



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

**Facultad de Estudios Superiores
Cuautitlán**

Propiedades viscoelásticas, de flujo y
adhesivas de productos comerciales untables
aplicados en repostería

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A
ANA CRISTINA CARDENAS CASTRO

Asesoras: Dra. Laura Patricia Martínez Padilla
Dra. Virginia Agustina Delgado Reyes



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
 UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
 FACULTAD DE ESTUDIOS
 SUPERIORES CUAUTITLÁN
 ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
 PRESENTE



ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
 Jefe del Departamento de Exámenes Profesionales
 EXÁMENES de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Propiedades viscoelásticas, de flujo y adhesivas de productos comerciales untables aplicados en repostería.

Que presenta la pasante: Ana Cristina Cardenas Castro
 Con número de cuenta: 308015300 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
 "POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
 Cuautitlán Izcalli, Méx. a 03 de Septiembre de 2015.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	Dra. Laura Patricia Martínez Padilla	
VOCAL	I.A. Patricia Muñoz Aguilar	
SECRETARIO	I.A. Miriam Edith Fuentes Romero	
1er. SUPLENTE	I.A. Verónica Romero Arreola	
2do. SUPLENTE	M. en C. Enrique Fuentes Prado	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Primeramente quiero agradecer a la vida, a Dios, por permitirme concluir una meta más.

No existen las palabras suficientes para agradecer a mi familia todo el esfuerzo, sacrificio, amor y lucha que me han brindado desde el primer momento que llegue a este mundo. A mi papá Guillermo y mi mamá Ana Margarita, por enseñarme a luchar por lo que se quiere y por guiarme en los momentos difíciles, es por ello que hoy concluyó con éxito mi ciclo universitario, gracias por su incansable ayuda y apoyo incondicional, pero sobre todo por hacerme una persona con valores. Quiero que sepan que es para ustedes y que siempre estarán en mi corazón. Los amo mucho, ¡lo logramos!, Pero sobre todo gracias por darme el mejor y más invaluable de todos los regalos... a mi compañero de vida.

A mi compañero de vida, mi hermano Guillermo por darme aliento en los peores momentos y decirme si se puede. Gracias por los buenos momentos compartidos, por motivarme y ser un ejemplo a seguir.

A la doctora Patricia Martínez, a la doctora Virgina Delgado y a la profesora Norma Casas por orientarme y ayudarme a concluir esta investigación.

A la *DGPA-UNAM*, Programa de apoyo a proyectos para la innovación y mejoramiento de la enseñanza, *PAPIME PE101313 "Fortalecimiento de la enseñanza en la determinación de estabilidad de sistemas dispersos en el Taller Multidisciplinario de Reología y Textura en Alimentos"*, por la beca recibida para el desarrollo de esta tesis.

"If you can dream it, YOU CAN DO IT".

-Walt Disney

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE CUADROS.....	2
ÍNDICE DE FIGURAS.....	3
RESUMEN.....	4
INTRODUCCIÓN.....	5
I. ANTECEDENTES.....	7
1.1 Recubrimientos en repostería.....	7
1.1.2 Tipos de recubrimientos en repostería.....	7
1.1.3 Funcionalidad de los lípidos y el azúcar en las coberturas....	10
1.1.4 Recomendaciones para el manejo de los recubrimientos.....	13
1.2 Alimentos semisólidos.....	14
1.2.1 Reología de alimentos semisólidos.....	14
1.3 Adhesividad de alimentos semisólidos.....	30
1.3.1 Pruebas instrumentales en la medición de las propiedades adhesivas.....	30
II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN.....	36
2.1 Objetivos.....	36
2.2 Materiales.....	36
2.3 Métodos.....	39
2.3.1 Pruebas reológicas.....	39
2.3.2 Pruebas texturales.....	42
III. RESULTADOS.....	44
3.1 Estudio de productos semisólidos bajo cizalla oscilatoria.....	44
3.1.1 Determinación de la zona viscoelástica lineal.....	44
3.1.2 Barrido de velocidad angular.....	45
3.2 Estudio de productos semisólidos bajo cizalla rotacional.....	52
3.3 Pruebas de Adhesividad.....	57
3.3.1 Prueba de penetración-retirada.....	57
3.3.2 Prueba de contacto-retirada.....	61
CONCLUSIONES.....	64
REFERENCIAS.....	66

ÍNDICE DE CUADROS

		Página
Cuadro 1.1	Modelos matemáticos para fluidos independientes y dependientes del tiempo.....	25
Cuadro 1.2	Ejemplos de productos semisólidos con los parámetros obtenidos bajo cizalla oscilatoria y por cizalla rotacional.....	29
Cuadro 1.3	Factores causantes de la adhesividad y su relativa contribución...	35
Cuadro 2.1	Cantidad de carbohidratos totales, azúcares y lípidos de los semisólidos de estudio.....	36
Cuadro 2.2	Nomenclatura e ingredientes de los productos comerciales.....	36
Cuadro 2.3	Condiciones de operación para la zona viscoelástica lineal y para la obtención del espectro mecánico.....	40
Cuadro 2.4	Condiciones establecidas en el reómetro MCR301 para el cálculo del esfuerzo de cedencia.....	40
Cuadro 2.5	Condiciones establecidas para la prueba por contacto-retirada...	43
Cuadro 3.1	Deformación seleccionada dentro de la zona de viscoelasticidad lineal en los diferentes productos comerciales.....	45
Cuadro 3.2	Módulo de almacenamiento de los productos de estudio determinados a una velocidad angular entre 5 y 7 s ⁻¹	51
Cuadro 3.3	Valores obtenidos del esfuerzo de cedencia por método gráfico de los diferentes semisólidos comerciales.....	53
Cuadro 3.4	Valores del módulo elástico antes de fluir de los diferentes semisólidos comerciales.....	55
Cuadro 3.5	Valores obtenidos de la curva de flujo para BR y DH.....	56
Cuadro 3.6	Valores obtenidos del gráfico de una prueba por penetración-retirada para los productos semisólidos comerciales de alta consistencia.....	58
Cuadro 3.7	Valores obtenidos del gráfico de una prueba por penetración-retirada para los productos semisólidos comerciales de baja consistencia.....	60
Cuadro 3.8	Valores obtenidos del gráfico de una prueba por contacto-retirada para los productos semisólidos comerciales de alta consistencia.....	62
Cuadro 3.9	Valores obtenidos del gráfico de una prueba por contacto-retirada para los productos semisólidos comerciales.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1.1	Comportamiento reológico de los alimentos..... 15
Figura 1.2	Representación del módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'') en función de la velocidad angular a una deformación constante..... 19
Figura 1.3	Representación del módulo de almacenamiento (G' , círculos rellenos) y módulo de pérdida (G'' , círculos vacíos) en función de la velocidad angular en la zona de viscoelasticidad lineal... 20
Figura 1.4	Representación de la variación de la tangente δ en función de la velocidad angular..... 21
Figura 1.5	Curvas típicas de los fluidos independientes al tiempo..... 23
Figura 1.6	Deformación en función del esfuerzo de cizalla..... 26
Figura 1.7	Método estático y dinámico para la determinación del esfuerzo de cedencia..... 27
Figura 1.8	Representación de la curva fuerza en función del tiempo de la prueba de adhesividad por penetración retirada..... 32
Figura 1.9	Representación de la curva fuerza en función del tiempo de la prueba de adhesividad por contacto-retirada..... 34
Figura 2.1	Módulo elástico antes de fluir..... 41
Figura 3.1	Módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en función de la deformación, para la muestra BC1..... 44
Figura 3.2	Módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en función de la velocidad angular, para la muestra BC1..... 46
Figura 3.3	Módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en función de la velocidad angular, para la muestra CC..... 47
Figura 3.4	Tan (δ) en función de la velocidad angular, para los productos BC1, BC2, BD y CC..... 48
Figura 3.5	Módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en función de la velocidad angular, para la muestra (a) BR y (b) DH..... 49
Figura 3.6	Tan (δ) en función de la velocidad angular, para la muestra BR y DH..... 50
Figura 3.7	Ejemplo de la determinación por método gráfico del esfuerzo de cedencia para el betún de chocolate..... 53
Figura 3.8	Esfuerzo de cizalla en función de la deformación..... 54
Figura 3.9	(a) Curva de flujo (ascenso), velocidad de cizalla en función del esfuerzo de cizalla. (b) Velocidad de cizalla en función de la viscosidad para DH y BR..... 55
Figura 3.10	Prueba de penetración-retirada de productos sólidos..... 57
Figura 3.11	Prueba de penetración-retirada de productos semisólidos de baja consistencia..... 60
Figura 3.12	Prueba de contacto-retirada de productos sólidos..... 61
Figura 3.13	Prueba de contacto-retirada de productos semisólidos con baja consistencia..... 63

RESUMEN

Actualmente en México existe un gran consumo de productos de repostería como los betunes, cremas, brillos, merengues, fondant, entre otros, donde su control de calidad se basa en pruebas empíricas y la información que existe es limitada; por ello se estudiaron las propiedades reológicas y adhesivas de diferentes productos semisólidos untables comerciales: betún (tres marcas), crema de avellana, brillo para repostería y dulce para helado.

Las pruebas reológicas que se realizaron fueron bajo cizalla oscilatoria y rotacional en un Reómetro (MCR 301 Physica Anton Para) a una temperatura de 25 °C. En las pruebas bajo cizalla oscilatoria de los productos semisólidos de estudio se dedujo que 4 de los productos comerciales semisólidos presentaron un predominio del comportamiento tipo sólido viscoelástico, seguido de un análisis del esfuerzo de cedencia obtenido por el método gráfico, para cada uno de los productos, en donde el betún de chocolate 1 presentó el mayor esfuerzo de cedencia requerido para que éste empezará a fluir. Por otra parte para los productos más fluidos (dulce para helado y el brillo para repostería) se llevaron a cabo pruebas bajo cizalla rotacional. El dulce para helado y el brillo para repostería presentaron un comportamiento tipo Herschel–Bulkley, fluidificante a la cizalla con un esfuerzo de cedencia entre 1 y 2 Pa, aproximadamente.

Finalmente se realizaron dos tipos de pruebas de adhesividad una por penetración-retirada y otra por contacto-retirada, en un texturómetro (TAX T2 Stable Micro Systems) a una temperatura de 25 °C; en donde en la prueba por penetración-retirada el producto que presentó valores mayores en casi todos parámetros texturales fue la crema de cacao, destacando la adhesividad ya que se obtuvo casi el doble en comparación de los otros productos. Sin embargo, la untabilidad para la crema de cacao fue la menor, presentando una mayor dificultad para ser aplicada. Por otra parte en la prueba por contacto-retirada, el betún para decorar exhibió los valores mayores en los parámetros texturales de estudio, en donde la fuerza adhesiva fue casi el triple en comparación de los otros betunes y de la crema de cacao. Con los resultados obtenidos de los productos de estudio se obtuvieron parámetros de control fundamentales para la innovación y el análisis de ellos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los alimentos comerciales semisólidos aplicados en repostería, denominados recubrimientos o coberturas, han tenido un gran auge gracias a las tendencias de consumo, lo que ha favorecido que surjan estudios desarrollando nuevos procesos, con la finalidad de conseguir productos innovadores adaptados a las exigencias de los clientes (Sánchez y Acosta, 2012). Productos con aplicaciones como relleno, protección, recubrimiento o decoración, aparte del factor visual que es muy importante, su consistencia o textura al final, es determinante para los mismos (Hernán y Méndez, 2014).

En México se consume una amplia variedad de productos de repostería como el betún, brillo, glaseado, cremas (avellanas, chocolate, cacahuete, vainilla), pero no se tiene producción industrial a nivel nacional, por lo que la mayoría de productos son importados. La producción se realiza de manera artesanal limitando su aplicación, en donde su control de calidad se basa en pruebas empíricas.

Por lo anterior, el investigar el comportamiento reológico de dichos productos, resulta importante ya que esta información es fundamental para el desarrollo de nuevos productos o mejoramiento de ellos, además de que algunas propiedades como la viscosidad, son necesarias para el diseño de equipo (transporte y tratamiento térmico) en el proceso de transformación. Asimismo, la reología y las propiedades sensoriales de los productos aplicados en repostería, están fuertemente influenciadas por las características particulares de algunos ingredientes, como el alto contenido de grasa, azúcares y/o carbohidratos, al igual que el tipo y concentración de hidrocoloides, así como la manera en que dichos componentes interactúan entre ellos (Liu y col., 2008).

La mayor parte de los recubrimientos o coberturas se pueden definir como sistemas multifásicos, dulces, atractivos de textura lisa y brillante al solidificar (Navarro, 2012), estos alimentos son semisólidos y presentan como característica principal propiedades elásticas y propiedades viscosas, pero cuando se someten a altas deformaciones pueden fluir (Van Vliet, 2013).

Por otro lado las propiedades texturales como la adhesividad dentro de los productos aplicados en repostería (coberturas) es de suma importancia la cual se manifiesta por la tendencia de un alimento a adherirse a las superficies con las que entra en contacto, especialmente en el paladar, los dientes y la lengua durante la masticación (Casas, 2014). Esta propiedad es de relevancia para el operario o supervisor de la línea de producción considerando que se pueden quedar adheridos al equipo de proceso (Kilcast y Roberts, 1997).

El presente proyecto tiene como objetivo determinar las propiedades viscoelásticas, de flujo y las propiedades adhesivas de productos semisólidos comestibles, para contribuir a generar información básica de parámetros de referencia que permitan el control en la producción industrial de dichos alimentos de gran demanda por el consumidor.

I. ANTECEDENTES

1.1 Recubrimientos en repostería

La repostería o pastelería es un área de la tecnología de alimentos, dedicada a la elaboración y decoración de panes, postres y dulces en donde se incluyen técnicas culinarias cuyos productos tiene un factor visual muy importante, ya que es innegable que su consumo empieza a realizarse con los ojos, es decir, la correcta atracción visual es el resultado final de una elaboración es un elemento del que dependerá en gran medida la venta del producto (Hernán y Méndez, 2014).

La mayor parte de los recubrimientos o coberturas aplicados en repostería son sistemas multifásicos; las propiedades de dichos sistemas no dependen sólo de la composición química, sino también de su estructura física muy compleja, además de que pueden tener diferentes tamaños de partículas o presentar diferentes estados de agregación (Badui, 1995). Las cuales tienen diferentes funciones ya que pueden ser ocupados para decoración o para protección. Actualmente existen nuevas técnicas de pastelería aplicadas a la decoración que dan lugar a novedosos tipos de presentaciones y acabados atendiendo a los nuevos conceptos y hábitos culinarios propiciados por el incesante interés de complacer al cliente. La decoración es la fase final del proceso de realización del producto de repostería, consistiendo en dar a la preparación, el acabado final para su presentación (Hernán y Méndez, 2014).

Debido al auge y la revolución que ha experimentado el universo culinario estos han hecho que surjan nuevos estudios en torno a él, desarrollando nuevas técnicas de ejecución con la finalidad de conseguir nuevos productos adaptados a las nuevas exigencias de los clientes (Sánchez y Acosta, 2012).

1.1.2 Tipos de recubrimientos en repostería

Un recubrimiento se puede definir como una cobertura dulce y de textura atractiva lisa y brillante al solidificar (Navarro, 2012). Sin embargo, no se encuentran en la literatura científica definiciones y/o clasificaciones de los diferentes recubrimientos

encontrados. Por esta razón se tomaron algunos conceptos de la repostería tradicional y a continuación se describen algunos ejemplos de coberturas:

- Crema de mantequilla y otros sabores

Las cremas se caracterizan por ser una pasta blanda con textura firme y viscosa, elaborada del producto de preferencia, el cual puede ser salado o endulzado, este último más empleado en repostería.

Pueden ser tan simples como crema batida con azúcar y tan complejos como crema de chocolate, avellana ó cacahuete. Siendo la materia grasa contenida que le proporciona el carácter untable.

La mayoría de estos productos son obtenidos por medio de un ligero batido, donde el componente en mayor proporción (azúcar) es adicionado a los lípidos (mantequilla, manteca vegetal, manteca de cacao, aceites, etc), agregando agua o leche y el sabor de elección.

- Betún

El betún es el más común y utilizado para decorar tanto pasteles como pequeños panqués. Su elaboración es sencilla y sólo requiere de mantequilla, azúcar glass, saborizante de elección y colorante; donde la mantequilla junto con el azúcar glass se baten inicialmente, para después añadir el saborizante y color el cual puede ser agregado con los mismos ingredientes o en su defecto por uno artificial hasta obtener una textura suave, cremosa y ligeramente esponjosa; dicho producto presenta como característica principal que es maleable y fácil de utilizar.

- Merengue

Se denomina merengue o suspiro, al batido de clara de huevo con azúcar. Se emplea para la decoración de pasteles y postres. También se puede consumir como bocado dulce llevándolos al horno para que sequen y endurezcan.

En este caso el componente principal es la clara de huevo la cual está compuesta por proteínas y agua. Cuando se baten las claras se incorpora aire y las proteínas actúan recubriendo las burbujas de aire. A medida que se va batiendo, las burbujas que en un comienzo son grandes, se van haciendo cada vez más pequeñas. Por tal razón el batido debe ser rápido y constante hasta

lograr el punto de firmeza. De lo contrario, el batido no se sostiene y se baja (Quintero y Toro de Serrano, 2014).

- Glaseado

El glaseado es una técnica culinaria que consiste en recubrir pasteles o galletas, con una sustancia brillante, de color blanco, a menudo dulce. Dentro de los ingredientes que se usan para su elaboración son; en mayor cantidad el azúcar glass, leche o agua, miel de maíz, gotas de jugo de limón y en algunas ocasiones se llega a ocupar colorante, los ingredientes se mezclan hasta obtener una consistencia viscosa pero fluida. El glaseado a diferencia de otros tipos de coberturas, solidifica después de ser aplicado.

- Pasta laminada

Se conoce como pasta laminada al “fondant”, la cual es una masa elástica dulce; que se prepara para cubrir y decorar pasteles. Tiene como ingredientes principales la grenetina, glucosa, grasa o manteca vegetal, azúcar glass y colorante (Quintero y Toro de Serrano, 2014).

La masa elástica presenta una textura flexible, suave y de alta consistencia, cuando es aplicada sobre el pastel solidifica de manera rápida, obteniendo una textura dura con acabado liso y mate.

- Brillo

El brillo es un gel que se usa para dar luminosidad y protección a todo tipo de pan o pasteles frutales, el cual está compuesto principalmente por agua, pectina, fructosa y glucosa (Puratos, 2014).

Esta cobertura se aplica sobre la fruta de los pasteles o pays, dando un acabado brillante y fresco, es un producto de decoración y a la vez brinda protección a la fruta, ya que se evita su oxidación garantizando propiedades de conservación, por lo tanto se alarga la vida de anaquel del producto final.

En las descripciones anteriores, los recubrimientos son materiales de tipo semisólido con un alto contenido de lípidos y azúcar, los cuales se someten a un mezclado suave o batido, que pueden incorporar aire, para aligerarlos, provenir de emulsiones aceite en agua o agua en aceite, o contener sólidos en suspensión (crema de chocolate), algunos solidifican después de ser aplicados, lo que confirma

la complejidad como sistema multifásico, en donde interactúan dos o tres sistemas dispersos diferentes (emulsión, espuma y suspensión) al mismo tiempo.

1.1.3 Funcionalidad de los lípidos y carbohidratos en las coberturas

Los recubrimientos anteriormente mencionados son productos con un alto contenido no sólo de lípidos sino también de carbohidratos (azúcares entre ellos); en donde se puede atribuir que la palatabilidad de este tipo de alimentos se debe principalmente a sus dos componentes calóricos principales: el azúcar y los lípidos (Watt y Merrill, 1975).

Los carbohidratos son un componente común en los alimentos, que se encuentran en forma natural o como ingredientes añadidos. Su uso es amplio, tanto por las cantidades que se consumen, como en la variedad de productos en los que se encuentran (Fennema y col., 2010).

Un carbohidrato extensamente utilizado es la sacarosa, ya que se usa como edulcorante en alimentos procesados, en fermentaciones, alimento para animales y en productos de repostería especialmente en recubrimientos y glaseados, en donde los cristales muy finos de sacarosa se recubren con una solución saturada de azúcar invertido, jarabe de almidón o maltodextrina. Por lo general, la sacarosa se comercializa como una solución acuosa refinada que se denomina azúcar líquido; tales soluciones como, los jarabes o miel, no necesitan conservadores para mantenerse en buenas condiciones y pueden ser utilizadas, no sólo como edulcorantes, sino también como humectantes. Otra función de los carbohidratos es como crioprotectores, de modo que protegen contra la deshidratación que se produce en la refrigeración y que destruye la estructura y la textura de los productos de panificación (Fennema y col., 2010).

En los sistemas acuosos, las partículas de polisacáridos pueden tomar moléculas de agua, hincharse con ellas, solubilizarse total o parcialmente y pueden controlar la movilidad de agua en los sistemas que forman los alimentos, modificando sus propiedades funcionales, incluyendo la textura.

Los polisacáridos (gomas, hidrocoloides) se utilizan mayoritariamente para espesar y/o gelificar soluciones acuosas, para modificar y/o controlar las propiedades de

flujo y la textura de los alimentos líquidos y las bebidas, así como para modificar las propiedades de deformación de los productos semisólidos.

Las aplicaciones de los espesantes como aditivos de alimentos son muy amplias, dan consistencia y estabilidad, evitan la formación de cristales grandes de azúcar o de hielo en los helados y la sinéresis en alimentos gelificados. Los productos gelificantes se usan para postres, flanes rápidos, geles de fruta, quesos untables, algunos tipos de caramelos y productos de bollería entre otros (Primo, 1997).

Por otro lado, el azúcar es usado como relleno, por ejemplo, agregado en grandes cantidades a los alimentos, contribuye al dulzor y a las propiedades texturales. Un cambio en el contenido de azúcar puede cambiar la percepción de ambos, el dulzor y la textura. Los dos edulcorantes más usados dentro del área de repostería son: la sacarosa y el jarabe de glucosa; sin embargo, también se usan de tipo sintético: la sacarina, el aspartame y el acesulfame (Primo, 1997).

Una posibilidad para la optimización del dulzor percibido, es la distribución de las moléculas que dan sabor, de manera distinta dentro de la estructura, de este modo se alteran los perfiles sensoriales (Holm y col., 2009).

Los usos de los diferentes azúcares se basan en las propiedades derivadas de su estructura química; dado que contienen un gran número de hidroxilos altamente hidrófilos, tiene la capacidad de hidratarse y de retener agua al establecer puentes de hidrógeno, generalmente son dulces, propician las reacciones de oscurecimiento, susceptibles a la fermentación, inhiben el crecimiento microbiano, confieren viscosidad y “cuerpo” a diversos alimentos, la textura y el lustre o brillantez de los chocolates y los dulces se debe en gran medida a la relación de concentraciones de los azúcares amorfos y cristalinos (Badui, 1995).

Por otra parte las grasas y los aceites constituyen los lípidos más abundantes e importantes en el estudio de los alimentos; ambos grupos están constituidos prácticamente 100% de triglicéridos, los que a su vez son ésteres de ácidos grasos con glicerol; los lípidos son de gran importancia en la formulación de diversos productos grasos como las margarinas, helados y mayonesas (Wong, 1995) un ejemplo son las grasas plásticas que sirven para dar estructura y características de conservación en los productos horneados (Primo, 1997).

Los lípidos tienen un rol crucial en la textura de muchos alimentos, ya que imparten características importantes en las sensaciones que se perciben en la boca (Drewnowski, 1987) y, en alimentos de composición dura, determinan las propiedades de fractura (Marshall, 1990a). En alimentos líquidos los lípidos afectan la consistencia, suavidad y cremosidad, esto puede estar directamente relacionado con las características sensoriales y la reología (Sherman, 1977).

Los lípidos y sustancias afines sufren cambios, en su mayor parte oxidativos, que implican degradaciones de estructuras esenciales para la alimentación y conducen al desarrollo de olores y sabores anormales. Incluso, cuando el proceso se encuentra en fases muy avanzadas, pueden aparecer compuestos capaces de ejercer alguna actividad tóxica sobre el organismo humano. En consecuencia, la oxidación de los lípidos contenidos en los alimentos puede ser responsable de graves deterioros en su valor nutritivo, en la estabilidad de su calidad sensorial, en su aceptabilidad y en su seguridad (Bello, 2000); sin embargo, existen muchas sustancias que se encuentran naturalmente en los alimentos lo que se producen durante su procesamiento, que tienen la capacidad de evitar o reducir la intensidad de las reacciones de oxidación. El grupo de los tocoferoles o vitamina E, junto con la lecitina, integran los antioxidantes naturales más importantes que se encuentran en los lípidos, pero que se pierden durante la refinación de oxidación, existen diferentes antioxidantes donde cada uno de ellos presentan la capacidad o potencia para inhibir la rancidez (Badui, 1995).

Los lípidos añadidos a otros componentes alimenticios generalmente mejoran la sensación bucal, facilitan la masticación y añaden sabor al alimento; es de gran importancia una comprensión adecuada de las relaciones entre los efectos sensoriales de los lípidos, la estructura y reología de los productos que contienen. La presencia de lípidos ayuda a la percepción olfativa además de generar olores específicos en forma de moléculas liposolubles y derivar en alimentos con una variedad de características texturales tales como: cremosidad, suavidad, adhesividad, entre otros (Wijk y col., 2003). En las coberturas aplicadas en repostería, los lípidos tienen un rol más completo, en donde el mecanismo de adhesividad se ve afectado, este efecto depende de las propiedades fisicoquímicas

de los lípidos y el grado de interacción que tenga con los otros ingredientes. Muchos alimentos se conservan mejor cuando su envase está tratado con algún antioxidante, ya que éste puede emigrar hacia el producto, o inhibir la autoxidación en caso de que la grasa vaya al envase, así mismo se puede inhibir la actividad microbiana (Badui, 1995).

Debido a lo anterior el contenido de lípidos y carbohidratos es muy importante, ya que si existe una reducción o un aumento de ellos pueden resultar texturas anormales e inaceptables (Marshall, 1990b).

1.1.4 Recomendaciones para el manejo de los recubrimientos

Para la aplicación de las coberturas se deben tener las siguientes consideraciones de uso:

- Las coberturas en el caso de estar conservadas en refrigeración, deberán ser puestas a temperatura ambiente (25 °C) con anterioridad para que ésta recupere su consistencia inicial. En el caso de las cremas, si fuese necesario, la cobertura deberá ser calentada o batida nuevamente, lo que ayudará a devolverle el brillo y la consistencia.
- A fin de conseguir una superficie uniforme deben evitarse bolsas de aire en la aplicación de las coberturas (Hernán y Méndez, 2014).
- Para el caso de las pastas laminadas, se recomienda conservar la masa envuelta en plástico o papel film, sin aire y en lugar fresco si se va a usar en días, de lo contrario guardar en recipiente hermético para refrigerar, para evitar grietas y resequedad de la masa (Quintero y Toro de Serrano, 2014).
- En los merengues se recomienda ocuparlo el mismo día que se preparó y usarlo rápidamente para decorar. Cuando sobra y se guarda, pierde sus atributos de firmeza para decorar, pero se puede usar para recubrir con betún o rellenar los pasteles o panqués.

1.2 Alimentos semisólidos

Un alimento semisólido es aquel que en apariencia es sólido pero que presenta cierto grado de fluidez con respecto a las propiedades mecánicas en las coberturas estas características son esenciales con respecto al comportamiento durante su consumo, preparación y producción. Debido a la complejidad de los recubrimientos aplicados en repostería, es necesario conocer sus propiedades reológicas; teniendo en cuenta que como un producto semisólido exhiben propiedades elásticas y viscosas, pero cuando se someten a altos esfuerzos su comportamiento puede ser fluido (Van Vliet, 2014).

1.2.1 Reología de alimentos semisólidos

La reología es la ciencia de la deformación y el flujo de los materiales, relacionadas con las propiedades de la materia que determinarán cómo se deformará o fluirá cuando es sometida a una fuerza externa (Steffe, 1996).

El comportamiento reológico de los materiales sólidos y fluidos es diferente ante la aplicación de un esfuerzo (σ) debido a la relación de éste con la deformación (γ) en cada uno de ellos. En un sólido elástico, el material se deforma proporcionalmente al esfuerzo aplicado. En un material fluido denominado viscoso el esfuerzo es directamente proporcional a la velocidad de deformación (con una deformación continua), que al ser sometido a un esfuerzo, disipa energía en forma de calor y no la recupera (Steffe, 1996).

Para caracterizar el comportamiento reológico de un alimento es importante conocer las definiciones básicas, como son, esfuerzo de cizalla, deformación y velocidad de cizalla.

El esfuerzo de cizalla (σ) es la respuesta de un material bajo la acción de una fuerza, cuya intensidad depende del área sobre la cual actúa, por lo que queda expresado como una fuerza por unidad de área (Steffe, 1996), es un componente de fuerza aplicado tangencialmente, usualmente se expresa en Pascales [N/m^2] (Rao, 1999). La deformación (γ) es el cambio relativo de dimensión o forma de un cuerpo sujeto a un esfuerzo. La deformación es de esta manera la reacción inducida de un esfuerzo (Ibarz y col., 2005)

La velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) es la derivada de la deformación en función del tiempo. Es una medida relativa del desplazamiento, cuando es aplicado un esfuerzo a un material y lo deforma rápidamente (Goodwin y Hughes, 2000)

Teniendo en cuenta las variables definidas anteriormente se pueden clasificar los materiales sólidos y fluidos a través de su comportamiento reológico, el cual se realiza por medio de una determinación cuidadosa de los instrumentos y técnicas adecuadas; tomando en cuenta comportamientos extremos de los materiales. En la Figura 1.1 se presenta la clasificación reológica de los materiales, en donde se hace una clara distinción entre sólidos y fluidos. Asimismo, existen productos (algunas coberturas) que presentan un comportamiento tanto de sólidos como de líquidos (viscoelásticos).

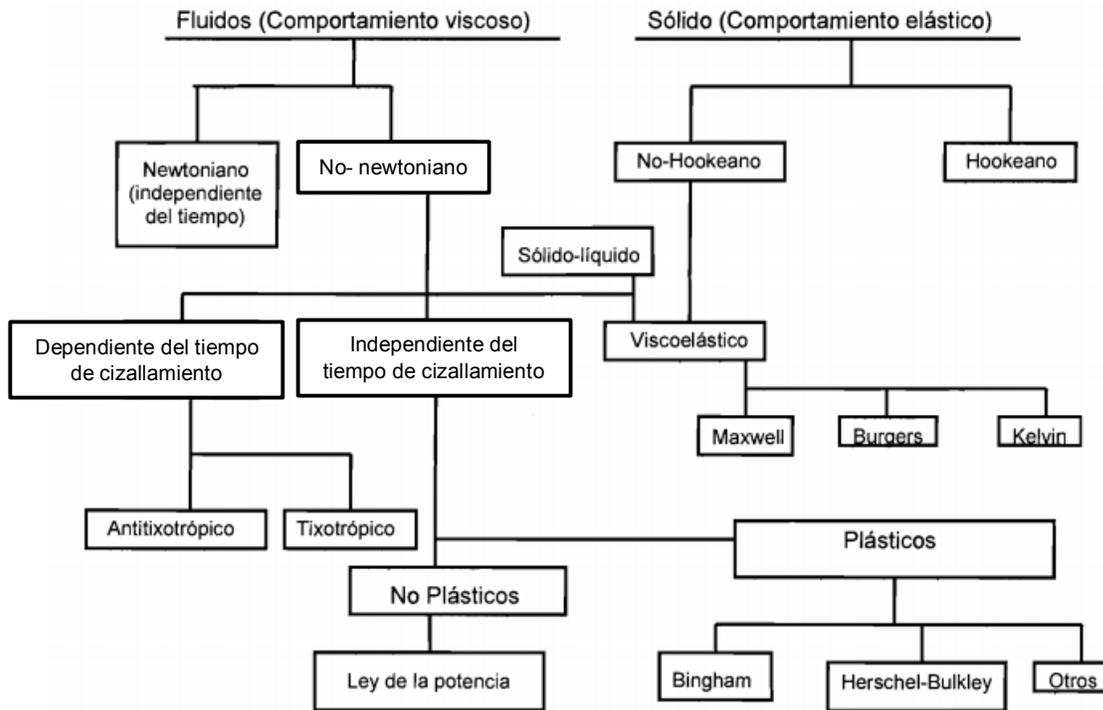


Figura 1.1 Comportamiento reológico de los materiales (Steffe, 1996).

Materiales sólidos

El material sólido es aquel que se deforma bajo la aplicación de un esfuerzo, hasta que alcanza una deformación total, los sólidos tiene como característica principal es la capacidad de almacenar y cuando el esfuerzo es removido el material regresa a

su configuración inicial (Morrison y Ross, 2002), un ejemplo es el tipo Hookeano (material elástico ideal). En los sólidos generalmente se evalúa la relación de esfuerzo-deformación y la elasticidad de un material puede ser descrita por la Ley de Hooke:

$$\sigma = G\gamma \quad (1.1)$$

Donde G se denomina como el módulo de Hooke y γ la deformación, los materiales que cumplen esta ley no fluyen y son linealmente elásticos, la deformación permanece constante hasta la tensión se elimina. La Ley de Hooke puede utilizarse para describir el comportamiento de muchos productos sólidos (cascarón de huevo, pasta seca y dulces duros entre otros) cuando son sometidos a pequeñas deformaciones, normalmente menores que 0.01 Pa o deformaciones menores al 5 %, al aplicar mayores esfuerzos o deformaciones frecuentemente se producen fracturas o comportamientos no lineales (Steffe, 1996).

Tanto el comportamiento sólido Hooke como el comportamiento newtoniano, son casos ideales, pero muchos de los sistemas alimenticios no se encuentran entre estos dos y quedan incluidos dentro del comportamiento viscoelástico.

Viscoelasticidad

El término viscoelasticidad significa la coexistencia de propiedades viscosas y elásticas en un material. Estas propiedades se pueden observar bajo condiciones particulares involucrando el tipo de deformación y el tiempo de observación. Dependiendo de estas condiciones, un mismo material. Dependiendo de estas condiciones, un mismo material puede mostrar diferentes comportamientos (Barnes y col., 1989).

Las propiedades viscoelásticas de un material pueden ser descritas por la viscoelasticidad lineal y no lineal. Las propiedades de un material viscoelástico lineal dependen sólo del tiempo y no de la magnitud del esfuerzo o de la deformación aplicada. Esto significa que la relación esfuerzo-deformación y su derivada con el tiempo siempre es lineal, sin importar sus magnitudes. Por el contrario, el comportamiento no lineal significa que las propiedades viscoelásticas del material

son una función no sólo del tiempo sino también de la magnitud del esfuerzo y la deformación aplicada.

Viscoelasticidad lineal

La mayoría de las mediciones viscoelásticas se realizan en la región lineal, la viscoelasticidad lineal se ha estudiado en mayor medida por varias razones (Tecante, 2005; Barnes y col., 1989), entre ellas:

1. La matemática es mucho más simple. En la teoría de la viscoelasticidad lineal las ecuaciones diferenciales son lineales y los coeficientes de las diferenciales de tiempo son constantes; estas constantes representan funciones del material tal como la viscosidad o el módulo elástico.
2. Las características macromoleculares de un material dado se pueden interpretar correlacionándolas con su respuesta reológica, la cual se determina bajo las condiciones donde el esfuerzo o la deformación son suficientemente pequeños para que el material no modifique significativamente su estado de equilibrio.
3. La viscoelasticidad lineal proporciona las bases para la viscoelasticidad no lineal.
4. Muchas situaciones de ingeniería ocurren bajo condiciones de flujo inestable, en las cuales la respuesta elástica del material se vuelve importante.

La teoría matemática de la viscoelasticidad lineal se basa en el principio de superposición de Boltzmann el cual plantea que existe una proporcionalidad directa a cualquier tiempo entre la perturbación ejercida sobre el material y su respuesta resultante. Si la perturbación es el esfuerzo, la respuesta es la deformación y viceversa. En la práctica, es necesario determinar la zona lineal del comportamiento viscoelástico, la cual en algunos casos se localiza a esfuerzos o deformaciones extremadamente bajas, donde los datos son difíciles de obtener (Morrison y Ross, 2005).

Métodos experimentales de medida para el estudio viscoelástico

Existen pruebas donde se puede aplicar el estudio viscoelástico de los materiales para determinar la relación entre el esfuerzo, así como la deformación y el tiempo de respuesta. Estas se dividen en dos categorías: métodos estáticos y métodos dinámicos. Los métodos estáticos incluyen las pruebas de fluencia (“Creep”) y las de relajación de esfuerzos. En éstos, la variable aplicada permanece constante con el tiempo. Por otro lado, en los métodos dinámicos, la aplicación del esfuerzo o la deformación se realiza de manera armónica, (sinusoidalmente) con el tiempo. Estas son llamadas pruebas oscilatorias de pequeña amplitud, debido a que emplean pequeñas deformaciones con el fin de mantener un comportamiento viscoelástico lineal. En este proyecto sólo se llevaran a cabo las pruebas por el método dinámico.

- **Pruebas en cizalla oscilatoria o dinámica**

Los métodos dinámicos se usan para definir la naturaleza elástica y viscosa de dichos productos. Esta información es útil para caracterizar y diferenciar las variedades de productos semisólidos aplicados (Tunick y col., 1990). Estos métodos se implementan dentro de la región de viscoelasticidad lineal del material, por lo que se considera que éstos no destruyen la estructura básica del material (Gunasekaran y Mehmet, 2000).

Las pruebas dinámicas se realizan por medio de la aplicación de pequeñas deformaciones de cizalla sinusoidales en función del tiempo midiendo su respectivo esfuerzo de cizalla sinusoidal. Se aplican generalmente deformaciones entre 1% y 5%, para definir el intervalo lineal entre el esfuerzo y la deformación (Gunasekaran y Mehmet, 2000).

$$\sigma(t) = \gamma G'(\omega) \sin(\omega t) + \gamma G''(\omega) \cos(\omega t) \quad (1.2)$$

En esta relación se definen el módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G''). G' es la medida de energía almacenada y posteriormente liberada por un ciclo de deformación por unidad de volumen, es la propiedad elástica de los materiales. G'' es la medición de la energía disipada en forma de calor por ciclo de

deformación por unidad de volumen, y esto se refiere a la propiedad viscosa natural de los materiales (Gunasekaran y Mehmet, 2000) como se muestra en la Figura 1.2

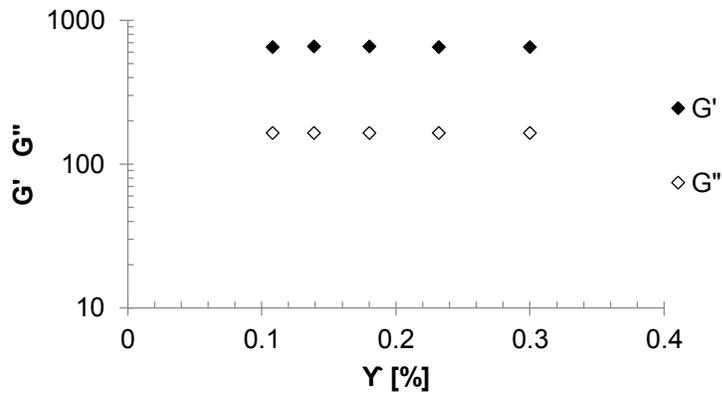


Figura 1.2 Representación del módulo de almacenamiento (G') y módulo de pérdida (G'') en función de la velocidad angular a una deformación constante.

La prueba de cizalla oscilatoria se realiza manteniendo constante la deformación y variando la frecuencia de oscilación (dentro de la zona de viscoelasticidad lineal). El barrido de velocidad angular es probablemente el gráfico más descriptivo, ya que muestra el cambio del comportamiento viscoso y elástico del material, cuando es sometido a una deformación. En esta prueba la frecuencia incrementa mientras la amplitud de la deformación permanece constante.

Dependiendo del ángulo de desfase (δ) entre las curvas sinusoidales de deformación de cizalla aplicada y la respectiva del esfuerzo de cizalla medido, el material presentará un comportamiento puramente elástico si no se desfasa ($\delta=0^\circ$), si se desfasa 90° el comportamiento es de un líquido puro ($\delta=\pi/2$) o intermedio entre ambos, el material es viscoelástico ($0<\delta<\pi/2$).

Para poder llevar a cabo un análisis de las propiedades viscoelásticas presentes en los diferentes productos semisólidos es necesario establecer la zona viscoelástica lineal en donde se aplica un barrido de deformación a una velocidad angular constante; aquí los módulos de almacenamiento y pérdida solamente dependen del tiempo (frecuencia de oscilación) y no la de la deformación aplicada (Steffe, 1996), en la Figura 1.3 se presenta los espectros mecánicos de un gel, de una solución concentrada y una solución diluida. En donde un gel (Figura 1.3 (a)) presenta una

resistencia a la deformación en el perfil de esfuerzo/cizalla (Clark y Ross-Murphy, 1987) y los módulos G' y G'' son constantes e independientes a la velocidad angular, presentando una estructura interna ordenada (Steffe, 1996); a diferencia de una solución diluida (Figura 1.3 (b)), los cuales son extremadamente sensibles a la deformación que se le aplique por lo general este tipo de comportamientos se exhiben en los materiales plásticos de Bingham (Clark y Ross-Murphy, 1987) y el módulo G'' es mayor que G' sobre el rango de velocidad angular, pero a altas frecuencias los módulos tienden a acercarse. En el caso de las soluciones concentradas (Figura 1.3 (c)), se observa que a baja velocidad angular predomina el módulo G'' seguido de un cruce entre G' y G'' pero la respuesta sólida (G') prevalece (Steffe, 1996); sin embargo, en un incremento de la deformación provoca rupturas y no se tiene una integridad microscópica (Clark y Ross-Murphy, 1987)

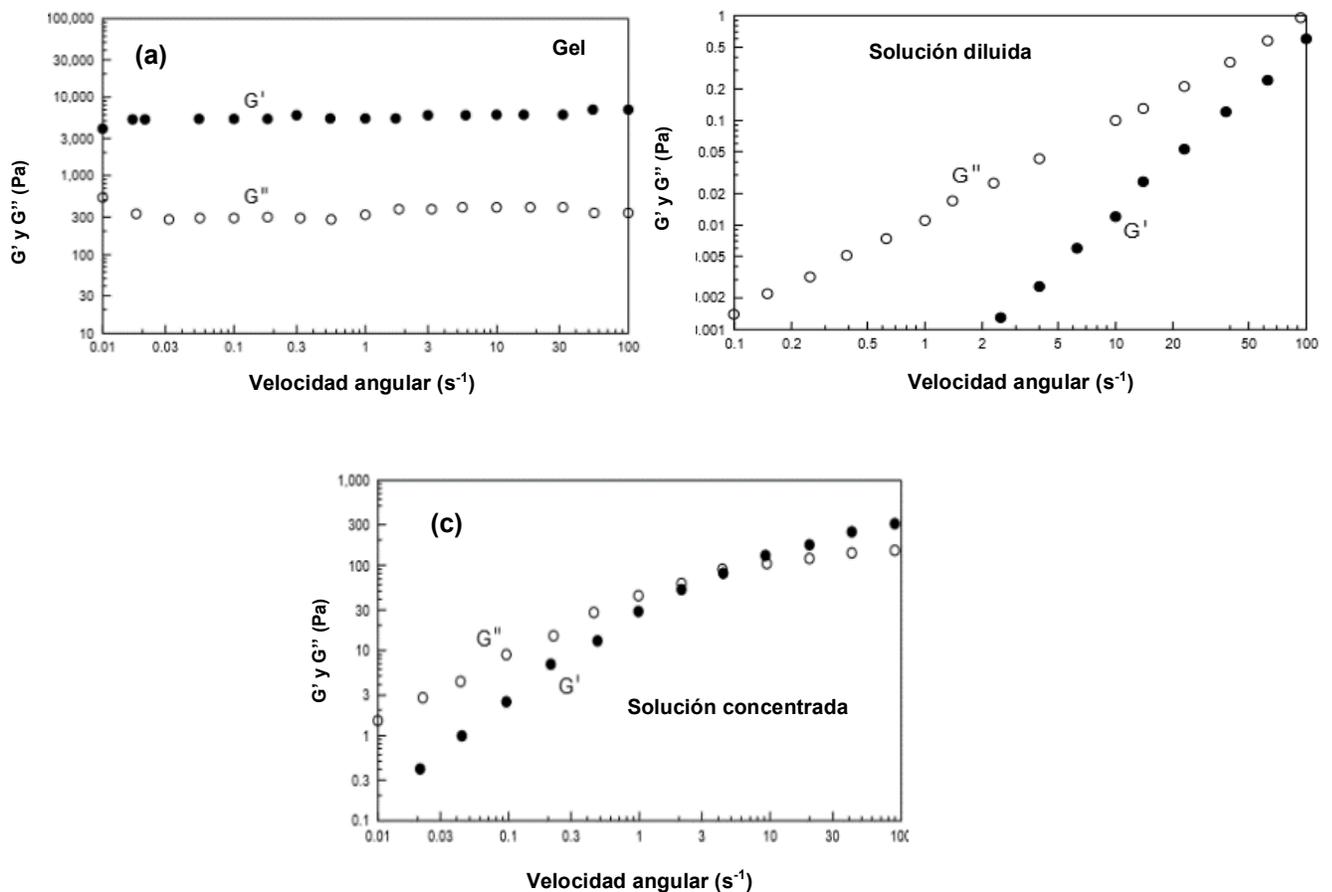


Figura 1.3 Representación del módulo de almacenamiento (G' , círculos rellenos) y módulo de pérdida (G'' , círculos vacíos) en función de la velocidad angular en la zona de viscoelasticidad lineal (Steffe, 1996).

Otra propiedad viscoelástica dinámica de uso común es la tangente del ángulo de desfaseamiento [$\tan \delta = G''/G'$], donde el valor igual a la unidad, indica un comportamiento viscoelástico en el que cada componente contribuye con el 50%. Valores inferiores a la unidad corresponden al comportamiento de un sólido ya que predomina G' sobre G'' . De igual manera, valores superiores a la unidad corresponden a un comportamiento predominantemente fluido, en la Figura 1.4 se presenta un ejemplo de un producto semisólido donde predomina el comportamiento sólido viscoelástico.

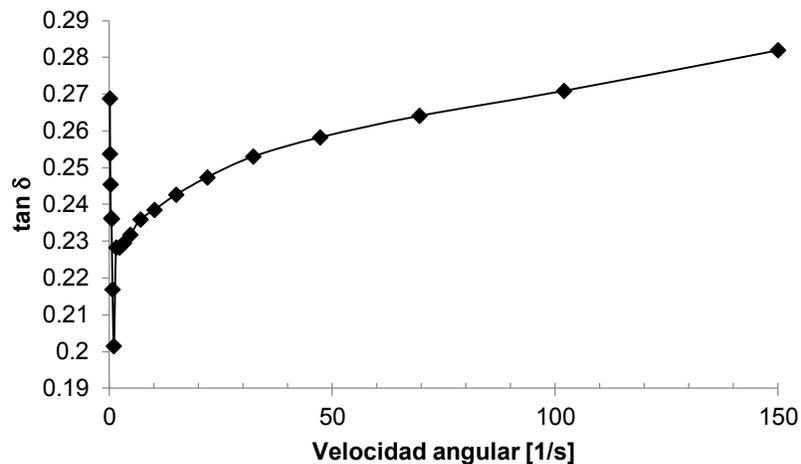


Figura 1.4 Representación de la variación de la $\tan \delta$ en función de la velocidad angular.

Las pruebas dinámicas oscilatorias son utilizadas por muchas razones (Gunasekaran y Mehmet, 2000):

- Es una técnica no destructiva que permite realizar la prueba sin dañar las estructuras del material obteniendo parámetros reológicos dinámicos. Estas pruebas también proporcionan un medio muy sensible para estudiar las macromoléculas que dan lugar a diversos fenómenos, como la gelificación, y la transición vítrea.
- Permite la búsqueda selectiva de eventos moleculares por la elección de una gama de frecuencias adecuadas, ya que en un experimento dinámico, la respuesta a la deformación aplicada, es el esfuerzo en el cual está dominado

por los procesos de relajación, con una constante de tiempo característica, cerca de $1/\omega$.

- La región viscoelástica lineal se puede determinar fácilmente en la prueba dinámica, cambiando la amplitud impuesta de la deformación.
- Los datos de la prueba oscilatoria pueden ser utilizados en la superposición de tiempo-temperatura, técnica empleada para ampliar la gama de frecuencias que de otro modo sería inaccesibles experimentalmente.

Como se mencionó anteriormente los productos viscoelásticos tienen una parte sólida y líquida (fluida) donde a diferencia de los sólidos, el fluido disipa la energía en forma de calor, se dice que tiene amnesia total. La energía que actúa en el líquido viscoso es totalmente liberada a los alrededores como calor y al material como trabajo de deformación (Tanner, 1988).

Materiales fluidos

El fluido ideal o de Newton es aquel en donde existe una relación lineal entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla, por lo tanto la viscosidad es independiente de la velocidad de cizalla (Steffe, 1996). Los fluidos no newtonianos, se definen como aquellos que exhiben flujo uniforme, donde la relación entre el esfuerzo de cizalla y la velocidad de cizalla es no lineal, por lo que la viscosidad del fluido no permanece constante.

Existen algunos fluidos no newtonianos que pueden presentar dependencia con el tiempo de cizalla, con un comportamiento adelgazante, tanto por la velocidad de cizalla como por el tiempo en el que se aplica, este comportamiento es llamado tixotrópico, y es característico de sistemas concentrados o gelificados, no muy homogéneos donde las partículas o macromoléculas en el material se encuentran unidas por fuerzas débiles, que al cizallarse se rompen, resultando una reducción en el tamaño estructural, la cual a su vez ofrece una resistencia menor a fluir durante el cizallamiento. Cuando la velocidad de cizalla desciende o durante el reposo, la viscosidad de los fluidos tixotrópicos puede retornar a su valor inicial, pero en tiempos mucho mayores al que fue cizallado, siendo el resultado de esta viscosidad la reorganización estructural (Steffe, 1996).

Así mismo, cuando un material tiene un comportamiento antixotrópico o también llamado reopéctico, la viscosidad se incrementa con el tiempo de cizallamiento al mantener la velocidad de cizalla constante, este comportamiento no es frecuente en los alimentos (Steffe, 1996).

Existen fluidos cuya viscosidad es independiente del tiempo se conocen como no newtonianos independientes del tiempo de cizallamiento. La relación que presenta el esfuerzo y la velocidad de cizallamiento pueden ser representadas por diferentes modelos reológicos, en la Figura 1.5 se presentan los diferentes tipos de comportamientos que puede presentar un material fluido y a continuación se define cada uno de ellos (Steffe, 1996).

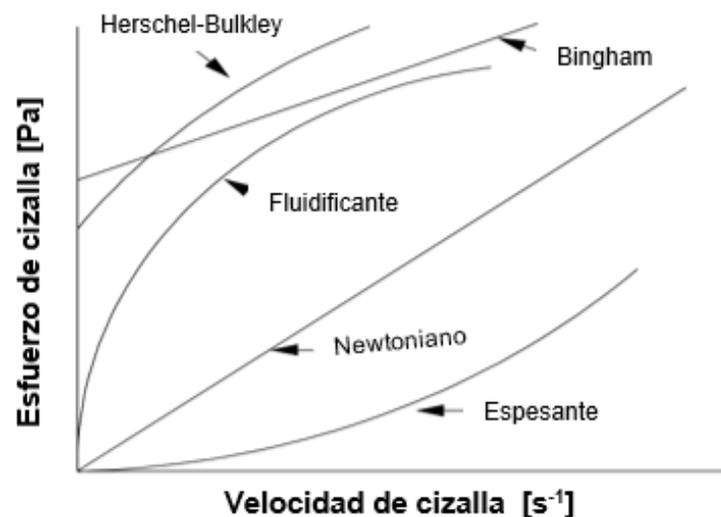


Figura 1.5 Curvas típicas de los fluidos independientes al tiempo (Steffe, 1996).

- Fluidificantes a la cizalla: Son fluidos menos espesos, cuando se someten a altas velocidades de cizalla, por lo tanto la viscosidad solamente depende de ésta y no del tiempo en el que están sometidos a la cizalla (Steffe, 1996). La viscosidad depende de la velocidad de cizalla, pero no del tiempo en que están sometidos al esfuerzo de cizalla. La velocidad de cizallamiento aumenta en proporciones más altas que el esfuerzo aplicado de manera que la viscosidad desciende a medida que aumenta la velocidad de cizalla.

- Espesantes a la cizalla: Los fluidos espesantes son similares a los fluidificantes en que ellos no muestran un esfuerzo de cedencia (σ_0), pero la viscosidad aumenta al incrementar la velocidad de cizalla (Steffe, 1996).
- Plástico de Bingham: Estos requieren de un esfuerzo de cedencia; una vez que empieza a fluir se comporta como un fluido newtoniano y la viscosidad es constante (Steffe, 1996).
- Modelo Herschel-Bulkley: Este fluido presenta un esfuerzo de cedencia, y por debajo de este esfuerzo se comporta como un sólido. Iniciando el flujo, tiene un comportamiento tipo fluidificante.
- Modelo Casson: Este tipo de fluido por lo general es el modelo reológico que mejor se ajusta a la mayoría de los materiales viscoelásticos algunos ejemplos son: la salsa de tomate, miel, sopa, jugos concentrados entre otros; dicho modelo se puede definir como un fluido adelgazante en el cual se asume que la viscosidad es infinita a una velocidad de cizalla igual a cero, pero por debajo del esfuerzo de cedencia no fluye y a una viscosidad igual a cero la velocidad de cizalla es infinita (Mukhopadhyay y col., 2013),
- Modelo Carreau: El modelo de Carreau se ha utilizado para simular fluidos no newtonianos alrededor de tuberías, cilindros o esferas, este fluido a bajas velocidades de cizallamiento se comporta como newtoniano y a altas velocidades de cizallamiento tiene un comportamiento regido por el modelo de la potencia (Asterios, 2015).
- Modelo Ellis: Es un modelo que se emplea cuando se presenta un fluido adelgazante a la cizalla pero que al aplicar el modelo de la potencia presenta desviaciones significativas a valores bajos y elevados de velocidad de cizalla, observándose la distintiva meseta en condiciones de bajo y elevado cizallamiento. Éste es un modelo de tres parámetros, los cuales describen el comportamiento adelgazante de fluidos con comportamiento no newtoniano, independiente del tiempo y adelgazante a la cizalla (Sochi y Blunt, 2008).

En el Cuadro 1.1 se mencionan los modelos matemáticos de los fluidos no newtonianos propuestas y empleadas para describir los diferentes comportamientos al flujo. Donde η es la viscosidad que representa la resistencia al fluir, n es el índice

de comportamiento al flujo es indicativo de la desviación respecto al fluido con comportamiento newtoniano (Ibarrola, 2014), cuando $n < 1$ el fluido se conoce como fluidificante a la cizalla y $n > 1$ el fluido se conoce como espesante a la cizalla. k es el índice de consistencia. En el modelo de Casson las variables que presentan son: k_c es la pendiente de la raíz cuadrada de la velocidad de cizalla con la raíz cuadrada del esfuerzo de cizalla, k_{0c} es la intercepción de k_c ; por otra parte para el modelo de Carreau se tienen: η_0 viscosidad constante, σ_0 esfuerzo de cedencia, $\sigma_{1/2}$, esfuerzo de cizalla en el cual la viscosidad vale la mitad de η_0 , para el modelo Ellis se tiene los siguientes parámetros a considerar: α es un parámetro análogo a n ; η_0 y η_∞ corresponden a las viscosidades de cero a infinito a una velocidad de cizalla, λ es la constante del tiempo y γ es la deformación.

Cuadro 1.1 Modelos matemáticos para los fluidos newtonianos y no newtonianos.

Modelo	Ecuación matemática
Newtoniano	$\sigma = \eta \dot{\gamma}$
Ley de la potencia	$\sigma = k \dot{\gamma}^n$
Bingham	$\sigma = \sigma_0 + \eta \dot{\gamma}$
Herschel-Bulkley	$\sigma = \sigma_0 + k \dot{\gamma}^n$
Casson	$\sigma^{0.5} = k_{0c} + k_c (\dot{\gamma})^{0.5}$
Carreau	$\eta_a = \eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{[1 + (\lambda c_\gamma)^2]^n}$
Ellis	$\eta_a = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\sigma}{\sigma_1}\right)^{\alpha-1}}$

Esfuerzo de cedencia

Muchos productos aplicados en repostería, así como los derivados de chocolate, necesitan para empezar a fluir un esfuerzo de cedencia (σ_0), el cual es definido como el mínimo esfuerzo requerido para que empiece a fluir (Steffe, 1996). La principal característica de estos fluidos es que con bajos esfuerzos de cizalla, se comportan como sólidos y no sufren una deformación evidente hasta que alcanzan una fuerza de cizalla crítica σ_0 , a partir de la cual los fluidos tienden a desplazarse

en forma de líquido, es decir en este comportamiento el material se comporta como sólido elástico hasta cierta deformación y luego fluye, como se muestra en la Figura 1.6.

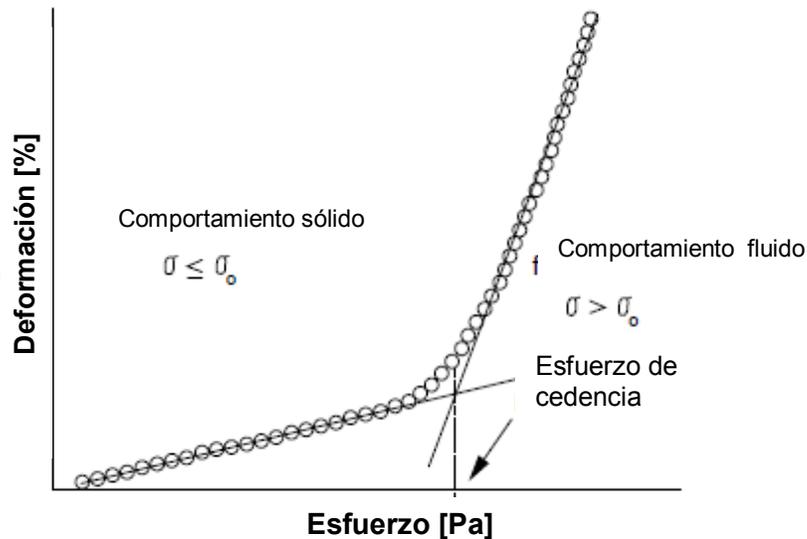


Figura 1.6 Deformación en función del esfuerzo de cizalla (Steffe, 1996).

El esfuerzo de cedencia, es una propiedad importante de alimentos que contienen sólidos en suspensión. La magnitud del esfuerzo de cedencia es significativo en la operación con bombas, para la estabilidad y en la aceptabilidad del producto por el consumidor (Morrison y Ross, 2002).

Evaluación del esfuerzo de cedencia

Existen métodos gráficos utilizados para determinar el esfuerzo de cedencia en el producto a analizar; entre ellos está la extrapolación a cero de la curva del esfuerzo de cizalla en función de la velocidad de cizalla, (se conoce como el método dinámico el cual causa una destrucción de su estructura interna). Los valores obtenidos usando este método pueden ser fuertemente influenciados por el modelo reológico (Bingham, Herschel-Bulkley y Casson (Steffe, 1996).

El esfuerzo de cedencia, se puede obtener también por el método de estático, en donde se mide en una muestra en reposo, a la cual no se le ha aplicado previamente ningún esfuerzo de cizalla, y se aplica gradualmente hasta que

fluye). Éste puede determinarse a través del seguimiento de la deformación producida, en donde se observa el cambio drástico de la linealidad entre las variables (Figura 1.6) o a través del seguimiento de la velocidad de cizalla o deformación registrada, en valores superiores a 0.1 s^{-1} , por ejemplo. El esfuerzo de cedencia estático puede ser significativamente más alto que el esfuerzo de cedencia dinámico; en la Figura 1.7 se exhibe el cálculo del esfuerzo de cedencia por el método dinámico y estático.

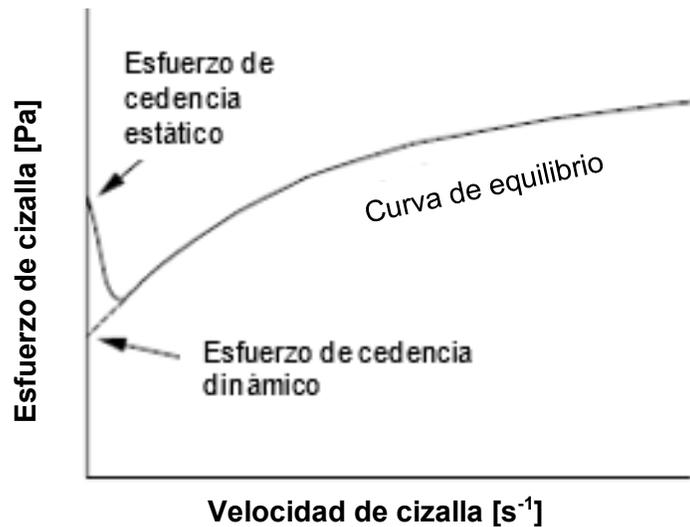


Figura 1. 7 Método estático y dinámico para la determinación del esfuerzo de cedencia (Steffe, 1996).

La idea de un esfuerzo de cedencia estático y dinámico se puede explicar suponiendo que puede haber más de un tipo de estructura en un fluido. Una estructura puede ser intensiva a la velocidad de cizalla y sirve para definir la curva de flujo de equilibrio; la otra estructura, la estructura débil, se forma en un cierto intervalo del tiempo cuando la muestra está en reposo. Las dos estructuras combinadas causan una resistencia a fluir que determina el esfuerzo de cedencia estático. El tipo de comportamiento recién descrito se ha observado, aunque no mencionado en los términos de esfuerzo de cedencia estático y dinámico, para varios productos alimenticios: puré de manzana, alimentos infantiles de plátano y

durazno, mostaza, cátsup, extractos de levadura. También la misma terminología fue utilizado para interpretar información reológica para margarina (Steffe, 1996).

Debido a la escasa información que existe sobre los recubrimientos semisólidos untables aplicados en repostería, se realizó una búsqueda de información de productos a fines a ellos, basándose en la consistencia, uso y/o la manera de ser empleados, así como en alto contenido de grasas o carbohidratos que pueden llegar a presentar; en el Cuadro 1.2 se presentan valores de G' , G'' , k , n y σ_0 a una velocidad angular de 6.28 y 10 s^{-1} .

La idea de un esfuerzo de cedencia estático y dinámico se puede explicar suponiendo que puede haber más de un tipo de estructura en un fluido. Una estructura puede ser intensiva a la velocidad de cizalla y sirve para definir la curva de flujo de equilibrio; la otra estructura, la estructura débil, se forma en un cierto intervalo del tiempo cuando la muestra está en reposo. Las dos estructuras combinadas causan una resistencia a fluir que determina el esfuerzo de cedencia estático. El tipo de comportamiento recién descrito se ha observado, aunque no mencionado en los términos de esfuerzo de cedencia estático y dinámico, para varios productos alimenticios: puré de manzana, alimentos infantiles de plátano y durazno, mostaza, cátsup, extractos de levadura. También la misma terminología fue utilizado para interpretar información reológica para margarina (Steffe, 1996).

Cuadro 1.2 Ejemplos de productos semisólidos con los parámetros obtenidos bajo cizalla oscilatoria y por cizalla rotacional.

Producto	Parámetros obtenidos bajo cizalla oscilatoria			Parámetros obtenidos bajo cizalla rotacional				
	G' (Pa)	G'' (Pa)	tan δ	Comportamiento al flujo	σ_0 (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	n	Referencia
Natillas	58.4	8.33	0.28	Presenta tixotropía y un comportamiento tipo Herschel-Bulckley				Tárreaga y col., 2004
				Modelo Casson	14.06	2.43	0.64	Doublier y Duran, 2008
Queso untable	155 738.8	30 602.5	-----	Presenta tixotropía	7 300 Método gráfico	-----	-----	Kealy, 2006
Crema de cacahuete	11 000	9000	-----	Presenta tixotropía y se ajusta al modelo Casson	363	-----	-----	Citerne y col.,2001
Pasta sesamo	4000	850	-----	Presenta tixotropía y un comportamiento tipo Herschel-Bulckley	80	15.20	0.72	Sevim y col., 2008
Mayonesa	288.3	-----	-----	Presenta tixotropía y un comportamiento regido por la ley de la potencia	-----	43.54	0.28	Thaiudom y Khantarat., 2011

1.3 Adhesividad de alimentos semisólidos

La adhesividad dentro de los productos aplicados en repostería, (como las coberturas) es de suma importancia, ya que es una propiedad textural que se manifiesta por la tendencia de un alimento a adherirse a las superficies con las que entra en contacto, especialmente el paladar, los dientes y la lengua durante la masticación (Casas, 2014).

Esta propiedad textural puede ser tanto una característica negativa como positiva dependiendo del tipo de alimento. Por lo general la adhesividad es presentada como un atributo negativo, ejemplo de esto es la adhesión de los alimentos a los materiales del empaque (Lai, 1987), la adhesión a los equipos de procesamiento, y finalmente cuando se pega a los dedos o a las diferentes partes de la boca (Kilcast y col., 1997). En el caso de los recubrimientos suele ser una propiedad positiva por ejemplo para los brillos o betún se busca proteger o cubrir el producto de panificación evitando que al aplicado se derrame y presente un aspecto desfavorable para el consumo, por otra parte si se tiene un producto con alta adhesividad como la crema de avellanas presenta una dificultad para ser untada ya que suele desprender o destruir el producto de panificación si no suele ser empleado de forma cuidadosa y uniforme (Quintero, 2014)

La adhesividad es característica de productos de confitería con altos contenidos de azúcar, los cuales pueden ser considerados como adhesivos, de acuerdo a las siguientes características o combinación de estas: 1) Bajos contenidos de humedad, 2) Alto contenido de sólidos solubles, 3) Se derriten con la temperatura del cuerpo, 4) Alta adhesión a las superficies del cuerpo (Casas, 2014).

1.3.1 Pruebas instrumentales en la medición de las propiedades adhesivas

Para poder cuantificar de manera satisfactoria las propiedades adhesivas de un producto semisólido aplicado en repostería no existe un modelo cuantitativo que describa de manera adecuada dicha propiedad; sin embargo, algunos mecanismos de prueba han sido desarrollados y adaptados para determinar el punto de adhesión de un producto. Un ejemplo de éstas son las pruebas de tensión, este tipo

de prueba se ocupa comúnmente en cubiertas laminadas de envase plástico o para cintas adhesivas y consiste en poner la muestra sobre una base y con un dispositivo con forma de pinzas, retira la cubierta laminada de la base y se mide la fuerza que se requiere para despegarla tomándola como fuerza adhesiva. También se encuentran las pruebas con dispositivo las cuales son más utilizadas en alimentos se basan en poner una geometría en contacto con un material adhesivo bajo una pequeña presión y un tiempo corto, retirando el dispositivo a una cierta velocidad para poder medir la fuerza de tensión del enlace formado, esto con el fin de simular la sensación de un humano cuando toca con el dedo una superficie pegajosa (Kilcast y col., 1997).

En la industria alimentaria se han utilizado para simular aspectos de procesos de adhesividad y como es que el consumidor percibe esta propiedad, básicamente se clasifican en tres tipos: perfil de textura (TPA), por contacto- retirada y por penetración- retirada.

Este tipo de pruebas se realizan en un texturometro en donde generalmente se ocupa un dispositivo de superficie plana y durante la separación del material se registra una curva de fuerza en función del tiempo, en donde se mide el tiempo de separación y el área bajo la curva, a esta área se le conoce como el parámetro de adhesividad.

- **Prueba por penetración- retirada**

En la prueba para evaluar la adhesividad por penetración-retirada se utiliza una cantidad relativamente grande de una muestra colocada en un recipiente (caja petri). El dispositivo penetra a una cierta distancia la muestra y luego se retira a una velocidad alta, por arriba de la superficie de la muestra, esta distancia deberá ser lo suficientemente alta consiguiendo que la cantidad del material adherida a la superficie se despegue en su totalidad (Casas, 2014).

En la Figura 1.8 se presenta la curva de fuerza en función del tiempo en el cual se obtiene parámetros como: resistencia inicial a la penetración, consistencia, trabajo

de penetración, trabajo adhesivo, fuerza adhesiva, adhesividad, estiramiento y untabilidad.

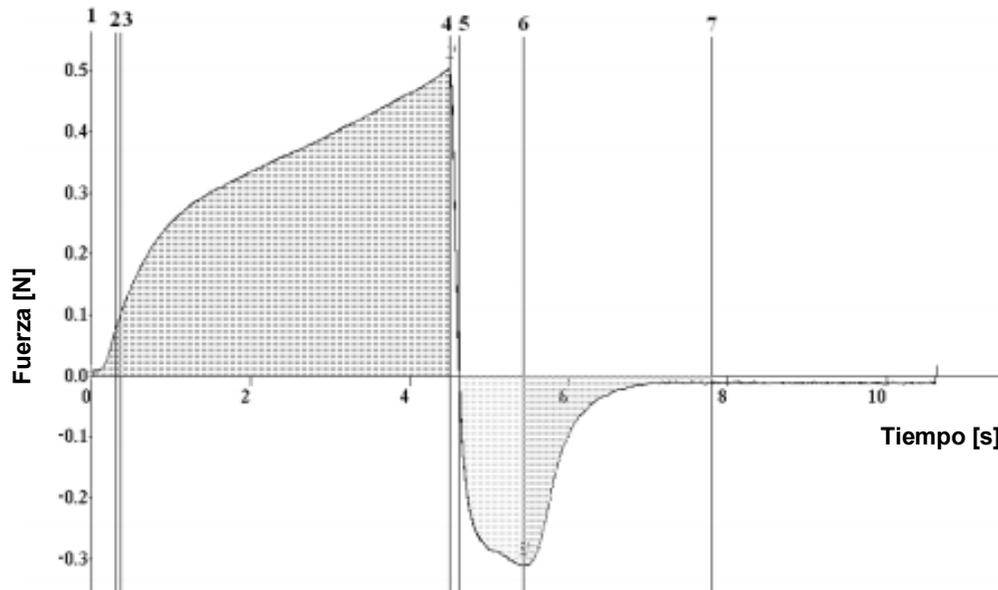


Figura 1.8 Representación de la curva fuerza en función del tiempo de la prueba de adhesividad por penetración-retirada.

Con referencia a la Figura 1.8 los parámetros texturales se definen y se obtienen de la siguiente forma:

- Resistencia inicial a la penetración (pendiente de 2 a 3): Es la fuerza necesaria para introducir el dispositivo a una distancia establecida. Es la primera pendiente del área positiva de la curva fuerza-tiempo.
- Consistencia (punto 4): Calidad del alimento que resiste sin romperse ni deformarse fácilmente. Es la fuerza requerida para comprimir una deformación dada y se calcula como el pico máximo de la parte positiva de la curva fuerza- tiempo (Casas, 2014).
- Trabajo de penetración (área de 1 a 4): Es el trabajo aplicado para penetrar la distancia establecida. Se mide como el área positiva de la curva fuerza-tiempo hasta la punta antes de iniciar el proceso de bajada.
- Trabajo adhesivo (área 5 a 6): Trabajo necesario para retirar el alimento de una superficie. Es el área bajo la curva del inicio de la retirada al pico máximo negativo. Área negativa antes de la fuerza adhesiva (Casas, 2014).

- Fuerza adhesiva (punto 6): Representa la fuerza necesaria para la separación del dispositivo del producto y se calcula como la fuerza negativa (Casas, 2014).
- Trabajo cohesivo (área 6 a 7): Es la fuerza que los enlaces internos hacen sobre el alimento (Rosenthal, 2001), de alguna manera es una medida del grado de estructura del alimentos (Casas, 2014). Es el área bajo la curva después del pico máximo negativo. Es el área negativa después de la fuerza adhesiva.
- Adhesividad (área 5 a 7): Es el trabajo necesario para la separación de dos cuerpos en contacto (Rosenthal, 2001), área bajo la curva desde el inicio de la retirada del dispositivo hasta que la fuerza llega a cero o se hace constante y representa el trabajo necesario para que el dispositivo se desprege totalmente del alimento.
- Estiramiento (distancia de 5 a 7): Es la distancia que el producto se extiende durante la retirada antes de romperse (Casas, 2014).
- Untabilidad: Es la facilidad o dificultad con la cual el producto de análisis es aplicado al producto de panificación. Se calcula como el cociente entre el estiramiento y la fuerza adhesiva.

Prueba de adhesividad por contacto-retirada

En la prueba para evaluar la adhesividad por contacto-retirada, se coloca sobre la base del instrumento una pequeña cantidad de muestra (buscando que al comprimir la muestra no sobresalga del área del dispositivo). El dispositivo se pone en contacto con la muestra con una fuerza ya establecida. El contacto dura unos segundos y después el dispositivo se retira por arriba de la superficie de la muestra que ésta se despega completamente, de esta manera se obtiene una curva de fuerza tiempo como se observa en la Figura 1.9 y se obtiene los parámetros texturales anteriormente mencionados, aunque un número menor que con la prueba de penetración- retirada. En este caso, al emplear una pequeña cantidad de muestra, el efecto de la base es más importante que en la prueba anteriormente explicada.

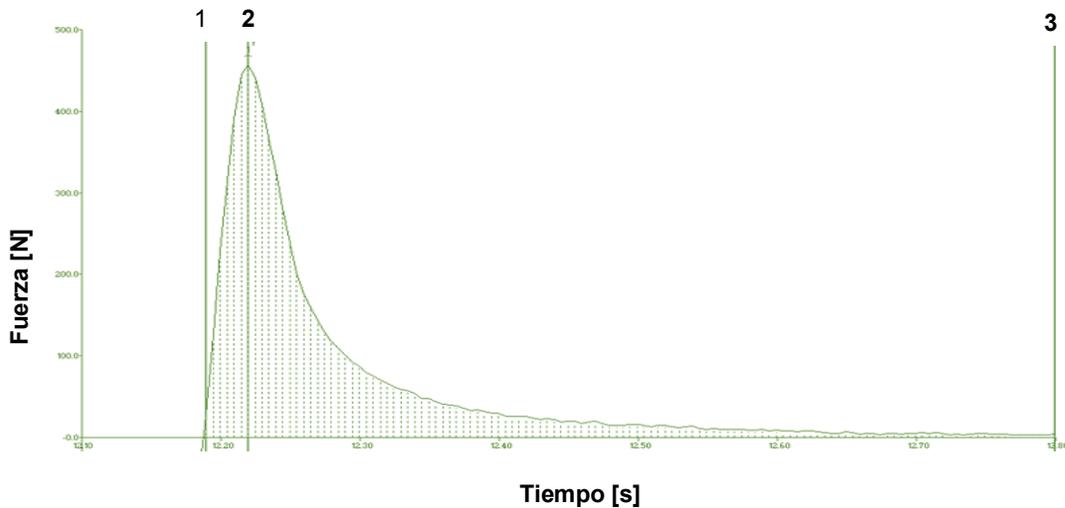


Figura 1.9 Representación de la curva fuerza en función del tiempo de la prueba de adhesividad por contacto-retirada.

Con referencia a la Figura 1.9 los parámetros texturales se midieron de la siguiente forma (Casas, 2014):

- Fuerza máxima o adhesiva (punto 2): Pico máximo de la curva fuerza-tiempo.
 - Trabajo adhesivo (área de 1 a 2): Es el área bajo la curva del inicio de la retirada al pico máximo.
 - Trabajo cohesivo (área de 2 a 3): Es el área bajo la curva del inicio de la retirada al pico máximo.
 - Estiramiento: Distancia desde el inicio de la retirada del dispositivo hasta que la fuerza cae a un valor constante o hasta cero.
 - Adhesividad (área 1 a 3): Es el área total bajo la curva fuerza-tiempo
 - Untabilidad: Es el cociente entre el estiramiento y la fuerza adhesiva.
- **Características que influyen en las propiedades adhesivas**

Es importante tener en cuenta que los parámetros texturales anteriormente mencionados pueden ser afectados por algunos factores como: la interacción del agua con los sólidos del alimento es la principal causa de la adhesividad. El agua es un plastificante (disminuye la temperatura de transición vítrea T_g); la temperatura de transición vítrea es la temperatura en la que el material pasa de un estado

gomoso, con cierta movilidad, a uno semicristalino amorfo, en el cual la movilidad es mínima (Casas, 2014), ya que sí la temperatura en los alimentos amorfos es mayor que la temperatura de transición vítrea (T_g), serán transformados a un estado similar a líquido viscoso que está asociado con la adhesividad y el apelmazamiento (Roos y Karel, 1993). Cuando se incrementa la temperatura, el estado amorfo se aproxima a uno viscoso, donde su viscosidad disminuye provocando la adhesividad del producto (Downton y col, 1982); esta temperatura depende de la composición característica del alimento ya que si el producto se encuentra elaborado con ingredientes de alto peso molecular compatibles con agua tales como: carbohidratos y proteínas tienen una temperatura de transición vítrea (T_g) alta (T_g incrementa proporcionalmente con el peso molecular). Por otra parte la interacción del agua con los sólidos es la principal causa de adhesividad y apelmazamiento en alimentos de baja humedad, propiedades como la viscosidad, tensión superficial y buena solvatación (proceso de atracción y asociación de moléculas de un disolvente con moléculas o iones de un soluto) hacen del agua un catalizador adecuado para la adhesividad y la aglomeración de los alimentos. En el Cuadro 1.3 se presentan la importancia de los factores causantes de la adhesividad anteriormente explicados.

Cuadro 1.3 Factores causantes de la adhesividad y su contribución (Adhikari y col., 2001).

Factores	Contribución relativa de adhesividad
Proteínas	O
Polisacáridos	O
Lípidos	+
Azúcares de bajo peso molecular	++
Ácidos orgánicos	++
Agua/Humedad relativa	+++
Temperatura	+++
Viscosidad	+++

O, punto base (contribución insignificante), +, contribución alta, ++, contribución más alta, +++, la contribución más alta.

II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

2.1 Objetivos

- Objetivo General

Evaluar las propiedades viscoelásticas, de flujo y adhesivas de productos semisólidos comestibles mediante cizalla oscilatoria, cizalla rotacional y pruebas texturales de adhesividad obteniendo parámetros de referencia que permitan el control de dichos alimentos.

- Objetivo Particular 1

Determinar las propiedades reológicas de productos semisólidos comerciales untables aplicados en repostería mediante pruebas dinámicas y curvas de flujo, estableciendo su comportamiento reológico.

- Objetivo Particular 2

Determinar las propiedades adhesivas de diferentes productos semisólidos comerciales untables aplicados en repostería mediante pruebas por contacto y por penetración, comparando la respuesta del material.

2.2 Materiales

Los materiales que se utilizaron son productos comerciales semisólidos untables aplicados en repostería, teniendo como característica principal un alto contenido de azúcar y grasa; el análisis se le realizó a los siguientes productos: a) una crema con cacao marca Hershey's untable (EUA), b) tres diferentes tipos de betún para decorar de las siguientes marcas Glitter Icing Shimmering Pink (EUA), Betty Crocker Frosting (EUA) y Duncan Hines Creamy Home Style (EUA), c) un dulce para helado marca Smucker's Toppings (EUA) y d) un brillo para repostería marca Puratos (México). Toda la materia prima se compró en un supermercado adquiriéndose del mismo lote para cada producto a evaluar. Las muestras se almacenaron a 25 ± 2 °C. En el Cuadro 2.1 se presenta el contenido de carbohidratos, azúcares y lípidos correspondientes a una porción declarada en la etiqueta y en el Cuadro 2.2 se resume la nomenclatura e ingredientes reportados en la etiqueta.

Cuadro 2.1 Cantidad de carbohidratos totales, azúcares y lípidos de los semisólidos de estudio.

Producto	Carbohidratos [%]	Azúcares [%]	Lípidos [%]	Fibra [%]
Crema con cacao sabor chocolate-untable Hershey's	52.2	50	33.3	0
Betún para decorar-Glitter Icing Betty Crocker	60	60	20	0
Dulce para helado Smucker's - Toppings	70	60	0	0
Betún de Chocolate Betty Crocker Wipped –frosting	63.6	51.5	15.1	2
Betún de Chocolate Duncan Hines Creamy Home Style	62.8	54.2	17.1	2
Brillo para repostería	58.6	No reportado	0	No reportado

Cuadro 2.2 Nomenclatura e ingredientes de los productos comerciales.

Nomenclatura	Producto	Ingredientes
BC1	Betún de chocolate Betty Crocker-Wipped – frosting	Azúcar, agua, jarabe de maíz con alto contenido de maltosa, aceite vegetal (aceite de palma), almidón de maíz, 5.23% cocoa procesada con álcali, aceite vegetal (aceite de canola). Contiene menos del 2% de los siguientes: sal, monoglicéridos y diglicéridos de ácidos grasos, polisorbato 60, saborizante natural y artificial, estearoil lactilato de sodio, pirofosfato ácido de sodio, colorante artificial (caramelo clase IV), leche descremada, ácido cítrico, sorbato de potasio (conservador). Contenido neto: 453 g Lote: PR0EP Marca: Betty Crocker Elaborado por Betty Crocker USA

Cuadro 2.2 Continuación, nomenclatura e ingredientes de los productos comerciales.

Nomenclatura	Producto	Ingredientes
BC2	Betún de chocolate Creamy Home Style	Azúcar, agua, manteca vegetal (aceites de soya y de semilla de algodón parcialmente hidrogenados, mono y diglicéridos, polisorbato 60), cocoa procesada con álcali, jarabe de maíz, contiene 2 %, o menos de fécula de maíz, sal, azúcar invertida, sabores naturales y artificiales, azúcar caramelizada (azúcar, agua), color caramelo, ácido acético, conservadores (sorbato de potasio), pirofosfato ácido de sodio, ácido cítrico, citrato de sodio. Contenido neto: 450 g Lote: GC4 Marca: Duncan Hines Elaborado por: Duncan Hines USA
BD	Betún para decorar Glitter Icing	Azúcar, jarabe de maíz, aceite vegetal parcialmente hidrogenado, (semilla de soya, semilla de algodón), agua, maltodextrina, almidón de papa modificado, almidón de maíz, colorante artificial (dióxido de titanio), ésteres de propilenglicol de ácidos grasos, saborizantes naturales y artificiales, goma arábiga, sal yodada, sorbato de potasio (como conservador), ácido cítrico. Contenido neto: 190 g Lote: D403A Marca: Betty Crocker Elaborado por Betty Crocker USA
BR	Brillo para repostería Puratos	Agua, azúcar, glucosa, pectina, ácido cítrico, sorbato de potasio, fosfato de sodio. Contenido neto: 5 kg Lote: 074232 Marca: Puratos México
CC	Crema con cacao sabor Hershey's	Azúcar, aceite vegetal, 16 % de leche descremada en polvo, cacao en polvo procesado con álcali, 1% de leche entera en polvo, aceite vegetal hidrogenado, lecitina de soya, sal yodada, saborizante, vainilla natural, contiene leche derivados de la leche y soya Contenido neto: 330 g Lote: 35MSAS2 Marca: Hershey's Elaborado por: Hershey's USA

Cuadro 2.2 Continuación, nomenclatura e ingredientes presentes en los productos comerciales.

Nomenclatura	Producto	Ingredientes
DH	Dulce para helado Smucker's Toppings	Jarabe de maíz de alta fructosa, azúcar, jarabe de maíz, agua, almidón modificado de maíz, contiene 2% o menos de: gel de carboximetilcelulosa sodica celulosa, dióxido de titanio (color), sabor artificial, sorbato de potasio (conservante), carboximetilcelulosa sodica, azul 2. Contenido neto: 347 g Lote: 4095007212326 Marca: Smucker's Elaborado por : Smucker's USA

2.3 Métodos

2.3.1 Pruebas reológicas

Se utilizó para las pruebas bajo cizalla oscilatoria y rotacional el Reómetro MCR 301 (Physica Anton Para, Austria), con un dispositivo cono/placa (CP75-1 cono de 75 mm de diámetro y un ángulo de 1°) y placa/placa PP50/P2 (diámetro de la placa de 49.756 mm) los productos utilizados para cada geometría en las pruebas bajo cizalla oscilatoria se muestran en el Cuadro 2.3.

Prueba bajo cizalla oscilatoria

La prueba de cizalla oscilatoria se realizó manteniendo constante la velocidad angular (ZVL) en forma sinusoidal variando la frecuencia de oscilación y midiéndose el esfuerzo de cizalla resultante. Dependiendo del ángulo de desfase entre las curvas sinusoidales del esfuerzo de cizalla oscilatorio y la respectiva deformación de cizalla oscilatoria medida, el material presentará un comportamiento puramente elástico o viscoelástico.

La prueba de cizalla oscilatoria inicio con la determinación de la zona viscoelástica lineal, donde la velocidad angular permaneció constante (1Hz ó 10 rad/s) y se aplicó un barrido de deformación, posteriormente con el valor de la deformación se realizó un barrido de velocidad angular. En el Cuadro 2.3 se resumen las condiciones de

prueba para cada producto. La muestra del producto se tomó sólo de la parte superior del recipiente.

Cuadro 2.3 Condiciones de operación para la zona viscoelástica lineal y para la obtención del espectro mecánico.

Nomenclatura del producto	Dispositivo	Intervalo de deformación	Intervalo de velocidad angular [rad/s]
DH	Cono- placa	0.01 a 0.05%	0.1 a 150
CC	Placa rugosa	0.005 a 0.01%	0.1 a 100
BD	Placa rugosa	0.005 a 0.03%	0.1 a 100
BC1	Placa rugosa	0.005 a 0.01%	0.1 a 100
BC2	Placa rugosa	0.005 a 0.01%	0.1 a 100
BR	Cono- placa	0.01 a 0.05%	0.1 a 100

El software del reómetro calcula los valores del módulo de almacenamiento (G') y del módulo de pérdida (G''), así como la $\tan(\delta)$, determinando el comportamiento viscoelástico del producto y graficando la evolución de G' y G'' en función de la velocidad angular.

Prueba bajo cizalla rotacional

Se realizó un análisis de esfuerzo de cedencia, con la finalidad de conocer el mínimo esfuerzo de cizalla requerido para que el producto empiece a fluir (Steffe, 1996). En el Cuadro 2.4 se resumen las condiciones de prueba para cada producto. El esfuerzo de cedencia se calculó realizando un gráfico del esfuerzo de cizalla [Pa] en función la deformación de cizalla [%] determinándose en el cambio de pendientes.

Cuadro 2.4 Condiciones establecidas en el reómetro MCR301 para el cálculo del esfuerzo de cedencia.

Nomenclatura del producto	Dispositivo	Intervalo del esfuerzo de cizalla [Pa]
BC1 BC2 BD CC	Placa rugosa	100 a 800
DH BR	Cono- placa	0.1 a 25

Con los datos obtenidos de deformación de cizalla (%) y esfuerzo de cizalla (Pa) (bajo las condiciones establecidas del Cuadro 2.4) se elaboraron gráficos con el fin de obtener el módulo elástico antes de fluir (sólo se realizaron para los productos con un comportamiento tipo sólido), este módulo es la relación entre el esfuerzo de cizalla y la deformación de cizalla en la dirección en que se aplica la fuerza. Es decir hasta un esfuerzo límite y en esa relación permanece constante. Esto ocurre hasta el límite elástico, el cual marca el esfuerzo de cizalla máximo sin entrar a la zona de deformación plástica, después de este punto el material ya no recupera la estructura original (Wilson y Bufo, 2003) este comportamiento se ejemplifica en la Figura 2.1.

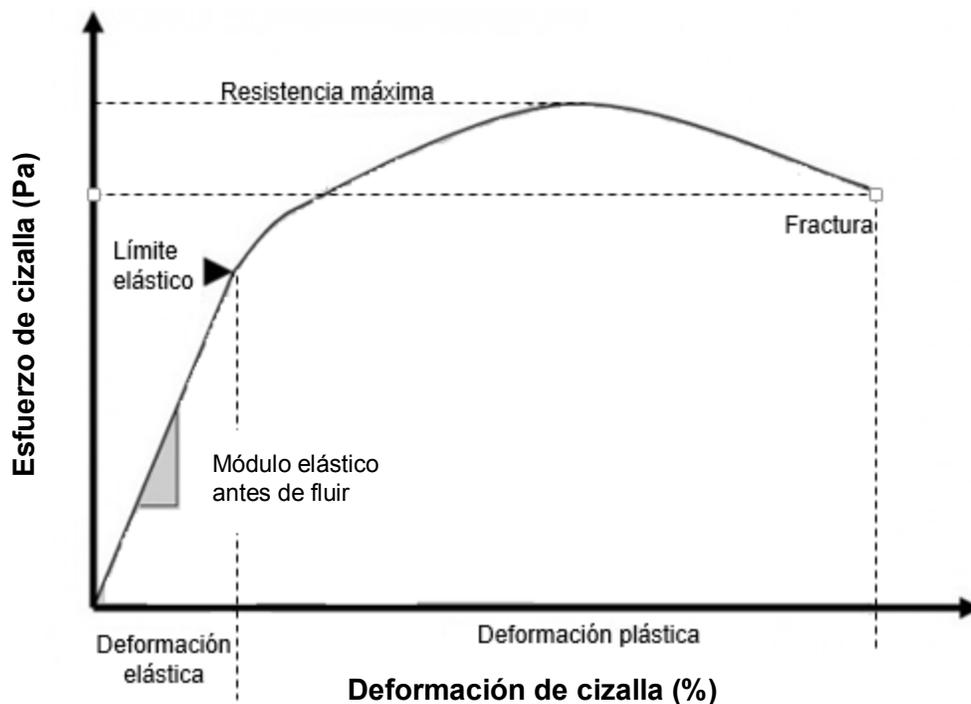


Figura 2.1 Módulo elástico antes de fluir

Por otro lado para los productos con mayor fluidez como el brillo de repostería (BR) y dulce para helado (DH), se les realizó curvas de flujo en ascenso-descenso utilizando un intervalo de cizalla de 0.01 a 100 s^{-1} con 25 puntos y un tiempo de 10s por cada punto, la prueba se realizó a 25 °C.

2.3.2 Pruebas Texturales

- **Prueba de adhesividad por penetración y contacto**

En las pruebas de adhesividad por penetración y contacto se utilizó el Texturómetro TAX-T2 (Stable Micro Systems, Inglaterra), con un dispositivo de cilindro de acrílico de 1 in de diámetro y una celda de carga de 25 kg, en estas pruebas texturales la muestra se obtuvo de la parte intermedia del envase. El equipo cuenta con el software Texture Expert.

El instrumento opera en modo de tensión o compresión y controla fuerza, distancia (deformación) y tiempo a velocidades entre 0.5 y 10 mm/s. Si controla la fuerza aplicada al material, mide la distancia en función del tiempo, si controla la distancia que el material se comprime o tensa, mide fuerza en función de tiempo. De esta forma, se pueden realizar una amplia variedad de pruebas dependiendo del modo de operación y del dispositivo utilizado.

Prueba de adhesividad por penetración – retirada

Las muestras se colocaron en cajas Petri de 5 cm de diámetro con una altura de 1.6 cm, las cajas se rellenaron al ras cuidando que quedaran los mínimos huecos, para los productos como BC1 y BC2 fueron sometidos a unos 5 ligeros golpeteos, las muestras se dejaron reposar dentro de las cajas Petri con su respectiva tapa con el fin de evitar que el producto dentro se resecara. La prueba se realizó a una temperatura de 25 °C. Se calibró el dispositivo a una distancia de 7 cm con relación a la base. Se tuvo un control en la distancia de penetración del 50 % de altura de la muestra del dispositivo sobre la muestra del producto (8 mm), con una fuerza de contacto de 5 g así mismo se estableció la velocidad de acercamiento de 5 mm/s, velocidad de prueba 2 mm/s y una velocidad de retirada 10 mm/s. Durante la prueba se obtuvo una curva de fuerza en función al tiempo de la cual se calcularon los siguientes parámetros texturales: Resistencia inicial a la penetración, consistencia, trabajo de penetración, trabajo adhesivo, fuerza adhesiva, trabajo cohesivo, adhesividad, estiramiento y untabilidad (Casas, 2014).

Prueba de adhesividad por contacto – retirada

Para realizar la prueba se colocó con una microespátula una cucharilla de muestra en el centro de la placa del texturometro, utilizando las siguientes condiciones de velocidad: velocidad de acercamiento 5 mm/s, velocidad de prueba 2 mm/s, velocidad de retirada 10 mm/s. En el Cuadro 2.5 se muestran las condiciones específicas para cada producto, se realizaron un mínimo de 7 repeticiones, la fuerza de contacto fue diferente para los productos semisólidos de alta consistencia (BC1, BC2, BD y CC) con respecto a los de baja consistencia (BR y DH), ya que si se aplicaba la misma para BR y DH el producto no cubría la superficie del dispositivo.

Cuadro 2.5 Condiciones establecidas para la prueba por contacto-retirada.

Producto	Condiciones
BC1 BC2 BD CC	Fuerza de contacto: 90 g Tiempo de compresión: 10 s Distancia de retirada: 40 mm
BR	Fuerza de contacto: 30 g Tiempo de compresión: 10 s Distancia de retirada: 20 mm
DH	Fuerza de contacto: 30 g Tiempo de compresión: 10 s Distancia de retirada: 70 mm

Con las condiciones establecidas del Cuadro 2.5 se obtuvo una curva de fuerza en función del tiempo en este caso las propiedades adhesivas se miden en la zona positiva del gráfico y los parámetros texturales a analizar fueron: Trabajo adhesivo, fuerza máxima o adhesiva, trabajo cohesivo, estiramiento, adhesividad y untabilidad (Casas, 2014).

La descripción del cálculo de los parámetros texturales mencionado anteriormente, se realizó de acuerdo con lo explicado en el capítulo de antecedentes; a los valores de las pruebas por penetración-retirada y contacto-retirada se calculó promedio, desviación estándar y coeficiente de variación en porcentaje.

III. RESULTADOS

3.1 Estudio de productos semisólidos bajo cizalla oscilatoria

3.1.1 Determinación de la zona viscoelástica lineal

A todos los productos semisólidos comerciales se les aplicó un barrido de deformación con la finalidad de determinar la zona viscoelástica lineal. Como ejemplo en la Figura 3.1 se presenta el comportamiento del módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en función de la deformación para el betún de chocolate 1 (BC1). Se presentan las 3 repeticiones realizadas en el BC1 evidenciando que hay ligera diferencia entre ellas.

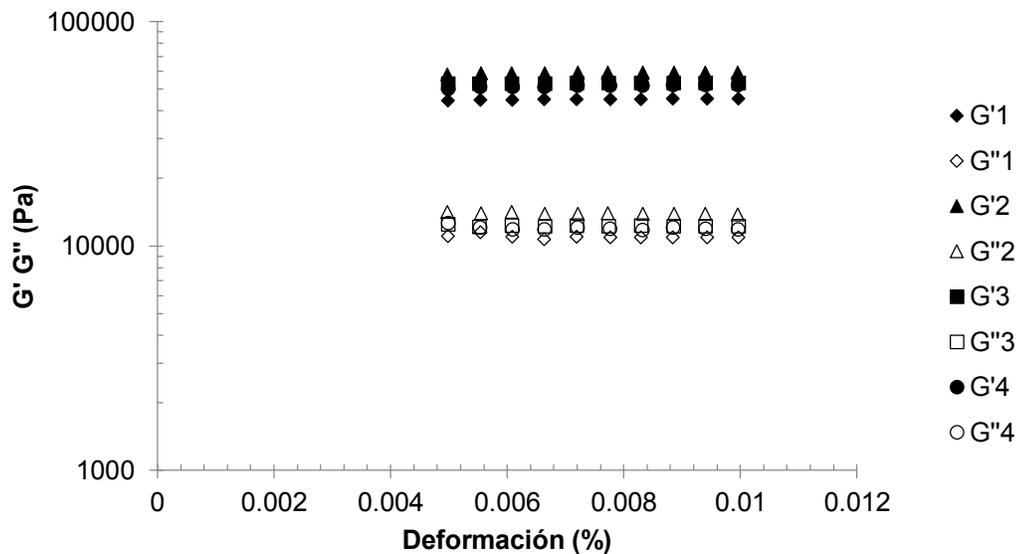


Figura 3. 1 Módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en función de la deformación, para la muestra BC1.

Se observa que G' y G'' son independientes de la deformación aplicada, por lo que se considera que el producto se está deformando dentro de la zona de viscoelasticidad lineal.

En el Cuadro 3.1, se resumen los intervalos de deformación aplicados en los diferentes productos analizados, indicando la deformación seleccionada para

obtener el espectro mecánico. Por ejemplo para el BC1, la zona de viscoelasticidad lineal se encontró en el intervalo de deformación de 0.005 a 0.0095 % y se seleccionó el valor de 0.0075 % para realizar el barrido de velocidad angular.

Cuadro 3.1. Deformación seleccionada dentro de la zona de viscoelasticidad lineal en los diferentes productos comerciales

Producto	Intervalo aplicado Deformación (%)	Deformación seleccionada (%)
BC1	0.005 a 0.0095	0.0075
BC2	0.00499 a 0.0095	0.0075
BD	0.000512 a 0.0030	0.0075
BR	0.1 a 0.5	0.2
CC	0.00495 a 0.00988	0.0075
DH	0.01 a 0.05	0.02

Los productos a los que se aplicó una deformación mayor son el brillo de repostería (BR) y el dulce para helado (DH), los cuales presentaron características más fluidas al compararlos con los otros sistemas de estudio. En estos productos se estableció un valor de deformación constante de 0.2 %, y 0.02 % respectivamente para obtener el barrido de velocidad angular.

3.1.2 Barrido de velocidad angular

En la Figura 3.2 se presenta el espectro mecánico representativo de cada uno de los betunes estudiados, entre los que se incluyen el sabor chocolate 1 y 2, así como el betún para decorar (BC1, BC2 y BD), en donde se puede observar la dependencia de los módulos de almacenamiento y de pérdida. Se observa que hay una diferencia entre los módulos de los productos en función a la velocidad angular, lo que se puede atribuir a la composición de cada uno de los betunes. El módulo de almacenamiento (G') siempre fue superior al módulo de pérdida (G'') en el intervalo de velocidad angular estudiado, por lo que se considera que predomina el comportamiento sólido viscoelástico del material.

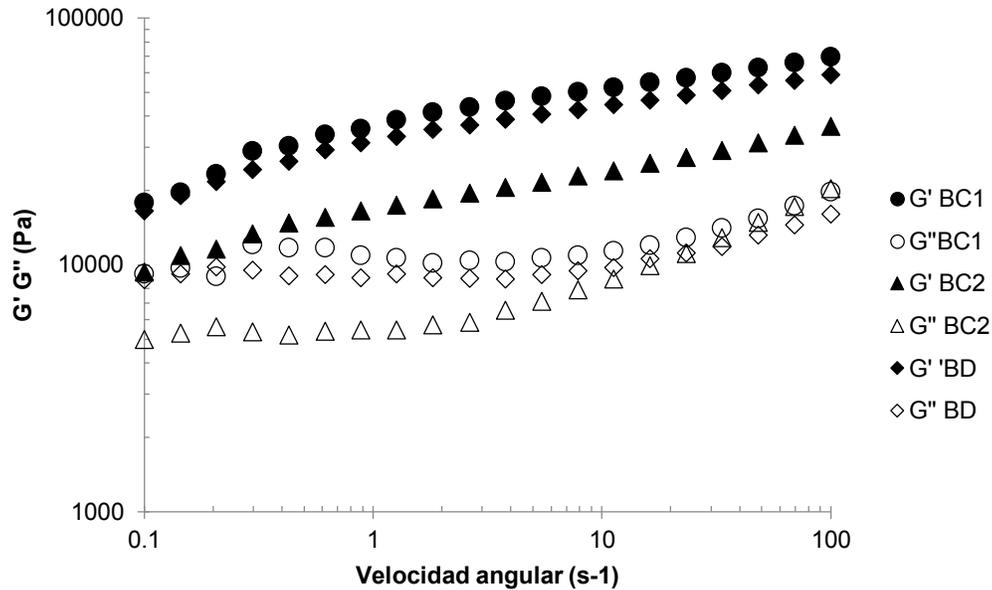


Figura 3.2 Módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en función de la velocidad angular, para la muestra BC1.

En cuanto a la variación de los módulos con respecto a la velocidad angular, para los productos estudiados, no se observa una dependencia definida de los módulos, ya que a una velocidad angular de 0.1 a 2 s^{-1} es casi constante G' y G'' , sin embargo, a velocidades de 2 a 100 s^{-1} se observa un aumento en la pendiente de los módulos. Los productos BC1 y BD presentaron un mayor módulo de almacenamiento; este comportamiento predominante sólido viscoelástico el cual puede ser atribuido al alto contenido de lípidos (15-20 %) y a la presencia de polisacáridos (almidón modificado y goma arábiga), reportado en la etiqueta, mientras que BC2 sólo está compuesto por azúcares y grasas.

La crema con cacao (CC), fue analizada por separado debido a la complejidad y heterogeneidad que presentó el producto dentro del envase; se realizó el espectro mecánico de las muestras en dos zonas diferentes dentro del envase, en la parte superior (PS) y en la parte intermedia (PI).

En la Figura 3.3 se presenta el espectro mecánico del CC, en donde se observa la dependencia de los módulos de almacenamiento y de pérdida en función de la velocidad angular de las tres repeticiones realizadas en las dos zonas; evidenciando la existencia de una ligera diferencia entre repeticiones de las diferentes zonas, y

diferencias entra las zonas de donde se tomó la muestra, lo que se puede atribuir a la complejidad de la composición química y heterogeneidad dentro del envase de la crema de cacao, así mismo la manera en la cual fue dosificada, el manejo del producto en almacén y los cambios de temperatura dentro del establecimiento de venta, estos son factores que puede modificar el comportamiento sólido viscoelástico del producto, por ejemplo a altas temperaturas la grasa de cacao o el chocolate tiende a fundir y al enfriar solidifica, por lo tanto el comportamiento reológico es modificado (Martínez y col., 2007).

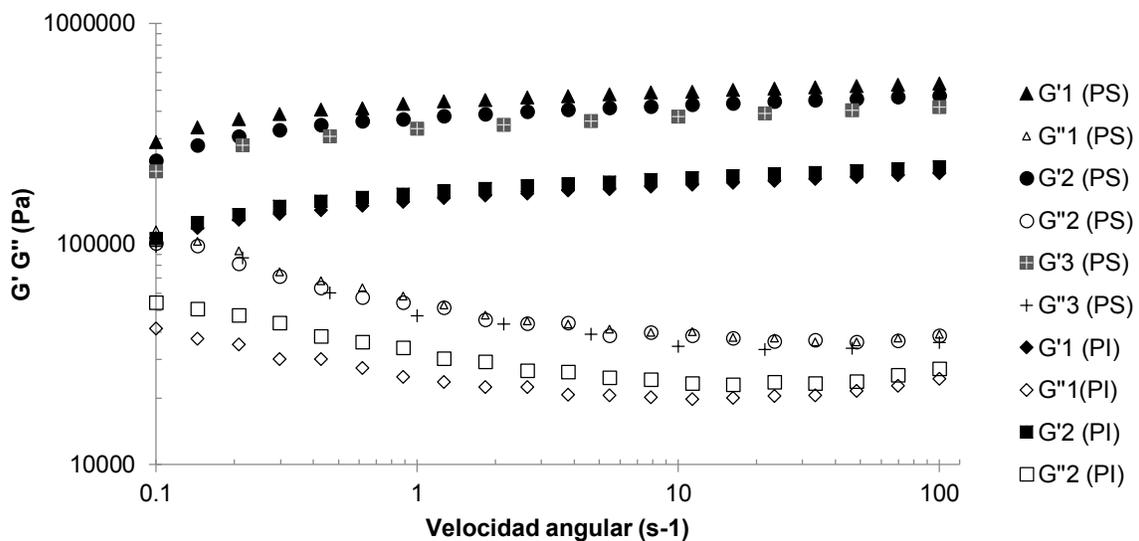


Figura 3.3 Módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en función de la velocidad angular, para la muestra CC.

El módulo de almacenamiento (G') al igual que en los productos anteriores predominó sobre el módulo de pérdida (G'') en el intervalo de velocidad angular estudiado, por lo que se considera que también predomina el comportamiento sólido viscoelástico del material. En este caso se observa que G' tiene una ligera tendencia a aumentar con la velocidad angular y por el contrario, G'' presenta una disminución. La heterogeneidad de la crema de cacao dentro del envase también se evidencia con la Figura 3.4 en donde se presenta la relación de módulos (G''/G') que corresponde a la $\tan(\delta)$, del material en función de la velocidad angular, los valores

de la $\tan(\delta)$, fueron menores a la unidad situándose entre 0.65 y 0.25, confirmando el predominio del comportamiento sólido viscoelástico en los productos

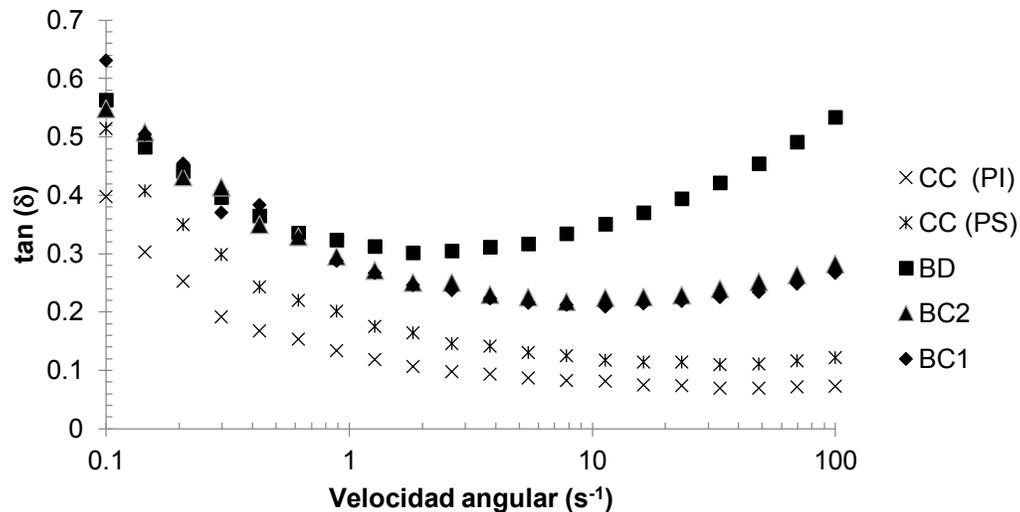


Figura 3.4 $\tan(\delta)$ en función de la velocidad angular, para los productos BC1, BC2, BD y CC.

Al comparar los diferentes betunes y la crema de cacao, el producto que presentó un menor valor de $\tan(\delta)$ es la crema de cacao, atribuido a la composición química más compleja, al igual que un alto contenido de carbohidratos aproximadamente el 52 %, y de lípidos un 33 %, de acuerdo con lo reportado en la etiqueta. A medida que la velocidad angular aumenta, el comportamiento que presenta CC es más sólido y constante a diferencia de lo que sucede con el BD, el cual inicialmente tiene un comportamiento sólido pero a mayor velocidad angular el producto presenta un comportamiento más fluido.

Se analizan a continuación los productos con mayor fluidez como es el brillo para repostería (BR) y el dulce para helado (DH).

En la Figura 3.5 se exhibe el espectro mecánico de BR (a) y DH (b), en donde se observa la dependencia de los módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') con respecto a la velocidad angular. En el producto BR el módulo de almacenamiento predominó sobre el módulo de pérdida en el intervalo de velocidad angular estudiado, por lo que se considera que predomina el comportamiento sólido

viscoelástico del material. Ambos módulos tienden a aumentar con el incremento de velocidad angular, así mismo, la magnitud de los módulos fue menor que en los betunes y la crema de cacao.

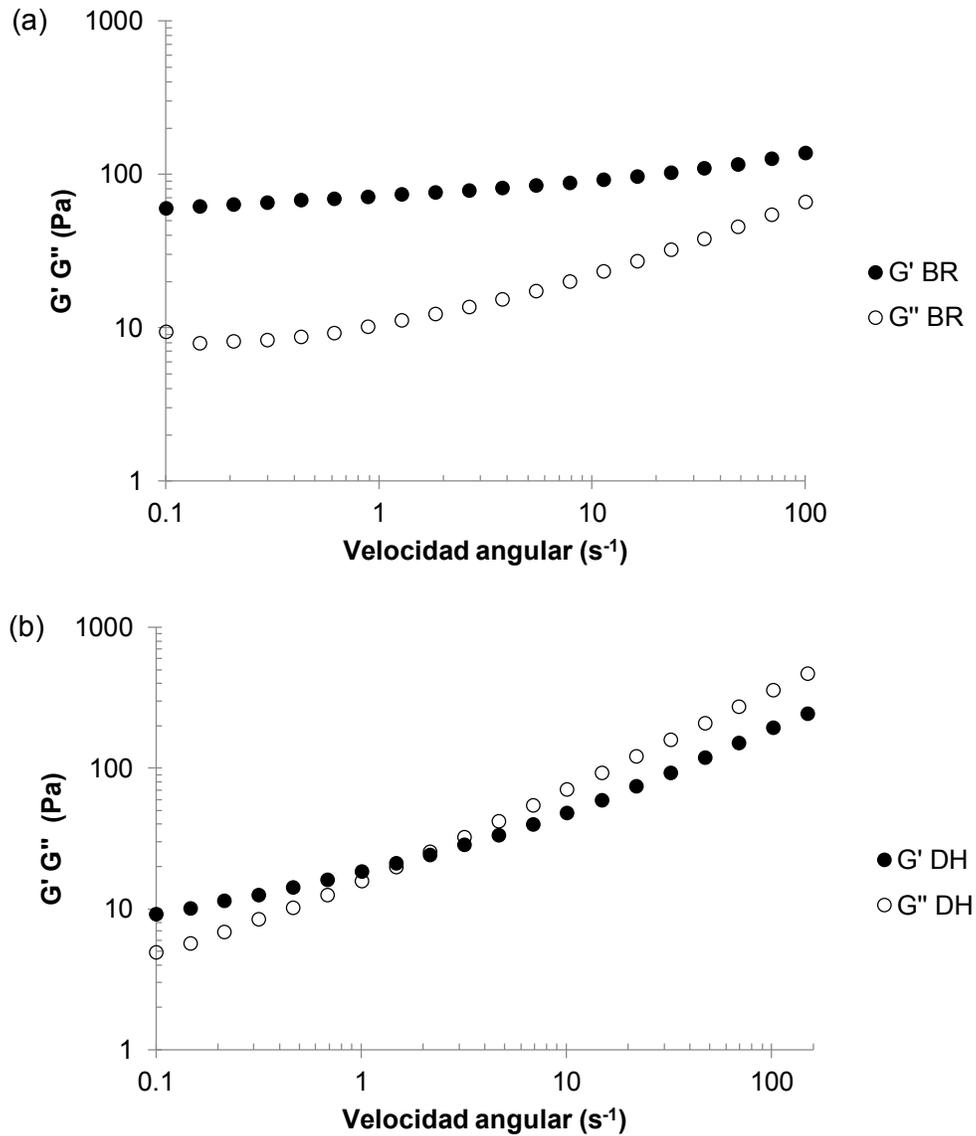


Figura 3.5 Módulo de almacenamiento (G') y el módulo de pérdida (G'') en función de la velocidad angular, para la muestra (a) BR y (b) DH.

En el producto DH se observó un comportamiento más fluido, diferente al obtenido en los betunes, ya que existió una mayor dependencia de los módulos con respecto a la velocidad angular. A baja velocidad angular predomina el módulo G' (en un

intervalo de velocidad angular entre 0.1 a 2.15 s^{-1}), existe el cruce entre ambos módulos, y la respuesta viscosa prevalece a velocidades angulares más altas (en un intervalo de velocidad angular de 10.1 a 150 s^{-1}). De los productos comerciales estudiados el dulce de helado fue el que presentó los módulos más pequeños.

En la Figura 3.6 se muestra la $\tan(\delta)$ del material en función de la velocidad angular, se observan claras diferencias entre el producto BR y DH, el DH tiene un comportamiento sólido viscoelástico a una velocidad angular baja pero después de los 10 s^{-1} presenta un comportamiento fluido viscoelástico, ya que los valores obtenidos fueron mayores a la unidad, por otra parte el comportamiento sólido viscoelástico predomina para BR a pesar del aumento de la $\tan(\delta)$ con respecto a la velocidad angular.

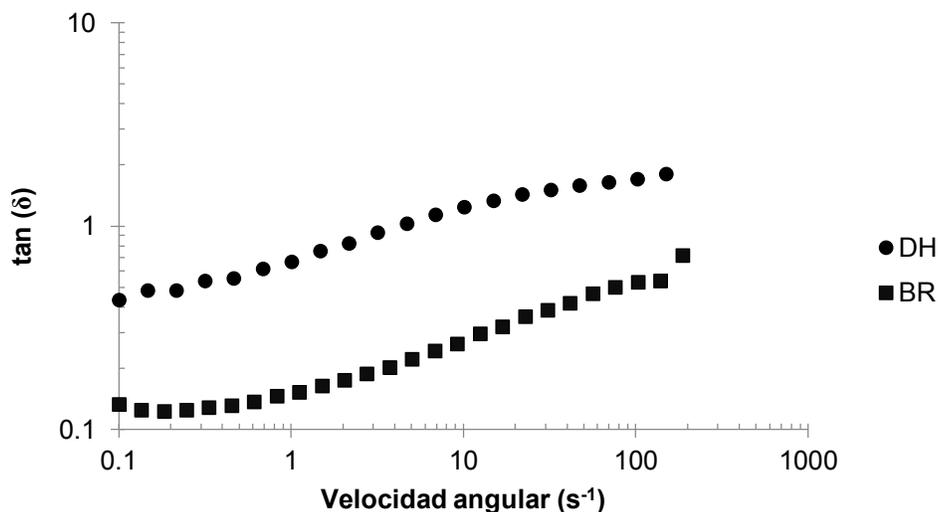


Figura 3.6 $\tan(\delta)$ en función de la velocidad angular, para la muestra BR y DH.

Con el fin de realizar un análisis cualitativo, se seleccionó el módulo de almacenamiento para el mismo. En el Cuadro 3.2 se presenta el promedio de 5 réplicas del módulo de almacenamiento evaluada a una velocidad angular entre 5.5 y 6.9 s^{-1} para BR, DH, BC1, BC2, BR y CC, en donde el coeficiente de variación fue menor al 10 %, por lo que se consideran resultados confiables, dichos productos se diferencian entre sí por el valor de G' ; en donde la CC tiene un módulo de almacenamiento mayor en comparación con los demás productos, esto puede ser

debido al alto contenido de lípidos (33 % casi el doble en relación con los otros recubrimientos del estudio) proporcionando una textura más sólida, sin embargo, si existe diferencia entre los módulos ya que G' en la parte superior de la crema de cacao fue casi el doble que en la parte intermedia, corroborando que el producto no es homogéneo dentro del envase, esto puede ser atribuido a la manipulación del producto desde la elaboración hasta el almacenamiento.

Cuadro 3.2 Módulo de almacenamiento de los productos de estudio determinados a una velocidad angular entre 5.5 y 6.9 s^{-1} .

Producto de estudio	Velocidad angular [s^{-1}]		G' [Pa]
BC1	5.5	\bar{x} σ C.V (%)	55 400 1 400 3
BC2	5.5	\bar{x} σ C.V (%)	37 367 3 188 9
BD	5.5	\bar{x} σ C.V (%)	50 833 5 700 9
BR	6.8	\bar{x} σ C.V (%)	80.3 4 5
CC PS	5.5	\bar{x} σ C.V (%)	441 750 43 554 10
CC PI	5.5	\bar{x} σ C.V (%)	185 000 9 899 5
DH	6.9	\bar{x} σ C.V (%)	51 6 10

Por otra parte el módulo de almacenamiento es similar entre BD y BC1 esto puede ser atribuido a que ambos productos presentan polisacáridos como el almidón de papa y almidón de maíz respectivamente, sin embargo, el módulo de almacenamiento fue mayor para BC1, ya que en lo reportado en la etiqueta dicho producto contiene una mayor cantidad de carbohidratos. Por otra parte la composición química de BC2 y BC1 es semejante en cuanto a la cantidad de azúcares, lípidos y carbohidratos, sin embargo, en el BC2 no se reporta la adición de ningún polisacárido, por lo tanto se tiene un producto con una consistencia o

textura más suave (según lo percibido). En el caso de los productos con características más fluidas, el BR presentó una G' mayor en comparación con DH, esto puede ser causado por la presencia de azúcar, glucosa y pectina, que le proporcionan consistencia al producto.

3.2 Estudio de productos semisólidos bajo cizalla rotacional

Considerando que los productos semisólidos estudiados presentaron comportamiento predominante de sólido viscoelástico (BC1, BC2, BD, CC), se procedió a determinar el esfuerzo de cedencia o esfuerzo de cizalla en donde empieza a fluir por encima de un valor crítico.

Determinación del esfuerzo de cedencia

Para el cálculo del esfuerzo de cedencia, en el primer segmento de la prueba, se aplicó progresivamente un esfuerzo de cizalla y se midió la deformación correspondiente. Se realizó el gráfico en donde se observó, que en los esfuerzos de cizalla pequeños se presentaban pequeñas deformaciones de manera proporcional, seguido de un incremento drástico de la deformación, indicando que el producto comienza a fluir como se muestra en la Figura 3.7. El esfuerzo de cedencia se calcula como la intersección de las dos líneas rectas que representan cada sección.

En el Cuadro 3.3 se presentan los valores de esfuerzo de cedencia obtenidos por el método gráfico exhibiendo el promedio de 7 réplicas, desviación estándar y coeficiente de variación para cada uno de los productos de estudio. El esfuerzo de cedencia se asocia con la ruptura inducida por cizallamiento de la estructura interna del producto alimenticio.

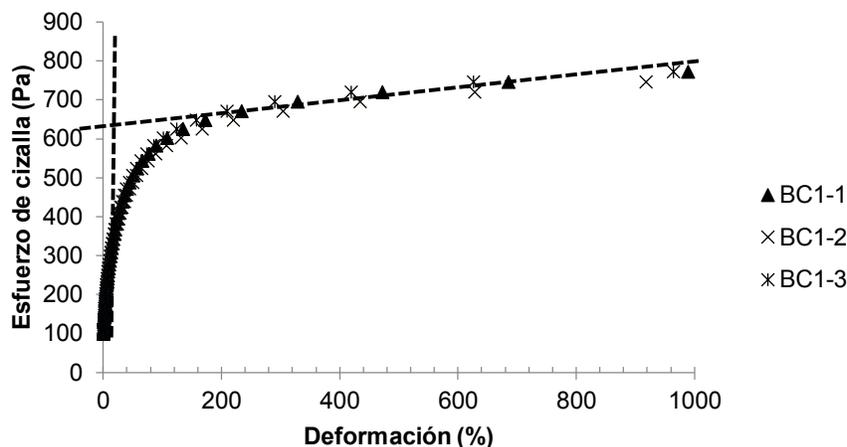


Figura 3.7 Ejemplo de la determinación por método gráfico del esfuerzo de cedencia para el betún de chocolate.

Cuadro 3.3 Valores obtenidos del esfuerzo de cedencia por método gráfico de los diferentes semisólidos comerciales.

Producto	σ_0 [Pa]	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
BC1	687	14	12
BC2	564	31	11
BD	531	11	4
BR	2	0	0
CC	262	5	2
DH	1	0	0

Se observa que existen diferencias entre los esfuerzos de cedencia calculados en los recubrimientos, donde BC1, BC2 y BD presentaron los valores mayores, por otra parte la crema de cacao presentó el mismo comportamiento predominantemente de sólido viscoelástico, y que después de aplicar una fuerza la estructura se rompe y el material empieza a fluir. Se esperaba que la CC al igual que en la prueba por cizalla oscilatoria tuviera un valor mayor de esfuerzo de cedencia, ya que el módulo de almacenamiento que presenta fue el más alto de todos los productos de estudio, lo cual no sucedió debido a que en esta prueba el material es sometido a altas deformaciones de cizalla (1000 %), por lo que se deduce que el alto contenido de lípidos (33 %) según lo reportado en la etiqueta funcionan como lubricantes; lo mismo sucede para BD, ya que es el segundo producto con la mayor cantidad de lípidos (20 %).

En el caso del DH y BR, se necesitó aplicar un menor esfuerzo de cizalla para obtener el esfuerzo de cedencia en comparación con los demás productos, ya que poseen una estructura interna menos concentrada, posiblemente más desordenada y menos cohesiva entre los elementos que componen al DH.

Se realizó un gráfico del esfuerzo de cizalla en función de la deformación de cizalla (0 a 20 %) en la zona de bajos esfuerzos de cizalla (60 a 180 Pa), con el fin de obtener el módulo elástico antes de fluir de los productos con comportamiento predominante de sólido viscoelástico (BC1, BC2, BD, CC), como se muestra en la Figura 3.8 en donde se observa una tendencia lineal entre el esfuerzo de cizalla aplicado y la deformación de cizalla obtenida, en donde la CC tiene una mayor pendiente en relación con la deformación de cizalla.

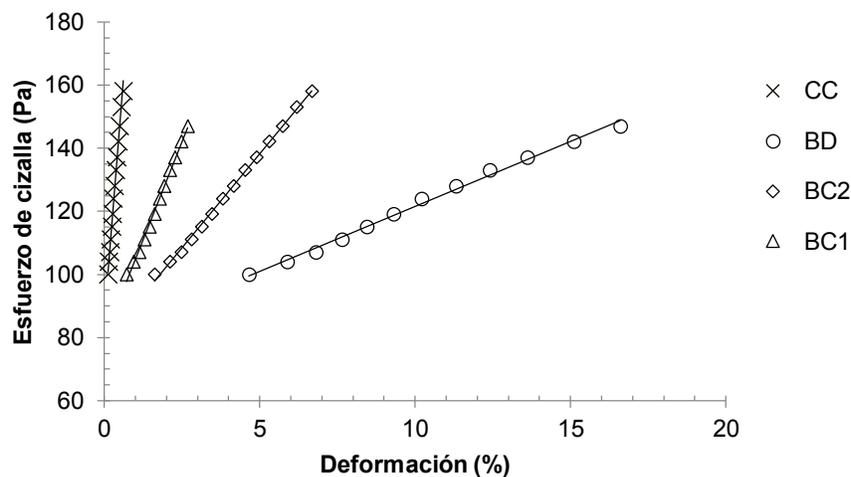


Figura 3.8 Esfuerzo de cizalla en función de la deformación.

Así mismo se realizó una regresión lineal obteniendo los valores reportados en el Cuadro 3.4, donde CC mostró la mayor pendiente o módulo elástico antes de fluir (mayor rigidez), atribuido a su composición, mientras que BC1 presentó un módulo elástico antes de fluir mayor que los demás betunes. Los resultados de esta prueba concuerdan con los resultados obtenidos en las pruebas bajo cizalla oscilatoria. En general se observa que no existe un alto coeficiente de variación entre réplicas.

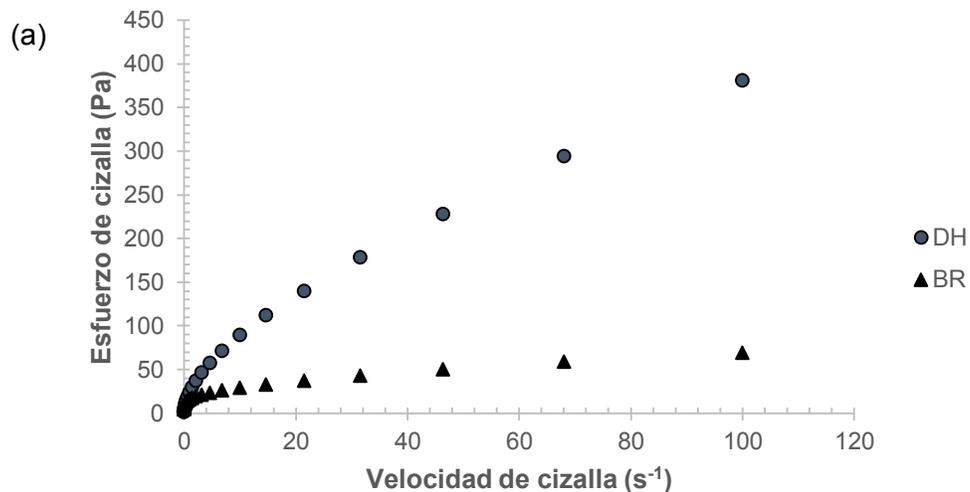
Cuadro 3.4 Valores del módulo elástico antes de fluir de los diferentes semisólidos comerciales.

Producto	Módulo elástico antes de fluir		
	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
BC1	26.3	2.61	0.09
BC2	12.7	1.86	0.14
BD	4.3	0.78	0.18
CC	124.9	0.67	0.02
DH BR	-----	-----	-----

Por la naturaleza fluida que presenta el brillo de repostería y el dulce de helado, los cuales se deforman rápidamente al aplicar un esfuerzo de cizalla, se realizó una curva de flujo de los productos BR y DH. En la Figura 3.9 (a) se presentan las curvas de flujo representativas para cada uno de los materiales, en donde el DH presentó mayores valores del esfuerzo de cizalla, un esfuerzo de cedencia y mayor dependencia del esfuerzo de cizalla con respecto a la velocidad de cizalla en comparación de BR, en la Figura 3.9 (b) donde se exhibe que ambos productos presentan un comportamiento fluidificante a la cizalla al igual se observa una disminución de la viscosidad con respecto a la velocidad de cizalla lo que implica un deterioro progresivo en la estructura interna del material

Estos productos se ajustaron al modelo reológico tipo Herschel- Bulkley, el cual tiene la siguiente ecuación (Ec. 1).

$$\sigma = \sigma_0 + k\dot{\gamma}^n \quad (3.1)$$



(b)

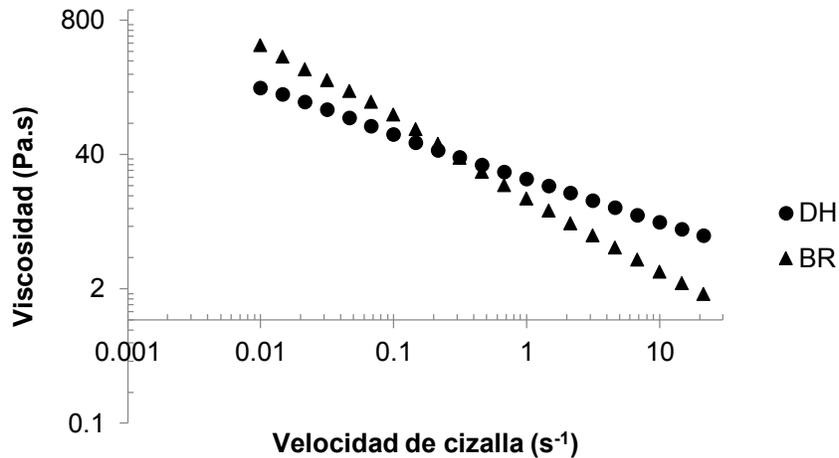


Figura 3.9 (a) Curva de flujo (ascenso), velocidad de cizalla en función del esfuerzo de cizalla. (b) Velocidad de cizalla en función de la viscosidad para DH y BR.

En el Cuadro 3.5 se muestran los resultados de esfuerzo de cedencia (σ_0) el cual se obtuvo por los datos obtenidos de las curvas de flujo, índice de consistencia (k) e índice de comportamiento al flujo (n) para ambos productos (promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación de 4 réplicas), donde el índice de comportamiento al flujo fue mayor para DH, es decir que es menos fluidificante a la cizalla. El esfuerzo de cedencia fue cercano para los dos productos, y semejantes a los obtenidos por el método gráfico (DH de 1 Pa y BR de 2 Pa). Sin embargo, el índice de consistencia de DH es mucho mayor que el del BR, atribuido igualmente a la diferencia de composición.

Cuadro 3.5 Valores obtenidos de la curva de flujo para BR y DH.

Producto		σ_0 (Pa)	k (Pa.s ⁿ)	N
DH	\bar{x}	1.2	23.3	0.62
	σ	0.30	1.9	0.02
	CV (%)	25.58	8.3	3.05
BR	\bar{x}	1.5	15.5	0.28
	σ	0.46	1.43	0.02
	CV (%)	30	9.3	6.4

3.3 Pruebas de Adhesividad

Para el análisis de la adhesividad de los productos de estudio fueron divididos en dos grupos: el primero para semisólidos de alta consistencia (betún de chocolate 1 (BC1), betún de chocolate 2 (BC2), betún para decorar (BD) y finalmente crema de cacao (CC)); y el segundo para los productos semisólidos de baja consistencia (brillo de repostería (BR) y dulce para helado (DH)).

3.3.1 Prueba de penetración-retirada

En la Figura 3.10 se presentan las curvas de fuerza en función del tiempo para los semisólidos de alta consistencia: BC1, BC2, BD y CC, en donde el producto con mayor consistencia y mayor área en la parte positiva del grafico es el CC seguido por BC1. Sin embargo, los productos BC2 y BD son semejantes en la zona positiva de la gráfica, pero la amplitud de la parte adhesiva es mayor para BD.

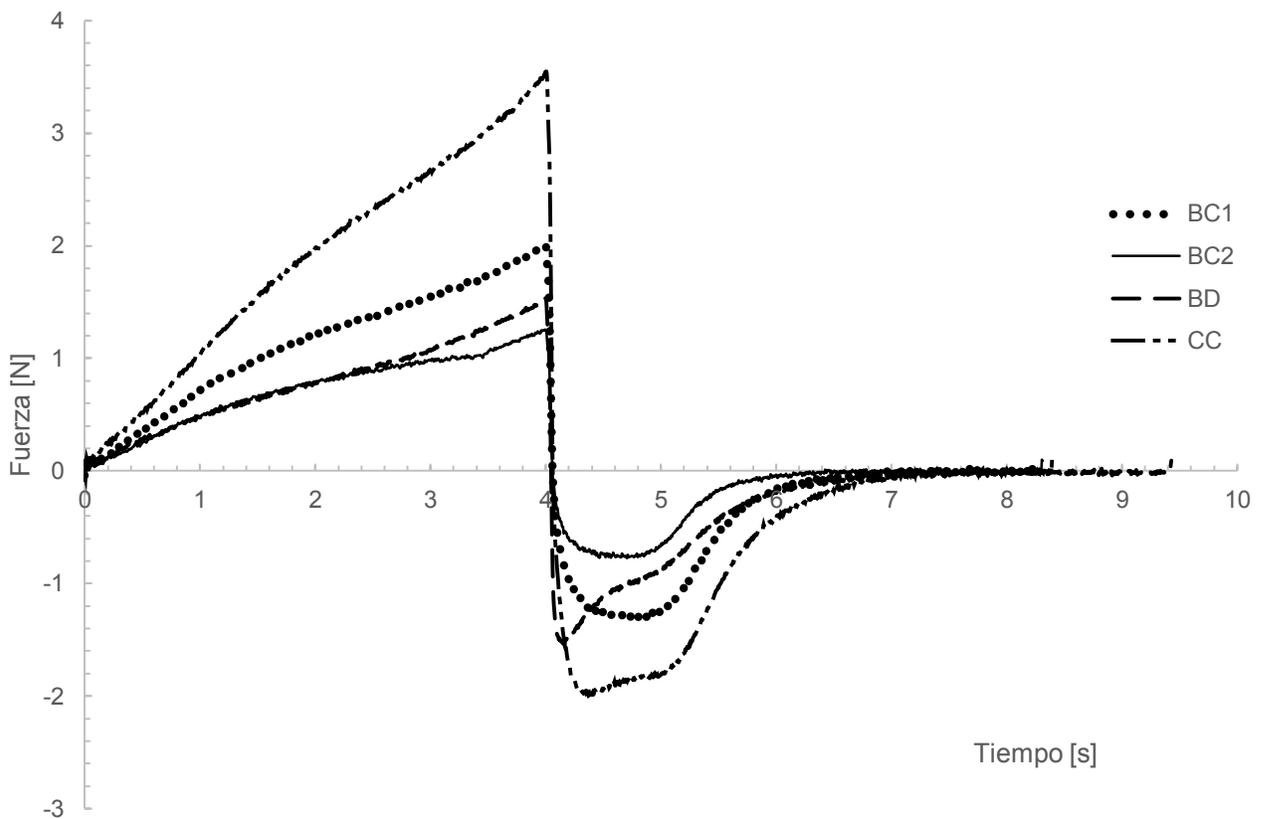


Figura 3.10 Prueba de penetración-retirada de productos sólidos.

En el Cuadro 3.6 se presentan los valores de los parámetros texturales para los semisólidos de alta consistencia, dichos valores son el promedio de 7 réplicas realizadas a cada uno de los diferentes productos mencionados anteriormente. Se obtuvieron coeficientes de variación fueron menores al 15 % a excepción del trabajo adhesivo y cohesivo en algunos casos. En donde se observa que la crema de cacao presenta la mayor consistencia, lo cual puede ser atribuido al alto contenido de azúcares (50 %) y de lípidos (33.3 %) (casi el doble de lípidos en comparación de BC1, BC2 y BD), por lo tanto se requiere un mayor trabajo de penetración. Por otra parte, la CC presentó la mayor adhesividad en comparación con los otros productos de estudio, esto puede ser debido al alto contenido de lípidos, los cuales son los responsables de impartir las características adhesivas.

También se percibe que predomina el trabajo cohesivo sobre el adhesivo, lo que indica que existen fuerzas de cohesión altas y por lo tanto se necesitará una fuerza mayor para vencer estas fuerzas que forman parte de la estructura de la crema de cacao. En cuanto a la untabilidad, presenta el valor menor lo que implica una mayor dificultad para ser aplicado sobre un producto de panificación.

Cuadro 3.6 Valores obtenidos del gráfico de una prueba por penetración-retirada para los productos semisólidos comerciales de alta consistencia.

Producto		Consistencia [N]	Trabajo de Penetración [N.s]	Fuerza adhesiva [N]	Trabajo Adhesivo [N.s]	Trabajo Cohesivo [N.s]	Adhesividad [N.s]	Estiramiento (mm)	Untabilidad [mm/N.s]
BC 1	\bar{x}	1.96	4.29	-1.25	-0.70	-0.96	-1.66	31.95	-19.34
	σ	0.07	0.39	0.08	0.21	0.15	0.11	1.29	1.94
	CV (%)	3.8	9	-6.8	-30.5	-15.5	-6.8	4	-10
BC 2	\bar{x}	1.25	2.82	-0.77	-0.40	-0.46	-0.86	27.35	-32.21
	σ	0.15	0.36	0.11	0.06	0.04	0.09	0.00	3.63
	CV (%)	12	12	-14	-14	-7.7	-10.6	0	-11.3
BD	\bar{x}	1.4	2.95	-1.35	-0.15	-1.46	-1.6	26.23	-16.38
	σ	0.12	0.10	0.15	0.03	0.06	0.05	3.00	1.83
	CV (%)	8.3	3.3	-11.4	-20.1	-4.1	-3.0	11.4	-11.20
CC	\bar{x}	3.66	7.68	-2.29	-1.03	-1.95	-2.97	32.32	-10.92
	σ	0.27	0.51	0.32	0.48	0.54	0.30	2.31	0.56
	CV (%)	0.22	0.42	0.26	0.39	0.44	0.24	1.89	0.45

En el caso de los betunes, el BC1 mostró valores más altos en la mayoría de los parámetros texturales en comparación con los otros dos betunes utilizados en esta experimentación (con excepción de la fuerza adhesiva y untabilidad). Los valores texturales más bajos fueron observados en BC2, excepto en el parámetro de untabilidad, ya que tiene menor consistencia, menor adhesividad y menor trabajo cohesivo; esto probablemente se debe a la formulación de cada producto, pues a pesar que BC1 y BC2 presentan valores semejantes en cuanto a la cantidad de carbohidratos (aproximadamente 63 %), existe una diferencia en cuanto a la cantidad de lípidos, ya que BC1 presenta 15.1 % y el betún de chocolate dos presenta 17.1 %, este contenido de lípidos faltante en BC1 pudo haber sido remplazado con un espesante como lo es el almidón de maíz (carbohidrato reportado en la etiqueta), proporcionando un producto con mayor consistencia y adhesividad. Lo mismo sucedió con el BD, ya que en este producto a pesar de tener un mayor porcentaje en lípidos (20 %), así como de carbohidratos (60 %) se reporta la adición de aditivos como almidones, proporcionando un aumento en las propiedades texturales como el trabajo cohesivo y la fuerza adhesiva.

En los diferentes betunes y en la crema de cacao predominó el trabajo cohesivo sobre el adhesivo y en el caso particular de BD fue casi 10 veces mayor el trabajo cohesivo sobre el adhesivo. Deduciendo través de los datos experimentales, que a mayor fuerza adhesiva presenta mayor consistencia y área cohesiva, por lo tanto presentará una menor facilidad para untar.

En cuanto a la untabilidad, el BC2 no indica adición de aditivos según lo reportado en la etiqueta, y por lo tanto es más untable en comparación de los demás productos lo que es de esperarse debido a que la adhesividad fue menor y el trabajo cohesivo bajo de magnitud muy cercano al trabajo adhesivo, por otra parte la mayor untabilidad es para BD ya que una de sus características es que tiende a solidificar rápidamente.

En lo que respecta a los semisólidos de baja consistencia como son el brillo para repostería (BR) y el dulce para helado (DH), en la Figura 3.11 se observa que en ambos productos existen fluctuaciones esto se debe a la baja consistencia que da

valores muy pequeños de fuerza y al ampliar el gráfico se percibe dichas fluctuaciones; también se puede distinguir que existen diferencias entre BR y DH, el dulce para helado presentó una mayor fuerza adhesiva y un mayor trabajo de penetración, al igual que en la parte adhesiva.

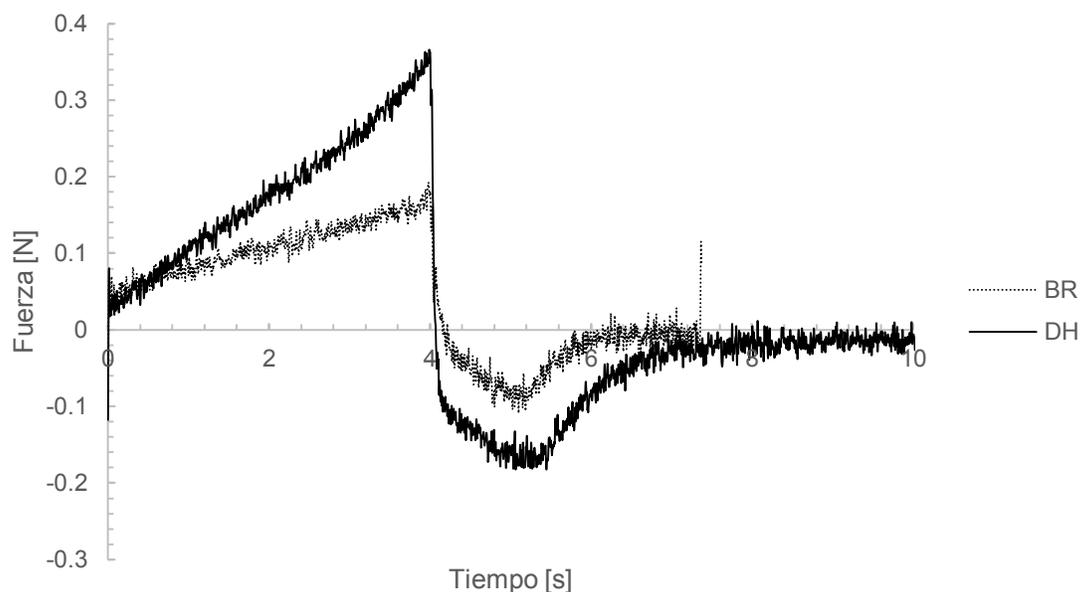


Figura 3.11 Prueba de penetración-retirada de productos semisólidos de baja consistencia.

En el Cuadro 3.7 se presentan los valores de los parámetros texturales para los semisólidos de baja consistencia en donde se observa que el coeficiente de variación fueron menores al 10 % proporcionando datos confiables.

Cuadro 3.7 Valores obtenidos del gráfico de una prueba por penetración-retirada para los productos semisólidos comerciales de baja consistencia.

Producto		Consistencia [N]	Fuerza adhesiva [N]	Trabajo de Penetración [N.s]	Trabajo Adhesivo [N.s]	Trabajo Cohesivo [N.s]	Adhesividad [N.s]	Estiramiento (mm)	Untabilidad [mm/N.s]
BR	\bar{x}	0.19	-0.11	0.414	-0.052	-0.041	-0.093	17.35	-187.14
	σ	0.006	0.008	0.022	0.004	0.004	0.001	0.001	2.543
	CV (%)	3.2	-6.9	5.2	-7.4	-9.5	-1.3	0.006	-1.35
DH	\bar{x}	0.34	-0.18	0.67	-0.12	-0.19	-0.30	38.11	-127.74
	σ	0.03	0.01	0.08	0.01	0.02	0.02	1.61	10.63
	CV (%)	10	-5.8	10.3	-4.7	-8.8	-5.4	4.2	-8.3

Se observa que DH presentó valores más altos en los parámetros texturales (excepto untabilidad), esto puede atribuirse al alto contenido de azúcar (70 %), así como a la presencia de ciertos aditivos como la carboximetilcelulosa y el almidón modificado de maíz, proporcionando una mayor consistencia y por lo tanto requiriendo un mayor trabajo de penetración.

Así mismo se tiene una mayor dificultad para untar en comparación de BR que solo está compuesto por agua, azúcar, glucosa y pectina. En ambos productos se percibe un predominio del trabajo cohesivo sobre el adhesivo, en donde el trabajo cohesivo que presenta el DH es casi el doble que el presentado por BR.

3.3.2 Prueba de contacto-retirada

En la Figura 3.12 se presentan las curvas representativas de la fuerza en función del tiempo para BC1, BC2, BD y CC, en donde se puede observar que el producto que presenta mayor fuerza adhesiva es el BD. Sin embargo, se exhibe que la CC presenta una mayor adhesividad en comparación con los otros productos.

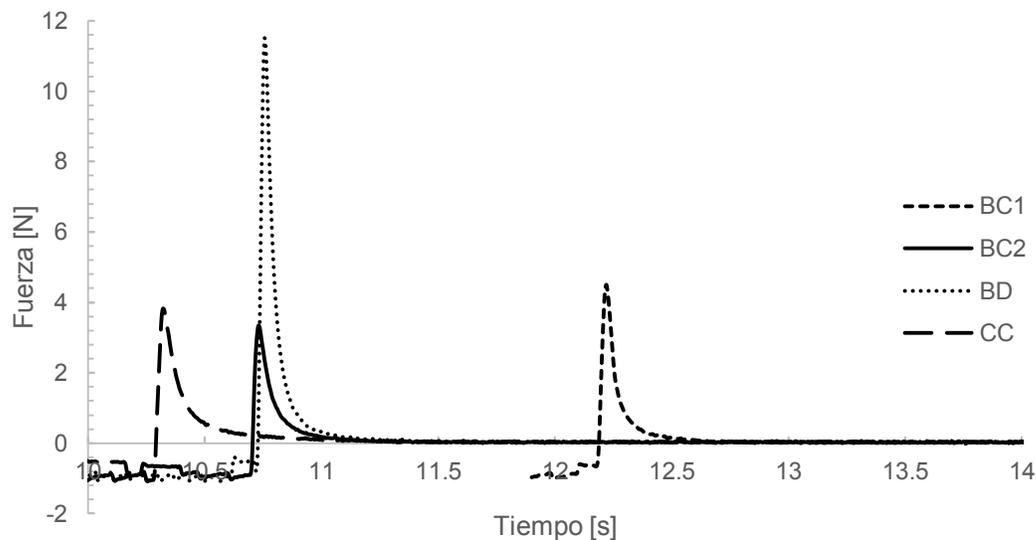


Figura 3.12 Prueba de contacto-retirada de productos sólidos.

En el Cuadro 3.8 se resumen los valores de los parámetros de los productos BC1, BC2, CC y BD, estos parámetros presentaron un coeficiente de variación próximos al 10 %, con excepción de la CC que presenta un valor del 12 % para el trabajo

cohesivo esto se puede atribuir a que no se tuvo un adecuado un control de la cantidad de muestra que es colocada en la placa del texturómetro. Se puede observar que los resultados del Cuadro 3.8 tienen la misma tendencia que los obtenidos por la prueba por penetración-retirada, con excepción de la CC y BD ya que los parámetros texturales mayores fueron para el BD, esto puede atribuirse a que el betún para decorar tiende a secarse con mayor facilidad y rapidez, por lo tanto tendrá una menor untabilidad; otro factor importante es el manipulación y la cantidad de la muestra al momento de ser colocado en la placa del texturómetro, se deben de tratar de cuidar dichos aspectos ya que pueden modificar los parámetros texturales.

Cuadro 3.8 Valores obtenidos del gráfico de una prueba por contacto-retirada para los productos semisólidos comerciales de alta consistencia.

Producto		Fuerza Adhesiva [N]	Trabajo Adhesivo [N.s]	Trabajo Cohesivo [N.s]	Adhesividad [N.s]	Estiramiento (mm)	Untabilidad [mm/N.s]
BC 1	\bar{x}	4.5	0.09	0.27	0.36	7.1	19.39
	σ	0.06	0.006	0.02	0.01	0.56	1.06
	CV (%)	1.3	6.4	5.8	3.07	7.9	5.5
BC 2	\bar{x}	3.33	0.02	0.27	0.31	6.35	20.6
	σ	0.01	0	0.03	0.02	0.15	1.1
	CV (%)	0.4	3.1	12.1	7.7	2.37	5.5
BD	\bar{x}	11.8	0.21	0.60	0.81	5.12	6.51
	σ	0.8	0.01	0.05	0.05	0.3	5.5
	CV (%)	6.8	4	7.8	6.7	5.7	0.8
CC	\bar{x}	3.5	0.10	0.50	0.60	12.5	22.4
	σ	0.3	0.0	0.1	0.1	1.5	2.4
	CV (%)	9.3	7.7	12	11.7	11.6	10.8

En el caso para los productos semisólidos de baja consistencia, como son el brillo de repostería (BR) y el dulce de helado (DH), se observa en la Figura 3.13, que DH presenta una mayor fuerza adhesiva al igual que una mayor fuerza adhesiva y adhesividad en comparación con BR.

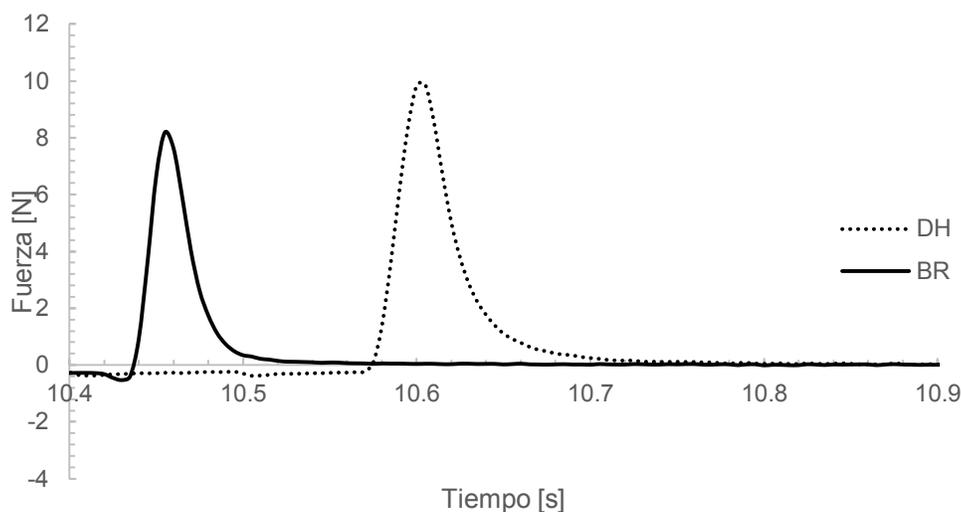


Figura 3.13 Prueba de contacto-retirada de productos semisólidos con baja consistencia.

En el Cuadro 3.9 se presenta el promedio de 7 réplicas de los parámetros texturales para BR y DH en donde se observa que se tiene la misma tendencia de los valores obtenidos por la prueba de penetración- retirada, obteniendo parámetros texturales mayores para el producto DH con excepción de la untabilidad ya que el brillo de repostería presenta una mayor facilidad para untar lo cual es recomendable debido a la aplicación que este tiene sobre los productos de panificación.

Cuadro 3.9 Valores obtenidos del gráfico de una prueba por contacto-retirada para los productos semisólidos comerciales.

Producto		Fuerza máxima [N]	Trabajo Adhesivo [N.s]	Trabajo Cohesivo [N.s]	Adhesividad [N.s]	Estiramiento (mm)	Untabilidad [mm/N.s]
BR	\bar{x}	7.62	0.09	0.16	0.24	2.34	9.9
	σ	0.7	0.01	0.01	0	0.14	0.77
	CV (%)	9.1	9.5	7.6	1.9	6.0	7.8
DH	\bar{x}	10	0.18	0.29	0.42	5.27	12.6
	σ	0.5	0.01	0.03	0.01	0.10	0.35
	CV (%)	5.4	7.5	8.9	2.9	1.8	2.8

CONCLUSIONES

Los materiales estudiados presentan propiedades viscoelásticas donde la zona de viscoelasticidad lineal para los productos BC1, BC2, BD y CC se determinó a una deformación de 0.075%, en el DH se estableció en 0.2% y para BR la deformación seleccionada fue de 0.002%.

En los productos BC1, BC2, BD, BR y CC predominó el comportamiento tipo sólido viscoelástico sobre el fluido viscoelástico, teniendo valores de G' entre 441750 y 80 Pa, y solo en el DH predominó el comportamiento fluido viscoelástico con un valor de G' de 51 Pa. Este tipo de comportamiento también fue comprobado con el valor obtenido de $\tan \delta$ para los productos BC1, BC2, BD, BR y CC los valores fueron menores a la unidad entre 0.65 y 0.25, por otra parte para DH se obtuvo un valor mayor a la unidad (2).

El cálculo de esfuerzo de cedencia por el método gráfico el BC1 exhibió una mayor dificultad para que empezara a fluir seguido de BC2, BD, CC, BR y DH.

En la CC se obtuvo mayor valor del módulo elástico antes de fluir y el mayor módulo almacenamiento por lo tanto representa el producto con mayor rigidez.

El BR y DH tienen un comportamiento no newtoniano tipo Herschel-Bulkley con un esfuerzo de cedencia entre 1.2 y 1.5 Pa.

En cuanto a las propiedades texturales, en la prueba por penetración-retirada, la CC presentó mayores parámetros con excepción de la untabilidad, demostrando que el contenido de lípidos y/o azúcares, la estabilidad y homogeneidad de los sistemas afecta a las características de los alimentos, ya que la proporción de algún componente modifica las propiedades mecánicas y sensoriales que pueden resultar no ser tan agradables al consumidor. Por otra parte, en la prueba por contacto retirada el producto que presentó valores mayores en los parámetros texturales fue el BD y los menores fueron para BR en ambas pruebas. Los resultados en ambas pruebas son diferentes para los productos con apariencia sólida, esto se puede atribuir a que en la prueba por contacto-retirada se fuerza el producto al contacto en un determinado tiempo (posible respuesta del consumidor) y en la prueba por

penetración-retirada se establece la distancia de penetración (brinda la respuesta del material para el control e innovación de productos).

Los resultados obtenidos en la prueba por penetración-retirada presentan una tendencia similar a los obtenidos en la prueba bajo cizalla oscilatoria ya que el módulo de almacenamiento para la crema de cacao fue el mayor al igual que la adhesividad y consistencia obtenida en la prueba por penetración-retirada, lo mismo sucede con los demás productos de estudio.

REFERENCIAS

- Adhikari, B., Howes, T., Bhandari, B.R., Troung, V. 2001. Stickiness in foods: A review of mechanisms and test methods. *International Journal of Food Properties*, 4, 1-33.
- Asterios, P. 2015. Non-similar Blasius and Sakiadis flow of a non-Newtonian Carreau fluid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, in press <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2015.03.021>
- Badui, S. 1995. *Química de los alimentos*. 3ª ed. Alhambra Mexicana. D.F., México
- Barnes, H.A., Hutton, J.F., Walters, K. 1989. *An Introduction to Rheology*. Elsevier Science Publishers. Amsterdam, Holanda.
- Bello, J. 2000. *Ciencia bromatológica. Principios generales de los alimentos*. Díaz de Santos. Madrid, España.
- Casas, N. 2014. Propiedades texturales en alimentos. Apuntes del Taller Multidisciplinario de Reología y Textura. LAPRYFAL, FESC.UNAM.
- Citerne, P.G., Carreau, J.P., Moan, M. 2001. Rheological properties of peanut butter. *Rheologica Acta*, 40, 86-96.
- Clark, A., Ross-Murphy S.B., 1987. Structural and mechanical properties of biopolymer gels. In *Advances in polymer science* (83 Biopolymers), Clark A. H., Kamide K., Ross-Murphy S. B., Saito M. (Eds.) Springer-Verlag, Heidelberg, Germany.
- Drewnowski, A. 1987. Fats and food texture. Sensory and hedonic evaluations. In *Food Texture, Instrumentation and Sensory Measurement*, H.R. Moskowitz. Marcel Dekker, New York, USA.
- Doublier, J.L., Duran, S. 2008. Rheological characterization of semi-solid dairy systems. *Food Chemistry*, 108, 1169-1175.

- Downton, G. E., Flores-Luna, J.L., King, C. J. 1982. Mechanisms of stickiness in hygroscopic, amorphous powders. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 21, 447-451.
- Fennema, O., Parkin, L., Damodaran, S. 2010. *Química de los alimentos*. 3ª ed. Acribia. Madrid, España.
- Gunasekaran, S., Mehmet. M. 2000. Dynamic Oscillatory shear testing foods-selected applications. *International Journal of Food Science Technology*, 11, 115-127.
- Goodwin, J., Hughes, R. 2000. *Rheology for Chemists an: Introduction*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- Hernán, D., Méndez, M. 2014. *Presentación y decoración de productos de repostería y pastelería*. HOTR0109. IC Editorial. D.F., México.
- Holm, K., Wendin, K., Hermansson, A. 2009. Sweetness and texture perceptions in structured gelatin gels with embedded sugar rich domains. *Food Hydrocolloids*, 23, 2388-2393.
- Ibarrola, E. 2014. Introducción a los fluidos no newtonianos. [en línea]. [Fecha de consulta: 14 Septiembre 2014]. Disponible en: <http://www.efn.unc.edu.ar/departamentos/aero/Asignaturas/MecFluid/material/introducci%C3%B3n%20no%20newtonianos.pdf>
- Ibarz, A., Castell, E., Barbosa, G., 2005. Newtonian and Non-Newtonian Flow. In *Food Engineering*. Barbosa-Cánovas G.V. (Ed.). Encyclopedia of Life Support Systems. UNESCO. Paris, France.
- Kealy, T. 2006. Application of liquid and solid rheological technologies to the textural characterization of semi-solid foods. *Food Research International*, 39, 265-279.
- Kilcast, D., Roberts C. 1997. Perception and measurement of stickiness in sugar-rich foods, *Journal of food Engineering*, 6, 51-81.

Lai, C. 1987. Sticky problems in food packaging. In *Food Product- Packaging*, Technomic publishing, Michigan, USA.

Liu, H., Xue, M., Shi, D. G. 2008. Comparison of full-fat and low-fat cheese analogues with or without pectin gel through microstructure, texture, rheology, thermal and sensory analysis. *International Journal of Food Science Technology*, 43, 1581-1592.

Marshall, R. 1990a. Composition, structure, rheological properties and sensory texture of processed cheese analogues. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 50, 237-52.

Marshall, R. 1990b. Combined instrumental and sensory measurement of the role of fat in food texture. *Food Quality and Preference*, 2, 117-124.

Martínez, D., Álvarez, S., Charo, A., Alvarado, E., Vázquez, J. 2007. The cooling rate effect on the microstructure and rheological properties of blends of cocoa butter with vegetable oils. *Food Research International*. 40, 47-62.

Morrison, I., Ross, S. 2002. *Colloidal Dispersions: Suspensions, Emulsions and Foams*. Ed. Wiley –Interscience, New York, USA.

Mukhopadhyay, S., Ranjan De, P., Bhattacharyya, K., Layek, G. 2013. Casson fluid flow over an unsteady stretching surface. *Shams Engineering Journal*, 4, 933-938.

Navarro, I. 2012. *Decoración de los productos de panadería y bollería* (UF0294). IC Editorial. Malaga, España.

Primo, P. 1997. *Química de los alimentos*. Síntesis. Madrid, España.

Puratos. 2014. Gama de productos para pastelería. Brillos. [en línea]. [Fecha de consulta: 12 Octubre 2014]. Disponible en: <http://www.puratos.com.pe/es/Products-recipes/our-product-range/Pasteleria/Brillo-Neutro.jsp>

Quintero, R., Toro de Serrano, A. 2014. Como hacer cubiertas y decoraciones. Club de repostería. [en línea]. [Fecha de consulta: 12 Octubre 2014]. Disponible en: <http://clubdereposteria.com/category/cubiertas/>

Rao, M. 1999. *Rheology of fluid and semisolid foods. Principles and applications*. Aspen Publishers, Inc., Galthersburg, Maryland.

Roos, Y., Karel, M. 1993. Effects of glass transition on dynamic phenomena in sugar containing food systems. In *Glassy States in Foods* Blanshard, J.M.V., Lillford, P.(Eds.), Nottingham University Press, England, UK.

Rosenthal, A. 2001. *Textura de los alimentos. Medida y percepción*. Acribia. Zaragoza, España.

Sánchez, A., Acosta, L. 2012. *Elaboraciones y presentaciones de productos hechos a base de masas y pastas*. IC Editorial. D.F., México.

Sherman, P. 1977. Sensory properties of food which flow. In *Sensory Properties of Foods*. Applied Science Publishers, London.

Sevim. K., Çiftçi, D., Talip, K., Sadettin, K. 2008. Colloidal stability and rheological properties of sesame paste. *Journal of Food Engineering*, 87, 428-435.

Steffe, J.F., 1996. *Rheological methods in food process engineering*. 2nd ed. Freeman Press. Michigan, USA.

Sochi, T., Blunt, M. 2008. Pore-scale network modeling of Ellis and Herschel-Bulkley fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 60, 105-124.

Tanner, R. 1988. *Engineering Rheology*. Clarendon Press. Oxford. USA.

Tárreaga, A., Durán, L., Costell, E. 2004. Flow Behavior of semi-solid dairy desserts. Effect of temperature. *International Dairy Journal*.14, 345-353.

Tecante, A. 2005. Viscoelasticity. In *Food Engineering*. Barbosa-Cánovas G.V. (Ed.). Encyclopedia of Life Support Systems. UNESCO. Paris, France.

Thaiudom, S., Khantarat, K. 2011. Stability and rheological properties of fat-reduced mayonnaises by using sodium octenyl succinate starch as fat replacer. *Procedia Food Science*, 1, 315-321.

Tunick, M., Mackey, L., Smith, P., Holsinger, V. 1991. Effects of composition and storage on the texture of Mozzarella cheese. *Nederlands melk en Zuivel Tijdschrift*, 45,117–125.

Van Vliet, T., 2013. *Rheology and fracture mechanics of foods*. CRC Press. Boca Raton, USA.

Watt, B., Merrill, A. 1975. *Nutritional composition of foods*, Government Printing Office. Washington, USA.

Wijk, R., Van Germet, J., Terpstra, M., Wilkinson, C. 2003. Texture of semisolids; sensory and instrumental measurements on vanilla custard desserts. *Food Quality and Preference*, 14, 305-317.

Wilson, J., Bufo, A. 2003. *Física*. 5ª ed. Prentice Hall. México.

Wong, D. 1995. *Química de los alimentos mecanismos y teoría*. Acribia. Zaragoza, España.