiempo sino solo de “ Y ”, entonces es un régimen estacionario.

El modelo de flujo de un líquido entre dos placas planas paralelas suficientemente grandes, sirve para definir las magnitudes “esfuerzo de cizalla” y “velocidad de deformación”.

Consideremos dos placas paralelas de área A separadas por una distancia D . es conveniente imaginar que D es pequeña en comparación con cualquier dimensión de las placas para evitar el efecto de borde.

Entre las placas hay sustancia fluida uniforme. Si una de las placas se deja en reposo mientras la otra se mueve con velocidad uniforme V_0 en una dirección paralela a su propio plano, en condiciones ideales el fluido sufre un movimiento deslizante puro y se crea un gradiente de velocidad de flujo de magnitud D/V_0 en el mismo.

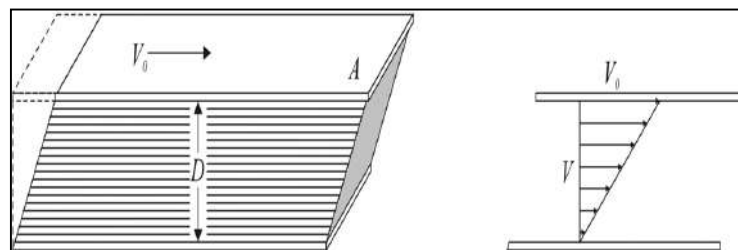


Figura 2.5 Flujo en una ranura entre dos placas planas paralelas desplazadas una respecto a otra.

2.5. Ley de newton

Isaac Newton encontró la ley elemental de la reología, que describe el comportamiento de un líquido ideal:

Según Newton el esfuerzo de cizalla o de corte, es proporcional a la velocidad de deformación (gradiente de velocidad) (du/dy), o también denominada como D . Si se duplica la fuerza, se duplica el gradiente de velocidad:

$$\tau = \mu \cdot \frac{du}{dy} = \mu \cdot D \quad (2.11)$$

Esta fórmula se denomina *Ley de Newton*, que es aplicable actualmente aún para unos fluidos determinados (Newtonianos).

La ley de Newton es la relación constitutiva (o modelo matemático) más sencilla de los fluidos viscosos, puesto que una sola función material, la viscosidad, es suficiente para caracterizar el comportamiento del fluido.

La Ley de Newton describe bastante bien el comportamiento de líquidos homogéneos de bajo peso molecular, tales como agua, aceites orgánicos e inorgánicos y todo tipo de soluciones (electrolíticas, de ácidos y de bases), así como el comportamiento de soluciones poliméricas, emulsiones y suspensiones muy diluidas.

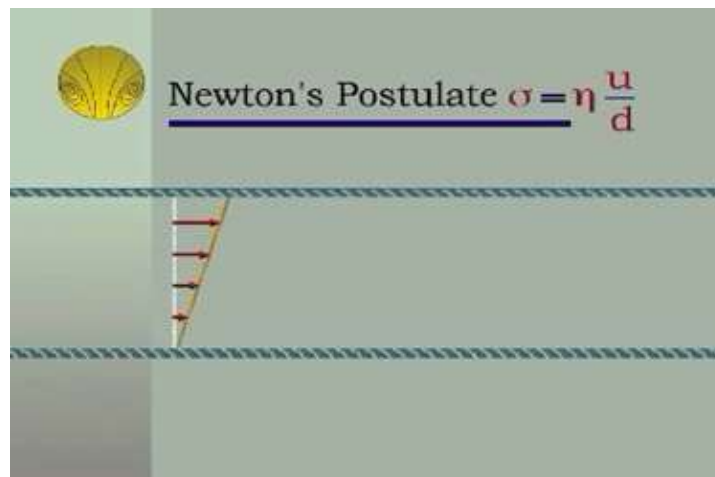


Figura 2.6 Ley de Newton.

La glicerina y el agua son ejemplos muy comunes que obedecen la Ley de Newton. Para la glicerina, por ejemplo, la viscosidad vale 1000 mPa·s, en cambio para el agua la viscosidad vale 1 mPa·s, es decir, es mil veces menos viscosa que la glicerina.

2.6. Viscosidad

Una paradoja reológica:

La miel podrá fluir a través del orificio de un embudo, mientras esto no ocurrirá con la mayonesa. Sin embargo, la mayonesa es mucho más fácil de esparcir sobre una rodaja de pan que la miel.

Tomemos otro ejemplo prosaico relacionado con la mayonesa. Cuando esta se encuentra en su recipiente en reposo, o si se voltea el recipiente, la mayonesa no fluye, comportándose en todo como un sólido. Si se golpea suavemente el recipiente de mayonesa, se puede observar que esta se deforma un poco, tal como un sólido elástico. Ahora bien, es muy fácil extender la mayonesa sobre un pan, comportándose entonces como un fluido.

Definición de Viscosidad (η)

La viscosidad es una propiedad de transporte que cuantifica la conductividad de cantidad de movimiento a través de un medio conductor o fluido.

La viscosidad es “lack of slipperiness”, sinónimo de fricción interna, resistencia al flujo.

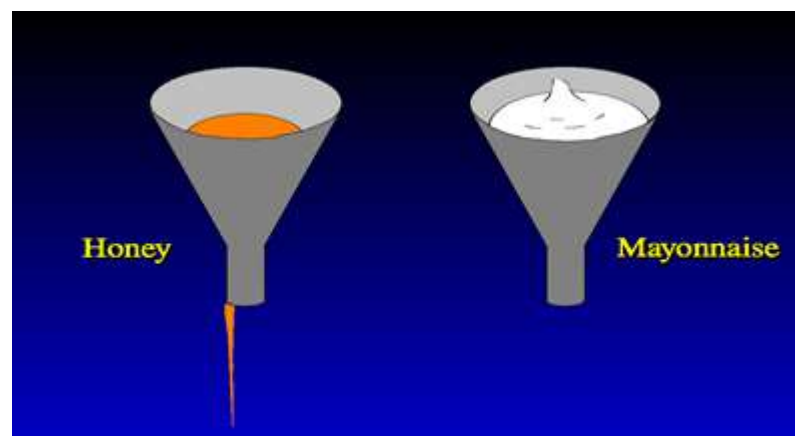


Figura 2.7 Flujo de miel y mayonesa.

Isaac Newton denominó la constante de proporcionalidad como viscosidad (expresada por el símbolo μ):

$$\sigma_{yx} = \mu \left(\frac{du_x}{dy} \right) = \mu \frac{\mu}{Y} \quad (2.12)$$

De modo que: $\sigma = \mu \cdot \gamma$, donde, σ : esfuerzo cortante [mPa], μ : viscosidad dinámica [mPa·s] y $\dot{\gamma} = \mu/\gamma$: velocidad de deformación [s^{-1}].

Las unidades de la viscosidad son de Pa.s (Pascal por segundo) aunque es más común el uso del mPa.s (mili Pa.s) o cP (centi Poise), los cuales equivalen a la milésima parte de un Pa.s. De este modo $1000 \text{ cP} = 1000 \text{ mPa.s} = 1 \text{ Pa} = 10 \text{ P}$.

Esta última unidad, el Poise (P), es igual a un g/cm s. La $\sigma = \mu \cdot \gamma$ se conoce como la Ley de Newton de la viscosidad; los fluidos que se comportan acorde a esta ley, o fluidos Newtonianos, exhiben una relación lineal entre el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación (gradiente de velocidad), lo cual significa que la viscosidad es constante con respecto a estas variables.

Unidades Las unidades de viscosidad más utilizadas son los *milipascales por segundo* [mPa·s]. Se debe tener en cuenta que: $1000 \text{ mPa}\cdot\text{s} = 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Además, el sistema cegesimal aún se sigue usando, siendo la unidad de medida el *centiPoise* [cp]. La conversión de unidades entre los dos sistemas es: $1 \text{ cp} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, $1 \text{ Poise} = 1 \text{ g/cm}\cdot\text{s}$.

La viscosidad es un término de gran relevancia, ya que será su valor el que nos aporte la información suficiente para anticipar la calidad del producto que se pretende medir.

Para conocer, por tanto, este parámetro reológico, es necesario diseñar un instrumento capaz de medir con exactitud los términos de los que depende la viscosidad.

Fluidos	Viscosidad aproximada (mPa·s)
Leche condensada	Aprox. 2000
Glicerol	10^3
Aceite de oliva	10^2
Crema de leche	10
Sangre (a 37°C)	4-15
Zumo de uva	2-5
Leche entera	2.2
Leche desnatada	1.7

Agua	1
Clorobenceno	0.9

Cuadro 1. Valores de viscosidad para diversas sustancias.

2.7. Tipos de viscosidad

Existen tres tipos principales de viscosidad: la viscosidad dinámica, la viscosidad cinemática y la viscosidad aparente.

2.7.1. Viscosidad dinámica o absoluta

Denominada “ μ ”. Si se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación) se define como la *pendiente* en cada punto de dicha curva.

2.7.2. Viscosidad aparente “ η ”

Se define como el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación σ/γ para cada γ , es decir la pendiente que une al origen en ese punto. Este término es el que se utiliza al hablar de “viscosidad” para fluidos no newtonianos que tienen un comportamiento no lineal.

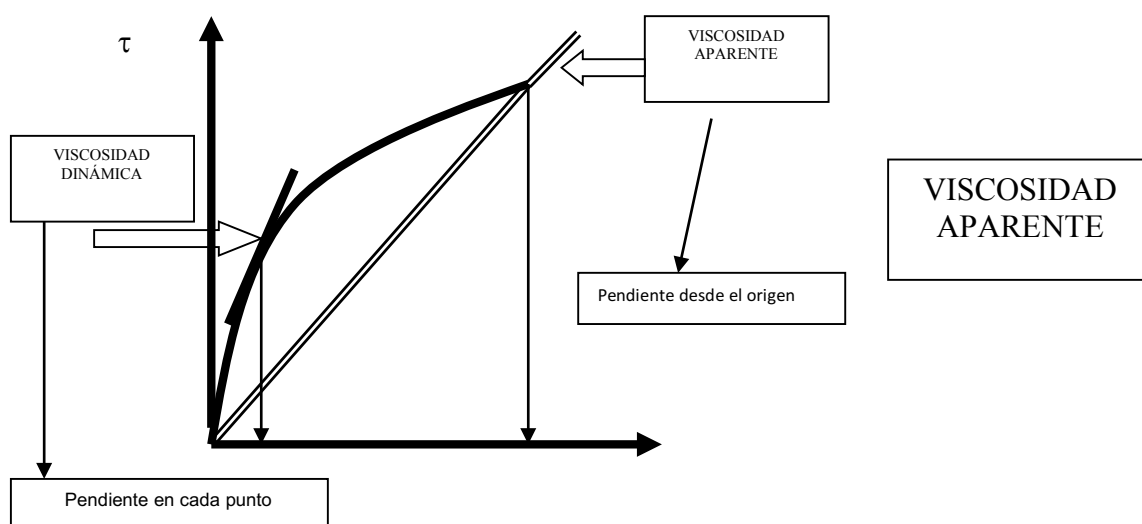


Figura 2.8 Curva de Fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente

La viscosidad de un fluido Newtoniano se suele representar con la letra griega μ , pero para fluidos no Newtonianos la viscosidad aparente se suele representar entonces con la letra griega η . En el caso de fluidos no newtonianos la viscosidad dinámica es igual a la viscosidad aparente.

2.7.3 Viscosidad cinemática, ν ,

Relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido utilizado. Las unidades más utilizadas de esta viscosidad son los centistokes [cst]. 1 stoke = 100 centistokes = cm^2/s . Su ecuación es la siguiente:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.13)$$

Es importante porque se puede calcular en varios tipos de viscosímetros capilares y se utiliza en el diseño de muchas operaciones básicas industriales.

2.8. Curvas de flujo y viscosidad

La relación entre el esfuerzo de cizalla (o de corte) y la velocidad de deformación (gradiente de velocidad) que describe el comportamiento de flujo de un líquido se representa en un diagrama, con el esfuerzo de cizalla en la ordenada y la velocidad de deformación en la abscisa.

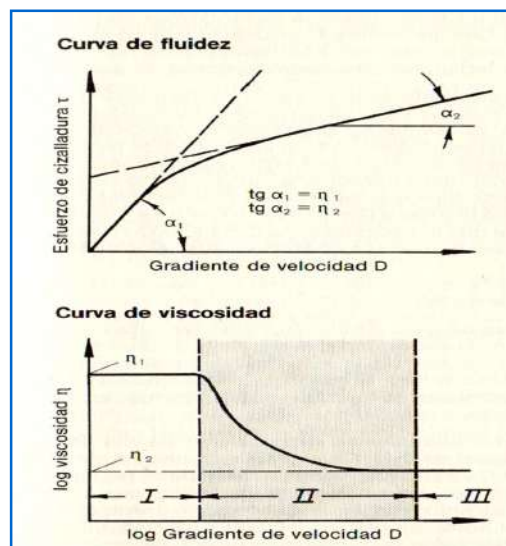


Figura 2.9 Curva de Fluidez y curva de viscosidad

2.9. Variables que influyen en la viscosidad

Las variables más importantes que afectan a la viscosidad son:

- a) Velocidad de deformación
- b) Temperatura
- c) Presión
- d) Concentración

2.9.1. Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación

Dicha variación es importante en la clasificación de los diferentes tipos de fluidos que se pueden encontrar desde el punto de vista reológico. El siguiente cuadro muestra el rango de gradientes de velocidad de diversos procesos muy conocidos y sus aplicaciones.

Tipo de proceso	Rango típico de Velocidad de Deformación (s^{-1})	Aplicaciones
Sedimentación de partículas finas sobre un líquido	10^{-6} - 10^{-4}	Medicinas, pinturas
Nivelación debido a tensión superficial	10^{-2} - 10^{-1}	Pinturas, tintas de impresión
Escurreo bajo gravedad	10^{-1} - 10^1	Dar mano de pintura, blanquear lavabos
Extrusión	10^0 - 10^2	Polímeros
Flujo de cremas fluidas	5 - 10	Alimentos - Cosmética
Untar mantequilla sobre pan	10 - 50	Alimentos
Amasado	10^1 - 10^2	Alimentos
Masticar y tragar	10^1 - 10^2	Alimentos
Revestimiento por inmersión	10^1 - 10^2	Alimentos
Mezclado y agitado	10^1 - 10^3	Líquidos
Verter líquido de una botella	40 - 200	Alimentos/Farmacía
Flujo en tuberías	10^0 - 10^3	Bombeado
Pulverizado y Pintado	10^3 - 10^4	Secado en spray, pintura
Fricción	10^4 - 10^5	Cremas y lociones para piel
Lubricación	10^3 - 10^7	Motores de gasolina

Cuadro 2. Intervalos aproximados de velocidad de deformación (cizalla) en diversos procesos.

2.9.2. Variación de la viscosidad con la temperatura

La temperatura tiene una gran influencia en las propiedades físicas de los alimentos, y en concreto, en su viscosidad. Este parámetro es de especial importancia en las líneas de procesado, condicionando la circulación por diversos equipos y, debe tenerse en cuenta al aplicar tratamientos térmicos de conservación.

La viscosidad depende de la temperatura. Esta correlación está representada por una ecuación del tipo Arrhenius:

$$\mu = A \cdot e^{\frac{B}{T}} \quad (2.14)$$

$$\ln \mu = A - Ea/RT \quad (2.15)$$

Donde:

μ = viscosidad dinámica (Pa·s), (newtoniana)

A = parámetro de ajuste (constante dependiente del líquido)

Ea = energía de activación para la viscosidad (J / kg.mol K)

R = constante universal de los gases (1,987 cal / g.mol K)

T = temperatura absoluta (K)

En fluidos que cumplan la Ley de la Potencia, el índice de consistencia puede describirse mediante la Ley de Arrhenius, siempre que el valor de n sea constante o en su defecto habría que cuantificar la dependencia de n con la temperatura. El valor de n es prácticamente constante con la temperatura, por tanto:

$$\ln K = k_0 - Ea/RT \quad (2.16)$$

La viscosidad de un líquido depende de la temperatura. A alta temperatura los líquidos son más fluidos mientras que a baja temperatura son más viscosos. Esto es debido a que la energía térmica hace más débiles las fuerzas de atracción entre las moléculas, que suelen ser fuerzas de Van der Waals.

Como se deduce de la ecuación, la viscosidad disminuye con la temperatura. Esto es debido al hecho de que, conforme aumenta la temperatura, las fuerzas viscosas son superadas por la energía cinética, dando lugar a una disminución de la viscosidad, efecto que ha de tenerse en cuenta para una determinación rigurosa de la misma. En la medición, la temperatura debe permanecer prácticamente constante.

2.9.3. Variación de la viscosidad con la presión

La viscosidad en líquidos aumenta exponencialmente con la presión. Excepcionalmente, para el agua a temperaturas menores de 30° C la viscosidad disminuye. Los cambios de viscosidad con la presión son bastante pequeños para presiones distintas de la atmosférica.

En algunos procesamientos, los alimentos son sometidos a altas presiones, como en el caso de la extrusión. En este caso la viscosidad se relaciona con la presión de la siguiente manera:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{aP} \quad (2.17)$$

Donde:

μ_0 = viscosidad a una presión de referencia

a = parámetro de ajuste

2.9.4. Variación de la viscosidad con la concentración

La viscosidad aumenta con la concentración de sólidos solubles (a diferentes °Brix). En la industria alimentaria es muy importante relacionar el efecto de la concentración y la temperatura sobre la viscosidad.

2.10. Bibliografía

- Barnes, H.A.; Hutton, J.F.; 1989. Walters, K. An Introduction to Rheology. Elsevier, Amsterdam. p.1-17.
- Cepeda, E. and Villarán, M. C. Density and viscosity of *Malus floribunda* juice as a function of concentration and temperature. *J. Food Eng.* 41, 103, 1999

- Constenla, D. T., Lozano, J. E. and Crapiste, G. H. 1989. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. *J. Food Sci.* 54, 663.
- Darby, R. 1996. Chemical Engineering Fluid Mechanics. En cap. 1-2, Marcel Dekker, Inc. New York.
- Haake. Introducción a la viscosimetría práctica. GmbH, D-7500 Karlsruhe 41, Dieselstrasse 4.
- Macosko, C. 1994. Rheology: Principles and Measurements. VCH Publishers, Inc., New York, En Cap. 1 a 3.
- Muñoz, J. 2007. Apuntes del Módulo de Técnicas Experimentales en Reología. Master en Formulación y Tecnología del Producto. UNIA-UHU. Huelva.
- Vitali, A. A. and Rao, M. A. 1984b. Flow properties of low-pulp concentrated orange juice: Effect of temperature and concentration. *J. Food Sci.* 49, 882.

CAPITULO 3

CAPITULO 3

3. Tipos de fluidos

3.1. Fluidos, concepto y clasificación

Los cuerpos pueden ser sólidos o fluidos. Entre los fluidos tenemos líquidos y gases, en los sólidos se estudia la deformación elástica del material, ejemplo: la elasticidad del queso parmesano, en los líquidos nos interesa conocer los fenómenos físicos asociados al flujo, ejemplo: zumo de fruta concentrado, entre los gases utilizados en la industria alimentaria tenemos al CO₂, NH₄, nitrógeno, gases de refrigeración.

Un fluido es una sustancia que no resiste permanentemente a la distorsión. Si se intenta variar la forma de una masa de fluido se produce un deslizamiento de unas capas de fluido sobre otras hasta que se alcanza una nueva forma. Durante la variación de la forma, se producen esfuerzos cortantes, cuya magnitud depende de la viscosidad del fluido y de la velocidad de deslizamiento.

En forma sencilla un fluido se puede definir como una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de un esfuerzo cortante por pequeño que este sea.

Las características reológicas de un fluido es uno de los criterios esenciales en el desarrollo de productos en la industria alimentaria, en el control de calidad, en las mediciones de estabilidad en almacenamiento y procesado y en la comprensión de atributos de textura de alimentos.

Numerosas investigaciones de reología de alimentos confirman la variedad del comportamiento de flujo de los sistemas alimentarios, lo que exige el estudio de los fenómenos o de la respuesta para comprender el mecanismo del flujo y establecer las relaciones entre la estructura y el comportamiento del flujo.

Las propiedades reológicas se definen a partir de la relación existente entre fuerza o sistema de fuerzas externas y su respuesta, ya sea como deformación o flujo. Todo fluido se va a deformar en mayor o menor medida al someterse a un sistema de fuerzas externas.

Los alimentos reaccionan de forma muy diferente ante la aplicación de un esfuerzo; unos son sólidos y se rompen bruscamente ante un esfuerzo elevado, como los helados; otros, sólidos, se deforman para acabar rompiéndose, como la gelatina; otros fluyen en diversas formas, como la leche, la mayonesa, el puré o la masa de pan, requiriendo o no superar un nivel de esfuerzo inicial frente al que pueden o no deformarse antes de fluir. En algunos casos, como la mantequilla, es difícil incluso discernir si se trata de un sólido o de un fluido.

Dicho sistema se representa matemáticamente mediante el esfuerzo cortante o de cizalla, mientras que la respuesta dinámica del fluido se cuantifica mediante la velocidad de deformación.

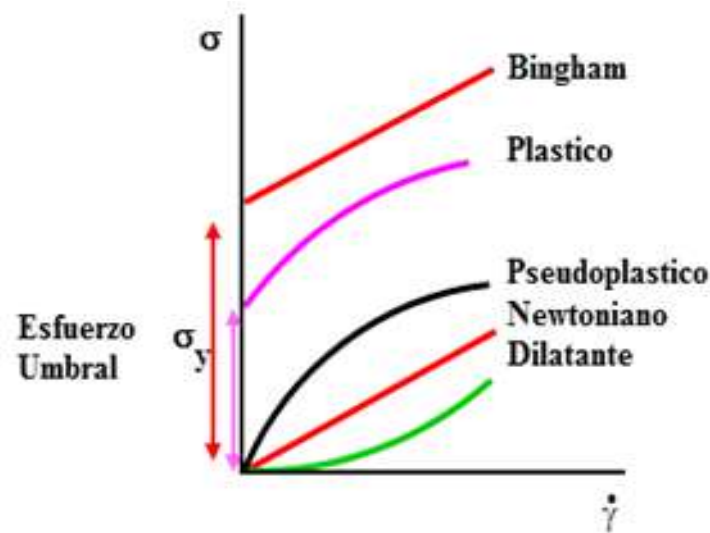


Figura 3.1 Tipos de fluidos según el comportamiento reológico. Curvas de flujo.

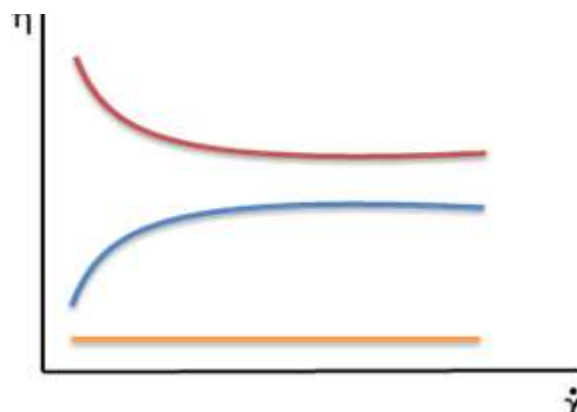


Figura 3.2 Tipos de fluidos según el comportamiento reológico Curvas de viscosidad.

De acuerdo al comportamiento reológico de los fluidos, éstos pueden clasificarse de la siguiente forma según Muller en 1973:

- Fluidos Newtonianos
- Fluidos No newtonianos

Flujo Independiente del tiempo:

- Pseudoplástico
- Dilatante
- Plástico de Bingham

Flujo dependiente del tiempo:

- Tixotrópico
- Reopético
- Viscoelásticos

En los fluidos newtonianos, la velocidad de corte es directamente proporcional al esfuerzo de corte, y la curva de esta relación comienza en el origen; un típico alimento newtoniano está conformado por elementos de bajo peso molecular y no contiene una concentración apreciable de polímeros disueltos o insolubles.

En los fluidos no newtonianos, la curva del esfuerzo de corte con la velocidad de corte es no lineal, o no comienza en el origen, o el material exhibe un comportamiento reológico que depende del tiempo como resultado de los cambios estructurales.

3.2. Fluidos newtonianos

Los fluidos newtonianos son aquellos que cumplen la Ley de Newton, que se expresan por la ecuación:

$$\sigma = \eta / \dot{\gamma} \quad (3.1)$$

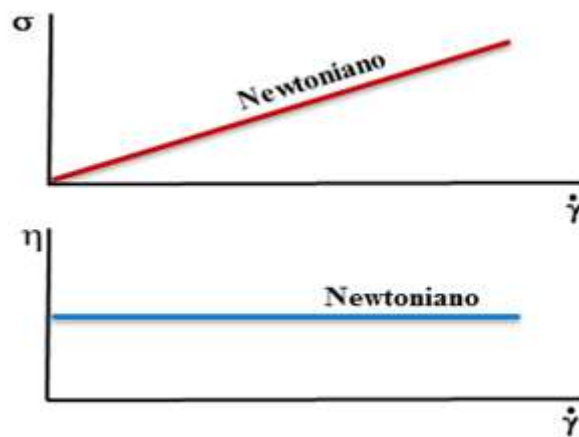


Figura 3.3 Fluidos newtonianos

Que indica que en un fluido la relación entre el esfuerzo cortante o de cizalla σ y la velocidad de deformación $\dot{\gamma}$ se mantiene constante, siendo la viscosidad η la constante de proporcionalidad, también llamada viscosidad dinámica o simplemente viscosidad.

La viscosidad es constante para este tipo de fluidos y no depende del esfuerzo cortante aplicado. Hay que tener en cuenta también que la viscosidad de un fluido newtoniano no depende del tiempo de aplicación del esfuerzo, aunque sí puede depender tanto de la temperatura como de la presión a la que se encuentre.

El fluido Newtoniano no posee propiedades elásticas, es incompresible, isotrópico y carente de estructura y, como el sólido de Hooke, no existe en la realidad. Sin embargo, muchos líquidos reales muestran un comportamiento Newtoniano en un amplio rango de esfuerzos cortantes. Estos líquidos son los que reciben el nombre de líquidos Newtonianos.

Presentan este comportamiento la mayoría de fluidos con estructura sencilla y compuestos de moléculas relativamente simples en una sola fase. Se consideran newtonianos los líquidos simples, soluciones verdaderas, disolventes de bajo peso molecular, dispersiones macromoleculares diluidas, soluciones de polímeros que no interaccionan y pastas con bajos contenidos en sólidos.

En este tipo de fluidos la viscosidad sólo depende de la temperatura y composición, siendo independiente del tiempo, de la velocidad de deformación y de la historia previa del fluido.

Un número limitado de alimentos muestran características de flujo ideal, entre los que se encuentran algunos tan importantes fisiológicamente como el agua, y soluciones diluidas de azúcar, nutritivamente como la leche y económicamente como las bebidas refrescantes.

La leche que es una emulsión acuosa de glóbulos grasos de 0.0015-0.001 mm de diámetro y contiene cerca del 87% de agua, 4% de grasa, 5% de azúcares (mayoritariamente lactosa) y 3% de proteína (mayoritariamente caseína) es un líquido newtoniano.

Las leches no concentradas son líquidos newtonianos, pero las leches concentradas presentan una débil dependencia del esfuerzo de cizalla.

La leche descremada es menos viscosa que la leche entera con nata, porque la viscosidad aumenta con el contenido graso. También como en la mayoría de los líquidos, la viscosidad de la leche aumenta con el incremento de sólidos no grasos y de la temperatura

Presentan flujo newtoniano algunos zumos clarificados, con bajos porcentajes de pectina y despectinizados de algunas frutas, tales como manzana, pera, melocotón, entre otras, en un rango de temperaturas y concentración de sólidos solubles.

También presentan este comportamiento la mayoría de las mieles y el conjunto de jarabes semejantes a la miel, entre ellos el jarabe de maíz, bebidas carbónicas, extractos de carne, algunos aceites ligeros de cocina.

3.3. Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos son aquellos que no cumplen la ley de Newton de la viscosidad, por lo tanto, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación deja de ser lineal.

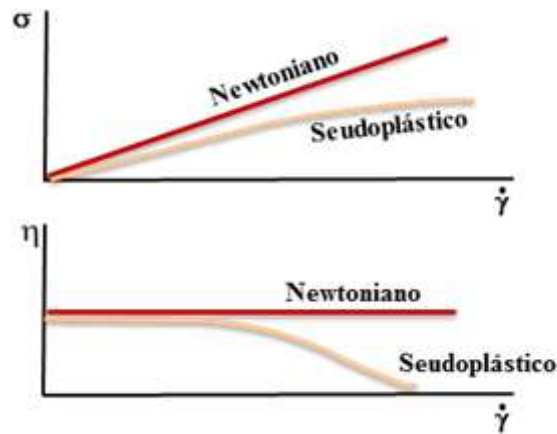


Figura 3.4 Fluidos no- newtonianos

Estos fluidos se caracterizan porque su viscosidad no permanece constante cuando la temperatura y la composición permanecen invariables, sino que depende del esfuerzo cortante o gradiente de velocidad y, a veces, del tiempo de aplicación del esfuerzo y de la historia previa del producto o muestra. Ello es debido a que la constitución física varía al someter el producto a los efectos de rozamiento a lo largo del tiempo. Dado que en este tipo de fluidos la viscosidad no permanece constante, se define la viscosidad aparente, como la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación correspondiente a una determinada condición de temperatura y agitación (no normalizada).

$$\eta_a = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \neq Cte \quad (3.2)$$

Esta dependencia de la viscosidad con la velocidad de deformación se debe a una variación en la estructura del fluido, cuando hay un cambio de velocidad de deformación.

A velocidades de deformación lo suficientemente bajas se puede esperar que la modificación estructural sea insignificante y por tanto desaparezca la dependencia de la viscosidad con la velocidad de deformación.

Estos fluidos se clasifican atendiendo a la forma que presentan las gráficas σ vs $\dot{\gamma}$ o bien η vs $\dot{\gamma}$.

CURVAS DE FLUJO EN FLUIDOS NO NEWTONIANOS

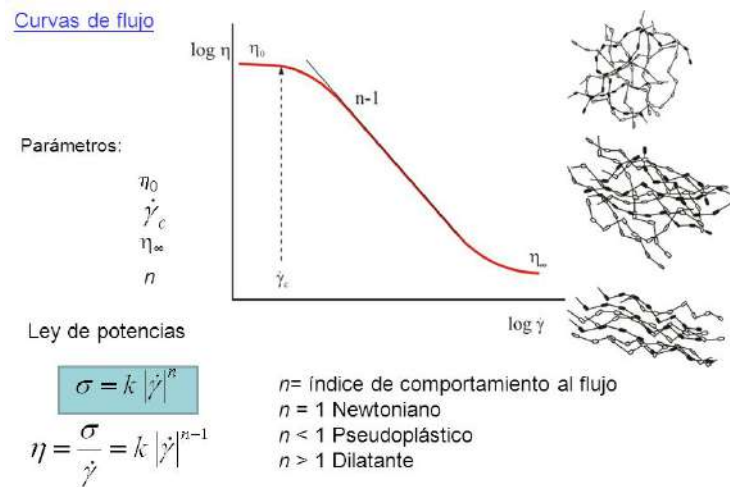


Figura 3.5 Curvas de flujo.

El cambio en la estructura de las partículas dispersas, que puede observarse experimentalmente por medio de técnicas microscópicas, consiste en una deformación, en el caso de gotas y burbujas, que adquieren una forma elipsoidal o una orientación de acuerdo a su forma en el caso de partículas gruesas y sus aglomerados. En el momento en que ocurre la máxima “orientación” el sistema muestra una viscosidad mínima (η_∞) en un intervalo de gradientes de velocidad altos que conlleva un nuevo comportamiento newtoniano.

La estructura inducida durante la cizalla en esta zona puede revertirse de forma parcial o completa al estado en que se encuentra en la zona A si el gradiente de velocidad se reduce de nuevo a valores bajos o bien si se recupera el estado de reposo.

En caso de excederse el límite de la velocidad de deformación (Segunda Meseta Newtoniana), el estado de máxima orientación puede distorsionarse.

Esta distorsión puede resultar en inestabilidades del flujo, interacciones partícula-partícula, especialmente si hay partículas gruesas o cambios en la estructura debidos al rompimiento de burbujas que provocan el incremento de la dispersión. Con estos cambios, la resistencia de flujo y la viscosidad pueden incrementarse de nuevo dando lugar a un comportamiento conocido como dilatante.

Sin embargo, si lo que contiene el sistema son disoluciones macromoleculares, en este caso puede observarse una rotura de las redes moleculares alineadas que se han formado en la zona de la Ley de la Potencia y causar una nueva disminución de la viscosidad.

Algunos ejemplos donde se puede observar este tipo de comportamiento viscoso con la presencia de los tres dominios, según la velocidad de deformación, pueden observarse en emulsiones concentradas como la mayonesa, en suspensiones como chocolate, así como sistemas aireados como productos espumosos, tipo “mousse”.

Si en la experimentación con un producto se observan los valores constantes de η_0 y η_∞ , la modelización exige recurrir a ecuaciones más complejas que las descritas en el apartado anterior, como el modelo de Cross.

En caso contrario, las ecuaciones de Ostwald o Ley de la Potencia, Herschel Bulkely y de Bingham suelen permitir una modelización adecuada del comportamiento al flujo, al menos en un determinado intervalo de gradiente de velocidad.

No obstante, dado que los sistemas alimentarios existen como sistemas complejos estructurados en múltiples fases, estos pueden describirse también por medio de modelos para sistemas viscosos multifásicos, en donde, la descripción reológica se basa en parámetros físicos cuantificables, y que afectan las características de flujo o textura de los sistemas multifásicos “estructurados”.

Los cambios de estructura mencionados que ocurren al variar el gradiente de velocidad pero que son instantáneos en el tiempo, reflejarían el comportamiento de los productos que se muestran pseudoplásticos, dilatantes o plásticos. No obstante, algunos productos muestran un comportamiento variable con el tiempo aun cuando el esfuerzo o el gradiente de velocidad se mantienen constantes. En estos casos, el cambio de estructura comentado no es instantáneo, sino que ocurre durante un cierto tiempo y conlleva una desorganización o reorganización de la estructura dependiendo de que se trate de fluidos tixotrópicos o antitixotrópicos, respectivamente.

Por otra parte, en el caso de productos fluidos o con gelificación débil como los procesados de frutas, néctares, cremogenados, mermeladas, etc., o bien aquellos con una consistencia semisólida y con partículas no solubles, el comportamiento reológico en

flujo depende de su composición y estructura en términos de los siguientes factores, con diferente influencia de la temperatura:

- ✓ Concentración y el peso molecular de los solutos moleculares. La influencia de la temperatura sobre la viscosidad asociada a esta contribución es grande, y tanto mayor cuanto mayor es la concentración y peso molecular de los solutos, ya que influye a través de las interacciones moleculares en el sistema.
- ✓ Concentración y el peso molecular de los solutos macromoleculares, como las pectinas solubles, por ejemplo. En este caso, la influencia de la temperatura sobre la viscosidad tiene un efecto antagónico, ya que por una parte al aumentar la temperatura disminuyen las interacciones moleculares en el sistema, disminuyendo así la viscosidad, pero por otra parte, un aumento de la temperatura supone un mayor desplegamiento de las cadenas macromoleculares, al potenciarse las interacciones soluto-solvente, y por tanto una mayor viscosidad, al aumentar el volumen hidrodinámico del polímero.
- ✓ La compensación parcial de estos dos efectos hace que la influencia de la temperatura pueda ser de menor magnitud que en el caso de solutos moleculares, y probablemente tanto menor cuantas más dificultades de solvatación presente la cadena.
- ✓ Concentración y tamaño de las partículas dispersas. En este caso, la influencia de la temperatura sobre la viscosidad suele ser de menor magnitud y es el resultado del cambio en las interacciones hidrodinámicas (de flujo) de estas partículas con el cambio de viscosidad de la fase continua.

El diferente grado de contribución de cada uno de estos factores a la viscosidad de la pulpa definirá además el nivel de influencia de la temperatura en su comportamiento reológico. Si los sólidos moleculares determinan predominantemente la viscosidad del producto, ésta estará notablemente afectada por la temperatura, tanto más cuanto mayor sea la concentración.

En la figura siguiente se puede apreciar un ejemplo de una curva de flujo en mermeladas de melocotón y borojé.

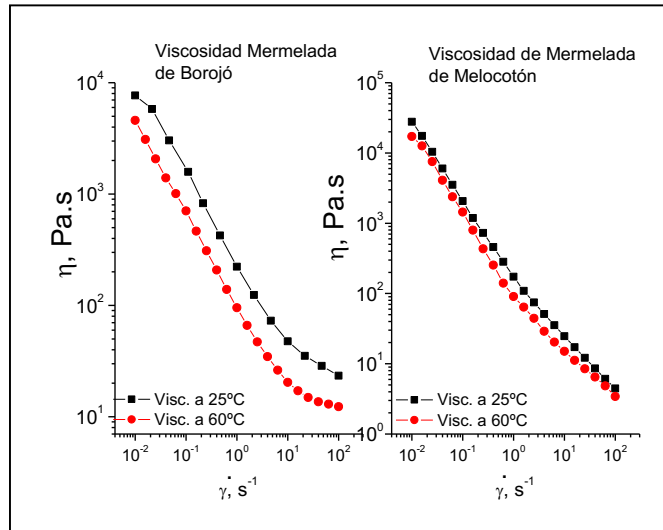


Figura 3.6 Curvas de viscosidad vs velocidad de deformación en mermeladas de melocotón y borojón a 25 y 60°C. (Díaz R, 2014)

Las curvas de flujo se suelen representar en forma doblemente logarítmica, ya que entonces las curvas decrecientes se convierten en rectas y se aprecian mejor las diferencias al modificar variables.

3.4. Fluidos independientes del tiempo

La mayoría de los alimentos tienen un comportamiento reológico independiente del tiempo. Este tipo de fluidos se clasifican en tres grupos: pseudoplásticos, dilatantes y plásticos.

Se caracterizan porque la viscosidad aparente depende solamente de la temperatura, la composición del fluido y del esfuerzo cortante o gradiente de velocidad aplicado, pero nunca del tiempo de aplicación de éste último.

3.5. Fluidos seudoplásticos.

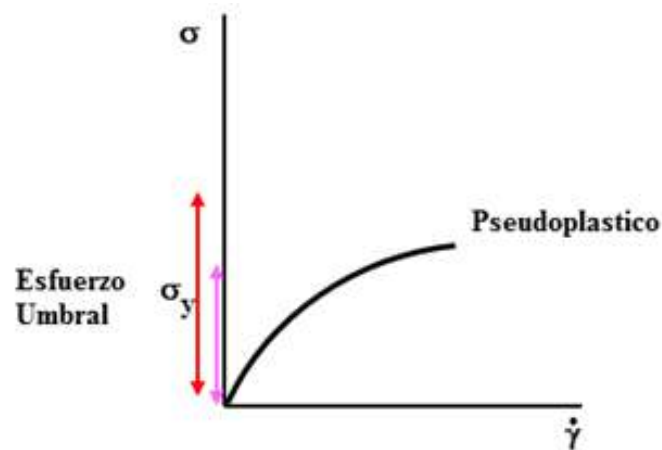


Figura 3.7 Fluidos seudoplásticos.

Según Muller en 1973, los líquidos seudoplásticos son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación que cuando se cizallan lentamente. La viscosidad aparente depende en ellos de la velocidad de deformación, pero no del tiempo durante el que están sometidos al esfuerzo de cizalla. La velocidad de deformación aumenta en proporciones más altas que la tensión tangencial, de manera que la viscosidad aparente desciende a medida que aumenta la velocidad de deformación.

La velocidad de flujo puede ser incrementada aumentando la fuerza aplicada por vertido, masticación, deglución, bombeo, mezclado, etc. Las moléculas de los polímeros lineales forman soluciones cuya viscosidad disminuye con la fuerza de cizalla.

Muestran un descenso de viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla (“shear thinning”). La curva de un fluido de estas características, pasa por el origen y es cóncava hacia abajo para bajos esfuerzos cortantes, haciéndose recta para esfuerzos cortantes elevados.

El fenómeno de la seudoplasticidad se debe a la microestructura interna de los fluidos, en el caso de suspensiones, sus agregados se pueden romper al aplicarse cizalla y las partículas orientadas al azar en algunos polímeros, se desorientan más o se disponen ordenadas con relación al flujo al ser sometidas a cizalla y esto disminuye la resistencia al flujo (o sea la viscosidad).

Los fluidos pseudoplásticos se caracterizan porque su viscosidad aparente decrece cuando aumenta el gradiente de velocidad de deformación. Este comportamiento indica una ruptura o reorganización continua de la estructura, dando como resultado una menor resistencia al flujo (o sea la viscosidad) y es debido a la presencia de sustancias de alto peso molecular, así como a la dispersión de sólidos en la fase sólida.

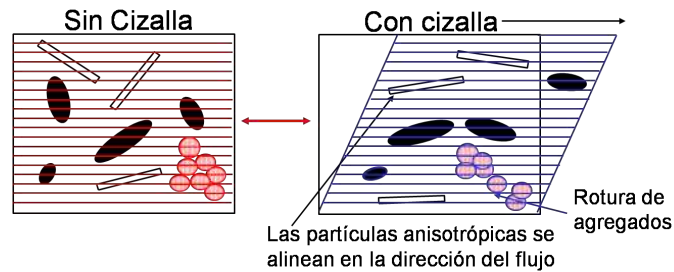


Figura 3.8 Representación esquemática de un polímero sin cizalla y con cizalla.

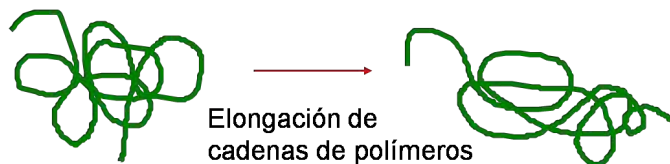


Figura 3.9 Representación esquemática de los posibles enmarañamientos entre cadenas poliméricas

En ausencia de cizalla, un polímero fundido se encontraría en un estado aleatorio de “equilibrio”, como el de la figura 3.8, en el cual la movilidad en las cadenas del polímero, propiciada por la temperatura, produce la simultánea desaparición y formación de interacciones entre las distintas cadenas poliméricas, siendo el resultado neto nulo; la presencia de dichas interacciones y los posibles enmarañamientos entre las cadenas poliméricas (como podrían ser los mostrados en la figura 3.9, son los responsables de la viscosidad del fluido (η_0).

En este modelo se supone que, dentro del fluido newtoniano situado entre dos placas paralelas, una de las cuales se mueve, aparecen una serie de macromoléculas en forma de filamentos porosos que contienen grupos de átomos con una gran movilidad.

Al principio estos grupos de átomos forman filamentos bastante enredados. Con el tiempo, al moverse la placa superior, la velocidad de deformación aumenta y la resultante de las fuerzas tiende a desenredar estos filamentos en la dirección del flujo, dependiendo

de su elasticidad y de su velocidad de deformación, y además dicha fuerza libera parte del líquido que existe alrededor de la molécula.

Como resultado de todo lo que ocurre en el seno del fluido se produce una disminución de la fricción interna dando lugar a su vez a una disminución de la viscosidad.

Ejemplos de fluidos pseudoplásticos son: algunos tipos de ketchup, mostaza, etc. La formulación matemática de un fluido pseudoplástico es bastante compleja.

Experimentalmente se comprueba que, en general en los fluidos no newtonianos, la curva de flujo, representada en escala logarítmica en ambos ejes, tiene la forma como en la figura 3.10.

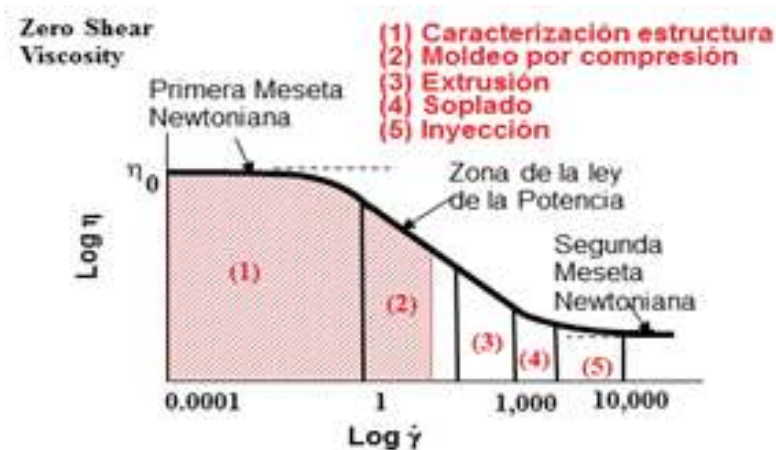


Figura 3.10 Relación entre viscosidad y la velocidad de deformación para fluidos multifásicos “estructurados”, tomado de Windhab, (1995).

Primera meseta newtoniana. Es la región newtoniana correspondiente a bajas velocidades de deformación, caracterizada por una viscosidad finita y constante.

Zona de la ley de la potencia. Es una región pseudoplástica correspondiente a velocidades de deformación intermedias, caracterizada por un descenso de la viscosidad.

Segunda meseta newtoniana. Una región newtoniana correspondiente a altas velocidades de deformación, caracterizada por una viscosidad finita y constante.

Este tipo de comportamiento que no es típicamente pseudoplástico ni dilatante, se puede explicar por la relación de las diferentes regiones con cambios en la estructura del material al aumentar la velocidad de deformación.

Muchos fluidos están formados por estructuras complejas distribuidas al azar en estado quiescente, manteniendo un estado desordenado que provoca una cierta resistencia al flujo, la explicación microscópica está relacionada con la ordenación que se produce en el interior del fluido a consecuencia del esfuerzo aplicado. Las propiedades de flujo de los fluidos están estrechamente relacionadas con su composición y estructura interna, siendo las macromoléculas y la materia dispersa (que incluye partículas sólidas, gotas líquidas y gaseosas) los componentes estructurales mayoritarios en el sistema que compone un alimento.

Por lo tanto, el comportamiento reológico de los sistemas multifásicos está determinado, generalmente, por el comportamiento de la fase continua y por las fuerzas entre las partículas.

Para cada material existen fuerzas de interacción entre los diferentes componentes, a saber, enlaces químicos, interacciones físicas tales como fuerzas de Van der Waals, fuerzas electrostáticas, interacciones sólido-líquido, etc., las cuales dominan el comportamiento estructural bajo la acción de una deformación débil. A medida que la deformación se incrementa y se inicia el movimiento, el esfuerzo o las fuerzas de elongación pueden superar a las fuerzas estructurales.

Como se observa, existen tres zonas diferenciadas, A bajas velocidades de deformación, las fuerzas hidrodinámicas son despreciables y únicamente el movimiento Browniano es el que actúa contra las fuerzas estructurales.

Si la concentración de la fase dispersa o el contenido de macromoléculas en la fase continua es alto, su fuerte interacción genera un umbral de esfuerzo (σ_0), lo cual implica que debe aplicarse una fuerza crítica antes de que se pueda generar cualquier movimiento. La viscosidad aparente en esta región, definida como la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación antes de que se inicie el movimiento, es en teoría infinita.

Para concentraciones bajas de los componentes estructurales, el que domina es el movimiento Browniano, que mantiene una estructura isotrópica con interacciones insignificantes entre las partículas o las macromoléculas. En este caso, la viscosidad aparente, η_0 , es independiente del gradiente de velocidad y se observa un régimen newtoniano a bajos gradientes de velocidad.

A velocidades de deformación intermedias (zona de la ley de la potencia), las fuerzas hidrodinámicas son del mismo orden de magnitud que las fuerzas estructurales, lo cual induce a nuevas estructuras de acuerdo con el tipo, dirección y tiempo de aplicación de las fuerzas de movimiento. En el caso de que este tiempo sea suficiente largo se alcanzará una “estructura de equilibrio”.

En la mayoría de alimentos multifásicos, esta estructura de equilibrio tiene una reducida resistencia “interna” al flujo en comparación con la Primera Meseta Newtoniana y por consiguiente la viscosidad se reduce con el incremento de las velocidades de deformación (o por el esfuerzo aplicados) en la zona de la Ley de la Potencia, lo que se corresponde con un comportamiento **pseudoplástico** si dicha estructura se alcanza de forma instantánea o tixotrópico si requiere un cierto tiempo de cizalla.

De los modelos utilizados para describir el comportamiento reológico de los fluidos pseudoplásticos, el más conocido y simple de aplicar es el de Ostwald-De Waale, también conocido como ley de la potencia:

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n \text{ Ecuación Ley de potencia}$$

Donde K es el índice de consistencia de flujo y n es el índice de comportamiento al flujo, valor entero menor que 1. K da una idea de la consistencia del producto y n de la desviación del comportamiento al flujo respecto al newtoniano. En este caso el valor de n es menor que 1.

Esta ecuación es una de las más utilizadas para describir el flujo de los derivados de fruta que se comportan como pseudoplásticos.

Se puede calcular el valor de “ n ” representando la ecuación en escala doble-logarítmica:

$$\ln \tau = \ln K \dot{\gamma} = \ln K + n \ln \dot{\gamma} \quad (3.3)$$

La ordenada en el origen que se obtiene representa el valor de K , cuyas dimensiones dependen del valor de η .

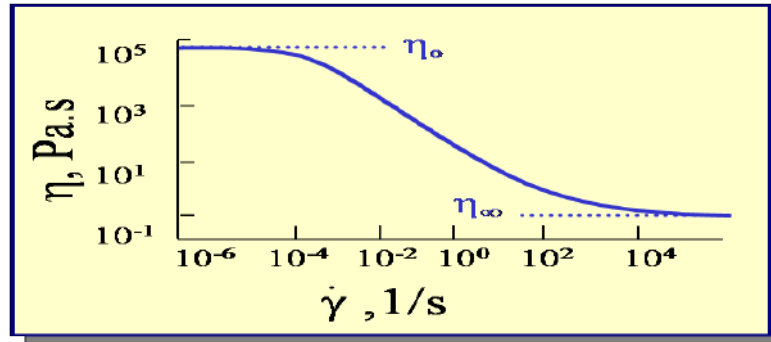


Figura 3.11 Comportamiento de un fluido estructurado. Representación gráfica de $\log \eta$ vs $\dot{\gamma}$

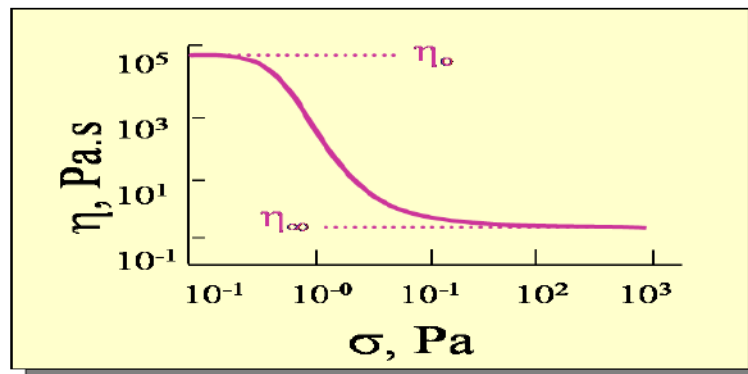


Figura 3.12 Comportamiento de un fluido estructurado Representación gráfica de $\log \eta$ vs σ

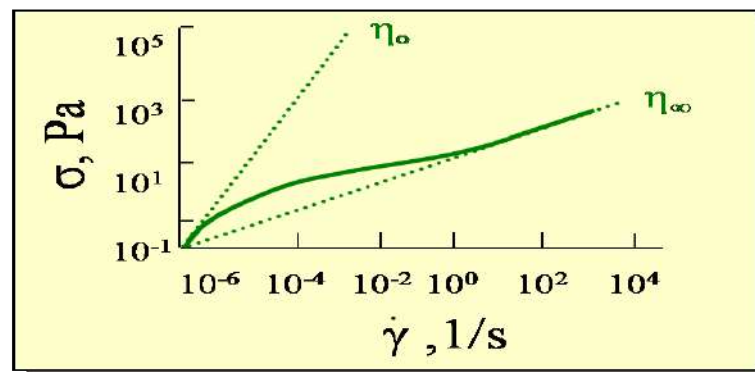


Figura 3.13 Comportamiento de un fluido estructurado Representación gráfica de $\log \sigma$ vs $\dot{\gamma}$

3.6. Fluidos dilatantes.



Figura 3.14 Fluidos dilatantes

En este caso el valor de n es mayor que 1.

La dilatancia es un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo que se da a altas velocidades de deformación; se trata del fenómeno opuesto a la pseudoplasticidad.

El fenómeno de dilatación se produce debido a la fase dispersa del fluido, puede ser una consecuencia de:

- ✓ Agregación de partículas inducida por cizalla
- ✓ Aumento de colisiones entre partículas
- ✓ Enmarañamiento de moléculas de polímeros
- ✓ Expansión en volumen inducido por cizalla en suspensiones muy concentradas

Ejemplo: Se puede observar este fenómeno cuando se pisa la arena mojada en la orilla de la playa.

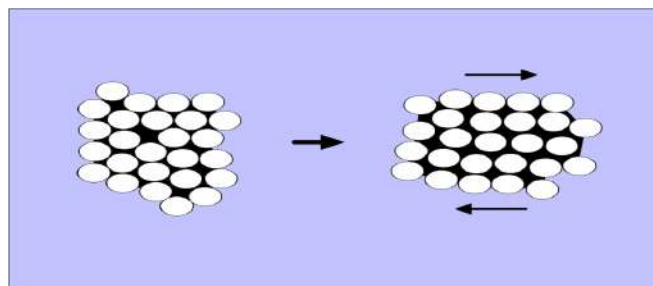


Figura 3.15 Empaquetamiento aleatorio en reposo y con cizalla. Expansión de volumen bajo cizalla.

Además, conforme aumenta la velocidad de deformación aplicada, mayor turbulencia aparece y más difícil es el movimiento de la fase continua por los huecos, dando lugar a un mayor esfuerzo cortante (la viscosidad aumenta).

Los valores de esfuerzo de corte y relación de deformación están unívocamente relacionados (espesamiento de estado estacionario). La viscosidad aparente aumenta al aumentar la velocidad de deformación.

Existen pocos alimentos que presenten esta característica, entre ellos tenemos aquellos que forman suspensiones concentradas o pastas acuosas. Algunos ejemplos son ciertos tipos de mieles de eucalipto, disoluciones de harina de maíz, disoluciones de almidón muy concentradas.

El modelo que describe un comportamiento dilatante es la ley de la potencia vista anteriormente en el caso de fluidos pseudoplásticos.

3.7. Fluidos plásticos de bingham.

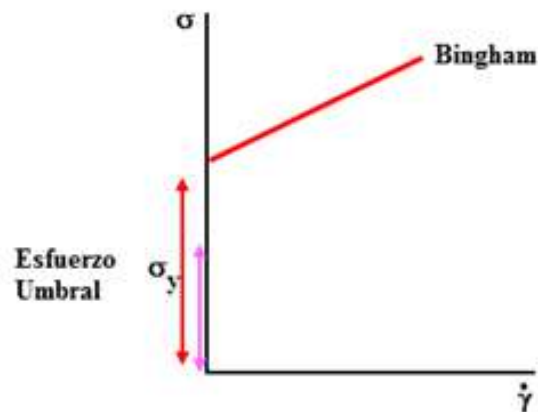


Figura 3.16 Fluidos plásticos de Bingham

En términos reológicos este tipo de fluidos se comportan como un sólido hasta que sobrepasa un esfuerzo de cizalla mínimo llamado umbral de fluencia y a partir de dicho valor se comporta como un líquido.

Son productos que mantienen su forma bajo la acción de la gravedad. Sin embargo, cuando actúan sobre ellos fuerzas suficientemente más grandes fluyen, casi como si fueran líquidos. Cuando la acción de la fuerza cesa, mantienen su forma y dejan de fluir.

Estos fluidos exhiben propiedades de líquido a esfuerzos superiores al umbral de fluencia, pueden clasificarse como líquidos o sólidos. El producto plástico ideal es el modelo de Bingham donde θ es el umbral de fluencia y M la viscosidad plástica.

El umbral de fluencia puede ser consecuencia de un entrelazado de moléculas o partículas debido a su gran tamaño, ramificaciones o forma irregular. También puede ser debida a la formación de redes provocadas por las interacciones entre moléculas o partículas.

Algunos *ejemplos* de comportamiento plástico son el puré de papa, la nata batida, el chocolate fundido, la mantequilla, la mayonesa, las emulsiones y espumas alimentarias, pastas de fécula de mandioca, suero de puré de albaricoque a gradientes de deformación bajos, geles de pectina y de algunos zumos naturales de manzana.

3.8. Fluidos dependientes del tiempo.

La viscosidad aparente se considera como la viscosidad de un fluido no newtoniano y se calcula con los datos empíricos como si el fluido obedeciera la ley de Newton.

La viscosidad aparente varía no sólo con el esfuerzo de corte, sino que también para un esfuerzo de corte constante, varía con el tiempo de duración de la relación de deformación; clasificándose en fluidos tixotrópicos y reopéticos.

3.9. Tixotropía

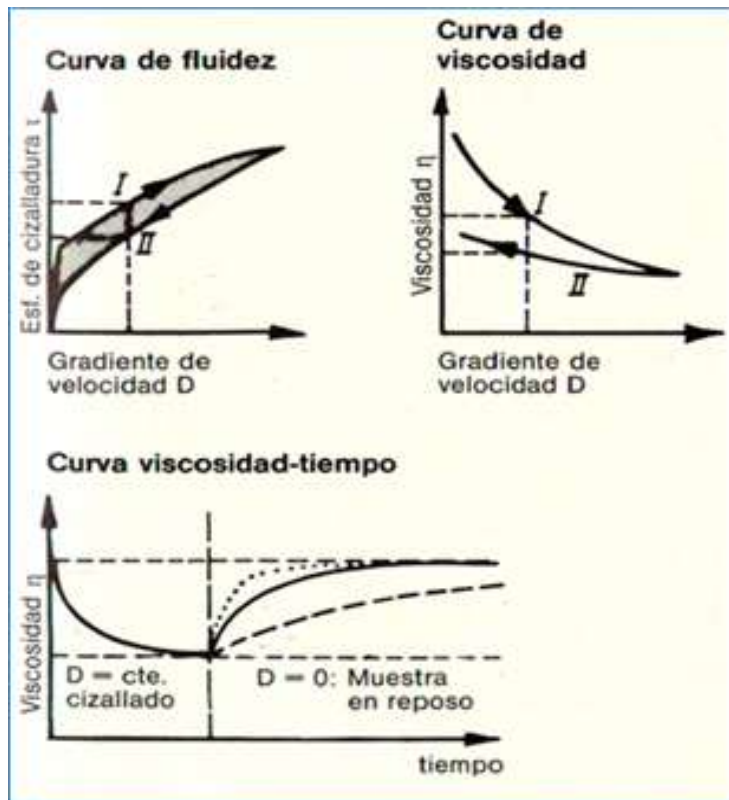


Figura 3.17 Descenso de la viscosidad aparente con el tiempo a una velocidad de cizalla constante, seguido de una recuperación gradual cuando cesa la cizalla.

La tixotropía es un ablandamiento dependiente del tiempo. La representación gráfica que le corresponde es una curva similar a la de la pseudoplasticidad, en cuanto que la viscosidad aparente desciende a medida que aumenta la velocidad de deformación. Difiere, sin embargo, de ella en que el descenso de viscosidad aparente no está relacionado exclusivamente con la velocidad de deformación, sino también con el tiempo.

Todas las definiciones de tixotropía incluyen el concepto de recuperación estructural.

Sin embargo, muchos alimentos tienen un comportamiento al flujo dependiente del tiempo, pero su periodo de recuperación es muy largo o su estructura sólo es parcialmente recuperable. Por ello es más adecuado utilizar los términos “dependencia del tiempo en el flujo” o “destrucción estructural” para definir este tipo de comportamiento que consiste en el descenso irreversible de la viscosidad aparente con el tiempo a una velocidad de cizalla constante.

Presentan comportamiento tixotrópico varios alimentos: yogur, pasta de tomate, la clara de huevo, el zumo de tomate, los aderezos de ensalada, el puré de albaricoque, leche condensada, mayonesa, algunos quesos blandos y miel. Entre otras muchas investigaciones realizadas en alimentos, se ha estudiado la dependencia con el tiempo en el comportamiento reológico de muestras de mayonesa, mantequilla, margarina, puré de manzana, salsa de tomate y mostaza.

3.10. Reopexia

La reopexia es el incremento de la viscosidad aparente con el tiempo a una velocidad de cizalla constante, seguido de una recuperación gradual cuando cesa la cizalla, consiste en un espesamiento dependiente del tiempo, en el que es curvilíneo el diagrama de esfuerzo de corte versus relación de deformación y en el que estos dos parámetros no están unívocamente relacionados.

Las sustancias reopécticas se comportan de forma contraria a las tixotrópicas, de forma que para una velocidad de cizalla constante el esfuerzo cortante aumenta con el tiempo. En general, las estructuras originales se recuperan con el tiempo.

Como la viscosidad aumenta con el tiempo en que la muestra es sometida a un determinado gradiente de velocidad, lo que les confiere una cierta semejanza con los fluidos dilatantes en el sentido de que la única diferencia es si el tiempo para la destrucción o formación de estructura es detectable o no.



Figura 3.18 Comportamiento de fluidos dependientes del tiempo.

El modelo reológico aplicable a estos fluidos es la ley de la potencia, siendo el valor del índice de comportamiento al flujo mayor que la unidad. Al igual que con los otros tipos de fluidos, para este tipo de alimentos se pueden aplicar otros modelos distintos con mayor o menor éxito.

Finalmente cabe señalar que, aunque se ha observado un comportamiento reopéptico en algunos alimentos como ciertas mieles de eucalipto, este tipo de fluidos son muy poco frecuentes en el campo de la alimentación.

3.11. Fluidos viscoelásticos

En los productos viscoelásticos, los componentes elástico y viscoso se manifiestan simultáneamente bajo las condiciones operacionales y la elasticidad es muy fácilmente detectable a tensiones altas, lo que contrasta con el comportamiento de los productos plásticos. En los alimentos viscoelásticos es frecuente que se dé una recuperación parcial, porque la red tridimensional elástica se desintegra bajo el efecto de la tensión. Cuanto más completa y resistente sea esta red, tanto más acusada será la elasticidad. Cuanto más fácil se desintegre la red, mayor será el componente viscoso.

Una forma de caracterizar estos fluidos es, estudiando la evolución del esfuerzo de cizalla con el tiempo a una velocidad de deformación fija, pudiéndose realizar un análisis comparativo de las diferentes muestras a partir de las curvas obtenidas. El comportamiento pseudoplástico es, quizás, el más frecuente en los fluidos.

Existen varios alimentos que presentan propiedades viscoelásticas. Se trata, en general, de productos con características de geles o semisólidos como los geles de almidón-gelatina y los de leche, muchos derivados de frutas y vegetales como algunos zumos y purés, confituras, derivados del tomate, los helados, las manzanas, los fideos cocidos, el queso fundido, las masas de harina de trigo para la fabricación de pan, galletas, dulces, bollería; las espumas de proteína y granos de maíz y trigo, la crema de leche, la mantequilla batida, la yema del huevo, la salsa de tomate, algunas sopas y salsas, la mostaza francesa.

3.12. Bibliografía

- Barbosa-Cánovas, G.V.; Ibarz, A y Peleg, M. 1993. Propiedades reológicas de alimentos fluidos. Revisión. Alimentaria. 242, 39-89.
- Bourne, M. C. 2002. Food texture and viscosity: Concept and measurement. San Diego: Academic Press, 2 ed. 73-87 p.
- Fennema, O. 2000. Química de los alimentos. Acribia Zaragoza. España. 1250 p.
- Franco, J.M. 2007. Apuntes del Módulo de Fundamentos de Reología. Master en Formulación y Tecnología del Producto. UNIA- UHU. Huelva.
- Gallegos, C.,Berjano, M.,García,J.P.,Muñoz.J.1988.Destrucción estructural con la cizalla en mayonesa.En Actas VII Congreso Nacional de Química. Sevilla.Vol.III,221-228.
- Haake. Introducción a la viscosimetría práctica. GmbH, D-7500 Karlsruhe 41, Dieselstrasse 4.
- Macosko, C. 1994.Rheology: Principles and Measurements. VCH Publishers, Inc., New York,.En Cap. 1 a 3.
- Muller, H.G. 1973. Introducción a la reología de los alimentos. Zaragoza: Acribia, p14.
- Rao, M.A., Steffe, J.F. 1999.Viscoelastic Properties of Foods. Elsevier Applied Science, Londres.
- Rha, C.H. 1978. Rheology of fluid foods. Food Technol. 32(7): 77-82.
- Steffe, J.1996. Rheological methods in food process engineering. Michigan: Freeman Press, 23 p.

CAPITULO 4

CAPITULO IV

4. Modelos reológicos de flujo

4.1. Modelos reológicos de flujo más utilizados en alimentos

Un modelo es una representación idealizada de la conducta de cualquier sistema cuantificada en términos matemáticos.

Muchos modelos se han propuesto para el tratamiento de los datos experimentales para describir el comportamiento de las propiedades de flujo de las sustancias. Sin embargo, es muy posible que un único modelo no correlacione satisfactoriamente el comportamiento de una determinada sustancia en un amplio intervalo de cizallas. A pesar de ello, estos modelos son útiles para correlacionar el comportamiento de una gran cantidad de sustancias.

El comportamiento reológico de un fluido alimentario puede describirse según distintas ecuaciones que relacionan el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación. La descripción precisa del flujo, necesaria para el diseño de sistemas de bombeo, tuberías, etc, requiere una ecuación que exprese la relación entre σ y $\dot{\gamma}$ en cualquier punto.

Cada ecuación puede representar, dependiendo de los valores que tomen las constantes, comportamientos newtonianos, plásticos de Bingham, pseudoplásticos y dilatantes.

Para los fluidos dependientes del tiempo y los viscoelásticos se requieren ecuaciones de mayor complejidad que pueden ser consultadas en diversas fuentes. El comportamiento pseudoplástico es, quizás, el más frecuente en los fluidos alimentarios.

En general, se comportan de esta forma muchos derivados de frutas y vegetales como algunos zumos y purés de frutas, derivados del tomate, confituras de fruta; productos lácteos como la nata o la leche azucarada condensada; algunas sopas y salsas; la clara de huevo; la yema del huevo, etc.

FLUÍDO	ALIMENTO
Newtoniano	Agua, jugo de frutas, miel, leche, aceite vegetal
Herschel-Bulckley	Pasta de pescado, pasta de uva
Pseudoplástico	Salsa de manzana, puré de banano, pulpa de frutas, jugo de naranja concentrado, suspensiones coloidales.
Dilatante	Soluciones de almidón de maíz, suspensiones de almidón.
Plástico de Bingham	Pasta de tomate, mermeladas concentradas, leche condensada para niños.

Cuadro 3. Modelos apropiados para algunos alimentos fluidos

A continuación, se muestran algunos alimentos con los diferentes tipos de flujo.

Fluido	K	n	σ_0	Ejemplos
H-B	>0	$0 < n < \infty$	>0	Pasta de pescado, pasta de pasas
Newtoniano	>0	1	0	Agua, jugo de frutas, leche, miel, aceite vegetal
Seudoplástico	>0	$0 < n < 1$	0	Puré de manzana, puré de banana.
Dilatante	>0	$1 < n < \infty$	0	Algunos tipos de miel, solución al 40% de almidón de maíz puro
Plástico de Bingham	>0	1	>0	Pasta de dientes, pasta de tomate

Cuadro 4. Ejemplos de flujos de alimentos según la clasificación reológica y sus constantes fundamentales. Tomado de Steffe, J. 1996

A continuación, se indican algunos de los modelos más comunes que han sido utilizados para representar las diversas clases de comportamiento no newtoniano observados.

4.2. Modelo de Ostwald-de Waele o Ley de la Potencia

De los modelos utilizados para describir el comportamiento reológico de los fluidos pseudoplásticos, el más conocido y simple de aplicar es el de Ostwald-De Waale, también conocido como ley de la potencia.

Muller (1973) señala que en los sistemas dilatantes y pseudoplásticos la relación esfuerzo de corte – relación de deformación no viene expresada por una línea recta, pero es única. A cada valor de esfuerzo de corte le corresponde un solo valor de relación de deformación. Por esta razón la gráfica se puede describir matemáticamente así:

$$\sigma = k(\dot{\gamma}) \quad (4.1)$$

Este modelo es de dos parámetros: K y n. Es el mínimo número de parámetros que se pueden utilizar para definir un comportamiento pseudoplástico, dependiendo de la temperatura, concentración, viscosidad del solvente.

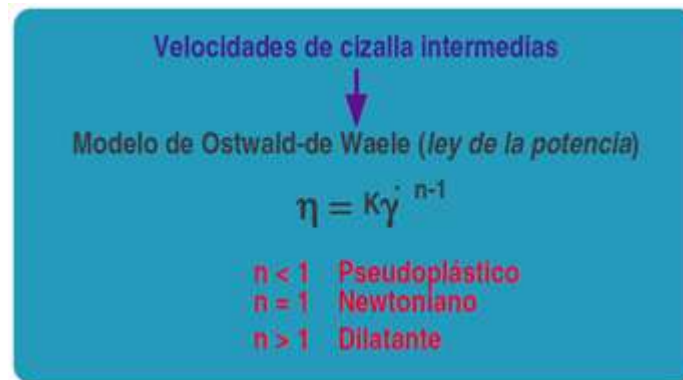
La pendiente de la recta n recibe el nombre de *índice de comportamiento reológico o de flujo* y representa la desviación del comportamiento de flujo respecto al newtoniano (n=1). Entre más grande es la diferencia, menos newtoniano es el sistema.

El valor de k da una idea sobre la consistencia del producto por lo que se le *denomina* índice de consistencia.

Si n=1, la Ley de la Potencia se transforma en la Ley de Newton, siendo $k = \mu$ y $K =$ coeficiente de viscosidad. Se tendrá así un fluido newtoniano, donde la viscosidad permanece constante con respecto a la velocidad de corte.

Si n es mayor que 1, se produce espesamiento y el producto es dilatante. Si n es menor que 1, se produce aclaración y el material es pseudoplástico.

La ecuación no permite la extrapolación de la gráfica, K y n no tienen bases físicas, son una pura descripción matemática de una gráfica experimental.



La Ley de la Potencia admite linearización por representación logarítmica:

$$\log. \sigma = \log. K + n \lg \frac{du}{dy} \quad (4.2)$$

Es decir, al poner en una gráfica $\log \tau$ vs $\log \gamma$ se obtiene una línea recta con pendiente igual a "n" y con intersección en el eje de las ordenadas igual a "log K".

Muchos fluidos muestran este comportamiento en intervalos de velocidades de corte de una década, pero una apreciable curvatura en intervalos más amplios. Por lo tanto, si la velocidad de corte no varía demasiado en un particular campo de flujo, la Ley de la Potencia puede proporcionar una descripción adecuada de su comportamiento.

Este modelo permite una fácil utilización y determinación de los parámetros K y n gráficamente. Su utilización se recomienda para valores del gradiente de velocidades no - próximos al origen donde se encuentra que K tiende a cero.

La expresión da un buen ajuste cuando el gradiente de velocidades varía varios órdenes de magnitud.

La utilización de sólo dos parámetros, K y n, no introduce gran complejidad en el desarrollo de la Mecánica de Fluidos clásica, lo que ha contribuido a su utilización más generalizada, ya que representa una precisión suficiente para la industria.

Es importante señalar la simplicidad de su representación (sólo dos parámetros), fácil manejo, la simplicidad de ajuste (manual, pasando a escalas logarítmicas), la calidad obtenida por la ley de Ostwald respecto a otros modelos más complejos y su actual difusión en la técnica como modelo más general. Como inconvenientes de este modelo, encontramos la falta de una justificación física que los defienda y la variabilidad de las

dimensiones de K, ya que dependen de n y ambos varían. Otra de las desventajas de este modelo es la predicción de viscosidades muy elevadas a bajas cizallas, lo cual podría suponer una drástica sobrevaloración en situaciones de flujo en las que la velocidad de deformación es muy baja.

Sin embargo, se ha demostrado que el modelo de Ostwald describe muy bien las curvas de flujo, sobre todo a altas velocidades de deformación, por lo cual es usual aún hoy en control de calidad por presentar resultados aceptables cuando el tiempo y los costos juegan un papel importante para medición y la valoración.

t°C	K (m.Pa.s/1)	n
4	2.780	0.68
10	2.287	0.68
15	1.740	0.68
20	1.247	0.71
25	1.146	0.68
30	859	0.71
35	678	0.73
40	654	0.71
45	557	0.73
50	515	0.73
55	467	0.74
60	404	0.75
65	402	0.74

Cuadro 5. Parámetros de la Ley de la potencia para zumo clarificado de kiwi a 47° Brix. (Ibarz,A. 2005)

4.3. Modelo de Ellis

Es un modelo de tres parámetros y la viscosidad aparente viene dada por la expresión:

$$\eta = \frac{\eta_o}{1+(\tau/\tau_{1/2})^{a-1}} \quad (4.3)$$

$$\tau_{1/2} \text{ Es el valor de } \tau \text{ para el que } \eta = \eta_o/2. \quad (4.4)$$

Para eliminar la imprecisión de la ley de Ostwald, Ellis añadió al modelo pseudoplástico uno newtoniano, obteniendo gráficas de la viscosidad en función del esfuerzo, lo que

permite un ajuste correcto de los reogramas para bajos valores del gradiente de velocidades.

El modelo de Ellis precisa la obtención de tres valores experimentales, que dan tres puntos del reograma, es decir tres ecuaciones, y permiten obtener los parámetros.

Se recomienda el empleo de esta ley para valores bajos del gradiente de velocidades (soluciones de polímeros). Es de destacar que el comportamiento de Ellis, es primero newtoniano y luego pseudoplástico,

4.4. Modelo de Casson

Este modelo tiende a dar una predicción más realista del flujo a lo largo de un intervalo más amplio de condiciones y es utilizado para materiales que tienden a un flujo newtoniano solo para valores de esfuerzo mucho mayores que el umbral de fluencia del material:

$$\tau^{1/2} = \tau_0^{1/2} + \mu_c^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} \quad (4.5)$$

Es un modelo de dos parámetros semiempíricos, utilizado fundamentalmente en suspensiones de partículas que interaccionan en un medio newtoniano.

μ_c Representa la viscosidad a velocidad de cizalla elevada.

El modelo de Casson es un modelo estructural que a menudo se ha aplicado a suspensiones de alimentos, además de ser utilizado para describir las propiedades del chocolate fundido, siendo adoptado como el método oficial para la determinación de umbral de fluencia por el Instituto Internacional del Chocolate.

Casson consideró que las partículas de la fase dispersa tienen la forma de cilindros huecos, cuya relación axial es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del gradiente de velocidad. Estas partículas están suspendidas en un fluido newtoniano y carecen de movimiento browniano. Los valores de las constantes de Casson dependen de la simetría, concentración e interacción entre las partículas suspendidas y de la viscosidad de la fase dispersante.

La ecuación propuesta por Casson se aplica en la caracterización del flujo de una gran variedad de materiales entre ellos los derivados de frutas, pero su mayor utilidad en estos productos es para determinar el umbral de fluencia.

4.5. Modelo de Sisko

El modelo de Sisko responde a la expresión siguiente:

$$\eta = \eta_{\infty} + k_s \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4.6)$$

En donde: η_{∞} es la viscosidad aparente, $\dot{\gamma}$ el gradiente de velocidad aplicada, k_s el índice de consistencia y n el índice de comportamiento.

Es un modelo de tres parámetros ajustables: η_{∞} , k_s , n y grafica la viscosidad en función de la velocidad de deformación. De forma análoga, Sisko descompone en newtoniano y pseudoplástico.

Para valores altos y medios del gradiente de velocidades, su comportamiento es bueno, no siéndolo para valores bajos. El hecho de tener un parámetro más en comparación con el modelo de Ostwald no lo hace atractivo.

4.6. Modelo de Cross

Una de las expresiones más usadas para modelizar el comportamiento de fluidos estructurados, a altas y bajas velocidades de deformación es el Modelo de Cross:

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_o - \eta_{\infty}}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^p} \quad (4.7)$$

Para $\eta_o \gg \eta \gg \eta_{\infty}$ este modelo se reduce a la ley potencial. Con $n = (1-p)$ y $k = \eta_o (\lambda)^{-p}$; λ es una constante de tiempo característico que es igual al recíproco del valor de $\dot{\gamma}$ para el que $\eta = (\eta_o + \eta_{\infty})/2$.

En general, para fluidos estructurados, los modelos reológicos pueden predecir la forma completa o porciones de la curva de flujo, el modelo de Cross corresponde al primer grupo.

4.7. Modelo de Carreau

El modelo Carreau está basado en la teoría constitutiva integral de redes moleculares, en la que se incorpora la historia completa de deformación del material, permitiendo la modelización adecuada de comportamientos viscoelásticos no lineales.

Para poder aplicar el modelo Carreau es preciso conocer la viscosidad límite η_0 , a velocidad de deformación cero, así como las constantes de tiempo. Para su cálculo es preciso realizar ensayos de cizalla en estado estacionario y experimentos oscilatorios.

$$\eta = \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^s} \quad (4.8)$$

Si $\eta_{\infty} = 0$ se obtiene una expresión útil cuando solo se tiene una zona de viscosidad newtoniana a baja velocidad de cizalla, quedando:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{1}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^s} \quad (4.9)$$

Cuando $\dot{\gamma} \rightarrow 0$, $\eta \approx \eta_0$ (viscosidad límite a velocidad de cizalla cero), es decir, prevé un comportamiento newtoniano hasta una velocidad de cizalla crítica.

λ Es una constante de tiempo; la inversa de este valor coincide aproximadamente con el valor de velocidad de cizalla crítica a partir del cual el comportamiento deja de ser newtoniano.

“s” es un parámetro de ajuste adimensional, relacionado con la velocidad de disminución de la viscosidad, o sea de la pendiente de la curva (n) en la zona no newtoniana.

El modelo de Carreau puede describir el comportamiento de flujo viscosos de emulsiones alimentarias.

4.8. Modelo de Herschel Bulkley

Este modelo incorpora los elementos de los modelos de la potencia y de Bingham, permite caracterizar el flujo de los fluidos plásticos que para valores del esfuerzo superiores al del umbral de fluencia fluyen con carácter no newtoniano:

$$\sigma = \sigma_0 + k \dot{\gamma}^n \quad (4.10)$$

Donde σ_0 es el umbral de fluencia, k el índice de consistencia y n el índice de comportamiento de flujo. Este modelo caracteriza muchos fluidos industriales por lo que se usa a menudo para especificar condiciones en el diseño de plantas de procesado.

Entre los casos especiales de este modelo, se encuentran:

- un material puramente newtoniano tiene $\sigma_0=0$ y $n=1$
- un fluido que sigue la ley de la potencia presenta un $\sigma_0=0$ y $n =$ índice de la potencia.
- un fluido de Bingham tiene σ_0 =umbral de fluencia de Bingham y $n=1$ (fluidos con viscosidad constante).

Uno de los modelos empíricos más utilizados en alimentos es el de Herschel-Bulkley, cuya expresión supone ampliar la ley de la potencia con un término correspondiente al umbral de fluencia.

Las ecuaciones más utilizadas para los fluidos independientes del tiempo son las de la ley de potencia y la de Herschel – Bulkley, esta última es válida solo para valores intermedios de esfuerzo y velocidad de deformación.

El modelo de Herschel-Bulkley ha sido uno de los más utilizados para describir los datos de flujo de dispersiones de proteínas y soluciones de gomas.

También las mermeladas y confituras, además de otros purés y concentrados de zumos de frutas con alto contenido en sólidos solubles totales han sido adecuadamente descritos por el modelo de Herschel-Bulkley en múltiples investigaciones.

Las curvas de flujo de purés de fruta se ajustan a este modelo, con coeficientes de correlación en todos los casos mayores que 0,995, siendo entonces adecuado para describir el comportamiento de flujo de purés frescos de banano, melocotón, papaya, mango, pera y de albaricoque, concentrado de tomate, que se comportan como plásticos no ideales.

4.9. Ajuste a Modelos Reológicos.

En general, la función que da el comportamiento físico de un fluido no es conocida. Todas las funciones reológicas expuestas son aproximaciones que proponen distintos autores. A

esta aproximación de la función empleada se han de añadir los errores de tipo experimental, centrándose en la aproximación de cierta función a una nube de puntos que representa un fenómeno real (despreciados los errores de medida para obtener la nube de puntos).

Para dar una forma analítica a los resultados experimentales, el primer problema que se nos presenta es la elección de la función o ley a ajustar.

La elección se realiza a través de la bibliografía que en el terreno de la Reología existe y luego *de* un estudio comparativo sobre casos reales.

Por emplear sólo dos parámetros reológicos, el más frecuente en la literatura es el modelo de Ostwald. Según la forma que presente el reograma puede llevarnos a la elección de otros modelos.

La adopción del modelo introduce rapidez en el cálculo de los parámetros o coeficientes característicos de la función en el desarrollo del ajuste.

En particular, la linealización polinomial de incrementos, propuesta para los modelos de Ellis y Sisko, es dificultosa de aplicación, pues se desconoce el valor de n y se ha de proceder por tanteos sucesivos.

El ajuste puede realizarse manualmente o con la ayuda de programas informáticos como Origin Pro 8.0, Rheowin Pro Job, TA Orchestrator V.7.1.2.3 y otros.

Partiendo de la nube de puntos (m medidas que establecen la correspondencia entre las variables x e y), se requiere la elección de unos criterios de ajuste para encontrar la curva que esté a la mínima distancia de la nube.

Los criterios se basan en la dependencia del fenómeno y de una sola variable x , es decir que la ley sea: $y = f(x)$. Esta función deberá ser definida y continua en todo el dominio experimentado.

Se supone que el valor de la variable x_i es conocido con toda exactitud y que la precisión de medida de las y_i es constante y acotada superiormente.

4.10. Bibliografía

- Barbosa-Cánovas, G.V.; Ibarz, A y Peleg, M. 1993. Propiedades reológicas de alimentos fluidos. Revisión. Alimentaria. 242, 39-89.
- Darby, R. 1996. Chemical Engineering Fluid Mechanics. En cap. 1-2, Marcel Dekker, Inc. New York.
- Franco, J.M. 2007. Apuntes del Módulo de Fundamentos de Reología. Master en Formulación y Tecnología del Producto. UNIA- UHU. Huelva.
- Ibarz,A.,Barbosa-Cánovas, G. 2005. Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos. Mundi Prensa S.A. Madrid. 177p.
- Macosko, C. 1994.Rheology: Principles and Measurements. En cap. 1 a 3, VCH Publishers, Inc., New York.
- Malkin, A. Ya. 1994. Rheology fundamentals (Fundamental topics in rheology). ChemTec Publishing. Ontario. 62 p.
- Muller, H.G. 1973Introducción a la reología de los alimentos. Zaragoza: Acribia, p14.
- Rha, C.H. 1978. Rheology of fluid foods. Food Technol. 32(7): 77-82 p.
- Soler, M. 1976. Hidrodinámica de los fluidos no newtonianos. UPB. 85-103 p.
- Steffe, J.1996. Rheological methods in food process engineering. Michigan: Freeman Press, 23 p.

CAPITULO 5

CAPITULO 5

5. Viscoelasticidad

5.1. Concepto de viscoelasticidad

Un material dado puede comportarse como un sólido o como un líquido dependiendo de la escala de tiempo del proceso de deformación.

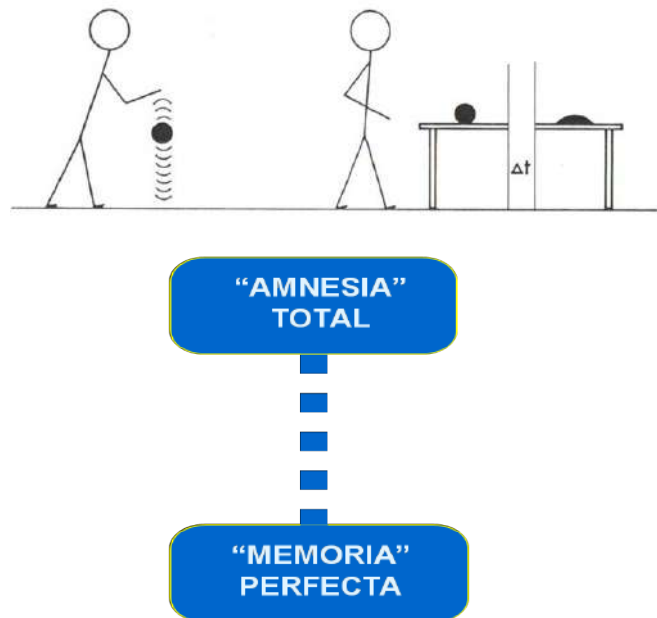


Figura 5.1 “Amnesia total o “Memoria” perfecta

Un sólido elástico ideal es aquel que al retirarle el esfuerzo aplicado recupera su forma original; este comportamiento correspondería a un material capaz de almacenar toda la energía mecánica suministrada por lo que se le asigna el término “memoria perfecta o infinita”.

En cambio, un líquido viscoso puro no puede recuperar ni siquiera parte de su forma original cuando se retira el esfuerzo aplicado, debido a que toda la energía mecánica suministrada se disipa en forma de calor. Se trata de un material de “amnesia total o memoria nula”.

Un fluido viscoelástico lineal es aquel que posee componentes viscosos y viscoelásticos en diversos grados. Los esfuerzos son función, no sólo de la deformación instantánea,

sino también del pasado completo de la deformación; por ellos son llamados fluidos con “memoria débil “.

El estudio de la viscoelasticidad implica establecer relaciones entre el esfuerzo, la deformación y el tiempo. En el caso de que tanto el esfuerzo como la deformación sean infinitesimales y las relaciones entre ambas magnitudes en función del tiempo se puedan describir mediante ecuaciones diferenciales lineales constantes, el comportamiento se denomina viscoelástico lineal. Ello implica que el esfuerzo es solo función del tiempo y no de la magnitud del esfuerzo (Darby, 1976).

✓ Sólido rígido (Euclides)	$\gamma = 0$
✓ Sólido elástico lineal (Hooke)	$\sigma = G \gamma$
✓ Sólido elástico no lineal	$\sigma = G(\gamma) \gamma$
✓ Viscoelástico	$\sigma = f(\gamma, \dot{\gamma}, t)$
✓ Fluido viscoso no lineal	$\sigma = \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma}$
✓ Fluido viscoso lineal (Newton)	$\sigma = \mu \dot{\gamma}$
✓ Fluido Inviscido (Pascal)	$\sigma = 0$

Cuadro 6. Clasificación reológica de materiales.

La teoría clásica de la elasticidad considera las propiedades mecánicas de los sólidos elásticos de acuerdo con la ley de Hooke, es decir, la deformación conseguida es directamente proporcional al esfuerzo aplicado. Por otra parte, la teoría hidrodinámica trata las propiedades de los líquidos viscosos para los que, de acuerdo con la ley de Newton, el esfuerzo aplicado es directamente proporcional a la velocidad de deformación, pero independiente de la deformación misma.

De esta forma si se aplica un esfuerzo sobre un sólido elástico éste se deforma hasta que la fuerza cesa y la deformación vuelve a su valor inicial.

Por otra parte, si un esfuerzo es aplicado sobre un fluido viscoso éste se deforma, pero no recupera nada de lo que se deforma. Un comportamiento intermedio es el comportamiento viscoelástico, en el que el cuerpo sobre el que se aplica el esfuerzo recupera parte de la deformación aplicada.

Se define como material viscoelástico aquel cuyo comportamiento tiene una componente elástica y otra viscosa, de forma que parte de la energía comunicada al someterle a una determinada tensión se almacena como energía potencial al estilo de los sólidos ideales y otra parte se disipa como hacen los fluidos. Por esta razón suele decirse que los materiales viscoelásticos tienen un comportamiento intermedio entre el de un sólido ideal y el de un fluido newtoniano.

Son viscoelásticos los polímeros en estado sólido, los polímeros fundidos y sus disoluciones o dispersiones (pinturas, adhesivos, etc.). Pero también se da una Reología de polímeros termoestables, comportamiento parecido en el caso de alimentos como la mayonesa, fluidos orgánicos como la sangre o el líquido sinovial, o en otros sistemas como las pastas dentífricas o los asfaltos.

Los materiales reales pueden presentar comportamiento elástico, comportamiento viscoso o una combinación de ambos, depende del esfuerzo aplicado y de su duración. Todo fluye si se espera lo suficiente, lo cual se expresa mediante el Número de Déborah.

Número de Déborah: $De = \lambda / T$

De acuerdo al valor del número de Déborah todas las sustancias pueden ser clasificadas:

$De < 1$ Comportamiento viscoso.

$De > 1$ Comportamiento elástico.

$De \approx 1$ Comportamiento viscoelástico.

En condiciones normales, no es apreciable la elasticidad debida al estiramiento de los enlaces interatómicos y se puede afirmar que la elasticidad de los alimentos viscoelásticos es debida a la deformación elástica de las macromoléculas. En los alimentos viscoelásticos es frecuente que sólo se dé una recuperación parcial, porque la red tridimensional elástica se desintegra bajo el efecto de la tensión.

El material viscoelástico se comporta de la siguiente forma:

- Ante la aplicación de un esfuerzo, un material viscoelástico responde deformándose instantáneamente con algún comportamiento elástico, la tensión aplicada produce una deformación.

- A partir del instante cero, el material fluye de acuerdo a un modelo reológico de forma que la tensión se relaja al aproximarse el material a una nueva posición de equilibrio.
- A tiempo infinito, la tensión puede haberse relajado totalmente, si el material fluye de acuerdo al modelo newtoniano o de la potencia, o conservar un valor si el flujo es de plástico general o de Bingham.
- Si el esfuerzo cesa en cualquier momento antes de la relajación, el material se retrotrae recuperando algo de su forma inicial.

Todo fluido es algo viscoelástico. Sin embargo, la viscoelasticidad sólo se hace notar cuando el tiempo de relajación es apreciable. En la siguiente tabla se muestran los tiempos de relajación de algunos materiales.

Fluidos	T (°C)	λ_{rel} (S)	η_0 (Pa s)
Agua	20	1E - 12	0.001
Aceite Mineral	30	7E - 10	0.5
Poly-dimethylsiloxano	30	1E - 6	0.3
	125	1.7E - 4	100
Polietileno de baja densidad	115	10	2E5
	240	0.1	3000
Polietileno de alta densidad	180	0.07	2000
	220	0.05	1000
Poliestireno de alto impacto	170	7	2E5
	210	3	1E5
0.5% de celulosa de hidroxietil en agua	27	0.1	1.3
Vidrio	27	>1E5	>1E18

Cuadro 7. Tiempo de relajación y Viscosidad límite para varios fluidos viscoelásticos (Steffe, 1996).

La mayoría de los sistemas alimenticios se denominan viscoelásticos por su carácter combinado de viscosidad y elasticidad. Las funciones de los materiales viscoelásticos se pueden determinar mediante experimentos que involucran la aplicación de deformaciones en estado no estacionario.



Figura 5.2 El helado muestra propiedades sólidas y líquidas a la vez (Viscoelástico)

Existen varios alimentos que presentan propiedades viscoelásticas. Se trata, en general, de productos con características de geles o semisólidos como los geles de almidón, gelatina y los de leche, los helados, las manzanas, los fideos cocidos, el queso, la masa de harina de trigo como la del pan, las espumas de proteína y los granos de maíz y trigo. También presentan propiedades viscoelásticas la crema de leche y la mantequilla batida.

Alimentos como el queso fundido, purés vegetales (papa y guisante) y prácticamente todas las masas para la fabricación de galletas, dulces, bollería y todo tipo de productos horneados o fritos son viscoelásticos.

El comportamiento viscoelástico de una muestra se puede caracterizar de varias maneras. Una de ellas es estudiar la evolución del esfuerzo con el tiempo, a una velocidad de deformación fija, de las curvas obtenidas es posible realizar un análisis comparativo de las diferentes muestras.

También se utilizan pruebas dinámicas oscilatorias se realizan aplicando una pequeña deformación (o esfuerzo) sinusoidal, midiendo el esfuerzo (o deformación resultante), los ensayos con pequeñas amplitudes oscilatorias se utilizan en las pruebas dinámicas oscilatorias.

Modelar el comportamiento viscoelástico es una cuestión de primera magnitud en el diseño de sistemas de extrusión y laminado de masas ya que la retrogradación típica de los materiales viscoelásticos provoca que los productos sean más cortos y gruesos que los proyectados, alterando profundamente los parámetros de horneado o fritura subsiguientes.

5.2. Modelo de Hooke

El comportamiento de muchos sólidos se aproxima a la ley de Hooke (comportamiento elástico) en infinitesimales deformaciones. Este modelo representa la ley de Hooke de la elasticidad, es decir, un resorte.

5.3. Modelos Analógicos

Los modelos analógicos describen las respuestas de los materiales viscosos y elásticos por analogía con la respuesta de ciertos elementos mecánicos. La descripción de los materiales se realiza, entonces, por combinación de elementos viscosos y elásticos; por tanto, estos modelos son aplicables solamente a comportamientos viscoelásticos lineales.

Los materiales reales muestran comportamientos no lineales bajo grandes deformaciones, con lo que en estos modelos sólo son adecuados para pequeños esfuerzos. Los modelos analógicos resultan extraordinariamente útiles para comprender la respuesta de un material viscoelástico a una sollicitación mecánica.

5.4. Modelo de Maxwell

El modelo de Maxwell es un modelo matemático que permite explicar el comportamiento de los fluidos viscoelásticos, el más simple de todos ellos puede obtenerse combinando un sólido de Hooke con un fluido de Newton.

$$\gamma = \gamma_{el} + \gamma_{vis} \quad (5.1)$$

$$\mu\gamma = \sigma + \lambda_{rel} \frac{d\sigma}{dt} \quad (5.2)$$

Donde λ_{rel} es el tiempo de relajación definido como la relación entre la viscosidad newtoniana (η) y el módulo de elasticidad (G).

Consiste en un muelle y un sistema émbolo-cilindro conectados en serie (Figura 5.3).

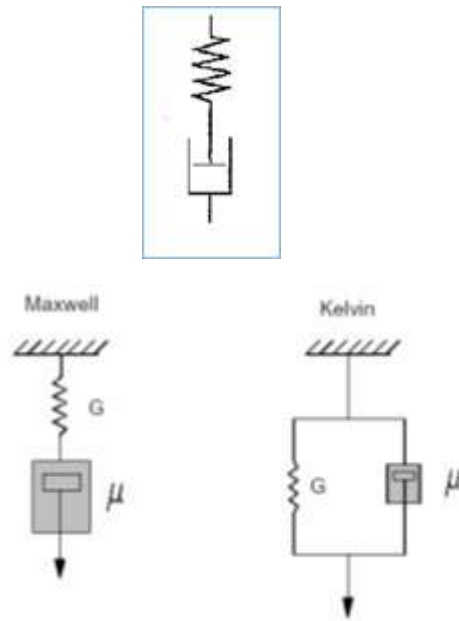


Figura 5.3 Modelo de Maxwell: a) elemento de Maxwell; b) muelle correspondiente a la simulación el comportamiento elástico de un material; c) pistón correspondiente a la simulación el comportamiento viscoso de un material.

El modelo implica que las deformaciones elásticas, representadas mediante un muelle, y viscosas, simuladas a través de un émbolo son aditivas. Se aplica una tensión instantánea que provoca una deformación en el muelle, lo que hace que el sistema émbolo-cilindro se mueva en el líquido con una velocidad de deformación constante. Cuando cesa la tensión, el muelle se recupera instantáneamente, pero la deformación del sistema émbolo-cilindro permanece intacta. Pueden conectarse en paralelo varios modelos de Maxwell, obteniéndose el modelo de Maxwell múltiple.

Este modelo resulta ser excesivamente simple y restringido, solamente puede ser aplicado cuando el comportamiento viscoelástico es lineal y, por lo tanto no es adecuado cuando se quiere representar un comportamiento no lineal como ocurre en los materiales reales.

Señala Barbosa-Cánovas (1992) que generalmente, la viscoelasticidad que presentan los alimentos es no lineal, no pudiéndose aplicar este modelo de Maxwell, debiéndose utilizar modelos constitutivos, siendo el de Carreau uno de ellos.

5.5. Modelo de Kelvin

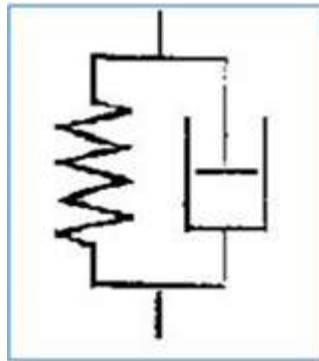


Figura 5.4 Un modelo compuesto por un modelo de Hooke y un modelo de fluido newtoniano en paralelo. También denominado Modelo de Voigt.

Los mecanismos son iguales a los del modelo de Maxwell, pero conectados en paralelo. El modelo implica que las deformaciones elásticas y viscosas son iguales. Las tensiones de ambos mecanismos son las que se suman. La respuesta elástica a la tensión está ahora retardada por el sistema émbolo-cilindro y tras la eliminación del esfuerzo, la deformación total se recupera lentamente aunque de forma total. Este tipo de comportamiento se denomina elasticidad retardada (White, 1990; Barnes, 2000).

5.6. Región Viscoelástica Lineal

Todos los líquidos estructurados tienen un estado natural de reposo que representa un estado de mínima energía para su ordenación estructural. Cuando estos líquidos se deforman, las fuerzas termodinámicas actúan de inmediato para restablecer su estado de mínima energía, de forma similar a como lo haría un muelle para recuperar su forma original. Como ocurre en un muelle, el movimiento para restablecer el estado de mínima energía implica la necesidad de almacenar energía potencial, lo que supone la existencia de una fuerza elástica que intenta recuperar el estado inicial. Este tipo de energía es el fundamento de la elasticidad de los líquidos estructurados. Algunos ejemplos de estados de mínima energía son:

- Una red polimérica enrollada con una configuración arbitraria y sin forma.
- Una distribución espacialmente arbitraria de partículas en una suspensión en reposo.

En un primer momento, las fuerzas de restablecimiento aumentan de forma lineal con la deformación producida respecto del estado de reposo, sin embargo, a partir de un cierto valor de la deformación, la relación entre ambas variables disminuye de forma que para grandes deformaciones se alcanza un estado estacionario y la fuerza elástica se hace constante. La región donde la relación tensión-deformación es lineal se denomina *región lineal viscoelástica* y la que se encuentra más allá de ella se conoce como *región viscoelástica no lineal*.

La aplicación de tensión sobre este tipo de materiales estructurales provoca variaciones en su microestructura y cuando las fuerzas elásticas aplicadas alcanzan valores altos, los cambios en la microestructura son tan radicales que implican que las propiedades del material sean diferentes según se miren en la dirección de la deformación ejercida o en otra: el material se ha vuelto anisótropo.

En cuanto a los materiales viscoelásticos, el comportamiento es algo parecido, para deformaciones muy bajas, casi cercanas al equilibrio existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación, encontrándose en la zona denominada como de "viscoelasticidad lineal". Para deformaciones mayores, dicha relación deja de ser lineal y se alcanza la denominada zona de "viscoelasticidad no lineal".

Para un ingeniero en alimentos que pueda encontrarse en la situación de tratar con materiales viscoelásticos ambas zonas son de interés:

- a) Por un lado, las bajas deformaciones conseguidas en los reómetros aseguran un régimen de viscoelasticidad lineal, que como se ha dicho, está sujeto a deformaciones casi infinitesimales, muy cercanas al equilibrio, de forma que la respuesta de un material en este régimen está fuertemente condicionada con su estructura molecular, lo cual le confiere la capacidad de ser una buena herramienta de caracterización.
- b) Por otro lado, durante el procesado de los polímeros estos sufren importantes deformaciones que corresponden a la zona de viscoelasticidad lineal. Por ejemplo, a la hora de abordar el diseño de ciertas operaciones unitarias de procesado de alimentos, sería necesario contemplar por un lado la viscoelasticidad de los materiales y por otro las elevadas deformaciones que tienen lugar.

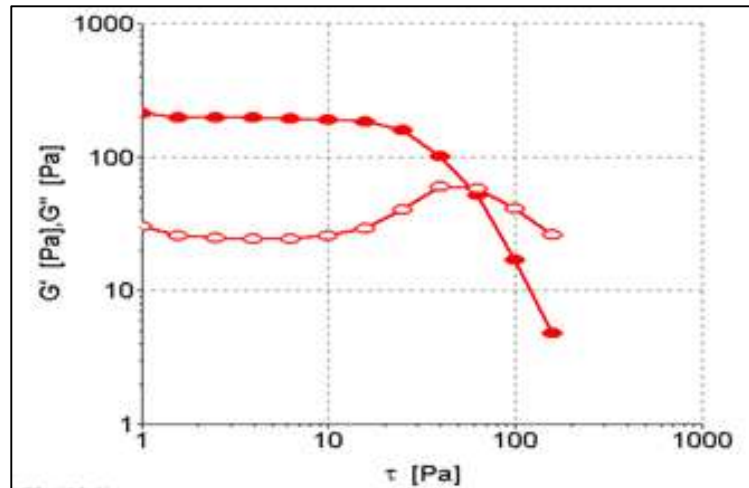


Figura 5.5 Intervalo viscoelástico lineal

Las funciones dinámicas G' y G'' son independientes del esfuerzo o de la deformación.

5.7. Caracterización de Fluidos Viscoelásticos

La caracterización de un fluido viscoelástico mediante reometría se realiza utilizando tres tipos de ensayos:

- Ensayos oscilatorios o dinámicos.
- Ensayos de transición. REALAJACIÓN DEL ESFUERZO
- Ensayos estáticos. FLUENCIA O CREEP

Muchos alimentos muestran un comportamiento de sólido (elástico) y de líquido (plástico). La determinación del comportamiento viscoelástico exige equipamientos caros que se usan en laboratorios de desarrollo de productos.

Aunque se puede realizar una amplia variedad de experimentos diferentes para cada tipo de ensayo, solamente se van a describir aquellos que mayormente se emplean, que corresponden al del grupo de ensayos oscilatorios o dinámicos.

5.8. Funciones Viscoelásticas Dinámicas

Desde estos ensayos oscilatorios es posible obtener una serie de parámetros o funciones viscoelásticas dinámicas para la caracterización del comportamiento viscoelástico de los productos objeto de estudio, en este caso, de alimentos:

G': **Módulo elástico o de almacenamiento.** Índice del componente elástico. Es directamente proporcional a la energía almacenada por el material en un ciclo de deformación.

G'': **Módulo viscoso o de pérdidas.** Índice del comportamiento viscoso. Es directamente proporcional a la energía disipada por el material en un ciclo de deformación.

G*: **Módulo complejo.** Representa la resistencia total de una sustancia frente a la deformación aplicada. Es definido como:

$$G^* = G' + iG'' \quad (5.3)$$

δ: **Ángulo de desfase.** Índice de la viscoelasticidad. Nos da una primera idea de la naturaleza reológica del material ya que mientras en los sólidos elásticos el desfase es muy próximo a cero, en los líquidos newtonianos el desfase es 90°.

Los materiales viscoelásticos poseen un desfase intermedio. A tenor de lo expresado anteriormente, un material elástico poseerá un elevado módulo elástico y un pequeño módulo viscoso ya que δ se aproximará a cero. Cuanto mayor sea el carácter viscoso del material, el desfase δ aumentará y el módulo viscoso irá aumentando en detrimento del módulo elástico.

La tangente del ángulo de desfase, denominada *tangente de pérdidas*, es una función viscoelástica dinámica generalmente dependiente de la frecuencia, que indica la razón entre la componente viscosa y elástica, lo que permite tener un conocimiento en términos relativos del comportamiento elástico y viscoso de la muestra.

$$\tan \delta = G''/G' \quad (5.4)$$

Así, el valor 1 de la $\tan \delta$ indica que el material responde con componentes viscosa y elástica del mismo valor. Un $\delta = 45^\circ$ significa que no se da una preponderancia de la componente elástica sobre la viscosa ni viceversa. Un material viscoelástico muestra un comportamiento intermedio entre el elástico y el viscosos puros, de aquí que la onda del esfuerzo de cizalla presente un ángulo de desfase respecto a la onda de la deformación comprendida entre 0° y 90°.

η^* : **Viscosidad Compleja.** Alternativamente al módulo complejo G^* , puede definirse la viscosidad compleja η^* , la cual describe la resistencia total de un material a la cizalla dinámica.

$$\eta^* = G^* / \omega \quad (5.5)$$

Se definen dos propiedades reológicas, el módulo de almacenamiento, G' , que representa la componente elástica del producto, y el módulo de pérdidas, G'' , que representa su carácter viscoso.

Funciones viscoelásticas derivadas de G^*

$$G' = G^* \cdot \cos\delta \quad \begin{array}{l} \text{Módulo de almacenamiento } G' \\ \text{(Componente elástico)} \end{array} \quad (5.6)$$

$$G'' = G^* \cdot \sin\delta \quad \begin{array}{l} \text{Módulo de pérdidas } G'' \\ \text{(Componente viscoso)} \end{array} \quad (5.7)$$

$$\frac{G''}{G'} = \frac{\sin\delta}{\cos\delta} = \tan\delta \quad \text{Tangente de pérdidas } \tan\delta \quad (5.8)$$

$$|\eta^*| = \frac{G^*}{\omega} \quad \text{Viscosidad compleja, } \eta^* \quad (5.9)$$

δ es el ángulo de desfase. Si el fluido es puramente elástico, $\delta=0^\circ$ y $G^*=G'$, $G''=0$. En un fluido viscoso ideal $\delta=90^\circ$ y $G''=G^*$, $G'=0$.

Otra importante función viscoelástica es el módulo de viscosidad compleja, η^* , donde la parte real, la viscosidad dinámica η' representa la componente viscosa en fase entre el esfuerzo y la velocidad de deformación, y la parte imaginaria η'' es la componente elástica o desfasada. Los parámetros G'' y η' pueden considerarse como una contribución viscosa asociada con una disipación de energía hecha sobre el fluido, mientras G' y η'' una contribución asociada con la habilidad del fluido de almacenar energía.

Estas funciones viscoelásticas han sido usadas para caracterizar diversos tipos de alimentos.

5.9. Ensayos Oscilatorios O Dinámicos

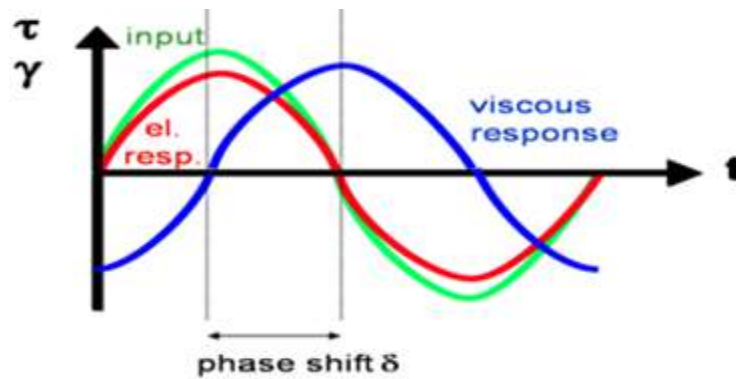


Figura 5.6 Material Viscoelástico: esfuerzo, deformación y desfase δ entre ambos.

En los fluidos alimenticios mediante los ensayos reológicos dinámicos donde se aplica de forma oscilatoria una pequeña deformación o velocidad de deformación sobre un fluido, se mide la amplitud de la respuesta del esfuerzo cortante y del ángulo de fase entre el esfuerzo cortante y la deformación. Las medidas mecánicas dinámicas u oscilatorias están cobrando un interés creciente debido a que permiten caracterizar las propiedades viscosas y elásticas del material.

Estos ensayos corresponden al estado de viscoelasticidad lineal si el esfuerzo es linealmente proporcional a la deformación aplicada y si la respuesta del esfuerzo es en forma de una onda sinusoidal. En el caso de un sólido elástico esta onda está en fase con la velocidad de deformación aplicada. Para un líquido viscoso ideal existe un desfase de 90° entre ellos. En fluidos viscoelásticos el ángulo de desfase está comprendido entre 0 y 90° .

Este tipo de ensayo permite cuantificar en qué medida un sistema alimentario se comporta como sólido o como líquido. De hecho se necesita conocer una serie de parámetros o funciones viscoelásticas dinámicas para la caracterización del comportamiento viscoelástico de alimentos:

En este tipo de experimentos la deformación aplicada varía sinusoidalmente y con el tiempo de acuerdo con la expresión: $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$ mientras que el esfuerzo varía con la misma frecuencia ω , pero presentando un desfase δ con respecto a la deformación:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (5.10)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones que describen el comportamiento de la deformación y el esfuerzo de cizalla, es posible desarrollar la ecuación constitutiva hasta llegar a la expresión:

$$\sigma = y_0 (G' \sin \omega t + G'' \cos \omega t) \quad (5.11)$$

definiendo el módulo de almacenamiento o módulo elástico $G'(\omega)$ y el módulo de pérdidas o módulo viscoso $G''(\omega)$:

$$G'() = G(s) \sin s \, ds \quad (5.12)$$

$$G''() = G(s) \cos s \, ds \quad (5.13)$$

Entre sus ventajas hay que destacar que trabajan en el dominio de viscoelasticidad lineal y que se trata de técnicas no destructivas, es decir, las medidas se realizan sin ocasionar daño estructural a la muestra, por lo que los parámetros reológicos dinámicos pueden relacionarse con la estructura molecular de la misma.

5.9.1. Barrido de Esfuerzo de Cizalla

Este ensayo se realiza específicamente para determinar la extensión del dominio viscoelástico lineal a una frecuencia dada, intermedia del intervalo de frecuencias disponible experimentalmente, aumentando progresivamente la amplitud de la onda de esfuerzo de cizalla. A medida que esta última aumenta, la respuesta del sistema se caracteriza por la constancia de las funciones viscoelásticas dinámicas hasta que se alcanza una amplitud del esfuerzo de cizalla crítica, a partir de la cual G' y G'' comienzan a disminuir siendo más importante la caída de G' que la de G'' , por lo que la salida del dominio viscoelástico lineal se corresponde con un aumento de la tangente de pérdidas.

El límite del dominio viscoelástico lineal, es decir, el intervalo máximo de esfuerzos de cizalla en el que se cumple la condición de que tanto la componente elástica de la respuesta (G') como la viscosa (G'') son independientes respectivamente de la amplitud de la onda del esfuerzo de cizalla, se determina para cada muestra con un barrido de esfuerzos de cizalla a una frecuencia de 1 rad.s⁻¹.

Un análisis más fiable de la extensión del dominio viscoelástico lineal requiere que el tipo de ensayo anterior se repita a frecuencias fijadas inferiores y superiores a la usualmente escogida (1 rad.s⁻¹). Por esta razón, se investiga generalmente el efecto de tres

frecuencias distintas, 0,1, 1, y 10 rad.s-1 en la extensión del dominio de viscoelasticidad lineal, no apreciándose diferencias notables en las amplitudes del esfuerzo de cizalla críticas obtenidas con las tres frecuencias.

Este ensayo permite, por lo tanto, seleccionar la amplitud de la onda del esfuerzo de cizalla a la que se estudia la influencia de la frecuencia, como se describe seguidamente, garantizando la no destrucción irreversible de la estructura del alimento en el intervalo de frecuencias seleccionadas.

Asimismo, se utilizan para la determinación del umbral de fluencia dinámico en el estudio de la comparación de diferentes métodos para determinar el umbral de fluencia en alimentos.

5.9.2. Barrido de Frecuencia

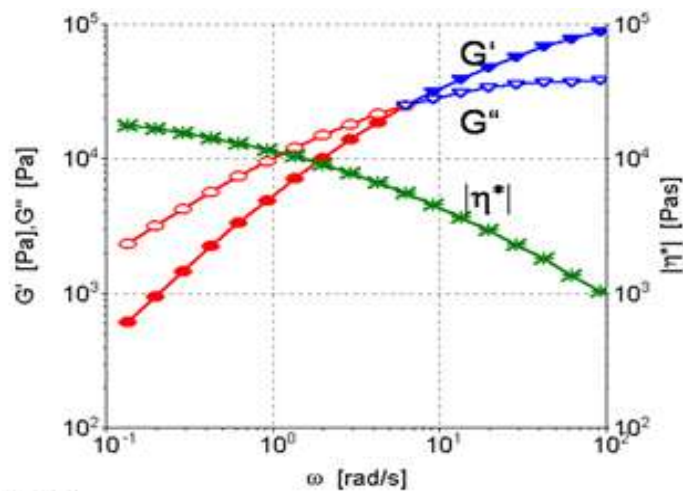


Figura 5.7 Barrido de frecuencia. La respuesta a bajas frecuencias es fundamentalmente viscosa, a altas frecuencias es fundamentalmente elástica.

Los barridos de frecuencia poseen como ventajas:

- El intervalo de medida amplio, ej. 0,01- 100 rad/s.
- Son ensayos no destructivos, abarcan el análisis de la estructura cuasi-imperturbada del material

En estos barridos se especifican la temperatura y la deformación, que se mantienen constantes durante todo el experimento. Se realiza un barrido de frecuencia en el intervalo que va de 0,5 a 80 Hz, aplicando una deformación del 2 %, una temperatura de -10°C,

una precizalla (Preshear) de 10 s⁻¹ durante 30 s y un tiempo de espera de 10 minutos una vez alcanzada la temperatura de consigna.

Los barridos de frecuencia (temperatura constante) son normalmente empleados para la caracterización de materiales. Teniendo en cuenta el principio de equivalencia entre tiempo ↔ frecuencia ↔ temperatura es inmediato suponer que la forma de las curvas obtenidas para cualquier módulo o para la tangente de pérdidas haciendo un barrido de frecuencias o un barrido de temperaturas serán muy semejantes.

Una vez seleccionada la amplitud de la onda del esfuerzo de cizalla a la que se va a estudiar la influencia de la frecuencia en cada muestra, se procede a la caracterización viscoelástica lineal de la misma mediante espectros mecánicos, lo que implica conocer la dependencia de las funciones viscoelásticas dinámicas, por ejemplo G' y G'' , respecto a la frecuencia en un intervalo de frecuencias lo más amplio posible.

En este tipo de estudio, la caracterización viscoelástica lineal se realiza en un intervalo de frecuencias generalmente de 0,1 a 100 rad.s⁻¹. Se obtienen tres espectros mecánicos para cada muestra, y todas las medidas reológicas se llevan a cabo por duplicado en cada combinación experimental.

Adicionalmente, se pueden representar las funciones reológicas dinámicas de alimentos (G' y G'') usando un modelo matemático simple del tipo ley potencial.

Para ello, se obtienen regresiones lineales del $\ln(G')$ y $\ln(G'')$ frente al $\ln(\omega)$, estimándose las magnitudes de las pendientes y ordenadas en el origen para cada componente viscoelástica a partir de las ecuaciones:

$$G' = k'(\omega)n' \quad (5.14)$$

$$G'' = k''(\omega)n'' \quad (5.15)$$

Donde n' , $\ln(K')$, n'' y $\ln(K'')$ son los coeficientes de las regresiones que relacionan G' y G'' con la frecuencia.

Las tensiones elástica y viscosa representan el comportamiento como sólido elástico ideal y fluido viscoso ideal, respectivamente. Ambas viscosidades pueden relacionarse con las propiedades del material mediante la relación tensión-deformación o módulo de cizalla.

El módulo de cizalla complejo (G^*) mide la resistencia total de los materiales a la deformación y su valor corresponde a la relación entre la tensión compleja y la deformación. El módulo de cizalla complejo puede entenderse como la suma compleja de las componentes elástica y viscosa del material, que se representarán respectivamente por el módulo elástico (G') y el módulo viscoso (G'').

Cuando lo que se mide en un experimento oscilatorio es la viscosidad se puede hablar en los mismos términos que con el módulo de cizalla.

Así, tendremos una viscosidad compleja (η^*), con sus respectivas componentes elástica (η') y compleja (η'').

El límite del dominio viscoelástico lineal, es decir, el intervalo máximo de esfuerzos de cizalla en el que se cumple la condición de que tanto la componente elástica de la respuesta (G') como la viscosa (G'') son independientes respectivamente de la amplitud de la onda del esfuerzo de cizalla, se determina para cada muestra con un barrido de esfuerzos de cizalla a una frecuencia de 1 rad.s⁻¹.

Este ensayo permite seleccionar la amplitud de la onda del esfuerzo de cizalla a la que se estudia la influencia de la frecuencia, como se describe seguidamente, garantizando la no destrucción irreversible de la estructura del material alimentario en el intervalo de frecuencias seleccionado.

Asimismo, este ensayo se utiliza para la determinación del umbral de fluencia dinámica en el estudio de la comparación de diferentes métodos para determinar el umbral de fluencia en alimentos tipo puré (Capítulo I.2) (Yoshimura y col. 1987; Qiu y Rao, 1988; Steffe, 1992a).

Los ensayos oscilatorios constituyen una de las herramientas fundamentales y de creciente uso para la caracterización de las propiedades viscoelásticas de los alimentos, y son más fiables que las medidas en estado estacionario.

Esta técnica no destructiva posibilita que las medidas se realicen sin provocar daño estructural a la muestra, lo que permite relacionar los parámetros reológicos dinámicos con la estructura molecular en un estado de equilibrio próximo a una situación de reposo y con sus temperaturas de transición vítrea (Gunasekaran y Ak, 2000). Por lo tanto, un

cambio en la estructura se reflejará en los valores de las funciones viscoelásticas dinámicas, e incluso en la dependencia de las mismas respecto a la frecuencia.

Los datos obtenidos de los ensayos oscilatorios pueden ser utilizados en la técnica de superposición tiempo-temperatura para ampliar el intervalo de frecuencias que, de otro modo, sería inaccesible experimentalmente.

Además, es generalmente más rápido desarrollar ensayos oscilatorios que otros experimentos viscoelásticos lineales, tales como ensayos de fluencia y de relajación de tensión, si bien ello depende del intervalo seleccionado y del número de frecuencias.

Un cambio repentino de desplazamiento (prueba de relajación de esfuerzo) o carga (prueba de fluencia) no es necesario en los ensayos de cizalla oscilatoria.

Dado que se trata de un dominio de frecuencia más que un ensayo de dominio de tiempo, la amplitud de la deformación y la escala de tiempo pueden ser variadas independientemente.

5.9.3. Barrido de Temperatura.

Estos barridos se llevan a cabo en diversos rangos de temperatura y con generalmente una frecuencia de 1 Hz. y una deformación inicial de 0,1 % para la temperatura inicial y se va aumentando conforme lo hace la temperatura, mientras que el momento generado disminuye debido a la fusión de la muestra. La disminución de los momentos generados implica así el aumento de la deformación programada, evitando siempre que el momento resultase inferior al límite marcado por el intervalo de medida del equipo.

En los ensayos dinámicos, una vez determinado el límite de viscoelasticidad lineal, la caracterización viscoelástica lineal completa del material requiere además la determinación del denominado espectro mecánico, es decir, de la influencia de la frecuencia del movimiento oscilatorio en un intervalo de frecuencias lo más amplio posible sobre los valores de al menos dos funciones viscoelásticas que permitan conocer tanto la respuesta elástica como la viscosa de un material.

Asimismo, la información que proporcionan los espectros mecánicos ofrece la posibilidad de que puede utilizarse para caracterizar o clasificar una dispersión desde un punto de vista estructural.

Las soluciones diluidas muestran valores de G'' más elevados que G' a lo largo de todo el rango de frecuencias, aunque a altas frecuencias los módulos se van aproximando, y además se caracterizan por ser ambos módulos fuertemente dependientes de la frecuencia. Las soluciones concentradas muestran curvas de G'' y G' cruzándose en aproximadamente el centro del intervalo de frecuencias, indicando una clara tendencia hacia un comportamiento más sólido a frecuencias más altas; en estas soluciones el volumen total hidrodinámico de las cadenas individuales excede el volumen de la solución.

La frecuencia a la cual G' se iguala a G'' , se denomina frecuencia de superposición o confluencia.

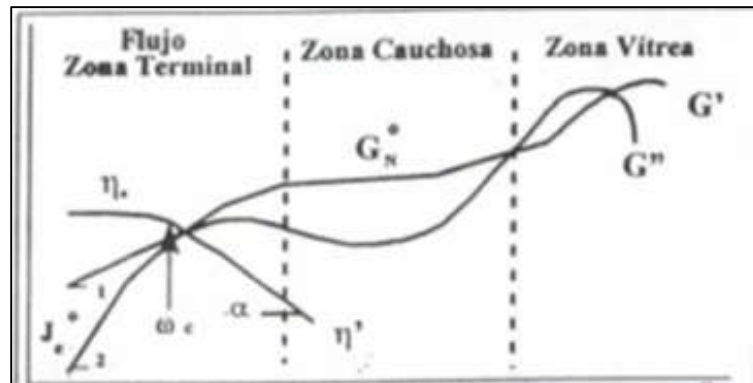


Figura 5.8 Regiones del espectro viscoelástico de fluidos estructurales

Los geles fuertes y débiles se clasifican, a su vez, como tales en base a su espectro mecánico. Los geles fuertes muestran G' mayores que G'' , siendo G' casi independiente de la frecuencia, y G'' muestra un mínimo a frecuencias intermedias.

Por ejemplo las dispersiones de almidón de maíz modificado, según investigaciones realizadas por Rao y col (1997), se comportan como geles fuertes.

Asimismo, según Udyarajan y col. (2007) la baja dependencia de G' , G'' y δ con la frecuencia, observada en queso mozzarella semidescremado y libre de grasa, a temperaturas inferiores a 40 °C, indicó un comportamiento de gel fuerte.

Estos sistemas se caracterizan, en los intervalos de frecuencia disponibles en la actualidad, por presentar valores de G' al menos dos órdenes de magnitud superiores a los de G'' , y una pendiente respecto a la frecuencia prácticamente nula. El valor límite a baja frecuencia de G' se asocia a un valor del módulo de equilibrio, característico de un

comportamiento viscoelástico para materiales con propiedades mecánicas predominantemente sólidas.

A su vez, los **geles débiles** poseen propiedades reológicas intermedias entre disoluciones y geles fuertes. Bajo pequeñas deformaciones, se parecen a los geles fuertes en su comportamiento mecánico, pero a medida que la deformación aumenta, las redes tridimensionales experimentan una progresiva ruptura en cúmulos más pequeños.

Estos sistemas pueden fluir homogéneamente con propiedades típicas de flujo de sistemas dispersos. A bajas deformaciones, estos sistemas exhiben un espectro mecánico de gel (G' es casi independiente de la frecuencia y G'' aumenta con la frecuencia, por lo que la $\tan \delta$ también aumenta con la frecuencia), mientras que, en el *punto de gel*, la $\tan \delta$ es independiente de la frecuencia.

En pasta de tomate, los gráficos del $\log \omega$ frente al $\log G'$ y $\log G''$ permitieron a Rao y Cooley (1992) observar que G' era muy superior a G'' , en todo el intervalo de frecuencias estudiado.

Además, las regresiones lineales del $\ln \omega$ frente al $\ln G'$ y $\ln G''$ mostraron que las líneas rectas ajustadas presentaban pendientes con valores muy pequeños (0,075-0,210 para G' y 0,110 a 0,218 para G''), lo que permitió concluir que, desde un punto de vista estructural, las muestras de pasta de tomate se comportan preferentemente como geles verdaderos, y no como geles débiles.

Sin embargo, un ejemplo convencional de comportamiento característico de gel débil es el comportamiento viscoelástico de las dispersiones de goma xantana (Rao, 1999b). Ahmed y Ramaswamy (2007) observaron un comportamiento de gel débil en purés infantiles de frutas (manzana, albaricoque y plátano), con el módulo elástico superior al módulo viscoso en un rango de frecuencia de 0,1-10 Hz. No obstante, los espectros mecánicos de geles formados por mezclas de polisacáridos pueden presentar aspectos no usuales (Doublier, 1992), como consecuencia del peso relativo de las interacciones entre cada polisacárido y el disolvente y de las interacciones polisacárido- polisacárido.

Por lo tanto, el conocimiento de las propiedades viscoelásticas de diversos alimentos permite obtener información en condiciones próximas a un estado inalterado, para

caracterizar su microestructura y, también para predecir su comportamiento de flujo a través del desarrollo de adecuados modelos viscoelásticos no lineales.

5.10. Ensayos de relajación

Se aplica al material una deformación durante un período de tiempo de aplicación. Estos ensayos permiten determinar el tiempo que tarda en estabilizarse la muestra para una cierta deformación.

5.11. Ensayo de Fluencia o Creep

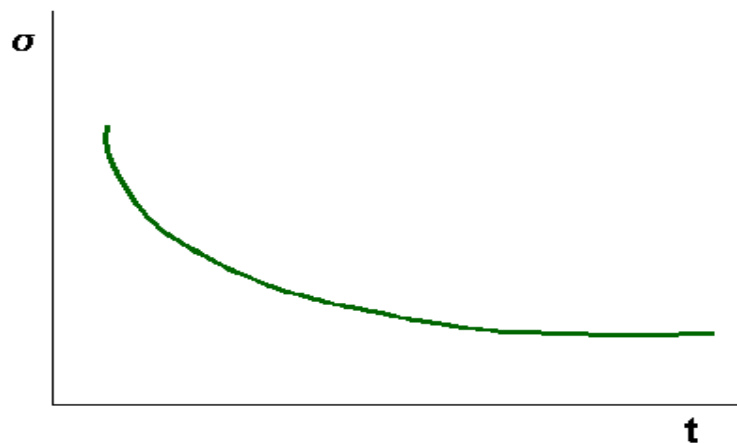


Figura 5.9 Ensayo de fluencia o Creep

Consiste en aplicar un esfuerzo constante a tiempo cero, σ , y medir la deformación resultante en función del tiempo. Los ensayos de fluencia suelen ir acompañado de un ensayo de recuperación, a través del cual se estudia la respuesta del material tras el cese del esfuerzo de cizalla. La función respuesta que se define en este ensayo es la capacitancia lineal, $J(t)$.

Se basan en la aplicación de un esfuerzo cortante o deformación por cizalla que varía de forma sinusoidal con el tiempo.

Desde un punto de vista práctico, el movimiento oscilatorio se genera en reómetros rotatorios convencionales, haciendo que el rotor no gire continuamente en una dirección, sino que se desplace un pequeño ángulo, en el sentido de las agujas del reloj y en el contrario, siguiendo una función sinusoidal del tiempo.

La deformación por cizalla aplicada sobre el material se puede expresar en función del tiempo según:

$$\gamma = \gamma_0 = \text{sen}\omega t \quad (5.17)$$

Siendo γ la deformación por cizalla, γ_0 la deformación por cizalla máxima o amplitud de la onda correspondiente al movimiento armónico simple, ω la frecuencia y t el tiempo de aplicación del ensayo.

La velocidad de deformación por cizalla es también una función periódica.

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \gamma_0 \omega \text{cos}\omega t = \gamma_0 \text{cos}\omega t \quad (5.18)$$

Un material sometido a una deformación sinusoidal pequeña, que garantice una respuesta viscoelástica lineal, responde tras un cierto número de ciclos con un esfuerzo de cizalla que sigue también una función sinusoidal respecto al tiempo, pero con una amplitud característica de la naturaleza de dicho material.

Si el material se comportara como un sólido ideal, la respuesta sería puramente elástica por lo que el esfuerzo de cizalla dependería linealmente de la deformación ($\sigma = G\gamma$; G es el módulo de cizalla), por lo que el desfase sería cero:

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma} \quad (5.19)$$

Los sólidos elásticos perfectos alcanzan rápidamente una situación en la que $J(t)$ deja de variar con el tiempo. Este valor constante se define como capacitancia de equilibrio, J_e , y es característico de cada material.

Los líquidos viscosos puros dan lugar a una función lineal creciente cuya pendiente es la inversa de la viscosidad dinámica. Los materiales viscoelásticos presentan un comportamiento intermedio, cuadrático, a tiempos pequeños, y lineal, a tiempos altos.

5.11.1. Caracterización del comportamiento de flujo independiente del tiempo

Se obtienen las curvas de flujo (dependencia funcional entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla) de los diferentes alimentos a velocidades de cizalla entre 0,1 y 100 s⁻¹, dado que es el intervalo más relevante en los estudios de textura de los alimentos (Bistany y Kokini, 1983).

Los valores de viscosidad tomados en la curva ascendente viscosidad/velocidad de cizalla a una velocidad de cizalla de 50 s⁻¹ son considerados como la viscosidad aparente de las muestras, ya que este valor representaría la viscosidad aproximada sentida en la boca.

Las curvas de flujo obtenidas permiten clasificar el comportamiento de los diferentes alimentos mediante ajustes a diferentes ecuaciones empíricas o modelos matemáticos (ley de la potencia, Bingham, Herschel-Bulkley y Casson, etc.).

El problema consiste en obtener una expresión matemática capaz de ajustar nuestras medidas experimentales de esfuerzo de cizalla y viscosidad con respecto a la velocidad de cizalla, de modo que se obtengan coeficientes de correlación adecuados. La validez del modelo estará restringida, generalmente, al intervalo de esfuerzos de cizalla utilizado.

5.11.2. Barridos de Velocidad de Deformación

Los ensayos estáticos que permite realizar el reómetro son los barridos de velocidad de deformación. Estos análisis se pueden dar para una única velocidad o bien emplearse para determinar un intervalo. A su vez, para cada una de las velocidades de deformación se ha de determinar si se trabaja utilizando una deformación en un único sentido o, por otro lado, se aplica en estático en ambos sentidos y se toma el valor medio. Estos ensayos permiten determinar el tipo de flujo y los resultados se pueden ajustar a diferentes modelos viscoelásticos y de fluencia.

5.11.3. Barridos de Tiempo

Estos ensayos permiten determinar la estabilidad de la muestra midiendo el tiempo necesario para alcanzar valores constantes de los módulos. Para llevar a cabo los barridos de tiempo se fija una temperatura, una frecuencia y una deformación, que se mantienen constantes durante todo el experimento.

Se elige una frecuencia en Hz para comprobar la estabilidad de la muestra para cada agente protector y una deformación determinada en %, posteriormente se comprueba si el material se encuentra dentro de la región lineal viscoelástica.

En los barridos de tiempo se determina también la conveniencia o no de una precizalla previa, “*PreShear*”, que permite la homogeneización de la muestra minimizando los efectos asociados a su colocación, así como reduciendo su tiempo de estabilización.

Son ensayos que se realizan a frecuencia de oscilación constante, y son aplicados normalmente al estudio de procesos de gelificación, curado, cristalización.

De forma genérica, cabe esperar una evolución, en la que se distingue a bajas temperaturas una zona en las que el módulo elástico alcanza una meseta o “plateau”, que se caracteriza por poseer módulos relativamente elevados. Un aumento de la temperatura provoca una disminución de ambos módulos, hasta alcanzar una segunda meseta en el módulo elástico, conocida como región gomosa o cauchosa. Un posterior aumento de la temperatura provoca el desmoronamiento de la estructura del material y que se alcance la zona conocida como terminal o de flujo.

Lógicamente la forma de la evolución de ambos módulos, y que se presenten en mayor o menor medida dichas regiones, depende en gran medida del material empleado y de sus características, como se observa para distinto tipo de muestras.

5.12. Bibliografía

- Barnes, H. A.; Hutton, J.F.; Walters, K.; "An Introduction to rheology". Ed. Elsevier Science Publishers, 3ª edición, Amsterdam, 1993.
- Barnes, H.A.; 2000. A. Handbook of Elementary Rheology; University of Wales Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Aberystwyth. Bistany, K.L. y Kokini, J.L. (1983a). “Dynamic viscoelastic properties of foods in texture control”. *Journal of Rheology*, 27(6): 605–620.
- Bird, R.B.; Armstrong, R.C.; Hassager, O. y Curtiss, C.E. (1987). En: *Dynamics of Polymeric Liquids*. vol. 1. 2nd ed. Ed. por: Wiley, New York.
- Da Silva, J.A.L; Rao, M.A. Rheology of structure development in high-methoxyl pectin/sugar systems, *Food Technol.*, p. 70-73, October, 1995.
- Da Silva, J.A.L.; Goncalves, M.P.; Rao, M.A. Viscoelastic behaviour of mixtures of locust bean gum and pectin dispersions, *J. Food Eng.*, v. 18, p. 211-228, 1993.
- Franco, J.M. 2007. Apuntes del Módulo de Fundamentos de Reología. Master en Formulación y Tecnología del Producto. UNIA- UHU. Huelva.
- Gunasekaran, S y Ak, M. 2000. “Dynamic oscillatory shear testing of foods-selected applications”. *Food Science and technology*. Vol 11, 115-127 p.

- Kokini, J.L.; Plutchok, G.J. Viscoelastic properties of semisolid foods and their biopolymeric components, *Food Technol.*, p. 89-95, March, 1987.
- Lee, H.G.; Lanier, T.C.; Hamann, D.D. Chemically induced covalent crosslinks affect thermo-rheological profiles of protein gels, *J. Food Sc.*, v. 62 (1), p. 29-32, 1997.
- Ma, L.; Grove, A.; Barbosa-Cánovas, G.V. Viscoelastic characterization of surimi gel: Effect of setting and starch, *J. Food Sci.*, v. 61(5), p. 881-883, 1996.
- Nielsen, L.E. y Landel, R.F. (1994). En: *Mechanical properties of polymers and composites*". (2nd ed.). Ed. por: Marcel Dekker, Inc, New York.
- Ma, L.; Barbosa-Cánovas, G.V. Rheological characterization of mayonnaise. Part II: Flow and viscoelastic properties at different oil and xanthan gum concentrations, *J. Food Eng.*, v. 25, p. 409-425, 1995.
- Shukla, A.; Rizvi, S.S.H. Viscoelastic properties of butter, *J. Food Sci.*, v. 60(5), p. 902-905, 1995.
- Steffe, J. 1996. *Rheological methods in food process engineering*. Michigan: Freeman Press, 1-10, 258-262, 301 p.

CAPITULO 6

CAPITULO 6

6. Aplicaciones Reológicas en la Industria

Las materias primas tales como las frutas y vegetales frescos requieren en ocasiones determinaciones de la firmeza del fruto para su tratamiento posterior. En cuanto a productos intermedios como pueden ser: pulpas de frutas, derivados del tomate y otros, las determinaciones de viscosidad y/o consistencia se encuentran normalizadas en muchas industrias.

En la producción de helado, las mediciones de la viscosidad de la mezcla son imprescindibles ya que pueden determinar los rendimientos industriales, así como la textura del producto terminado.

En la producción de chocolate, las pastas fundidas y las coberturas son controladas además por las mediciones reológicas y de igual forma, los rendimientos y la textura del producto terminado pueden estar influenciados por el comportamiento del flujo de estos productos.

Para el caso del control de la calidad del producto terminado, se conoce que la textura representa un atributo importante de calidad que puede influir en la aceptación por el consumidor, tales son los casos de los productos crujientes: snacks, botanas, galletas, panes de corteza dura, papas fritas, etc. Otros derivados de las harinas como las panetelas, tortas, productos de repostería, deben poseer una determinada textura suave y esponjosa que resulte agradable al consumidor.

Una viscosidad adecuada en los néctares de frutas, yogur batido, cremas y sopas, salsas derivados del tomate y otros productos viscosos, también son preferidas por el consumidor. La consistencia y untosidad de productos grasos tales como margarina, mayonesa y mantequilla también resultan parámetros importantes en la calidad.

6.1 Factores que influyen en el comportamiento reológico de los alimentos

Existen muchos factores que influyen en el comportamiento reológico de los alimentos, los más importantes son la temperatura y la concentración de sólidos.

Hasta el momento en que son consumidos, los alimentos están sometidos continuamente a cambios de temperatura, así mismo en el proceso de elaboración y pasando por los periodos de transporte, las condiciones de temperatura a que son sometidos los alimentos pueden variar notablemente.

El conocimiento de la influencia de la temperatura sobre la viscosidad es esencial para proporcionar un mejor conocimiento del comportamiento reológico de derivados de frutas y vegetales durante el procesado a temperaturas elevadas.

En el procesado de puré de batata se generan variaciones substanciales de la temperatura que provocan un efecto muy significativo, tanto en el comportamiento de flujo como en las propiedades sensoriales del producto.

El efecto de la temperatura sobre la viscosidad de fluidos alimentarios a una velocidad de cizalla constante puede ser descrito por la ecuación de Arrhenius, en la que la viscosidad aparente disminuye de forma exponencial con el aumento de la temperatura.

Existen numerosas publicaciones sobre las propiedades de flujo de concentrados de zumo, y de los efectos de la temperatura y la concentración en las mismas.

Se ha observado el efecto de la temperatura en la disminución de la viscosidad en jugos de melocotón, en zumo clarificado de pera, en jugos concentrados de kiwi, siendo dicha tendencia más pronunciada a mayor concentración de sólidos en los jugos de frutas.

Como se ha estudiado en diferentes tipos de mermeladas de frutas, la viscosidad disminuye con el aumento de la temperatura, habiendo sido analizado el comportamiento reológico a diferentes temperaturas, en mermeladas de frambuesa, fresa, ciruela, durazno y albaricoque.

En sistemas alimentarios, la ecuación de Arrhenius también puede emplearse para relacionar el índice de consistencia con la temperatura, como se describe para concentrados de tomate; cremogenados de pera, puré de guayaba.

$$K = A \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (6.1)$$

Donde: E_a es la energía de activación, R es la constante universal de los gases perfectos, T es la temperatura absoluta y A un parámetro pre-exponencial.

Aunque la influencia de la temperatura se produce generalmente sobre el índice de consistencia, en algunos alimentos se ha encontrado que el índice de flujo puede variar linealmente con la temperatura absoluta:

$$n = a + bT \quad (6.2)$$

En otros casos, se ha correlacionado la viscosidad aparente con la temperatura a una velocidad de deformación fijada.

En líneas generales, puede decirse que la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura. La variación de la temperatura no suele afectar al índice de flujo, aunque algunos autores han encontrado un aumento de este parámetro con la temperatura.

Debido a que productos como zumos y purés de frutas están compuestos por partículas de sólidos dispersas en una fase acuosa, su comportamiento reológico se verá influenciado por la concentración, composición química, tamaño, forma y disposición de las partículas que componen la fase dispersa.

Se han descrito dos tipos de correlaciones para considerar el efecto de la concentración de sólidos en la viscosidad.

$$\text{Modelo potencial} \quad \eta = k_1 C^{A_1} \quad (6.3)$$

$$\text{Modelo exponencial} \quad \eta = K_2 \exp(A_2 C) \quad (6.4)$$

En estas ecuaciones, K_1 , K_2 , A_1 y A_2 son constantes y C es el contenido en sólidos, expresado en ° Brix. Estas ecuaciones también son válidas para estudiar el efecto de la concentración en el índice de consistencia.

El modelo potencial se ha aplicado en purés de frutas y hortalizas altamente viscosos. Sin embargo, los mismos autores encontraron que el modelo exponencial proporcionaba mejores ajustes para zumos de frutas. Esto último ha sido confirmado por otros autores que han estudiado la reología de zumos clarificados de diversas frutas.

Así, por tanto, un aumento de la concentración de sólidos comporta un incremento de la viscosidad o del índice de consistencia. También puede afectar a otros parámetros como el umbral de fluencia, que si bien tiende a aumentar con la concentración a veces se ha descrito el efecto contrario. Por lo que respecta al índice de flujo, un aumento de sólidos.

6.2 Aplicaciones Reológicas en Alimentos derivados de Frutas y Hortalizas.

El comportamiento fluidodinámico de frutas y hortalizas ha sido estudiado por un gran número de autores. Una gran parte de las frutas y hortalizas se destinan a la elaboración de productos en conserva y de jugos o zumos concentrados también llamados pulpas concentradas, en el caso de frutas con alto contenido de sólidos en suspensión, para su posterior uso en alimentos líquidos y semilíquidos.

Tiene gran interés el estudio de los productos elaborados de frutas, cuya materia prima básica es la pulpa de la fruta, el cual se utiliza para aplicaciones en operaciones unitarias como proyectos de bombas, intercambiadores de calor y tanques de mezclado. Para que este tipo de procesos industriales sean técnica y económicamente viables, es importante tener conocimiento de las propiedades físico-químicas y reológicas de los alimentos. Estas propiedades reológicas también son importantes como parámetros de control de calidad en los productos finales.

Los jugos o pulpas concentradas presentan una serie de ventajas respecto a la misma fruta de la que se obtuvieron, pese a que pueden sufrir ligeros cambios en sus propiedades organolépticas, los que se reducen a un mínimo, gracias a los modernos equipos de concentración y de recuperación de aromas.

En la elaboración de jugos, néctares, batidos, conservas, compotas, mermeladas, cremogenados o yogures, se requiere encontrar la mezcla óptima de ingredientes que permita generar un nuevo producto cuya formulación ofrezca características de producto funcional con alto valor nutricional y en las que se mantengan propiedades organolépticas de aroma y sabor deseables.

El comportamiento reológico de zumos vegetales está influenciado por su composición, y en consecuencia, dependerá tanto de la naturaleza de la fruta con que se elaboran, como de los tratamientos que se hayan realizado en sus procesos de elaboración. Lo expuesto, pone de manifiesto la importancia de conocer la evolución de las propiedades de flujo de estos alimentos líquidos o semilíquidos durante los procesos de concentración y bombeo en instalaciones industriales, además de otras operaciones, como el tamizado, desairado, mezclado y tratamientos térmicos diversos, entre otros.

Un número limitado de alimentos muestran características de flujo newtoniano, entre los que se encuentran algunos tan importantes fisiológicamente como el agua o como las

bebidas refrescantes. En la bibliografía, son también muy numerosas las citas que consideran el comportamiento newtoniano de los zumos clarificados y despectinizados de diversas frutas en un rango amplio de temperaturas y concentraciones de sólidos solubles.

Se ha determinado el comportamiento reológico de jugo industrializado de acerola, con concentraciones de sólidos solubles de 4 a 16 °Brix y un intervalo de temperatura de 5 a 85 °C. Los autores encontraron que el jugo mostró un comportamiento pseudoplástico, y la viscosidad aparente disminuyó con la disminución del contenido en sólidos solubles y el aumento de la temperatura.

Se ha aplicado la metodología de superficie de respuesta para estudiar el efecto de la temperatura sobre el comportamiento reológico de las mezclas ternarias de pulpa de mango, jugos de naranja y zanahoria, con temperaturas de 10 a 60 °C. El modelo Ostwald-de-Waele se empleó para ajustar el comportamiento reológico. Continuando con esta labor, estudiaron el comportamiento de la mezcla a 60 °C, usando el modelo de Casson. El esfuerzo umbral y la viscosidad de Casson aumentaron con la fracción de mango y se redujeron con el aumento de la fracción de zumo de naranja y zanahoria.

Se ha evaluado el efecto de la temperatura y la concentración de sólidos sobre la viscosidad de jugos concentrados de granada y pera en un rango de 20 a 90 °C a 40 °Brix y de 25 a 90 °C a 30 °Brix, respectivamente y se observó una disminución de la viscosidad con el aumento de la temperatura y un incremento con el aumento de la concentración de sólidos.

El efecto de la temperatura (10-55 °C) y la concentración (12 °Brix y 32 °Brix) en la reología de purés de melocotón homogeneizados, fue estudiado por, concluyendo que el modelo de la ley de la potencia describe adecuadamente el comportamiento reológico del fluido.

Para describir el comportamiento reológico del puré de arándano ha sido utilizado el modelo de Sisko.

Jugos concentrados y purés de frutas con valores altos de sólidos solubles, han sido bien descritos por el modelo de Herschel-Bulkley, como es el caso del puré de banano, puré de papaya.

Otro modelo utilizado es el de Casson. El modelo de Casson ha sido aplicado a una amplia gama de productos alimentarios tales como purés de frutas, gomas y pasta de dátiles. El modelo de Casson se ha utilizado frecuentemente para estimar el esfuerzo umbral en alimentos, estudiando los concentrados de tomate, mostraron que el modelo de Casson no se ajusta a los datos experimentales a bajas velocidades de deformación, mientras que encontraron un buen ajuste del modelo de Casson a los datos experimentales de puré de guayaba. El modelo de Casson ha sido utilizado para describir el comportamiento de la pulpa de mango integral, filtrada y centrifugada.

Entre los alimentos típicamente plásticos se encuentran el puré de patata. Algunos autores han usado el modelo de Bingham para describir el comportamiento reológico de pastas de fécula de mandioca, suero de puré de albaricoque, , pectinas, de algunos zumos naturales de manzana, ketchup y mostaza francesa.

El número de fluidos que siguen el comportamiento dilatante es reducido, siendo característico de suspensiones, con alto contenido en sólidos, de almidón, goma arábica y de ciertos tipos de mieles de eucalipto.

Igualmente, es importante la dependencia del tiempo en las características reológicas de los alimentos, ya que establece la relación entre la estructura y el flujo. Sistemas alimentarios que muestran esta dependencia son las mezclas de gomas de algarrobo y xantana, la pulpa de mango, la pasta de chile y soya caliente y los helados.

6.3 Bibliografía

- Alvarez E.; Cancela, M. A.; Maceiras, R. (2006). Effect of temperature on rheological properties of different jams. *International Journal of Food Properties*, 9:135-146.
- Maguerramov M.A.; Abdulagatov, A.I.; Azizov, N. D.; Abdulagatov, I.M. (2007). Effect of temperature, concentration, and pressure on the viscosity of pomegranate and pear juice concentrates. *Journal of Food Engineering*, 80(2):476-489.
- Muteki, K.; MacGregor, J. F.; Ueda, T. (2007). Mixture designs and models for the simultaneous selection of ingredients and their ratios. *Chemometrics Intelligent Laboratory Systems*, 86(1): 17-25.

- Silva, F. C.; Guimaraes, D.H.P.; Gasparetto C.A. (2005). Reologia do Suco de Acerola: Efeito da Concentração e da Temperatura. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 25(1):121-126.
- Smith, P.G. (2011). *Introduction to Food Process Engineering*. Second Edition. Editorial Springer-Verlag, 510 p.
- Razavi, S.; H.Karazhiyan. (2012). Rheological and textural characteristics of date paste. *International Journal of Food Properties*, 15:281–291.
- Yeow, Y.L.; Perona, P.; Leong, Y.K. (2002). A reliable method of extracting the rheological properties of fruit purees from loop data. *Journal of Food Science*, 67:1407-1411.

GLOSARIO

GLOSARIO

- **AGREGADO (Aggregate)**. Un grupo de partículas mantenidas juntas
- **ANISOTRÓPICO (Anisotropic)**. Dícese de aquellos cuerpos en los que la magnitud de la propiedad de la que se trate no es la misma en todas las direcciones.
- **BLANDURA (Softness)**. Tendencia a deformarse fácilmente
- **CAÍDA DE FLUENCIA (Yield drop)**. Es la magnitud de una disminución abrupta en el esfuerzo en el punto de fluencia inferior después de haberse alcanzado el punto de fluencia superior en una curva de esfuerzo frente a deformación.
- **CIZALLA (Shear)**. a) el movimiento de una capa relativo al de capas adyacentes paralelas, b) una abreviatura para deformación de cizalla.
- **CONSISTENCIA (Consistency)**. Término general que describe la propiedad de una sustancia de resistir un cambio permanente de forma.
- **CREMADO (Creaming)**. La elevación hasta la superficie de las partículas de una fase dispersa en un líquido.
- **CURVA DE FLUJO (Flow curve)**. La curva que representa el esfuerzo frente a la velocidad de deformación.
- **DEFORMACION (Strain)**. La medida de la deformación respecto a la dimensión de referencia (longitud, área o volumen).
- **DEFORMACION DE CIZALLA (Shear strain)**. La deformación relativa durante un proceso de cizalla; este término se describe a veces abreviadamente como cizallamiento.
- **DILATANCIA (Dilatancy)**. El aumento de volumen producido por cizalla.
- **DUREZA (Hardness)**. La resistencia de un material al rayado o la penetración
- **ECUACION CONSTITUTIVA (Constitutive equation)**. Una ecuación que relaciona el esfuerzo, la deformación, el tiempo y también a veces otras variables como la temperatura. También se denomina ecuación reológica de estado.
- **EFECTO DE WEISSENBERG (Weissenberg effect)**. Un efecto que se encuentra en algunos fluidos no-Newtonianos y que se manifiesta, por ejemplo en la subida de un fluido por una varilla que está girando dentro de él.
- **ELASTICIDAD (Elasticity)**. Conducta de esfuerzo/deformación reversible.

- ENERGÍA DE ACTIVACION (Activation energy). La energía adicional que requieren las moléculas por encima de su energía cinética media, para permitir que ocurra un proceso particular.
- ESFUERZO (stress). La fuerza por unidad de área.
- ESFUERZO DE CIZALLA (Shear stress). La componente del esfuerzo paralela (o tangencial) al área considerada.
- ESFUERZO DE FLUENCIA (Yield Btress). El esfuerzo correspondiente al punto de fluencia.
- ESFUERZO NORMAL (Normal stress). La componente del esfuerzo en ángulo recto con el área considerada.
- ESPESAMIENTO POR CIZALLA (Shear thickening). Un aumento de viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla en flujo estacionario.
- FLUENCIA (Creep). La deformación lenta de un material, corrientemente se mide a esfuerzo constante (Véase también fluencia primaria, fluencia secundaria y fluencia terciaria).
- FLUIDEZ (Fluidity). El recíproco de la viscosidad dinámica.
- FLUIDO (Fluid). Un líquido o gas.
- FLUJO (Flow). Una deformación, parte de la cual no es recuperable (uso reológico del término)
- FLUJO ESTACIONARIO (Steady flow). Un flujo en el que la velocidad en cada punto no varía con el tiempo.
- FLUJO LAMINAR (Laminar flow). Flujo sin turbulencia.
- FLUJO VISCOSIMETRICO (Viscometric flow). Un flujo laminar en el que la historia de la velocidad de cizalla ha sido constante durante un tiempo prolongado. Tal flujo se puede determinar completamente por tres constantes del material a lo sumo: la función de viscosidad y dos funciones de esfuerzos normales.
- GRADIENTE DE VELOCIDAD (Velocity gradient). La derivada de la velocidad de un fluido con respecto a una coordenada espacial.
- ISOTROPICO (Isotropic). Que tiene las mismas propiedades en todas direcciones.
- LIQUIDO (Liquid). Aquella fase de la materia que fluye aún bajo esfuerzos de cizalla casi nulos de manera que en último término toma la forma del recipiente que lo contiene hasta un cierto nivel, definido y horizontal que se conoce por superficie del líquido.

- **MODELO (Model).** Una representación idealizada de la conducta de cualquier sistema cuantificada en términos matemáticos,
- **MODELO DE BINGHAM (Bingham model).** El que cuantifica la conducta de un sólido elástico hasta el esfuerzo de fluencia (yield stress); por encima del esfuerzo de fluencia la velocidad de cizalla es directamente proporcional al esfuerzo de cizalla menos el esfuerzo de fluencia.
- **MODELO DE FLUIDO SEGUN LA LEY DE LA POTENCIA (Power-law fluid model).** El que cuantifica el flujo de cizalla simple por una relación lineal entre el logaritmo del esfuerzo de cizalla y el logaritmo de la velocidad de cizalla.
- **MODELO DE FLUIDO NEWTONIANO (Newtonian fluid model).** Un modelo caracterizado por un valor constante del cociente del esfuerzo de cizalla entre la velocidad de cizalla, en flujo de cizalla simple y con diferencias nulas de esfuerzos normales.
- **MODELO DE HOOKE (Hooke model).** Un modelo que representa la ley de Hooke de la elasticidad, es decir, un resorte.
- **MODELO DE KELVIN (Kelvin model).** Un modelo compuesto por un modelo de Hooke y un modelo de fluido newtoniano en paralelo. También denominado Modelo de Voigt.
- **MODELO DE MAXWELL (Maxwell model).** Es el formado por un modelo de Hooke y un modelo de fluido Newtoniano en serie.
- **MODULO (Modulus).** En reología es la razón de un componente del esfuerzo a un componente de la deformación.
- **NUMERO DE DEBORAH (Deborah number).** a) La razón del tiempo de relajación de una sustancia a la duración de la observación. b) La relación entre una característica de tiempo de la sustancia y un tiempo característico de la observación.
- **PERFIL DE VELOCIDAD (Velocity profile).** La distribución de velocidad en un área transversal normal a la dirección de flujo.
- **PLASTICIDAD (Plasticity).** La capacidad de dejarse moldear por encima del esfuerzo que produce la fluencia, pero también de retener la forma bajo fuerzas finitas.
- **PUNTO DE FLUENCIA (Yield point).** El punto en la curva de esfuerzo/deformación o esfuerzo/velocidad de deformación, que corresponde a la transición des de la deformación elástica a la plástica (Véase punto de fluencia inferior). También se denomina punto de fluencia superior.

- RELAJACION DEL ESFUERZO (Stress relaxation). La disminución del esfuerzo con el tiempo en un material deformado.
- REOLOGIA (Rheology). La ciencia del flujo y la deformación de la materia.
- REOGRAMA (Rheogram). Un gráfico de una relación reológica.
- REOMETRO (Rheometer). Un instrumento para medir propiedades reológicas.
- REOPEXIA (Rheopexy). a) la aceleración de la solidificación de una sustancia tixotrópica por movimientos suaves y regulares. b) Véase tixotropia negativa.
- SEUDOPLASTICIDAD (Pseudoplasticity). Una disminución de la viscosidad por acción de cizalla, independiente del tiempo y sin esfuerzo de fluencia.
- SOLICITACIÓN MECÁNICA. Distintos tipos de carga que afectan el comportamiento mecánico de los materiales, que pueden describirse a través de ensayos simples e idealizados.
- SOLIDO (Solid). Un material que no fluye bajo esfuerzos pequeños.
- SOLVATACION (Solvation). La unión íntima de las moléculas o iones de la fase continua, a las moléculas o iones de soluto o fase dispersa.
- TENSION (Tension). Una fuerza normal a la superficie sobre la que actúa y dirigida hacia el exterior del cuerpo.
- TENSOR DE ESFUERZO (Stress tensor). Una matriz de los componentes de la deformación de cizalla y el esfuerzo normal, que representa el estado del esfuerzo en un punto de un cuerpo.
- TIXOTROPIA (Thixotropy). Una disminución en la viscosidad aparente, por la acción de esfuerzos de cizalla, seguida de una recuperación gradual cuando se retira el esfuerzo. El efecto es función del tiempo.
- TURBULENCIA (Turbulence). Una condición de flujo en la que las componentes de la velocidad muestran variación al azar.
- VELOCIDAD DE DEFORMACION EN CIZALLA (Rate of shear). El cambio de la deformación de cizalla por unidad de tiempo. Abreviadamente se le suele llamar velocidad de cizalla
- VELOCIDAD DE DEFORMACION (Rate of strain). El cambio de la deformación por unidad de tiempo.
- VELOCIDAD DE FLUJO VOLUMETRICO (Volumetric flow rate). El volumen de fluido que pasa a través de cualquier área transversal de un conducto en la unidad de tiempo.

- VISCOELASTICIDAD (Viscoelasticity). Que posee propiedades viscosas y elásticas.
 - VISCOELASTICIDAD LINEAL (Linear viscoelasticity). Viscoelasticidad caracterizada por una relación lineal entre el esfuerzo, la deformación y la derivada con respecto al tiempo de la deformación.
 - VISCOSIDAD (Viscosity). a) Cualitativamente es la propiedad de un material de resistir la deformación de manera creciente a medida que crece la velocidad de deformación. b) Cuantitativamente es una medida de esta propiedad definida como el cociente entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla en flujo estacionario. Frecuentemente se utiliza como sinónimo de viscosidad aparente.
 - VISCOSIDAD APARENTE (Apparent viscosity). La razón del esfuerzo de cizalla a la velocidad de cizalla, si depende de la velocidad de cizalla.
 - VISCOSIDAD CINEMATICA (Kinematic viscosity). El cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad del material, ambas medidas a la misma temperatura.
 - VISCOSIDAD DINAMICA (Dynamic viscosity). a) Un sinónimo del coeficiente de viscosidad, utilizado para distinguirlo de la viscosidad cinemática. El recíproco de la fluidez b) La relación entre el esfuerzo en fase con la velocidad de deformación y la velocidad de deformación bajo sollicitación sinusoidal.
 - VISCOSIMETRO (Viscometer). Un instrumento para medir la viscosidad
- VISCOSO (Viscous). Adjetivo para la viscosidad.

Raúl Díaz Ocampo

Químico y Master en Ciencias, graduado en la Universidad de Amistad de los Pueblos. Moscú-Rusia. Master en Administración Educativa, Loja-Ecuador. Experto Universitario en Acreditación de Laboratorios de Análisis Químico, Universidad de Andalucía, España. Master en Formulación y Tecnología del Producto, Aplicaciones en la Industria Química, Alimentaria y Farmacéutica. España. Doctor PhD en Procesos y Productos Químicos. Universidad Internacional de Andalucía, España.

Profesor Principal de la Universidad Técnica estatal de Quevedo – Ecuador, habiendo impartido las asignaturas: Química analítica, Control de calidad de alimentos, Diseño y desarrollo de nuevos productos, Reología, entre otras.

Profesor de Posgrado en diversos programas de maestrías organizados por la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.

Ha participado en cursos y seminarios a nivel nacional e internacional en el área de Alimentos, Química y Educación

Tiene publicaciones en revistas indexadas Scopus y Latindex, relacionadas con Ingeniería en Alimentos, Ingeniería Química, Educación, Ambiental y Nuevas tecnologías.

ISBN: 978-9942-33-068-0

