



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**



PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL CHOCOLATE

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA:

MENDOZA AQUINO VIRGINIA ALEJANDRA

DIRECTOR DE TESIS

DR. EDTSON EMILIO HERRERA VALENCIA

ASESORES

DR. FAUSTO CALDERAS GARCÍA

M. EN C. LUIS ANTONIO RAMÍREZ TORRES

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO, ABRIL 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

P R E S E N T E

Comunico a usted que la alumna **Mendoza Aquino Virginia Alejandra** con número de cuenta **306189960** de la carrera de Ingeniería Química, se le ha asignado en el mes de mayo de 2024 la fecha para presentar su examen profesional que tendrá lugar en la sala de exámenes profesionales del Campus II de esta Facultad, con el siguiente jurado:

Presidente: I.Q. Ortiz Bautista Dominga

Vocal: Dr. Herrera Valencia Edtson Emilio

Secretario: Dr. Calderas García Fausto

Suplente: Dra. Salinas Juárez Maria Guadalupe

Suplente: M. en C. Ramírez Torres Luis Antonio

El título de la tesis que se presenta es: Propiedades reológicas del chocolate

Opción de Titulación: Tesis convencional.

Director de tesis: Dr. Edtson Emilio Herrera Valencia.

Asesor de tesis: Dr. Fausto Calderas García

Asesor de tesis: M. en C. Luis Antonio Ramírez Torres

Dedicatorias

Trabajo dedicado a Dios que me regalo una gran familia.

A mi familia que con su apoyo incondicional he logrado cumplir uno de mis objetivos, principalmente a mi madre Luz María Aquino. que con su esfuerzo y ejemplo puedo tomar aliento para lograr mis metas. A mi hermana Belén Mendoza que su amor me ha enseñado a crecer y tener el mejor ánimo para continuar siempre adelante. Dedicado a mi tía Laura Aquino que con su estancia en el IPN en más de 30 años de servicio testimonia la importancia de la autodisciplina, a mi tío Roberto García que en su labor de docente profesional es mi ejemplo de constancia y trabajo duro cada día. Con una dedicatoria especial a mi tío el doctor en derecho Ángel Santiago Aquino que me instruye con paciencia, a mi tía la licenciada en derecho Sandra Martínez que me acoge con amor, dedicada a mi primo hermano Ángel Geovanni Santiago M. que me muestra que no hay límites para ser mejor persona en cada área de la vida, a mi prima Sandy Santiago M. por mostrar carácter para continuar aún en las situaciones adversas. Dedico esta investigación a mi tía Clara Santiago Aquino por enseñarme a compartir y sentir un gran orgullo por su empeño laboral en la vocacional donde se desempeña con actitud de mejora continua.

A cada uno de mis profesores UNAM que durante mi estancia en la Universidad me compartieron su gran conocimiento para adquirir las herramientas necesarias y me inspiraron para ir por más, especialmente a los doctores que me apoyaron en el proceso de tesis y al jefe de carrera el I.Q. Aldo Varela que su actitud de servicio me inspira a continuar.

Dedicado a mis alumnos que son el motivo para seguir aprendiendo y ser la mejor versión de mí misma para ofrecerles un servicio de excelencia.

Agradecimientos

A Dios gracias por brindarme el regalo de la vida y el amor de la familia que son un apoyo incondicional. A mi madre por impulsarme a cumplir metas y sueños, con ejemplo y valentía, gracias por ser mi pilar importante. A mi hermana que se encuentra presente y es mi motivación de seguir en la mejora continua.

A la comunidad UNAM, FES Zaragoza que me ha dado una excelente formación. Al doctor Edtson Emilio Herrera que impulsa a su alumnado a ir siempre adelante, superando los retos que se nos presenten, por sus consejos y disposición. Al doctor Fausto Calderas por compartir sus conocimientos, impulsar a la superación profesional e inspirar con su sobresaliente trayectoria. Al doctor Luis Antonio Torres por guiar con su ejemplo, dedicación, disciplina, actitud de servicio con calidad humana y su gran ayuda. A la I.Q. y maestra Dominga Ortiz por ser parte de este sueño logrado al transcurrir de los años con gran esfuerzo y superación. A la doctora Ma. Guadalupe Salinas por sus valiosas aportaciones en la comunidad universitaria de la carrera de Ingeniería Química.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la educación (PAPIME) de la UNAM <<PE106224>> << Material didáctico para la asignatura de transferencia de Masa Usando COMSOL MULTIPHYSICS Y WOLFRAM MATHEMATICA>>. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

Al Proyecto de investigación intitulado Simulación numérica del mezclado de suspensiones coloidales en un tanque de agitación continua (CSTR) con clave FESZ-RP/23-204-02.

A la Unidad de Bioingeniería UI-FESZ-110323.

Al seminario de investigación de las líneas de investigación: Fenómenos de Transporte y Reología de Fluidos Complejos (LUI-FESZ-420415) y Reología Teórica y Reometría de Fluidos Estructurados (LI-FESZ-570619) por todas las observaciones y aportaciones realizadas a este trabajo.

Contenido

Dedicatorias	ii
Agradecimientos	iii
Abstract.....	1
Resumen	2
1 Introducción.....	4
2 Objetivos	8
2.1 Objetivo general.....	8
2.2 Objetivos particulares.....	8
3 Pregunta de investigación	9
4 Hipótesis.....	9
5 Resultados de la investigación	10
5.1 Parámetros reológicos	10
5.1.1 Deformación	10
5.1.2 Rapidez de deformación.....	10
5.1.3 Viscoelasticidad.....	10
6 Ecuaciones constitutivas basadas en la viscoelasticidad lineal.....	17
7 Pruebas y respuestas reológicas en chocolate.....	18
7.1 Flujo cortante simple	18
7.2 Flujo oscilatorio de baja amplitud de deformación.....	19

7.3	Respuestas reológicas	19
8	Equipo para la medición de propiedades reológicas del chocolate	26
8.1	Reómetro	26
8.1.1	Diferencia entre reómetro y viscosímetro.....	27
9	Procesos de fabricación del chocolate.....	28
9.1	Selección de emulsificante	28
9.2	Atemperado	28
9.3	Diferencias entre emulsión con lecitina de soya (tradicional) y goma xantana.....	29
9.4	Conchado	29
	Alcances y trabajo futuro.....	30
	Conclusiones	31
	Respuestas a las preguntas de investigación	32
	Nomenclatura.....	34
	Glosario	35
	Tiempo que requiere una sustancia para alcanzar un nuevo estado de equilibrio, reorganizando su estructura.....	38
	Referencias bibliográficas	39

Índice de Figuras

Figura 5-1. Representación gráfica de la ley de Hooke[27].	12
Figura 5-2. Representación gráfica de la ley de Newton [27].....	13
Figura 5-3. Comportamiento a) elástico, b) viscoso y c) viscoelástico [27]	15
Figura 5-4. Comportamiento de un material en función de la amplitud de la deformación y el número de Débora [27].	16
Figura 5-5. Relación entre esfuerzo y deformación para un fluido viscoelástico [27].....	17
Figura 7-1. Esfuerzo cortante versus la rapidez de deformación de chocolate con distinto contenido de grasas. La línea continua representa la predicción teórica del modelo de Casson [19].	21
Figura 7-2. Curvas de flujo de una muestra de 70% chocolate a diferentes temperaturas bajo a) rapidez de deformación controlada y b) esfuerzo cortante controlado [17].	22
Figura 7-3. Efecto de la composición en el comportamiento reológico a 45°C de diferentes mezclas de chocolate.	23
Figura 7-4. Prueba de relajación de esfuerzos de una muestra de chocolate tradicional [33].....	25
Figura 8-1. Reómetro modelo TA Instruments AG-2®[33].	27

Abstract

This work begins with the principal objective of elucidating the rheology of fluids, focusing on food-grade chocolate. It acknowledges that any material has the capacity to flow and highlights the principal rheological parameters: stress, deformation, viscosity, time, relaxation, and deformation rate.

The literature review was conducted based on experimental data from peer-reviewed scientific journals with impact factor, concerning the rheological behavior of chocolate. It analyzed the viscosity of traditional chocolate with soy lecithin emulsion and contrasted it with chocolate emulsified with xanthan gum, highlighting differences in viscosity, fluidity, and texture.

Rheological responses were measured using a rheometer with specific geometry, identified as the optimal equipment for obtaining real viscosity results compared to the apparent viscosities provided by a viscometer. It is understood that using a rheometer yields more reliable rheological responses with a lower margin of error. Chocolate is categorized as a non-Newtonian fluid with a complex structure due to its varying viscosity throughout the manufacturing process, influenced by temperature fluctuations, mechanical stress, and velocity changes.

Thus, adhering to precise temperature and time parameters during chocolate preparation is crucial. Additionally, selecting the appropriate emulsifier is essential to achieve desired organoleptic properties such as gloss, proper molding and demolding, texture, flavor, aroma, and labeling compliance.

Resumen

La principal finalidad de este trabajo versa en dar a conocer la reología de fluidos, específicamente, la reología del chocolate; se enfatizó en el chocolate que se usa en la industria alimenticia. La reología considera que todo material puede fluir, independientemente si es sólido, líquido o gas, y lo expresa a través de unos parámetros numéricos llamados propiedades materiales, o parámetros reológicos, de los que más destacan: esfuerzo, deformación, viscosidad, tiempo característico (o tiempo de relajación) y la rapidez de deformación. Se realizó el estudio del *estado del arte* de la reología del chocolate alimenticio consultando bases de datos de artículos del JCR con factor de impacto y revisión por pares. La respuesta reológica de chocolate fue estudiada analizando su viscosidad a diferentes rapidezces de deformación, enfatizando como objeto de estudio un chocolate tradicional con emulsión de lecitina de soya. Otros parámetros estudiados, de un chocolate emulsionado con goma xantana, de la literatura científica fueron la viscosidad, la fluidez y la textura.

Las respuestas reológicas consultadas fueron obtenidas con técnicas experimentales a través de un reómetro equipado con una geometría de flujo específica, resaltando los motivos del porqué dicho equipo es la opción para la obtención de resultados de viscosidades reales en comparación con, por ejemplo, la viscosidad aparente que obtiene un viscosímetro. Por lo anterior, y fundado en conocimientos teóricos y prácticos, se puede decir con total seguridad que la respuesta reológica que genera un reómetro es de mayor fiabilidad.

Por otro lado, se clasifica al chocolate como un fluido no newtoniano de estructura compleja, tanto desde el punto de vista molecular debido a la gran diversidad de

componentes que lo constituyen, como desde el punto reológico ya que, como se verá más adelante, el chocolate presenta una considerable variación en la viscosidad en cada etapa de su procesado debido a las diferentes temperaturas, esfuerzos y velocidades (movimiento) a las que se somete.

Por ello, es de suma importancia el control de la temperatura y los tiempos de procesamiento durante su preparación, así como involucrar al emulsificante adecuado para lograr las propiedades organolépticas deseadas como brillo, moldeo correcto y desmoldeo con facilidad, textura, sabor, olor y etiquetado (cumpliendo la normatividad).

1 Introducción

Cualquier material puede fluir (algunos de ellos cuando son sometidos a esfuerzos cortantes o esfuerzos normales [1]), es decir, a exhibir una deformación continua e irreversible [2-4]. Sin embargo, aquellos materiales que exhiben una viscosidad constante, independientemente de cuán rápido sea deformado, o que no presentan resistencia a fluir como un gas, se denominan fluidos newtonianos, mientras que aquellos que presentan una viscosidad variable dependiente del tipo de flujo, del tiempo o de la rapidez de deformación se les denomina fluidos no newtonianos [5, 6]. Como consecuencia de lo anterior, la reología ha creado una detallada clasificación de los materiales no newtonianos, la mayoría en función del tipo de esfuerzo aplicado y de la cantidad de deformación [7-9]. Los principales parámetros básicos de la reología son: el esfuerzo y la deformación, seguido de la viscosidad, elasticidad, plasticidad y rapidez de deformación, la reología es una ciencia importante aplicada en los alimentos, ya que las pruebas reológicas a las que son sometidos se emplean como indicadores de texturas, fluidez, resistencia y estabilidad del producto, el objeto de estudio es el chocolate tradicional[10-12].

El chocolate es un fluido no newtoniano debido a que se considera como una suspensión de partículas no-lipídicas (azúcar y sólidos de cocoa o, eventualmente, partículas de leche en polvo) dispersos en manteca de cacao la cual actúa como fase continua[13-16]. Por otro lado, el chocolate fundido es una mezcla densa de sacarosa recubierta de fosfolípidos y partículas de cacao depositadas en una grasa líquida [17]. Por lo anterior, el chocolate exhibe diferentes viscosidades en función de la rapidez de deformación y de la temperatura a la cual se encuentra, como era de esperarse debido a que es un líquido cuya composición es muy

variada [18, 19]. Investigaciones realizadas en la actualidad se enfocan en el aporte de más información del comportamiento al flujo del chocolate, en diferentes etapas de proceso tales como refinado, conchado y templado, requiriendo lograr características y propiedades organolépticas deseables para generar un buen producto final. Por lo general, las investigaciones se realizan en relación y dependencia de la viscosidad y el límite elástico, que se definen previamente en la producción con un producto patrón. Además, el chocolate es un alimento complejo en el cual, en estado sólido, posee una estructura cristalina dada, además, es posible controlar las características sensoriales y propiedades polimórficas a través de la manteca de cacao, por otra parte, cabe destacar, la estructura cristalina también tiene un rol importante en la distribución y tamaño de partícula, y en la composición de sus ingredientes para la textura final. Se sabe que la reología es de suma importancia en el procesamiento de alimentos y la correcta conservación, moldeo, etiquetado y embalaje de los mismos [14, 20]. Asimismo, el sabor característico del chocolate se logra a través de una cantidad impresionante de etapas [18].

La Norma Oficial Mexicana NOM-186-SSA1/SCFI-2013, en el apartado 3.6, define al chocolate como: “Producto homogéneo elaborado a partir de la mezcla de dos o más de los siguientes ingredientes: pasta de cacao, manteca de cacao, cocoa adicionado de azúcares u otros edulcorantes, con independencia de que se utilicen otros ingredientes, tales como productos lácteos y aditivos para alimentos” [21].

Para lograr un mayor entendimiento del comportamiento al flujo del chocolate, es necesario conocer conceptos básicos usados en la reología. La reología es una

rama de la física que describe el comportamiento de los materiales sometidos a diferentes esfuerzos y, por tanto, originando una deformación, además, clasifica los diferentes tipos de fluidos a partir de las propiedades reológicas como esfuerzo, deformación, viscosidad, densidad, plasticidad, elasticidad, rapidez de deformación, tixotropía, por mencionar algunas, las cuales tienen modelos matemáticos propios, la reología también estudia y clasifica los flujos [2, 7, 10, 11, 22].

La reología es la ciencia que estudia el comportamiento al flujo de los fluidos y su deformación, frente a esfuerzos sometidos al material [5].

Otra definición que vale la pena analizar es la siguiente: la reología es la ciencia (rama de la física) que estudia las deformaciones de un material o fluido que es sometido a esfuerzos externos, en flujos controlados, detallando su comportamiento a dichos cambios [9]. De acuerdo con las propiedades reológicas, tales como la viscosidad y deformación que presente el fluido al ser sometido a dicho esfuerzo, este poseerá una clasificación [3]. Los principales parámetros básicos de la reología son, entonces: el esfuerzo y la deformación, seguido de la viscosidad, elasticidad, plasticidad y rapidez de deformación. Por lo anterior, la reología, además de estudiar el flujo de los materiales, en este caso de los fluidos, también estudia y clasifica los tipos de flujos los cuales son: flujo cortante, flujo extensional y flujo mixto (o libre) [8, 19, 23-25]. Nótese que la reología es una ciencia importante, ya que es aplicada en los alimentos como el chocolate tradicional, debido a que las pruebas reológicas a las que son sometidos se emplean como indicadores de textura, fluidez, resistencia y estabilidad del producto [22]. Durante el procesamiento del chocolate, los componentes del

mismo son mezclados, refinados, y se realizan un conjunto de subprocesos para desarrollar sabor y textura llamado *conchado*, para conseguir las propiedades reológicas deseadas de un producto final definido, es decir, imitar el comportamiento reológico de una muestra de chocolate de control que posee una textura y sabor ideales [18]. A través de un mezclado cortante y extensional, los sabores ácidos y la humedad en la masa de cacao son reducidos. Al entrar en el proceso de conchado, no todas las partículas de azúcar y las de cacao son conchados en la manteca de cacao [15]. La grasa en el chocolate debe ser separada de la masa de aglomerados y dispersada para cubrir las partículas de azúcar y cacao para que fluyan fácilmente. La viscosidad del producto chocolatero final debe considerarse óptima para un proceso de templado posterior.

Las propiedades de flujo del chocolate son importantes debido a que el control de calidad es una necesidad. La viscosidad del chocolate no solo es importante en un solo proceso, sino debe monitorizarse en cada etapa; dichas propiedades son obtenidas a través de un reómetro, usando una metodología analítica experimental que debe estar publicada en trabajos de investigación previos [16, 17, 19, 25]. Cabe resaltar que la dureza del chocolate tiene relación con parámetros de composición tales como tipo y cantidad de grasa y azúcar, condiciones de templado y temperatura de conchado. Los mecanismos importantes para una correcta fluidez de chocolate son [13]:

- i) Efecto de lubricación en fase grasa
- ii) Efectos entre partículas y partículas sólidas

- iii) Interacción de partículas sólidas agregadas como azúcar, leche en polvo, entre otros.
- iv) Comportamiento de flujo por presencia de humedad
- v) Fractura de aglomerados
- vi) Distribución y tamaño de partícula
- vii) Distribución homogénea de partículas sólidas en fase continua
- viii) Recubrimiento de partículas sólidas en fase grasa

Por otro lado, chocolates con una alta viscosidad están relacionados con una sensación persistente pastosa en el paladar [15, 25, 26].

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Identificar el comportamiento reológico del chocolate, como fluido no newtoniano de estructura compleja, en diferentes tipos de flujo reométricos.

2.2 Objetivos particulares

1. Realizar una revisión bibliográfica en bases de datos de revistas científicas pertenecientes al JCR de preferencia con factor de impacto de la respuesta reológica del chocolate.
2. Proponer un equipo reométrico, con la bibliografía consultada, que genere parámetros reológicos de una muestra de chocolate.

3. Analizar las propiedades reológicas del chocolate y conocer la importancia de las mismas para su elaboración con diferentes emulsiones tales como lecitina de soya y goma xantana, planteando las ventajas y desventajas de cada una de ellas en la industria.

3 Pregunta de investigación

¿Cómo varían las propiedades reológicas del chocolate en función de la temperatura durante las etapas clave de su procesamiento, como la conchación, templado y enfriamiento, y cuál es el rango óptimo de temperaturas para obtener un chocolate con las propiedades reológicas deseadas para su posterior procesamiento y calidad final?

4 Hipótesis

Si el chocolate en estado líquido exhibe un comportamiento reológico no newtoniano, donde su viscosidad varía con la rapidez de deformación, lo que lo diferencia de líquidos comunes como el agua, el etanol, la acetona, etc., **entonces**, para que el chocolate pueda adquirir una forma definida, es necesario realizar variaciones de esfuerzos y de deformaciones, además de agregar ciertas sustancias como emulsificantes, que proporcionan propiedades organolépticas deseadas.

5 Resultados de la investigación

5.1 Parámetros reológicos

5.1.1 Deformación

Se entiende por deformación de un material, sustancia o fluido, al cambio de posición de un punto material a otro, al ejercer un esfuerzo sobre el mismo. La deformación que pueda tener el fluido al aplicarle un cierto esfuerzo, está relacionada directamente con el comportamiento viscoso del mismo [7].

5.1.2 Rapidez de deformación

La rapidez de deformación además de indicar que tan pronto se deforma el fluido o material, es útil para lograr identificar y clasificar los tipos de fluidos en conjunto con la viscosidad de la sustancia [3]. Como lo sugiere Herrera-Valencia *et al.* (2023) la rapidez de deformación se define como "... la rapidez con la que se deforma continua e irreversibles un fluido" [2].

5.1.3 Viscoelasticidad

Algunos materiales, incluyendo el chocolate, exhiben un comportamiento viscoelástico, es decir, tienen propiedades de los sólidos elásticos (al deformarse y soltar el material, este recupera su forma original) como viscosas (se deforman continua e irreversiblemente), es decir, un material viscoelástico exhibe las dos propiedades anteriores de manera simultánea [5].

5.1.3.1 La ley de Hooke de la elasticidad

El esfuerzo ejercido en un material es proporcional a su deformación; la constante de proporcionalidad es conocida como el módulo elástico o módulo de Young. La deformación que experimenta el material es reversible, es decir, cuando el material es deformado y el esfuerzo se detiene, éste regresa a su forma original (memoria perfecta) [7]. Todo material posee elasticidad hasta un valor crítico de deformación, materiales tales como la madera y los cerámicos tienen un rango de elasticidad muy pequeño ya que se fracturan fácilmente, la goma, el hierro, el cobre, en cambio pueden deformarse elásticamente y plásticamente, la deformación plástica es irreversible [27]. Un valor numérico alto del módulo elástico implica una gran fuerza intermolecular entre sus componentes [12].

$$\tau = G_0\gamma \quad (1)$$

donde, σ es el esfuerzo aplicado al material [Pa s], G_0 es el módulo elástico (cortante) [Pa s] y γ es la deformación que exhibe el material [-]. En la **Figura 5-1** se puede observar la variación del esfuerzo aplicado a un material elástico en función de la deformación que sufre. La ley de elasticidad de Hooke predice un comportamiento lineal de τ con γ en donde la pendiente de dicha línea recta es el módulo elástico.

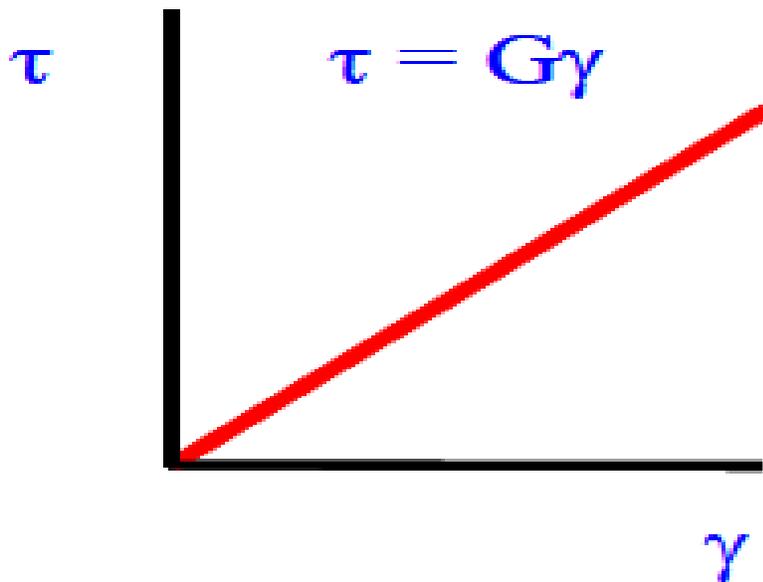


Figura 5-1. Representación gráfica de la ley de Hooke [27].

5.1.3.2 La ley de viscosidad de Newton

La ley de viscosidad de Newton menciona que el esfuerzo que se ejerce en el material es directamente proporcional a la rapidez de deformación que exhibe, la constante de proporcionalidad es conocida como viscosidad. Los fluidos que exhiben un valor de viscosidad constante a cualquier valor de rapidez de deformación se les conoce como fluidos newtonianos, ya que sigue la ley de la Ec.

(2) [27-29]. En la **Figura 5-2** se observa la variación del esfuerzo aplicado al material en función de su deformación la cual es una función constante, nótese que la pendiente de la gráfica de la **Figura 5-2** es la viscosidad.

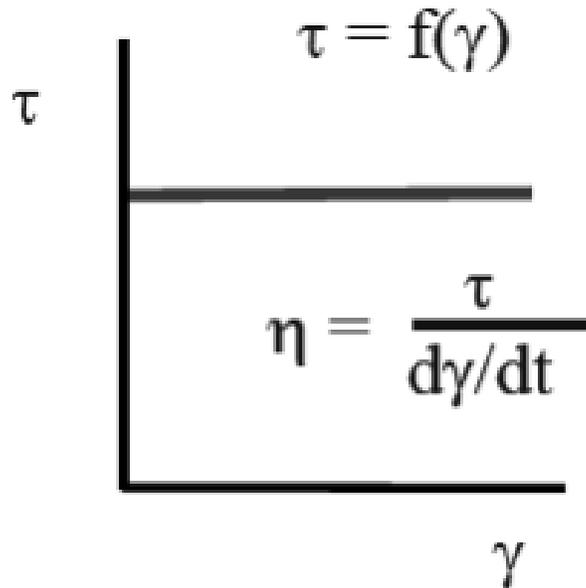


Figura 5-2. Representación gráfica de la ley de Newton [27].

La siguiente ecuación representa la ley de viscosidad de Newton:

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

Donde τ es el esfuerzo aplicado al líquido [Pa], μ es la viscosidad newtoniana del material [Pa s] y $\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$ es la rapidez de deformación [1/s]. Los fluidos que no siguen la Ec. (2) se conocen como fluidos no newtonianos [28, 29].

El sólido elástico y el fluido newtoniano son los comportamientos límite de un material desde el punto de vista reológico [7]. Aquellos materiales que no sean ni elásticos ni viscosos, o bien, poseen características de ambos límites son conocidos como materiales viscoelásticos [7, 9].

Para la clasificación de materiales viscoelásticos se implementa un número adimensional, llamado número de Deborah (véase Ec. (3)), el cual relaciona otro parámetro reológico conocido como tiempo de relajación y un tiempo de experimentación o de observación propio del tipo de flujo que se esté desarrollando [27].

$$De = \frac{\lambda_0}{t_{obs}} \quad (3)$$

donde, λ_0 es el tiempo de relajación (o tiempo de relajación de Maxwell) [s] y t_{obs} es el tiempo de observación del experimentador o bien, el tiempo característico del tipo de flujo donde el material fluya [s].

El número de Deborah puede ayudar a clasificar la respuesta de un sistema a una deformación particular. Por ejemplo, si De es grande, la relajación del material determina la respuesta viscosa. Si De es pequeño, o cero, la escala de tiempo de flujo determina la respuesta elástica. Por lo tanto, el número de Deborah De , es importante para determinar si los efectos de relajación material dominan en una aplicación determinada [30].

En la **Figura 5-3** se muestran los tres tipos de comportamiento de un material o sustancia, en el eje de las ordenadas se grafica el esfuerzo aplicado o la deformación aplicada, mientras que en eje de las abscisas se grafica el tiempo de aplicación (desde t_0 , inicio del experimento, hasta t_1 se remueve completamente el esfuerzo o la deformación). **Elástico a)** Al ejercer un esfuerzo en un sólido elástico, este presenta deformación hasta que la fuerza concluya, regresando a su forma original; se dice que un material elástico tiene memoria perfecta. **Viscoso**

b) Al ejercer un esfuerzo en un fluido viscoso, este presenta una deformación que no se recupera al detener el esfuerzo (deformación continua e irreversible), es decir, es un material sin memoria, sin embargo, al detener el esfuerzo, este se detiene progresivamente (relajándose). **Viscoelástico c)** Al principio de observa un comportamiento lineal de la deformación contra el tiempo, después de un tiempo crítico, el material se deforma continua e irreversiblemente [27].

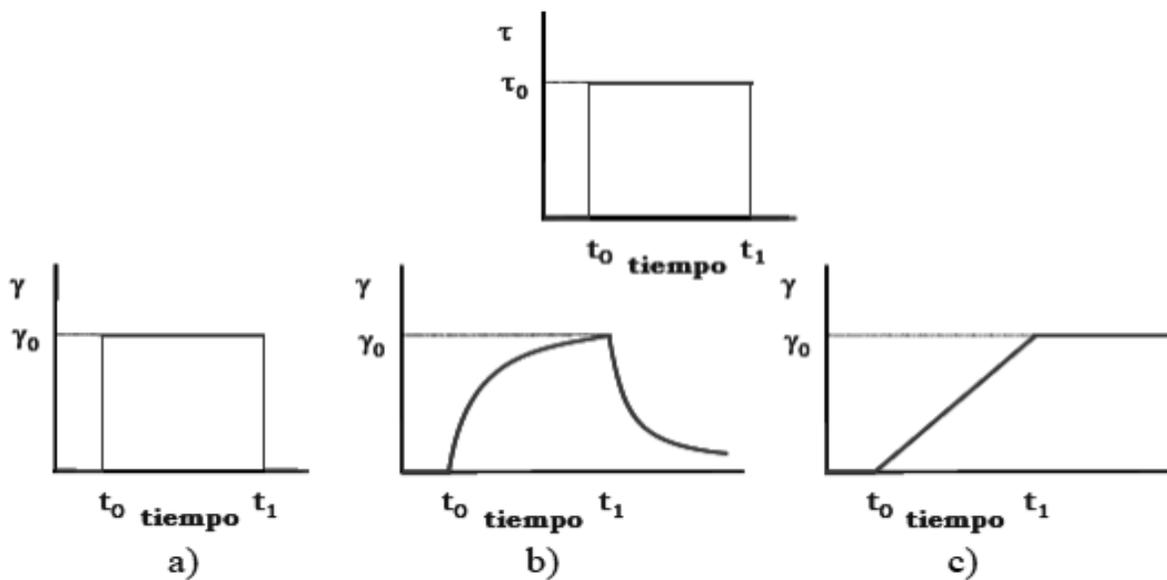


Figura 5-3. Comportamiento a) elástico, b) viscoso y c) viscoelástico [27]

Como se mencionó anteriormente, los materiales no newtonianos pueden ser clasificados en función de los valores del número de Deborah: si $De < 1$ comportamiento viscoso, si $De > 1$ comportamiento elástica, y si $De = 1$ comportamiento viscoelástico. Por lo anterior, en un sólido de Hooke el tiempo de relajación es infinito, mientras que en un líquido de Newton el tiempo de relajación es cero. Al esperar el tiempo necesario, todas las sustancias pueden fluir [10]. En

la **Figura 5-4** se muestra la clasificación de los materiales en función de su número de Deborah (De), se observan 3 principales regiones [7]:

- 1) A bajos números de Deborah y una deformación pequeña (pequeña amplitud de deformación), el material se comporta como un fluido viscoso newtoniano.
- 2) A altos números de Deborah y una deformación media a alta, el material se comporta como un sólido de Hooke.
- 3) A una zona intermedia correspondiente a un comportamiento viscoelástico, para deformaciones bajas y medias, cercanas al equilibrio y en relación lineal de esfuerzo y deformación: “viscoelasticidad lineal”
A mayor deformación, se pierde la relación lineal y se tiene la zona de “viscoelasticidad no lineal” [27].

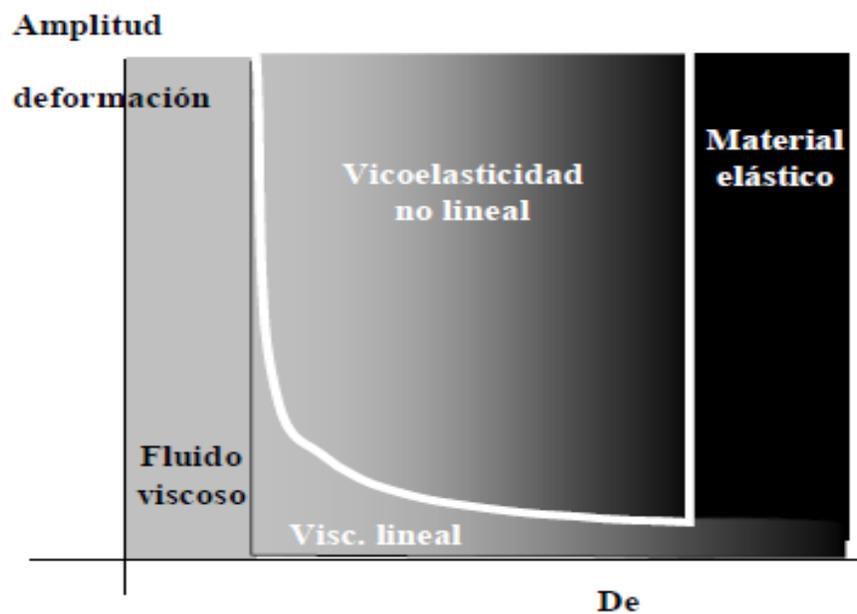


Figura 5-4. Comportamiento de un material en función de la amplitud de la deformación y el número de Débora[27].

En la **Figura 5-5** se muestran dos gráficas del esfuerzo cortante en función de la deformación, la línea roja representa el comportamiento viscoelástico de un material y la línea punteada representa el comportamiento de un fluido newtoniano. Una gran variedad de sólidos elásticos pierde la relación lineal de la ley de Hooke al tener valores de deformación elevados, lo que se conoce como deformación plástica. Asimismo, diversos fluidos viscosos no siguen la ley de Newton a valores elevados de deformación [27].

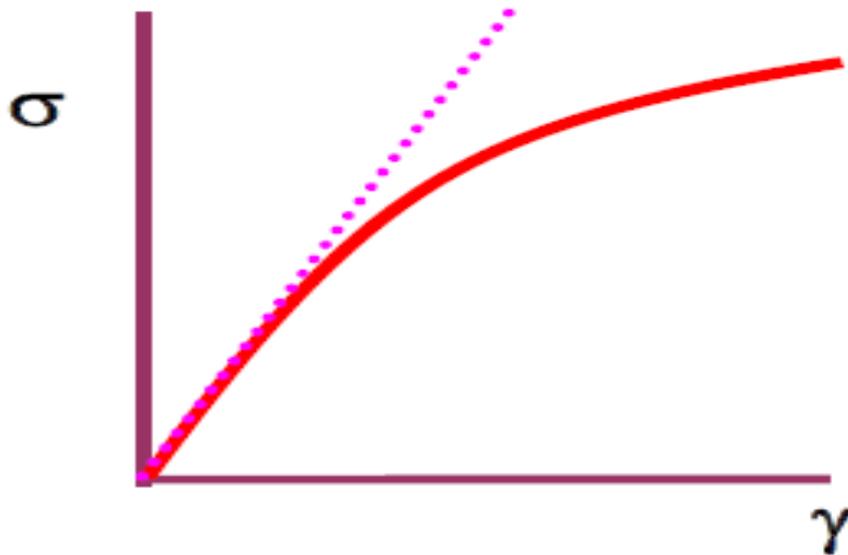


Figura 5-5. Relación entre esfuerzo y deformación para un fluido viscoelástico [27].

6 Ecuaciones constitutivas basadas en la viscoelasticidad lineal

La relación matemática entre el esfuerzo y la deformación, en su forma integral, están dadas por una ecuación constitutiva reológica de estado usando el principio de superposición de Maxwell [6]:

$$\gamma(t) = \int_{-\infty}^t G(t - t') \frac{d\gamma(t')}{dt'} dt' \quad (4)$$

$$\sigma(t) = \int_{-\infty}^t J(t - t') \frac{d\sigma(t')}{dt'} dt' \quad (5)$$

En donde t es el tiempo actual, t' es el instante anterior cualquiera del proceso, $G(t)$ es el módulo de relajación y $J(t) = \frac{1}{\sigma(t)}$ es la complianza (inverso del esfuerzo). La ecuación constitutiva de la viscoelasticidad lineal puede ser usada para describir la respuesta de los materiales que siguen un comportamiento viscoelástico lineal en distintos tipos de experimentos en cizalla simple [27].

Los experimentos más comunes empleados, basados en la viscoelasticidad lineal para la caracterización de materiales, son los siguientes:

- Relajación de esfuerzos
- Ensayo de fluencia
- Recuperación elástica
- Experimentos dinámicos u oscilatorios

7 Pruebas y respuestas reológicas en chocolate

7.1 Flujo cortante simple

Prueba reológica destructiva que se lleva a cabo en un flujo continuo en estado estacionario y donde el perfil de velocidades del sistema es lineal (flujo homogéneo), es decir, el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación no son dependientes de la posición; para lo anterior, se aplica una fuerza tangente

generando que la deformación del material se continua e irreversible [3, 4]. Al flujo cortante simple también se le conoce como flujo de Couette, dicho tipo de flujo originalmente se llevó a cabo en una geometría de cilindros concéntricos [5]. Estado estacionario: no hay dependencia del tiempo en las variables dinámicas y cinemáticas del sistema [29]. En la mayoría de las geometrías usadas en los reómetros para conocer la respuesta del chocolate, se desprecian los efectos, además, se considera un proceso isotérmico, entendiendo que la temperatura es constante, finalmente, el fluido se considera incompresible, es decir, en el tiempo y espacio su densidad permanece constante [2].

7.2 Flujo oscilatorio de baja amplitud de deformación

Prueba reológica no destructiva en donde se realiza un análisis de la respuesta mecánica de un sistema, en este caso en un reómetro. Estudia que tan elástico y que tan viscoso es el material, eligiendo para la prueba reológica una geometría específica en reómetro de acuerdo a lo que considere el investigador [8]. Al programar el reómetro este comienza a deformar de forma controlada y oscilatoria, es decir, la deformación va primero en una dirección y posteriormente va en la otra dirección [8].

7.3 Respuestas reológicas

Al ejercer una presión en el fluido los parámetros reológicos varían, lo anterior también se debe a que los porcentajes de cacao en el chocolate varían u

otros factores. Por lo general, bajas deformaciones en reómetros implican pruebas en el régimen de viscoelasticidad lineal, por ende, a deformaciones infinitesimales cercanas al equilibrio, la respuesta de un material en este régimen está condicionada a su estructura molecular [12, 31].

La respuesta reológica de una cobertura de chocolate viene determinada por la composición de la muestra (es decir, cantidad de grasa, cantidad y tipo de emulsionantes y distribución del tamaño de las partículas). Por ejemplo, De Graef *et al.* (2011) reportaron el esfuerzo cortante en función de la rapidez de deformación de chocolate fundido a diferentes contenidos (en porcentaje peso-peso) de grasas (véase **Figura 7-4**). Mencionan que, en el chocolate fundido, las grasas pueden estar presentes de dos maneras: libres de chocolate o como grasa en y rodeada de partículas de chocolate. Además, explican que, es la grasa libre la que permite que las partículas sólidas se muevan entre sí y, por lo tanto, que el chocolate fluya. Con un contenido de grasa creciente, la distancia entre las partículas sólidas aumenta y, en consecuencia, la viscosidad disminuye, por ende, a medida que el contenido de grasas en el chocolate aumenta, el esfuerzo cortante disminuye, lo anterior lo asocian a un efecto lubricante entre las capas del fluido debido a la presencia de las grasas, adicionalmente, se puede observar que conforme la cantidad de grasa disminuye, la respuesta reológica del fluido se vuelve más compleja, es decir, se detectan cambios de pendiente a bajas rapidez de deformación, lo anterior probablemente se deba a la gran complejidad en composición de la muestra de chocolate. En el mismo estudio, los autores emplearon el modelo constitutivo de Casson [5]. La correlación anteriormente

descrita también se vio reflejada en los valores de los parámetros reológicos del modelo.

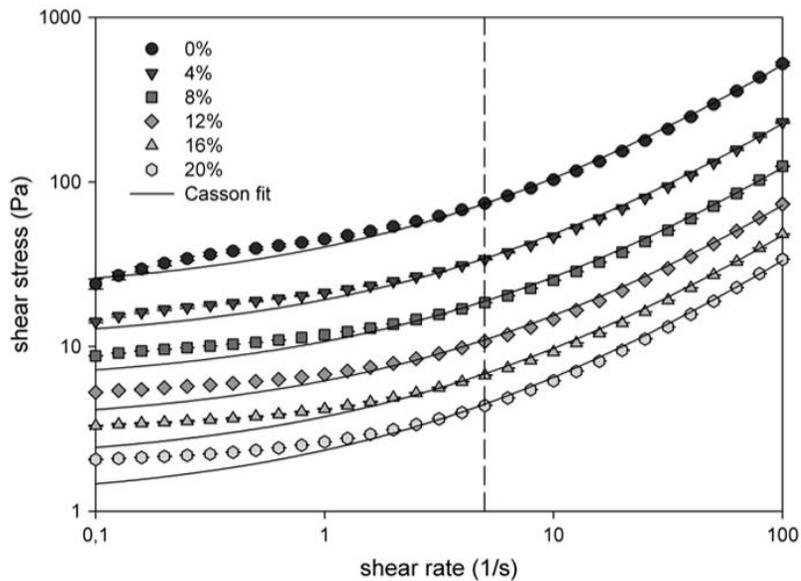


Figura 7-1. Esfuerzo cortante versus la rapidez de deformación de chocolate con distinto contenido de grasas. La línea continua representa la predicción teórica del modelo de Casson [19].

Adicionalmente, Fernandes *et al.* (2013) estudiaron la transición de fase sólido-líquido del chocolate a diferentes composiciones a través de su comportamiento reológico. Como en el anterior estudio, en este se corrobora que la composición de grasas y azúcares, así como el tipo de partícula afectan las propiedades reológicas del chocolate, incluso se detectan esfuerzos a la cedencia en el chocolate líquido. En sus estudios (véase **Figura 7-2(a)**) se percataron que, conforme la temperatura aumenta, la viscosidad a bajas y altas rapidezces de deformación disminuye, mientras que a valores intermedios la viscosidad de las muestras es parecidas, indicando una transición de fase que es independiente de

la composición del chocolate. Lo anterior puede ser corroborado en la prueba a esfuerzo controlado (**Figura 7-2(b)**), donde de la misma manera, a rapidezces de deformación medias la respuesta es prácticamente la misma [17].

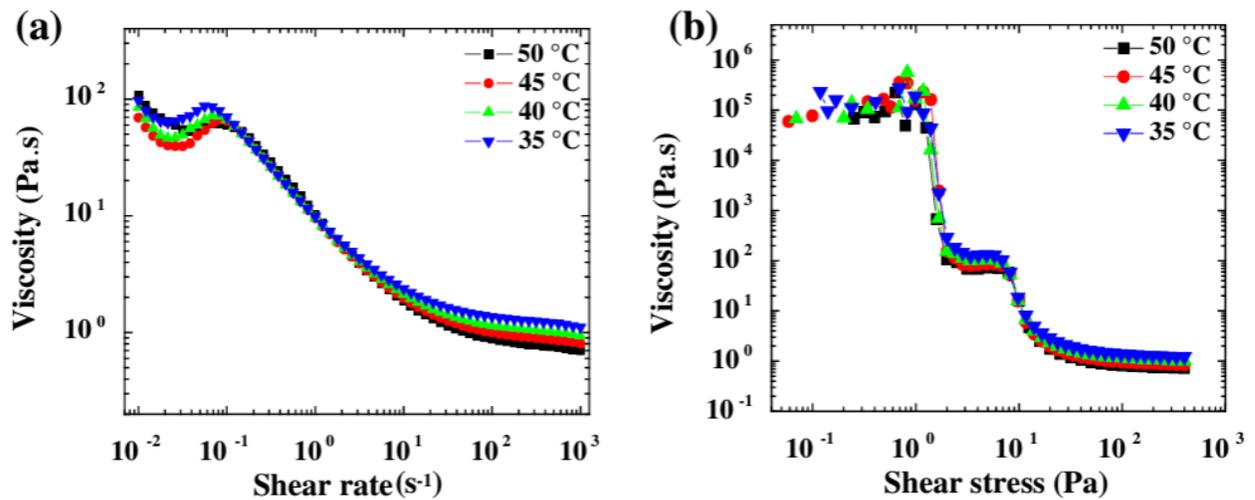


Figura 7-2. Curvas de flujo de una muestra de 70% chocolate a diferentes temperaturas bajo a) rapidez de deformación controlada y b) esfuerzo cortante controlado [17].

En la **Figura 7-3** se puede observar el comportamiento reológico, al flujo cortante simple estacionario, de mezclas con diferente porcentaje de chocolate oscuro y de una muestra de licor de cocoa (CL). En general, si el porcentaje de cocoa disminuye, la viscosidad será a mayor a medida que aumenta la rapidez de deformación. Las respuestas reológicas entre las mezclas de chocolate y el licor de cocoa son diferentes, de hecho, muestran un valor de pendiente distinto, lo cual es un indicio de que la estructura del licor y de las mezclas de chocolate generan estructuras moleculares muy distintas. Nótese como a bajas rapidez de deformación se exhibe un pequeño adelgazamiento seguido por un

engrosamiento, los autores asocian este comportamiento a que se induce la formación de estructuras nuevas por las partículas presentes en el chocolate debido a las azúcares [17].

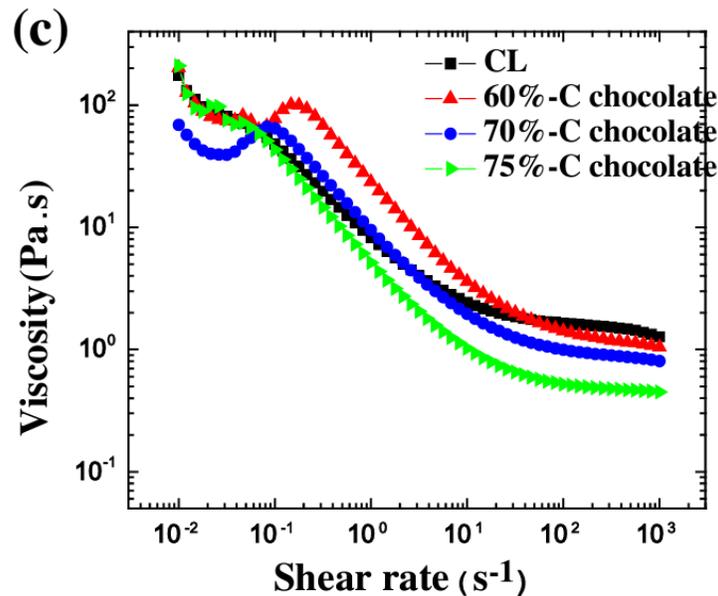


Figura 7-3. Efecto de la composición en el comportamiento reológico a 45°C de diferentes mezclas de chocolate.

Así como las distintas etapas que intervienen en la elaboración del chocolate: mezclado, refinado, conchado, templado, moldeado y envasado. Estas dispersiones se utilizan habitualmente para aportar dulzor y recientemente se han desarrollado para elaborar coberturas de bajo contenido calórico. Así pues, está claro que, por un lado, la aparición de diversas fases sólidas (es decir, el polimorfismo) tiene un impacto significativo en la calidad del producto de chocolate y confitería [32].

Como lo menciona Medina-Torres *et al.* (2014), el chocolate con goma xantana, en pruebas oscilatorias de baja amplitud de deformación, mostró un comportamiento

reológico mejorado en comparación con el de la marca comercial (emulsión con lecitina de soya), es decir, el punto de cruce de la cobertura de chocolate con goma xantana se sitúa más bajo, lo que significa que este recubrimiento tiene una mejor respuesta mecánica (mayor comportamiento sólido) y también un mejor comportamiento de fluidez a altas temperaturas, teniendo ambos módulos valores más bajos, lo que posiblemente se deba a la composición del recubrimiento (debido a la mayor movilidad de la cadena de ácidos grasos)”[16].

Las respuestas reológicas mencionadas anteriormente son obtenidas a partir de la prueba de relajación de esfuerzos.

Por otro lado, en una muestra de chocolate tradicional se realiza una prueba de relajación de esfuerzos, es decir, tiene como objetivo la lectura de la relajación del esfuerzo aplicado a la muestra de chocolate en función del tiempo (obsérvese la **Figura 7-4**) teniendo en el eje de las ordenadas (vertical) el esfuerzo cortante al que es sometido el fluido en unidades de pascales vs el tiempo de sometimiento en el eje de las abscisas (horizontal). Dicha lectura arroja resultados de tener una menor relajación de esfuerzos a mayor paso del tiempo (en segundos) y menor esfuerzo ejercido.

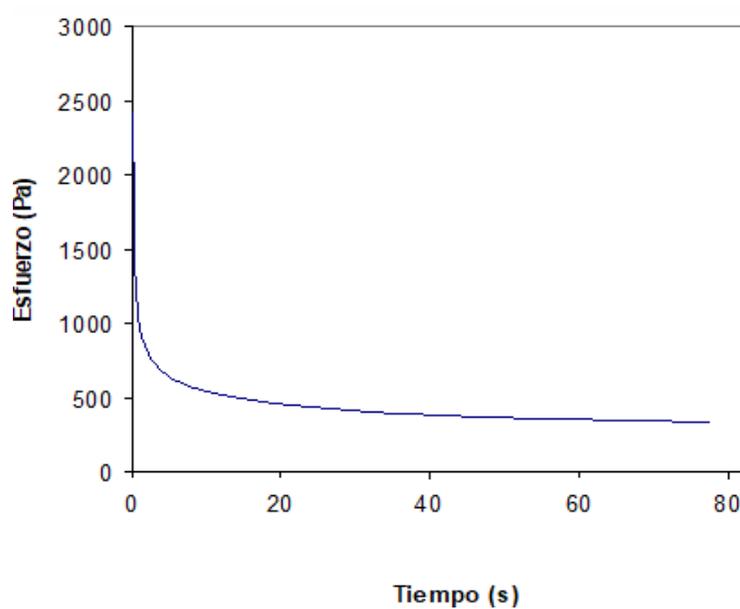


Figura 7-4. Prueba de relajación de esfuerzos de una muestra de chocolate tradicional [33].

Las sensaciones que perciben los consumidores de chocolate, así como las diversas texturas, van relacionadas con la reología, al tener en cuenta la cremosidad, suavidad, blandura, fragilidad y dureza, es referido al resultado de sus propiedades organolépticas y comportamiento reológico.

Las pruebas reológicas permiten evaluar resultados desde la calidad hasta el comportamiento de la materia prima para la elaboración del producto y poder cumplir con las propiedades adecuadas y requeridas del cliente, la normatividad de calidad, almacenamiento y seguridad, así como optimizar los costos de producción. Se hace mayor referencia a la descripción de los procedimientos cualitativos, ya que el proyecto se enfoca en una investigación teórica de las propiedades reológicas del chocolate, teniendo como base los datos actualizados y publicaciones de revistas científicas en revisión por pares [16].

8 Equipo para la medición de propiedades reológicas del chocolate

Además del reómetro, también se utiliza el viscosímetro, el primero arroja resultados de una viscosidad real de la muestra, es decir, una *huella digital* del material (la cual es única e irrepetible), mientras que el segundo arroja un resultado de viscosidad aparente, dicho de otra manera, la viscosidad aparente no representa una propiedad del material ya que el tipo de flujo usado no es controlado [7]. Se podría decir que un reómetro es de más eficacia para encontrar los parámetros reológicos de una sustancia que un viscosímetro, sin embargo, un reómetro suele ser mucho más costoso que un viscosímetro.

8.1 Reómetro

El Reómetro Rotor-estator (RE) Rodete (alternativa Conching) es ideal para la homogeneización a baja viscosidad, emulsificación y reducción del tamaño de partícula del cacao. Los cuatro álabes funcionan a altas rpm con un estator fijo.

A medida que las palas giran, todo pasa a través de la abertura del estator, las partículas se someten a esfuerzo cortante y el material se expulsa a altas velocidades de corte entre ellas, elimina rápidamente aglomerados [16].

Otro equipo comúnmente usado es el reómetro AR-G2 de la marca TA Instruments (ver **Figura 8-1**)[16]. Asimismo, el tipo de geometría usada para la obtención de propiedades reológicas suele ser de platos paralelos rugosos [16] y plato y cono rugosos [22].

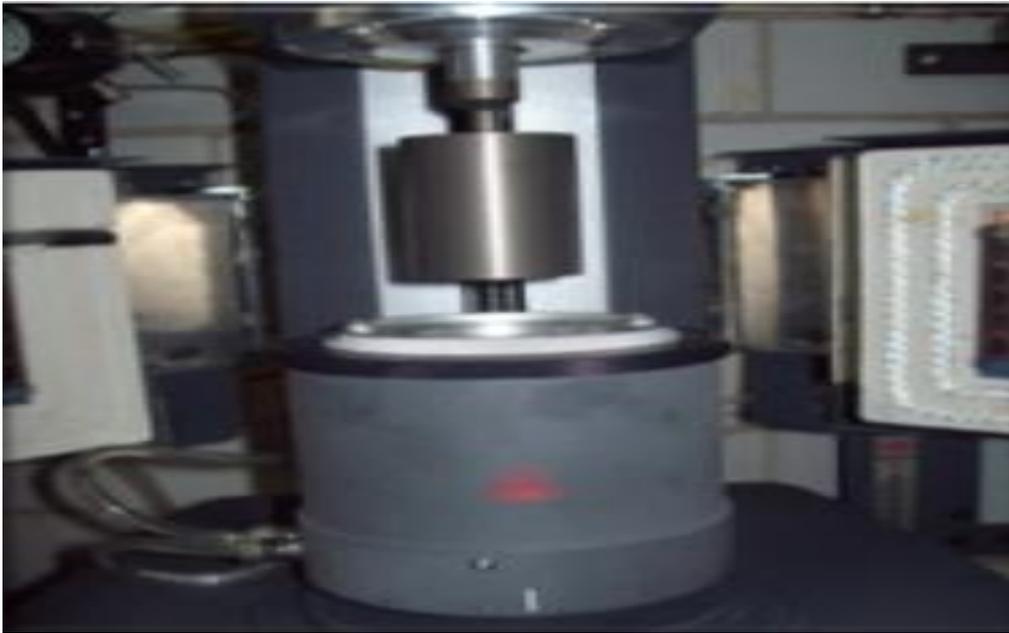


Figura 8-1. Reómetro modelo TA Instruments AG-2®[33].

El reómetro es controlado a través de una interfase computacional donde se puede regular la distancia del plato inferior del superior (gap) o bien establecer valores específicos del esfuerzo [16].

8.1.1 Diferencia entre reómetro y viscosímetro

El reómetro realiza oscilaciones, mientras que el viscosímetro no realiza oscilaciones, por lo que el reómetro es un equipo que arroja respuestas de viscosidad real y el viscosímetro de viscosidad aparente, teniendo en cuenta dichos aspectos, es mejor la selección de un reómetro para obtener viscosidades más exactas, siendo así que un viscosímetro es un equipo de menor costo y por ello arroja respuestas con mayor error [1].

9 Procesos de fabricación del chocolate

9.1 Selección de emulsificante

Cristalización y atemperado. Los métodos reométricos son muy útiles para controlar los cambios micro-estructurales que se producen durante la (pre) cristalización del chocolate, siguiendo la evolución de las propiedades reológicas en condiciones térmicas y de cizallamiento controladas. La influencia de tiempo y temperatura de pre-cristalización se pueden imitar con una prueba de rampa de temperatura rotacional, obteniendo mayor reproducibilidad en comparación con un templado manual, dada una configuración experimental reométrica precisa. Las técnicas reométricas permiten diferenciar entre distintos grados de atemperado, incluyendo las variaciones de la cristalización primaria, desarrollo de la microestructura y calidad macroscópica general entre distintos chocolates bien atemperados [31].

9.2 Atemperado

Etapa donde se tiene un templado (enfriamiento) del chocolate, por lo que hay nuevamente una variación en la temperatura, lo que ayuda a la conversión de cristales inestables existentes (cristalización) por las grasas contenidas, triglicéridos u otros, reorganización en su microestructura. Durante una experimentación de pruebas reológicas del chocolate se obtuvo mejores condiciones de atemperado a las siguientes condiciones: $T = 35^{\circ}\text{C}$ y $t = 36$ horas. La aparición de varias fases sólidas (polimorfismo) tiene impacto significativo en la calidad de producto de chocolate, las propiedades reológicas del chocolate son

importantes en el procesamiento para la obtención de productos de alta calidad y textura definida. Comportamiento dilatante (shear-thickening), fluido no Newtoniano [16].

9.3 Diferencias entre emulsión con lecitina de soya (tradicional) y goma xantana

Al agregar al chocolate la lecitina de soya como emulsificante, se puede encontrar personas que presenten reacción alérgica a la soya, por dicho aspecto y otros más, es necesario encontrar una emulsión más adecuada y en este caso fue la goma xantana (no presenta ningún tipo de reacción alérgica).

9.4 Conchado

Etapa de proceso de conchado es un amasado generalmente por 1 día (24 horas) en donde se obtiene la manteca de cacao (presencia de grasas y triglicéridos), además de añadir un emulsificante previamente seleccionado. Por lo que se presenta además de un esfuerzo (amasado), también la presencia característica de viscosidad y deformación (formación de emulsión). Concha: Rudi Lindt, 1878 en Suiza Lindt: "Proceso que ayuda a que el chocolate sea más suave y cambia su sabor. " El chocolate pasa de ser un polvo o una pasta, a un líquido que fluye libremente. Existen dos tipos de flujo: Velocidad de corte y elongación o alargamiento. Una vez obtenida la textura deseable, así como sus propiedades organolépticas del chocolate, se procede a realizar un moldeo y etiquetado por

normatividad para distribución y venta del producto. En esta etapa el emulsificante ha hecho ya su trabajo y se facilita el moldeo del producto [16].

Alcances y trabajo futuro

Los alcances y trabajo a futuro de la reología del chocolate, de acuerdo a lo investigado en este documento, se enlistan a continuación:

- **Mejor comprensión de la estructura molecular y el comportamiento al flujo del chocolate:** Se busca profundizar en el conocimiento de cómo los ingredientes y las condiciones de procesamiento influyen en la estructura y las propiedades reológicas del chocolate.
- **Desarrollo de modelos constitutivos reológicos:** Se pretende desarrollar modelos matemáticos y de simulación numérica que puedan predecir el comportamiento reológico del chocolate, tanto en estado líquido, como en estado sólido, bajo diferentes condiciones de procesamiento y formulación comúnmente usados en la industria chocolatera.
- **Optimización de procesos:** Se propone la optimización de los procesos de fabricación del chocolate, en función de su respuesta reológica, para garantizar una calidad consistente y una mínima variabilidad en las propiedades organolépticas del producto final.
- **Innovación en productos:** La comprensión más profunda de la reología del chocolate permitirá el desarrollo de nuevos productos con características reológicas específicas, como chocolates con texturas

diferenciadas o con propiedades de flujo adaptadas a aplicaciones específicas.

- **Aplicación en la industria alimentaria:** Se propone aplicar los conocimientos de reología del chocolate en otros productos alimenticios relacionados, como cremas para untar, helados y productos de confitería, para mejorar su calidad y estabilidad.

Para el trabajo futuro, es crucial continuar investigando y desarrollando técnicas analíticas avanzadas para caracterizar las propiedades reológicas del chocolate con mayor precisión y eficacia. Además, se requerirá una colaboración interdisciplinaria entre científicos de alimentos, ingenieros, físicos y otros expertos para abordar los desafíos actuales y futuros en este campo en constante evolución. La aplicación de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y la nanotecnología, también podría abrir nuevas oportunidades para avanzar en la comprensión y manipulación de la reología del chocolate. En resumen, el futuro de la reología del chocolate se perfila como un campo emocionante y lleno de posibilidades para mejorar tanto la calidad como la diversidad de productos de chocolate disponibles en el mercado.

Conclusiones

El ingeniero químico desempeña un papel destacado en la industria alimentaria, siendo el profesional con los conocimientos necesarios para llevar a cabo pruebas reológicas y, por ende, modificar los alimentos según las características deseadas. Sin el análisis de estas propiedades y las pruebas

reológicas, resulta imposible comprender el comportamiento de los materiales, como en el caso del chocolate. Los modelos matemáticos basados en la reología ofrecen una mejor interpretación de la diversidad de fluidos.

Tras llevar a cabo un análisis teórico e investigación del estado actual de la reología aplicada en la industria alimentaria, con un enfoque específico en el chocolate, se pueden extraer las siguientes conclusiones: La comprensión de las respuestas reológicas en los alimentos, particularmente en el chocolate, desempeña un papel fundamental en la garantía de aspectos críticos como la aceptabilidad por parte del consumidor en términos de textura, la mejora de las propiedades organolépticas (sabor y textura), el control de calidad, la eficacia del almacenamiento y la seguridad alimentaria mediante la implementación de normativas adecuadas. Además, el conocimiento en reología permite la optimización de procesos y la reducción de costos de producción, lo que resulta en productos finales de alta calidad y rentabilidad para la industria alimentaria.

Respuestas a las preguntas de investigación

El chocolate, al no adherirse al modelo reológico establecido por la ley de Newton de la viscosidad, que predice una viscosidad constante, se clasifica como un fluido no newtoniano debido a su estructura química compleja. Durante cada etapa de procesamiento, el chocolate experimenta cambios significativos en su textura para alcanzar las características deseadas. Al considerar los parámetros reológicos en cada etapa de procesamiento, obtenidos a través de distintas

pruebas reológicas, se pueden implementar mejoras significativas en la industria del chocolate. Esto incluye la optimización de procesos para reducir la descomposición del cacao, mejorar el sabor con ingredientes de calidad y reducir la necesidad de edulcorantes y colorantes artificiales. Estos ajustes no solo benefician la salud de los consumidores al ofrecer un producto más nutritivo, sino que también pueden ser económicamente rentables para la industria, al cumplir con las normativas que garantizan la calidad del chocolate y generar productos más competitivos en el mercado.

Nomenclatura

τ	esfuerzo cortante [Pa]
σ	esfuerzo normal [Pa]
E, G_0	módulo elástico [Pa]
ϵ	deformación (alargamiento) [-]
t	tiempo característico del proceso de deformación al que se somete la sustancia [s]
t''	instante anterior cualquiera del proceso [s]
τ	tiempo de relajación de la sustancia [s]
De	número de Deborah [-]
$G(t)$	módulo de relajación
$J(t)$	compliance (inverso del esfuerzo)
η	viscosidad [Pa.s]
$\dot{\gamma}$	rapidez de deformación [1/s]

Glosario

Término	Significado
Deformación	Cambio de posición de un punto material a otro.
Ecuación constitutiva	Relaciona las variables dinámicas como rapidez de deformación, esfuerzo cortante y deformación del sistema.
Ecuación de continuidad	Representa la conservación de materia con una ecuación diferencial parcial.
Ecuación de movimiento	Aplicada en un medio continuo a través de la segunda ley de Newton.
Elasticidad	El material tiene la capacidad de regresar a su forma original después de aplicarle un esfuerzo.
Estado estacionario	Las variables dinámicas no dependen del tiempo.
Fluido	Sistema físico con deformación continua e irreversible al poner un esfuerzo sobre el mismo.

Fluido complejo	Sus propiedades físicas enlazadas con flujo dependiente e independiente del tiempo, considerado un fluido no newtoniano con comportamiento reológico en estado estacionario y no estacionario.
Fluido dilatante	Variación en la viscosidad al aplicar un esfuerzo y temperatura.
Fluido incompresible	Presenta una densidad constante.
Fluido newtoniano	La viscosidad muestra relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.
Fluido no newtoniano	La viscosidad no muestra una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación.
Fluido plástico	Aplicar un esfuerzo mínimo para que presente fluidez.
Fluido pseudoplástico	Al aumentar la rapidez de deformación, su viscosidad disminuye.
Fluido viscoelástico	Presenta una contribución viscosa y

	otra elástica.
Fluido viscoplástico	Presenta una contribución viscosa y otra plástica.
Flujo	Movimiento continuo de materia en una dirección y sección o superficie determinada.
Flujo cortante	Al aplicarle una fuerza tangencial al sistema, su deformación es continua e irreversible.
Flujo homogéneo	Propiedades del sistema, no dependen de su posición.
Módulo elástico	Asociado con la energía almacenada en el material, medido en pascal.
Módulo viscoso	Asociada con la energía disipada por el material, medido en pascal.
Plasticidad	Propiedad que presenta un material al aplicarle un esfuerzo, no es posible recuperar su estado original.
Rapidez de deformación	Rapidez con la que se deforma un

	fluido.
Reología	Ciencia que estudia el flujo de la materia y su deformación.
Tiempo de relajación	Tiempo que requiere una sustancia para alcanzar un nuevo estado de equilibrio, reorganizando su estructura.
Viscosidad	Medida de resistencia al fluir de un material.

Glosario tomado de tomado de Herrera-Valencia *et al.* (2023) [2].

Referencias bibliográficas

1. Morrison, F.A., *Understanding Rheology*, ed. M.T. University. 2001, New York: Oxford University Press.
2. Herrera-Valencia, E.E., *et al.*, *Fenómenos de transporte y reología de fluidos estructurados*. 2023, Ciudad de México: Comité Editorial de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.
3. Herrera-Valencia, E.E., *et al.*, *Fenómenos de transporte y reología de fluidos complejos: Flujo pulsátil de sangre humana*. 2022, Ciudad de México: UNAM-FESZ.
4. Herrera-Valencia, E.E., *Fenómenos de transporte y reología de fluidos complejos aplicados a sistemas biológicos*. 2015, Ciudad de México: PAPIIT IN115615.
5. Barnes, H.A., *A Handbook of Elementary Rheology*. 2000: University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics.
6. Barnes, H.A., J.F. Hutton, and K. Walters, *An introduction to rheology*. 1989, Amsterdam: Elsevier.
7. Macosko, C.W., *Rheology: Principles, Measurements and Applications*. 1994, Weinheim: Wiley-VCH.
8. Middleman, S., *Fundamentals of polymer processing* 1997, New York: McGraw-Hill.
9. Malkin, A.Y., *Rheology: Concepts, Methods, and Applications*. 2017, Toronto: ChemTec Publishing.
10. Tanner, R.I. and K. Walters, *Rheology: An Historical Perspective*. Rheology Series. Vol. 7. 1998, Amsterdam: Elsevier.

11. Walters, K., *Rheometry*. 1975, London: Chapman and Hall.
12. Goodwin, J.W. and R.W. Hughes, *Rheology for Chemists: An Introduction*. 2008, Cambridge: RSC Publishing.
13. Hendrik, J.N., *et al.*, *Chocolate Tempering in a Rheometer: Monitoring Rheological Properties During and After Crystallization of Cocoa Butter*. *Journal of Food Engineering*, 2023. **16**: p. 1555–1570.
14. Toker, O.S., *et al.*, *Chocolate flow behavior composition and process effects*. *Journal Food Science and Nutrition*, 2021. **63**(19): p. 3788-3802.
15. Salinas, K., *Ingeniería Comercial del Chocolate*. 2016, Guayaquil: Ciencia, Tecnología e Innovación.
16. Medina-Torres, L., *et al.*, *Rheological of chocolate-flavored, reduced-calories coating as a function of conching process*. *Journal of Food Science and Technology*, 2014. **51**(7): p. 1421-1427.
17. Fernandes, V.A., A.J. Müller, and A.J. Sandoval, *Thermal, structural and rheological characteristics of dark chocolate with different compositions*. *Journal of Food Engineering*, 2013. **116**(1): p. 97-108.
18. Beckett, S.T., *The science of chocolate*. 3rd. ed. 2019, Croydon: Royal Society of Chemistry.
19. De Graef, V., *et al.*, *Chocolate yield stress as measured by oscillatory rheology*. *Food Research International*, 2011. **44**: p. 2660-2665.
20. Afoakwa, E.O., A. Paterson, and M. Fowler, *Factors influencing rheological and textural qualities in chocolate – a review*. *Trends in Food Science & Technology*, 2007. **18**(6): p. 290-298.

21. México, N.O.M., *GOBIERNO DE MÉXICO*, in *SECRETARIA DE SALUD*. 2015.
22. Steffe, J.F., *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 1996, East Lansing: Freeman Press.
23. Instruments, T. *Rheometer*. 2022 [cited 2024 20 april]; Available from: <https://www.tainstruments.com/what-are-rheometry-and-rheology/>.
24. Calderas, F., *et al.*, *On the yield stress of complex materials*. Korea-Australia Rheology Journal, 2013. **25**: p. 233-242.
25. Gonçalves, E.V. and S.C. da Silva-Lannes, *Chocolate rheology*. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 2010. **30**(4): p. 845-851.
26. González, L. *Chocolate y Reometría*. Comportamiento Reológico de los alimentos, 2022.
27. García-Q., J.C., *Viscoelasticidad lineal*. 2008, España: Universidad de Alicante.
28. Bird, R.B., W.E. Stewart, and E.N. Lightfoot, *Transport Phenomena*. 2002, New York: John Willey & Sons.
29. Bird, R.B., R.C. Armstrong, and O. Hassager, *Dynamics of polymeric liquids, vol. 1*. 1977, New York: Wiley.
30. *Understanding rheology*. 2001, Oxford University Press: Michigan Technological University New York.
31. Hendrik, J.N., *et al.*, *Chocolate Tempering in a Rheometer: Monitoring Rheological Properties During and After Crystallization of Cocoa Butter*. *J. Food Eng. Science Nature*. *Journal Food Eng. Science Nature*, 2023: p. 128-139.

32. Toker, O.S., *et al.*, *Chocolate flow behavior: Composition and process effects.* . Journal Food Science and Nutrition, 2021: p. 3788-3802.