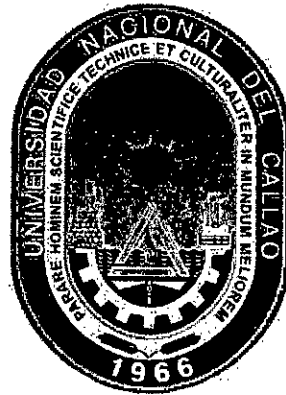


UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA PESQUERA Y DE
ALIMENTOS
UNIDAD DE INVESTIGACION



INFORME FINAL DEL TEXTO
TEXTO: REOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA
DE ALIMENTOS”

AUTOR: David Vivanco Pezantes

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'David Vivanco Pezantes', is located to the right of the author's name.

(Resolución de aprobación N° 302-2017-R)

CALLAO - 2019

A handwritten mark or signature, possibly a stylized 'C' or a similar symbol, located in the lower right quadrant of the page.

DEDICATORIA

A todas aquellas personas que dejaron una luz en el fondo del túnel de la investigación, lo que hace posible que fluya el conocimiento

AGRADECIMIENTO

A mis profesores de la **Universidad Politécnica de Valencia-España y Universidad Estatal de Campinas, Sao Paulo-Brasil**, por los conocimientos que me alcanzaron y las dudas que lograron despejar de esta disciplina muy complicada pero a la vez muy hermosa de la Reología de Alimentos.

A la Universidad Nacional del Callao, por el financiamiento recibido para realizar este proyecto de investigación.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a final flourish, located in the lower right quadrant of the page.

	Pag.
ÍNDICE	
Dedicatoria	i
Agradecimiento	ii
I INDICE	1
Índice de Figuras	3
Índice de Gráficos	4
Índice de tablas	5
II PROLOGO	6
III INTRODUCCIÓN	7
IV CUERPO DEL TEXTO O CONTENIDO	9
CAPITULO I. Introducción	9
CAPITULO II. Clasificación reológica de los alimentos	10
CAPITULO III. Medidas sensoriales e instrumentales de la textura de los alimentos	13
3.1 Medidas sensoriales	13
3.2 Análisis de textura	14
CAPITULO IV. Fluidos newtonianos y no newtonianos	18
4.1 Fluidos newtonianos	18
4.1.1 Concepto de viscosidad	18
4.2 Fluidos No Newtonianos	23
4.2.1 Flujos independiente del tiempo	27
4.2.2 Flujo dependiente del tiempo	28
4.3 Lista de Problemas	31
CAPITULO V. Alimentos viscoelásticos	38
5.1 Introducción	38

5.2 Propiedades fundamentales	38
5.2.1 Modulo de Young	39
5.2.2 Modulo de Cizalla o de Corte	41
5.2.3 Relación de Poisson	42
5.2.4 Modulo de Volumen	43
5.2.5 Relaciones matemáticas entre estas propiedades	44
5.3 Viscoelasticidad	44
5.4 Modelos viscoelásticos	45
5.4.1 Modelo de Kelvin	46
5.4.2 Modelo de Maxwell	46
CAPITULO VI. Modelos reológicos	48
6.1 Ejemplo aplicativo para fluido No Newtoniano	50
CAPITULO VII. Medidas de parámetros reológicos	54
7.1 Métodos de medidas	54
7.1.1 Prueba de Estrés de relajación	55
7.1.2 Prueba a una tasa de deformación constante	56
7.1.3 Prueba a Estrés Constante	56
CAPITULO VIII. Experimentos de laboratorio	58
8.1 Usando viscosímetro de Brookfield y miel industrializada	58
8.2 Resultado del experimento	61
V REFERENCIALES	65
VI APENDICE	68
VII ANEXO	71



INDICE DE FIGURAS

		Pag.
Figura 3.1	Análisis de perfil de textura	15
Figura 4.1	Análisis de la aplicación de un esfuerzo cortante para obtener una velocidad de corte	18
Figura 4.2	Reograma de los fluidos newtonianos	20
Figura 4.4	Representación de curvas de Flujo para diferentes fluidos	24
Figura 4.5	Clasificación de los fluidos No Newtonianos	25
Figura 4.6	Viscosidad aparente versus velocidad de corte para fluidos pseudoplásticos	27
Figura 4.7	Viscosidad aparente versus velocidad de corte para fluidos dilatantes	28
Figura 4.8	Comportamiento tixotrópico	29
Figura 4.9	Comportamiento Reopéxico	29
Figura 5.1	Relaciones de esfuerzo y deformación en un sólido	39
Figura 5.2	Modelo simple tipo resorte o muelle para el sólido ideal	40
Figura 5.3	Modelo simple de corte o cizalla	42
Figura 5.4	Cuerpo comprimido y deformaciones observadas	43
Figura 5.5	Modelo de Kelvin generalizado	46
Figura 5.6	Modelo de Maxwell generalizado	47
Figura 8.1	Viscosímetro concéntrico de Brookfield tipo RVDV-E	58
Figura 8.2	Husillos o Splindes para el viscosímetro concéntrico de Brookfield tipo RVDV-E	59



INDICE DE GRAFICOS

Grafico 4.1	Reograma del esfuerzo cortante versus velocidad de corte	22
Grafico 4.2	Ajuste lineal de los datos experimentales	23
Grafico 4.3	Reograma de la Miel, Mayonesa y Mantequilla de maní	31
Grafico 6.1	Reograma para el zumo de naranja a 65°Brix para diferentes temperaturas	51
Grafico 6.2	Comportamiento del coeficiente de consistencia en función de la temperatura del zumo de naranja a 65°Brix	53
Grafico 8.1	Viscosidad absoluta versus temperatura de la miel industrializada	62
Grafico 8.2	Variación de la viscosidad de la miel industrial versus la temperatura y ajuste matemático propuesto en este proyecto-2019	64



INDICE DE TABLAS

	Pag.
Tabla 3.1 Parámetros y definición sensorial del análisis de perfil de textura	15
Tabla 4.1 Datos de reograma de una sustancia – esfuerzo vs velocidad de corte	22
Tabla 4.2 Valores de los parámetros reológicos de algunos alimentos	26
Tabla 4.3 Valores de parámetros reológicos de algunos alimentos	30
Tabla 5.1 Valores del modulo de Young	41
Tabla 6.1 Valores de esfuerzo cortante y velocidad de corte de zumo de naranja a 65°Brix para diferentes temperaturas	51
Tabla 6.2 Valores calculados del esfuerzo cortante para el zumo de naranja a 65°Brix	52
Tabla 6.3 Valores de n y K en función a la temperatura del zumo de naranja a 65°Brix	52
Tabla 8.1 Valores de la viscosidad versus la temperatura de la miel industrializada	61
Tabla 8.2 Ecuaciones matemáticas usadas para modelar el comportamiento de la viscosidad absoluta de la miel industrializada versus la temperatura	62
Tabla 8.3 Ecuaciones de ajuste para el comportamiento de la miel industrializada en función a la temperatura	63

II. PROLOGO

A nivel conceptual la Reología aplicada a la industria de alimentos, se constituye como herramienta fundamental en el control y diseño de los procesos de producción de los alimentos, donde la naturaleza del alimento es sometida a esfuerzos de deformación y esta pueda ser medida a través de los diversos equipos existentes en el mercado, desde simples viscosímetros de vidrio hasta sofisticados reómetros y texturómetros.

Se medirá en consecuencia el tiempo de fluencia, el tiempo de deformación, constantes e índices de flujo, viscosidades absolutas o dinámicas y viscosidades cinemáticas, se graficaran respuestas del esfuerzo cortante y la velocidad de corte denominados curvas de flujo, los alimentos de naturaleza visco-elástica se medirán en reómetros y texturómetros y los alimentos sólidos solamente serán estudiados en texturómetros y sometidos a esfuerzos de rotura o que tienden a ésta.

Los equipos existentes en el mercado son variados y siempre se busca aquellos que han trascendido en el tiempo por la calidad de los mismos y competencia a nivel internacional, tal es así, que en los diferentes papers de trabajos científicos en el área de reología casi siempre son nombrados.

En este proyecto de elaboración de un texto sobre reología aplicada a la Ingeniería de Alimentos, los capítulos guardan una secuencia de los aspectos teóricos hasta una exposición de las correlaciones matemáticas de cálculo en el proceso de las determinaciones reológicas de los alimentos, se realizó una abstracción matemática necesaria en el ámbito de la Ingeniería.

III. INTRODUCCIÓN

El objetivo fue presentar un texto sobre aspectos prácticos y de aplicación en la ingeniería de alimentos, como una de las técnicas más usadas por la industria de alimentos, ilustrado con algunos ejemplos y simulando los ejercicios resueltos con el software comercial de Excel de la Microsoft corporación vs.7. que se encuentra en todas las PC de uso diario. Se procuró en algunos ejercicios, presentar paso a paso, todas las etapas de resolución de los ejemplos usando el programa ya mencionado, y se trato de interpretar los resultados desde el punto de vista práctico e ingenieril. En el área de la Ingeniería de Alimentos, esta ciencia o disciplina, juega un papel muy importante en los procesos tecnológicos y/o de fabricación de alimentos, desde los controles primarios hasta la última etapa de fabricación, los análisis reológicos implican, control de proceso y calidad del producto y los estudios preliminares reológicos permiten diseñar adecuadamente los procesos de Ingeniería y el desarrollo de productos. El uso de metodologías de cálculo está siendo aplicado por las variadas actividades científicas e industriales en el control de procesos y diseño de los equipos que resulta en la reducción de costos y del trabajo exploratorio mediante procesos de simulación.

El capítulo 1 y 2, trata de los conceptos preliminares de la Reología de alimentos y su clasificación. El capítulo 3, aborda básicamente sobre las medidas sensoriales e instrumentales que se usan para determinar aspectos de textura en los alimentos. El capítulo 4, describe las diferencias de los fluidos newtonianos y no newtonianos. En el capítulo 5, se describen a los alimentos viscos elásticos. En el capítulo 6 y 7, se describen los modelos reológicos y las medidas de los parámetros reológicos. En el capítulo 8, se presenta el caso de un análisis de un alimento y se modeliza el comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura.



IV CUERPO DEL TEXTO O CONTENIDO

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La Reología es la ciencia que estudia la deformación y flujo de la materia, como tal, en alimentos se le aplica a todos los alimentos líquidos alimenticios semi-sólidos y alimentos sólidos. Todos estos alimentos deben responder a un esfuerzo normal o tangencial observándose un grado de deformación o flujo. La importancia de la aplicación de ésta técnica va de la mano con la tecnología y el procesado de alimentos, porque es necesario:

1. Dimensionar adecuadamente la cantidad de energía para impulsar un determinado a través de un sistema de tuberías por el cual el fluido deberá transportarse con una cierta velocidad y caudal;
2. Dimensionar adecuadamente el tipo de equipamiento industrial, esto es, banco de tubos, instalaciones de bombeo, mezcladores, tipos de intercambiadores de calor, etc;
3. En la formulación de un alimento, la influencia de un ingrediente sobre el comportamiento global del producto;
4. Controlar el proceso desde el punto de vista de los fenómenos de transporte de cantidad de movimiento, calor y masa;
5. Controlar la calidad de proceso y calidad del producto;
6. Conocer a través de un reograma o de un perfil de análisis de textura al alimento objeto del proceso de fabricación;
7. Estudiar a través de las referencias bibliográficas el comportamiento reológico de la sustancia problema y con esos datos simular el comportamiento en el sistema del procesado o fabricación.



Es decir, el estudio del comportamiento reológico de la materia contribuye al conocimiento de su estructura, el diseño industrial y control de los procesos y del acabado y aceptación del producto.

A handwritten signature or mark, possibly initials, located on the right side of the page. It consists of a large, stylized letter 'D' with a vertical line through it and some additional scribbles.

CAPITULO II

CLASIFICACIÓN REOLÓGICA DE LOS ALIMENTOS

Las propiedades reológicas de los alimentos varían ampliamente, desde fluidos alimenticios en estado líquido, como el agua, aceites comestibles y bebidas alcohólicas, alimentos visco-elásticos como purés y cremas de sopas a alimentos sólidos galletas horneadas o queso de tipo parmesano, estos últimos deben ser fracturados o quebrados para ser consumidos.

La selección de una técnica instrumental para la determinación de las propiedades reológicas del alimento dependerá en gran medida de las propiedades de éste. Para líquidos diferentes técnicas ha sido empleadas, desde viscosímetros capilares hasta viscosímetros rotacionales; el uso de reómetros para el estudio reológico de alimentos visco-elásticos y de texturómetros para alimentos sólidos. También es importante la referencia bibliográfica que da la información de los parámetros utilizados usando determinados equipos de investigación (Rojas & Marconi, 2019).

Básicamente la Reología es el estudio de la relación entre fuerzas externas sobre el material y consecuentemente la deformación de éste con el tiempo. Las unidades fundamentales empleadas de cálculo son la fuerza por unidad de área (esfuerzo, usualmente expresado en $Pa \equiv N \cdot m^{-2}$) y la deformación en medidas de longitud.

De acuerdo a sus propiedades reológicas a los alimentos pueden clasificarse en materiales elásticos y viscosos. Así mismo muchos alimentos reaccionan sobre el esfuerzo o tensión parcialmente con una contribución viscosa y parcialmente elástica, por lo que se clasifican como alimentos visco elástico.



El tiempo que dura la aplicación del esfuerzo o tensión sobre el material juega un papel muy importante, que puede resultar en un comportamiento de equilibrio como también de un comportamiento de no equilibrio, por lo que los alimentos también puede reológicamente clasificarse con comportamiento en equilibrio y comportamiento de no equilibrio, observándose esta relación en un reograma, es decir, observando los datos del esfuerzo cortante (Shear stress) versus la velocidad de corte (Shear rate)

Cuando se observa una relación lineal entre esfuerzo cortante versus la velocidad de corte, los fluidos son denominados de fluidos newtonianos, la viscosidad es determinada por la pendiente de la recta y se trata de un fluido que es independiente de la velocidad de corte. Ejemplos de fluidos newtonianos son: agua, soluciones azucaradas, leche pasteurizada, alcohol, soluciones diluidas de partículas esféricas (Alexander & otros, 2016).

Para los fluidos No newtonianos, la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte es no lineal. La viscosidad varia con la variación de la velocidad de corte, para valores particulares de la velocidad de corte, la viscosidad es denominada viscosidad aparente. Cuando la viscosidad aparente decrece cuando aumenta los valores de la velocidad de corte, el fluido es denominado "fluido adelgazante", o también denominado pseudoplastico; Y si la viscosidad aparente aumenta, entonces el fluido es denominado "fluido engrosante" o también dilatante. Algunos productos alimenticios presentan comportamiento pseudoplásticos como la leche concentrada, soluciones de macromoléculas concentradas como las gomas xanthan y guar y diferentes jugos de frutas. En el caso de fluidos dilatantes, se tiene ejemplos de suspensiones concentradas de almidón pero siempre a altas velocidades de corte (Steffe & Daubert, 2013).



Muchos alimentos como la margarina, mantequilla, salsa de tomate, compota de manzana, suero de leche, precisan de un esfuerzo inicial para fluir, y partir de ese punto, existen diferentes comportamientos, observándose fluidos de comportamiento plástico, adelgazante y engrosante. Los plásticos son denominados de fluidos de "Bingham" para los adelgazantes son denominados de "Hershel & Buckley", (Steffe & Daubert, 2013).



CAPITULO III

MEDIDAS SENSORIALES E INSTRUMENTALES DE LA TEXTURA DE LOS ALIMENTOS

3.1 Medidas sensoriales

Antiguamente y hasta la actualidad la evaluación sensorial era concluyente para definir cualitativamente la calidad de un producto en relación a su textura. Aspectos sensoriales como la rigidez, el grado de masticación y la tenacidad que se presentan al interior de la boca en un proceso de evaluación sensorial son muy complejos, es muy difícil que un equipo de laboratorio evalúe la interacción entre la cavidad bucal y la lengua, entre los dientes y la lengua, el comportamiento de parámetros de textura que se dan simultáneamente con las señales auditivas y el grado de viscosidad de la saliva en todo ese proceso. Por lo que los datos obtenidos entre las evaluaciones sensoriales y las pruebas mecánicas realizadas con equipos específicos no son concluyentes (Guo & Campanela, 2017).

No existe una prueba mecánica que pueda reproducir las percepciones humanas elaboradas en el cerebro en relación a la textura de un alimento, la respuesta es inmediata, si el producto es masticable o no.

Lo que realizan los científicos en el análisis de la mecánica de los materiales, es observar los procesos generales que ocurren en el interior de la cavidad bucal mientras se come un alimento, e intentan simplificar este proceso reduciéndolos a una serie de propiedades individuales y definibles del material, es inevitable algunos factores de confusión como la forma geométrica, la velocidad o la temperatura (Augusto & otros, 2018).



Esta simplificación ha permitido al mundo científico la facilidad de comunicación en la investigación, llevar los procesos texturales tan complejo del alimento a eventos simples que sean susceptibles de experimentación y medición.

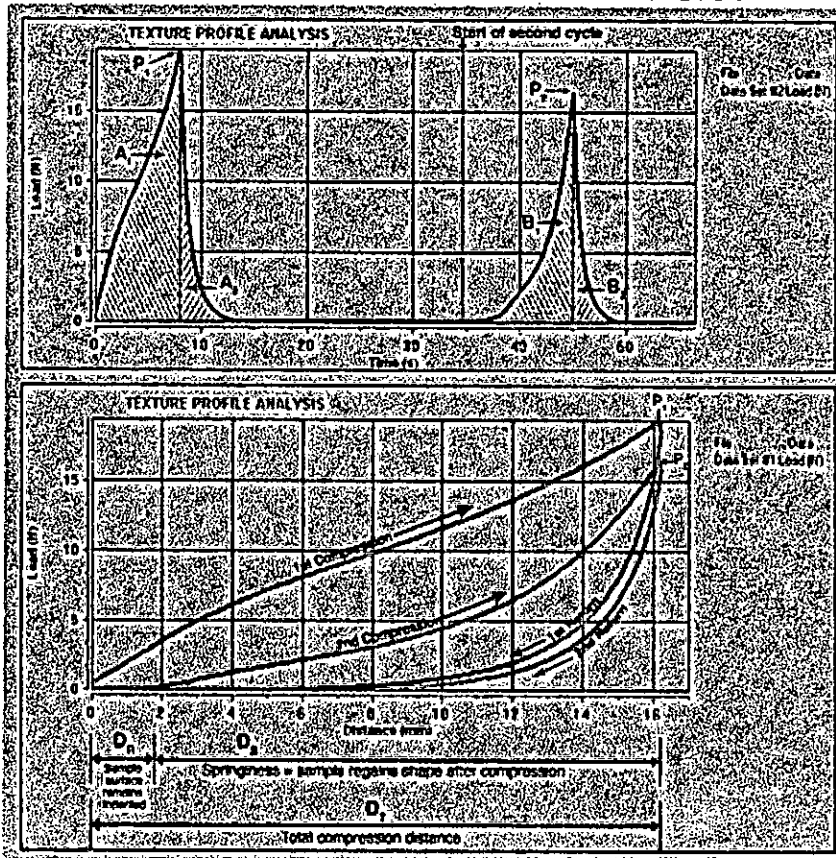
3.2 Análisis de textura

El análisis de textura se refiere principalmente a la medición de las propiedades mecánicas del producto, a menudo en un producto alimenticio, ya que se relaciona con sus propiedades sensoriales detectadas por los seres humanos. Cincuenta años de investigación sobre la textura han desarrollado un conjunto de definiciones que relacionan las propiedades sensoriales de un producto con las propiedades instrumentales que pueden calcularse a partir de los resultados de una prueba de análisis de perfil de textura de dos ciclos. Los analizadores de textura realizan esta prueba aplicando fuerzas controladas al producto y registrando su respuesta en forma de fuerza, deformación y tiempo (Rehman & otros, 2018).

Estas Figuras (Fig. 3.1), muestran dos maneras de ver los datos de una prueba de análisis de perfil de textura de 2 ciclos. Las figuras de fuerza vs tiempo muestran claramente el pico de fuerza resultante de cada ciclo de compresión, mientras que las figuras de fuerza vs distancia muestran mejor la respuesta de la muestra a la aplicación y la eliminación de la deformación. (Brookfield, 2017).



FIGURA 3.1
ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA



Fuente: Brookfield (2017)

En la siguiente tabla 3.1, se presenta las definiciones de los parámetros usados en el análisis de perfil de textura para los diferentes equipos que se ofertan en el mercado.

TABLA 3.1
PARÁMETROS Y DEFINICIÓN SENSORIAL DEL ANÁLISIS DE PERFIL DE TEXTURA

Parámetros	Definición sensorial	Definición instrumental	Medida o calculo
Dureza	Fuerza requerida para comprimir el alimento entre los molares (definida como la fuerza necesaria para alcanzar una determinada deformación)	Pico de fuerza del primer ciclo de compresión	P_1

Continuación tabla 3.1

Parámetros	Definición sensorial	Definición instrumental	Medida o calculo
Resistencia	Medición de cómo una muestra se recupera de la deformación en relación con la velocidad y las fuerzas derivadas	Resistencia, es la relación del trabajo de retorno por la muestra a medida que se elimina la deformación de compresión (conocida como trabajo recuperable realizado A_2), al trabajo requerido para la compresión (conocido como trabajo de dureza A_1)	$\frac{A_2}{A_1}$
Fuerza adhesiva	La fuerza máxima requerida para separar los dientes después de morder la muestra	Máxima fuerza negativa generada durante el retorno de la sonda	
Adhesividad	El trabajo necesario para superar las fuerzas atractivas entre la superficie del alimento y la superficie de otros materiales con el cual el alimento entra en contacto (por ejemplo, lengua, dientes, paladar) (trabajo requerido para sacar los alimentos de una superficie)	El área negativa para la primera mordida, que representa el trabajo necesario para extraer el émbolo de compresión de la muestra (no se observa adhesividad en los gráficos anteriores)	
El índice de elasticidad (preferido para comparar muestras de diferentes longitudes)	Relación de la altura que la muestra se recupera después de la primera compresión en comparación con la deformación máxima	Flexibilidad dividida por la deformación total	$\frac{D_s}{D_t}$



Continuación tabla 3.1

Cohesividad Una medida de lo bien que la estructura del producto soporta la compresión	La fuerza de los enlaces internos que componen el cuerpo del producto (mayor es el valor, mayor es la cohesividad)	La relación del trabajo durante la compresión (sólo carrera descendente) del segundo ciclo B_1 dividido por el del primer ciclo A_1	$\frac{B_1}{A_1}$
Cohesividad corregida	Trabajo neto invertido en las deformaciones no grabables de la primera y segunda masticación	La relación del trabajo neto del segundo ciclo $B_1 - B_2$ dividido por el del primer ciclo $A_1 - A_2$	$\frac{B_1 - B_2}{A_1 - A_2}$
Masticabilidad Solamente para alimentos sólidos	La energía requerida para masticar un alimento sólido hasta el punto requerido para tragarlo	El producto de la dureza, cohesividad y elasticidad	$P_1 \times \frac{B_1}{A_1} \times D_s$
Masticabilidad corregida	La energía NETA requerida para masticar un alimento sólido hasta el punto requerido para tragarlo	El producto de dureza, cohesividad corregida y elasticidad	$P_1 \times \frac{B_1 - B_2}{A_1 - A_2} \times D_s$
Gumminess Se aplica a productos semisólidos sólo si no tienen elasticidad y sufren deformación permanente	Energía necesaria para desintegrar un producto alimenticio semisólido al estado listo para tragar (relacionado con alimentos con bajos niveles de dureza)	El producto de la dureza y cohesividad	$P_1 \times \frac{B_1}{A_1}$

Fuente : Brookfield (2017)



CAPITULO IV

FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS

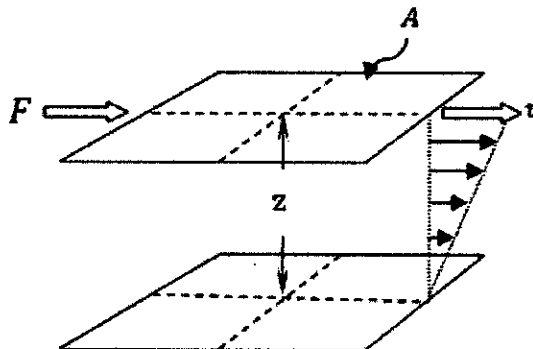
4.1 Fluidos newtonianos

4.1.1 Concepto de viscosidad

Es aquella propiedad de un fluido el cual da lugar a fuerzas de resistencias al movimiento relativo de capas adyacentes del mismo fluido. Newton en su obra "Philosophiae Naturalis – Principia Mathematica" afirmó que la resistencia ejercida la cual se manifiesta a partir de una falta de deslizamiento de un fluido, si el resto de factores se mantienen constantes, es proporcional a la velocidad a la que las partes de un fluido son separadas entre sí. De este modo, se establece la proporcionalidad existente entre la fuerza cortante por unidad de área (F/A) necesario para producir un gradiente de velocidades en un fluido (v/z).

En la Fig. 4.1, se presenta una propuesta de Newton, para analizar el comportamiento de un fluido el cual se encuentra entre dos superficies planas y paralelas separadas una distancia "z", cuando a una de ellas se le aplica una fuerza cortante y constante "F" y la superficie (móvil) se desplaza con una velocidad relativa constante "v".

FIGURA 4.1
ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DE UN ESFUERZO CORTANTE PARA
OBTENER UNA VELOCIDAD DE CORTE



Fuente: elaboración propia (2017)

Es decir, el “esfuerzo cortante” requerido “ F/A ” para mantener el movimiento la placa móvil, ha sido encontrado experimentalmente, ser proporcional a “ v ” e inversamente proporcional a “ z ”, en adelante “ v/z ” es denominada “**velocidad de corte**”, el coeficiente de proporcionalidad es llamado viscosidad del fluido y denotado por el símbolo “ μ ”; Estas fuerzas denominadas fuerzas viscosas son de las mismas características a las fuerzas de corte que se dan en los sólidos, siendo estas fuerzas intrínsecas o de cohesión que existe entre las moléculas (Mitchell & Hauppauge, 2013).

Los fluidos que presentan una función lineal de este comportamiento son denominados “Fluidos Newtonianos”,

De la definición, podemos escribir:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{v}{z} \quad (4.1)$$



Donde:

- F : Fuerza cortante aplicada (N)
- A : Área de la superficie móvil sobre la cual la fuerza cortante es aplicada (m^2)
- v : velocidad de la superficie móvil relativa al otro plano (m/s)
- z : distancia entre las superficies (m)
- μ : viscosidad absoluta o dinámica (Pa.s)

La ecuac. 4.1, también se puede escribir como:

$$\sigma = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (4.2)$$

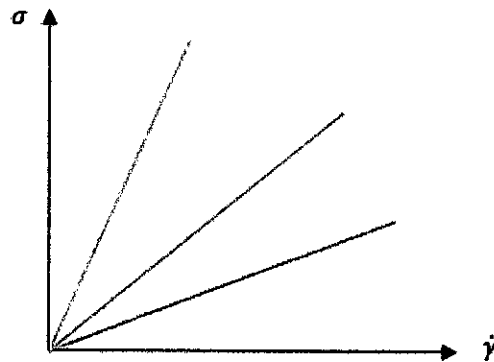
Donde.

- σ : Esfuerzo cortante (Shear stress) ($N/m^2 \equiv Pa$)
- $\dot{\gamma}$: Velocidad angular de corte, o velocidad de corte (Shear rate) (s^{-1})

Se acostumbra realizar la grafica de σ versus $\dot{\gamma}$ a la cual se le denomina "Reograma"

Que para el comportamiento lineal que presentan los fluidos newtonianos puede ser observado en la Fig. 4.2

FIGURA 4.2
REOGRAMA DE LOS FLUIDOS NEWTONIANOS



Fuente: elaboración propia (2017)

Ejemplos de comportamiento de fluidos newtonianos, tenemos el agua, las bebidas gaseosas y alcohólicas, aceites comestibles, algunas mieles ligeras, salmueras, jarabes de baja concentración.

Unidades de la viscosidad

En el sistema internacional: $1Pa \cdot s = 1 \frac{N \cdot s}{m^2} = 1 \frac{kg}{m \cdot s}$

Las unidades en el sistema CGS (sistema caduco): $1 Poise = 1 \frac{g}{s \cdot cm} =$

$1 \frac{dina \cdot s}{cm^2} = 0,10Pa \cdot s$

Algunas equivalencias:

$$1P = 100cP = 1 \frac{g}{s \cdot cm}$$

$$1cP = 10^{-3}Pa \cdot s = 1mPa \cdot s$$

Viscosidad Cinemática

Se define como la relación entre la viscosidad absoluta y la densidad de la sustancia, así: (4.3)

$$\nu = \mu/\rho$$

El valor de la viscosidad cinemática, debe estar referida a una temperatura.

Unidades de la viscosidad cinemática:

En el sistema internacional-SI: (m²/s)

Sistema CGS: Stoke (abreviado S ó St); Centistokes (cS ó cSt)

$$1 \text{ Stoke} = 100cSt = 1 \frac{cm^2}{s} = 0,0001 \frac{m^2}{s}$$

$$1 cSt = 10^{-6}m^2/s$$

En la actualidad, el estudio de la viscosidad se ha visto muy diversificado debido principalmente al comportamiento heterogéneo de los fluidos que se emplean a nivel industrial, tales como las pinturas, suspensiones, emulsiones, polímeros fundidos, entre otros. En donde la naturaleza química de éstos, ya sea por la presencia de partículas coloidales, macromoléculas o agregados al fluido base, muestra que la viscosidad depende de las condiciones de flujo y de la velocidad con que estos fluidos se mueven, alejando totalmente la idea clásica de una viscosidad newtoniana. Este tipo de fluidos han sido clasificados como fluidos No Newtonianos (Goodwin & Hughes; 2008).



Problema. Haciendo uso de un reómetro se han obtenido experimentalmente los siguientes valores para el estudio reológico de una sustancia. Determinése de qué tipo de fluido se trata y el valor reológico que representa en la tabla 4.1.

TABLA 4.1
DATOS DE REOGRAMA DE UNA SUSTANCIA – ESFUERZO VS VELOCIDAD DE CORTE

$\gamma(s^{-1})$ $\times 10^{-3}$	0	0,100	0,171	0,295	0,503	0,694	1,033	1,850	2,500	3,000
$\sigma(\text{Pa})$	0	0,8	1,5	3	6	9	15	25	35	45

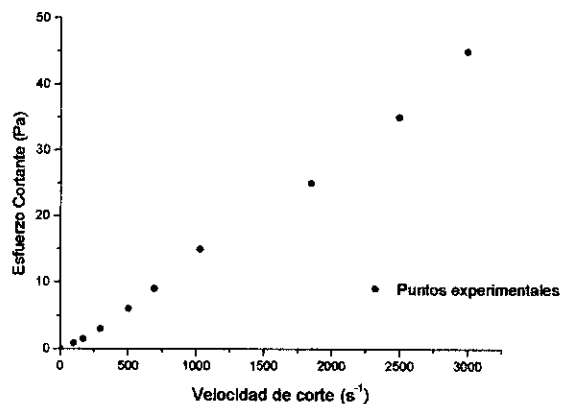
Fuente: Elaboración propia (2017)

Solución.

Al representar los datos en un reograma, la distribución de los puntos experimentales se presentan en el gráfico 4.1;

GRÁFICO 4.1

REOGRAMA DEL ESFUERZO CORTANTE VERSUS VELOCIDAD DE CORTE



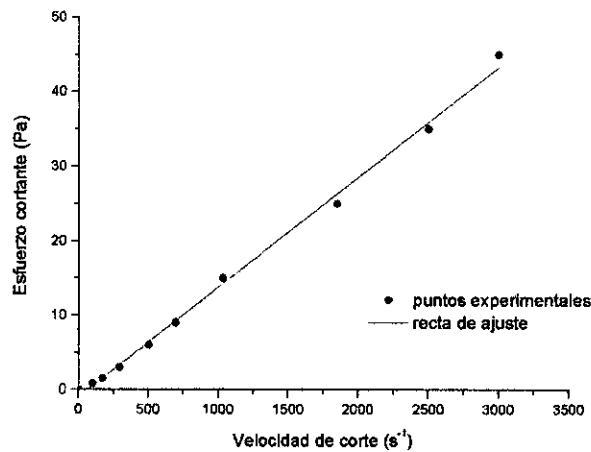
Fuente: elaboración propia (2017)

La distribución de los puntos experimentales se hayan alineados a una recta (Fig. 4.3), lo cual indica una relación de tipo lineal entre el esfuerzo

cortante y la velocidad de corte, por lo que de acuerdo a la ley de la viscosidad de newton, el fluido es newtoniano (Grafico 4.4).

Según la ecuac. 4.2; el valor de la viscosidad representa la pendiente de la recta.

GRÁFICO 4.4
AJUSTE LINEAL DE LOS DATOS EXPERIMENTALES



Fuente: elaboración propia (2017)

Usando la hoja de cálculo Excel, en opciones para determinar la línea de tendencia lineal, con intercepción en la coordenada (0,0) se obtiene la siguiente ecuación lineal:

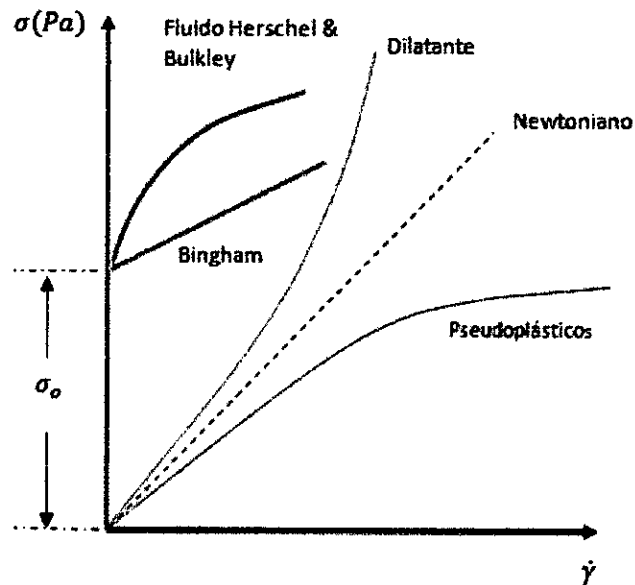
$$\sigma = 0,0143 \cdot \dot{\gamma} \quad (R^2=0,9946)$$

Por lo que el valor de la viscosidad absoluta o dinámica es de 0,0143 Pa.s

4.2 Fluidos No Newtonianos

Los fluidos No Newtonianos, son aquellos que se niegan a seguir un comportamiento lineal entre el esfuerzo cortante o Shear Stress(σ) y la velocidad de corte o Shear Rate ($\dot{\gamma}$), es decir para diferentes niveles de velocidad de corte, el esfuerzo cortante puede aumentar o disminuir significativamente (Von & otros, 2019). Dicho comportamiento puede observarse en la Fig. 4.4;

FIGURA 4.4
REPRESENTACIÓN DE CURVAS DE FLUJO PARA DIFERENTES FLUIDOS



Fuente: Elaboración propia (2018)

Un modelo matemático puede ser usado para expresar las características de un fluido No Newtoniano, tal como se presenta en la ecuac. 4.4;

$$\sigma = K \cdot \dot{\gamma}^n + \sigma_0 \quad (4.4)$$

Donde:

- σ_0 : Esfuerzo inicial de fluencia
- K : Coeficiente de consistencia
- n : Índice de comportamiento de flujo

Los fluidos pseudoplásticos y dilatantes son denominados como fluidos que siguen la ley de potencia, por tanto, pueden ser expresados mediante la siguiente ecuac. 4.5;

$$\sigma = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (4.5)$$

Obsérvese que los fluidos No Newtonianos no presentan un valor constante de su viscosidad absoluta o dinámica, por lo que se define una "Viscosidad Aparente (μ_{ap})"; por lo que si inicialmente la relación de la

viscosidad dependía del esfuerzo cortante y de la velocidad de corte, tal como la ecuac. 4.6;

$$\mu = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (4.6)$$

Sustituyendo la ecuac. 4.5 en 4.6; tenemos:

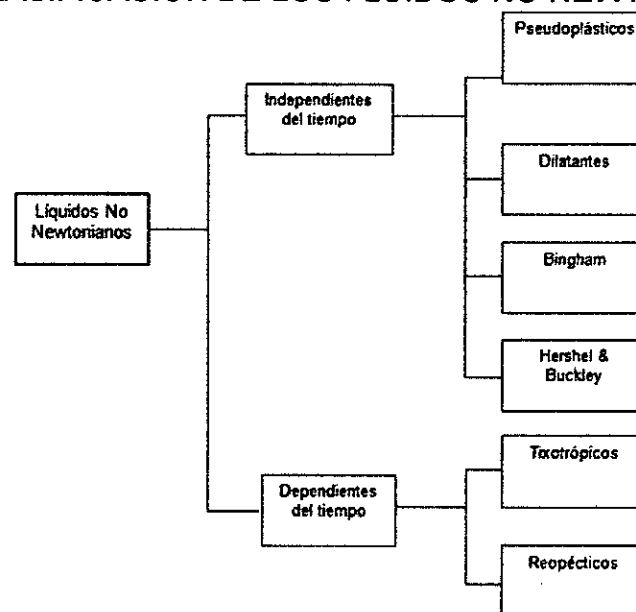
$$\mu_{ap} = \frac{K \cdot \dot{\gamma}^n}{\dot{\gamma}} = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (4.7)$$

por lo tanto su valor depende fundamentalmente del valor de la velocidad de corte, permaneciendo constantes los parámetros reológicos de K y n .

En la siguiente Fig. 4.5, se presenta una clasificación simplificada de los fluidos No Newtonianos. Los términos que aparecen en la Figura, tienen un valor exclusivamente histórico y carecen de significado reológico.



FIGURA 4.5
CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS NO NEWTONIANOS



Fuente: Mitchel & Hauppauge (2013)

La Tabla N° 4.2, muestra los ejemplos típicos de algunos alimentos los cuales presentan comportamientos No Newtonianos, es necesario mencionar que antes de definir si un alimento tiene características no newtonianas, primero se debe recurrir a datos bibliográficos publicados en revistas científicas y/o textos especializados en el área de alimentos, o de lo contrario someter al alimento a una deformación y obtener su reograma para varios valores de esfuerzos cortantes y velocidad de corte, así se encuentra en la bibliografía que el puré de tomate es pseudoplástico como también se mencionan que varias clases de salsa de tomate tiene comportamiento de Herschel and Bukley o que las soluciones saturadas de azúcar en su punto de cristalización son dilatantes.

TABLA N° 4.2
VALORES DE LOS PARÁMETROS REOLÓGICOS DE ALGUNOS ALIMENTOS

Fluido	K	n	σ_0	Ejemplos típicos
Newtoniano	>0	1	0	Agua, jugos de fruta, mieles ligeras, leche, aceites vegetales, bebidas alcoholicas, bebidas, bebidas carbonatadas
Pseudoplasticos	>0	$0 < n < 1$	0	Compota de manzana, puré de banana, jugo de naranja concentrado, leche condensada, mayonesa, puré de frutas, y vegetales, soluciones de goma a alta concentración, clara de huevo sin mezclar, concentrado de proteínas
Dilatantes	>0	$1 < n < \infty$	0	Algunos tipos de miel, 40% de solución de maíz crudo, suspensión de almidón, mieles de eucalptos facifolia, mieles de eucalipto eugenioles
Plástico de Bingham	>0	1	>0	Pasta dentrifica, pasta de tomate, puré de tomate, puré de papas 90% de agua, chocolate fundido 35% de grasa líquida, pastas y suspensiones finas, extracto de carne
Herschel & Bukley	>0	$0 < n < \infty$	>0	Pastas cárnicas, varias clases de salsa de tomate, mayonesas, compotas, cremas de chocolate, yogurt, jugos concentrados

Fuente: Steffe & Daubert (2013)

De la ecuación generalizada que gobierna el comportamiento para fluidos no newtonianos:

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n$$

En términos reológicos, un producto plástico o de tipo Herschel & Bukley, fluyen cuando la tensión excede de un valor límite. A esta tensión límite se le denomina tensión de deformación plástica ó también se le denomina el esfuerzo inicial de fluencia: σ_0

Se presenta en la tabla 4.2, algunos ejemplos típicos de alimentos con comportamiento No newtoniano;

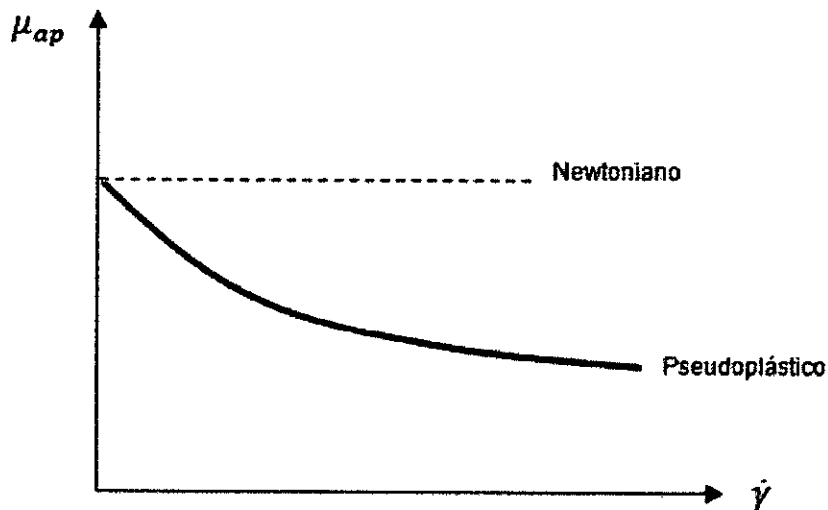
4.2.1 Flujos independiente del tiempo

a) Pseudoplasticidad.

Tienen las siguientes características (Fig. 4.6):

- Son menos espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación.
- La velocidad de deformación aumenta en proporciones más altas que la tensión tangencial de manera que la viscosidad aparente descende a medida que aumenta la velocidad de corte.

FIGURA 4.6
VISCOSIDAD APARENTE VERSUS VELOCIDAD DE CORTE PARA FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS



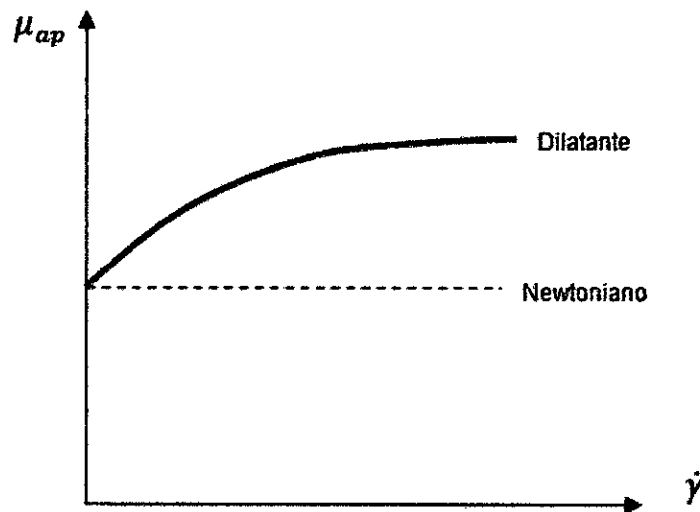
Fuente: elaboración propia (2018)

b) Dilatancia.

Es un fenómeno de espesamiento independiente del tiempo, que se da a altas velocidades de deformación (fenómeno opuesto a la pseudoplasticidad), tiene las siguientes características (Fig. 4.7):

- Son más espesos cuando se someten a altas velocidades de deformación.
- La viscosidad aparente aumenta a medida que aumenta la velocidad de corte.

FIGURA 4.7
VISCOSIDAD APARENTE VERSUS VELOCIDAD DE CORTE PARA
FLUIDOS DILATANTES



Fuente: elaboración propia (2018)

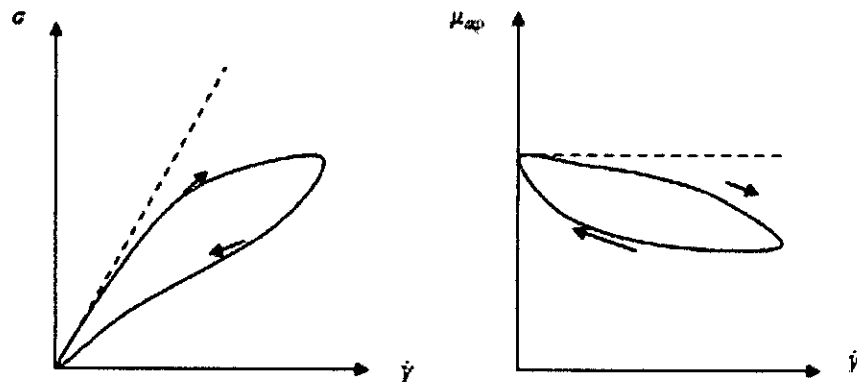
4.2.2 Flujo dependiente del tiempo

a) Tixotropía.

Es un ablandamiento dependiente del tiempo, la grafica es similar a la del fluido pseudoplástico, en cuanto la viscosidad aparente desciende a medida que aumenta la velocidad de corte. Define sin embargo, de ella en que el descenso de la viscosidad aparente no está relacionado exclusivamente con la velocidad de deformación sino también con el tiempo (Mitchell & Hauppauge, 2013). Es decir, manteniendo constante

la velocidad de deformación la viscosidad aparente desciende con el tiempo de manera que la viscosidad aparente no depende solo de la velocidad de corte sino también de la duración (t) de la deformación. Ver Fig. 4.8;

FIGURA 4.8
COMPORTAMIENTO TIXOTRÓPICO

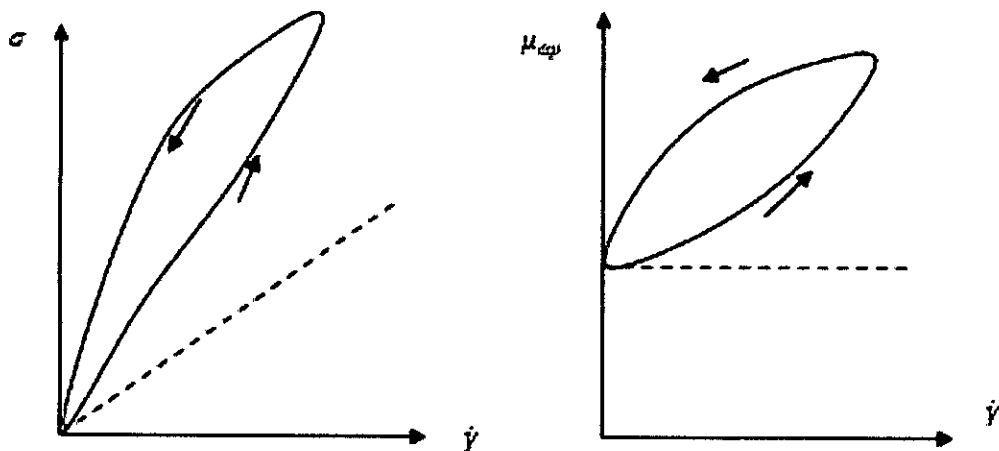


Fuente: elaboración propia (2018)

b) **Reopexia.**

Es un espesamiento dependiente del tiempo, existen 2 valores de la velocidad de corte para cada valor del esfuerzo cortante, y a la inversa. La reopexia es el fenómeno inverso de la tixotropía. Ver Fig. 4.9. (Mitchell & Hauppauge, 2013).

FIGURA 4.9
COMPORTAMIENTO REOPÉXICO



Fuente: elaboración propia (2018)

La tabla N° 4.3, muestra algunos valores de los parámetros reológicos de fluidos No Newtonianos del factor de consistencia y del índice de comportamiento al flujo. Según el autor los datos fueron colectados sobre una velocidad de corte (Shear rate) de 0,1 hasta 100s⁻¹ a la temperatura de 30,5°C.

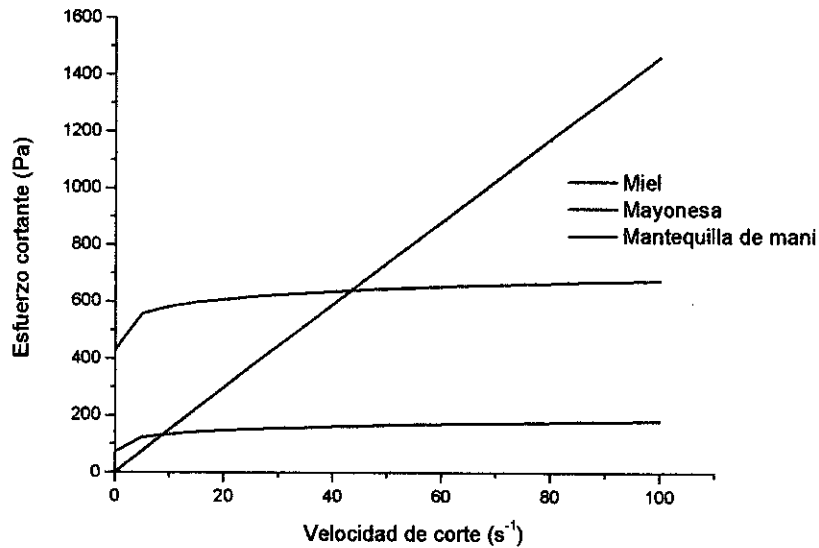
TABLA 4.3
VALORES DE PARÁMETROS REOLÓGICOS DE ALGUNOS
ALIMENTOS

Producto	$K (Pa \cdot s^n)$	$n(-)$
Puré de manzana	222,90	0,145
Miel	15,39	0,989
Salsa de tomate	29,10	0,136
Crema de malvavisco	563,10	0,379
Mayonesa	100,13	0,131
Mostaza	35,05	0,196
Mantequilla de maní	501,13	0,065
Barra de mantequilla	199,29	0,085
Margarina en barra	297,58	0,074
Mantequilla batida	312,30	0,057
Crema de queso batida	422,30	0,058

Fuente: Steffe & Daubert (2013)

El gráfico 4.3, presenta las curvas de flujo (Reograma) de la Miel, Mayonesa y Mantequilla de maní, simuladas con los valores de la tabla 4.3.

GRÁFICO 4.3
REOGRAMA DE LA MIEL, MAYONESA Y MANTEQUILLA DE MANÍ



Fuente: elaboración propia (2018)

4.3 Lista de Problemas

Problema 1. Las viscosidades experimentales en cP de una sustancia líquida a varias temperaturas es como sigue:

T (°C)	0	17	25	40	70
μ (cP)	0,524	0,461	0,386	0,341	0.262

la dependencia entre la viscosidad y la temperatura obedece una ecuación de la forma:

$$\log \mu = \frac{A}{T} + B \quad \dots\dots (1)$$

$$\mu = C \cdot \exp \left[\frac{D}{R} \cdot \frac{1}{T} \right] \dots(2)$$

Determinése, cuál de estas dos ecuaciones se ajustan mejor a los datos experimentales y el valor de la viscosidad (SI) a 50°C.

Problema 2. Las viscosidades experimentales en cP del aceite de LINAZA a varias temperaturas es como sigue:

T (°C)	20	30	40	50	60
μ (cP)	43	32	24	19	15

la dependencia entre la viscosidad y la temperatura obedece una ecuación de la forma:

$$\log \mu = \frac{A}{T} + B \dots\dots\dots (1)$$

$$\mu = C \cdot \exp \left[\frac{D}{R} \cdot \frac{1}{T} \right] \dots(2)$$



Determinése, cuál de estas dos ecuaciones se ajustan mejor a los datos experimentales.

Problema 3. En la mayor parte de los gases, la viscosidad se calcula por medio de una forma más generalizada. La Formula de Sutherland, tiene la siguiente forma:

$$\mu = C_1 \frac{T^{1,5}}{T + C_2}$$

Siendo C_1 y C_2 las constantes de Sutherland del gas y T la temperatura absoluta en Kelvin y la viscosidad en kg/s.m; Para la siguientes datos:

T (°C)	-23	-13	-3	7	17
μ ($\frac{kg}{m \cdot s}$)	15,99	16,50	17,00	17,49	17,98

Determinése el valor de las constantes.

Problema 4. Se tiene un cilindro de radio R , que gira sobre una superficie. Entre la superficie y el cilindro hay una capa de líquido con viscosidad μ y dicho cilindro gira a una velocidad angular constante ω determinada. La separación entre el cilindro y la superficie es " y " y el radio del cilindro es constante e igual a R . Determinése una relación para determinar el Torque de giro y la potencia consumida en función a las variables involucradas.

Problema 5. Calcular el momento torsional necesaria para hacer girar el cono donde solo las superficies laterales hacen contacto a una velocidad ω constante, si un fluido de viscosidad μ llena el espacio entre él y la superficie cónica. Dicha separación tiene un valor de " y ", el radio del cono es R y el ángulo que forma la pared con la vertical es α .

Determinése una relación para determinar el Torque de giro y la potencia consumida en función a las variables involucradas.

Problema 6. La distancia entre dos placas es de 0,5cm siendo 10cm/s la velocidad de la placa móvil y el fluido es alcohol etílico a 273K, cuya viscosidad es 1,77cP. Calcúlese el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad o velocidad cortante.

Problema 7. La distancia entre dos placas paralelas es 0,00914m y la placa inferior se desplaza a una velocidad relativa de 0,366m/s mayor que la superior. El fluido usado es aceite de soya con viscosidad de 4×10^{-2} Pa.s a 303K. (a) Calcúlese el esfuerzo cortante y la velocidad cortante



(b) Si se usa glicerol a 293K con viscosidad de 1,069kg/m.s en lugar de aceite de soya ¿Qué velocidad relativa se necesitara con la misma distancia entre las placas para obtener el mismo esfuerzo cortante en la parte (a) además cual será la nueva velocidad cortante.

Problema 8. Un viscosímetro de cilindro rotacional esta siendo usado para medir la viscosidad del liquido. A 6, 9 12 rpm, la lectura que dio cada torque fue de 2,3; 3,7 y $5,0 \times 10^{-3}$ N.cm. Calcular la viscosidad del líquido. Se dan los siguientes datos del cilindro móvil: R=2cm, L=5cm. El espacio entre los cilindros = 2mm.

Problema 9. Se usa un viscosímetro de Hoppler para la determinación de la viscosidad de un tipo de aceite, con una esfera de prueba #2 y se empieza a medir el tiempo de caída de ésta, tres veces, con las siguientes temperaturas, presentándose los siguientes datos:

Temperatura de 30°C, tiempos de caída: 42,35; 42,75 y 42,50 segundos

Temperatura de 40°C, tiempos de caída: 33,15; 32,90 y 22,72 segundos

Temperatura de 50°C, tiempos de caída: 26,31; 26,25 y 26,40 segundos

Temperatura de 60°C, tiempos de caída: 22,53; 21,71 y 21,22 segundos

La viscosidad puede determinarse mediante una ecuación empírica:

$$\mu = K(\rho_1 - \rho_2)\vartheta \quad [\text{cP}]$$

Donde: K -constante de la esfera a utilizar=0,075413; ρ_1 -densidad de la esfera =2,233g/cm³; ρ_2 -densidad del fluido=0,85g/cm³; ϑ -tiempo de caída de la bola (s). Si la viscosidad y la temperatura absoluta pueden ajustarse a una ecuación exponencial de la forma:

$$\mu = Ce^{D/RT}$$

Determinese la viscosidad del aceite a 55°C.

Problema 10. Un viscosímetro de cilindros concéntricos es accionado por la caída de una masa M ligada por medio de una cuerda y polea al cilindro interno. El líquido a ser probado, llena el espacio anular de anchura " a " y altura " H ". Después de un cierto periodo de transición de partida, la masa cae a una velocidad constante V_m . Determine la viscosidad del fluido empleando: $M = 0,10\text{kg}$; $R = 50\text{mm}$; $H = 50\text{mm}$; $r = 25\text{mm}$; $a = 0,20\text{mm}$ Y $V_m = 40\text{mm/s}$.

Siendo: R : el radio del cilindro de superficie fija

r : radio de la polea de giro conectada a la masa M

H : altura del cilindro

a : espacio entre los cilindros giratorios

ω : la velocidad angular

V : la velocidad de caída de la masa M

Problema 11. Los viscosímetros rotativos de tipo Placa-placa son usados para la determinación de las propiedades reológicas de las sustancias alimenticias cuando éstas presentan partículas dispersas muy grandes. Para un diámetro " $D=160\text{mm}$ " y una distancia " $Z=4\text{mm}$ " de separación entre las placas, determinese la viscosidad dinámica (μ) de la sustancia, si el par aplicado es de 9×10^3 dinasxcm para una velocidad angular " $\omega = 2$ r.p.m." de la placa móvil. Supóngase que el fluido tiene comportamiento newtoniano.



Problema 12. Experimentalmente se han obtenido los siguientes valores para el estudio reológico del chocolate, determínese las constantes reológicas.

Se muestran los siguientes datos correspondientes al esfuerzo cortante (Pa) y velocidad de corte (s^{-1}) respectivamente:

Esfuerzo cortante (Pa)	28,6	42,8	61,9	80,9	100,0	123,8	164,2	178,5	201,1
Velocidad de corte (s^{-1})	0,10	0,20	0,80	2,40	3,90	6,40	11,50	13,10	15,90

Problema 13. Se realizó una evaluación del proceso de degradación de un aceite vegetal utilizado en proceso de fritura por inmersión mediante la medición de la viscosidad en un rango de temperatura de 15 a 40°C. Se utilizó una mezcla estándar de aceite de girasol, algodón, soya, ajonjolí, maní y oleica de palma. Las medidas se realizaron a 20 RPM usando un viscosímetro de baja Brookfield modelo RVDV-E, se presenta los siguientes datos experimentales:

T (°C)	15	20	25	30	40
μ (Poises)	0,01312	0,00952	0,007711	0,006793	0,00469

Para el análisis de la variación de la viscosidad dinámica del aceite en función de la temperatura se recomienda usar el siguiente modelo matemático: $\mu = C \cdot e^{(D/RT)}$, donde C : una función de la densidad del fluido específico para la transferencia de la cantidad de movimiento, D : una función de la energía relacionada al calor latente de vaporización, R : constante general del estado gaseoso y T : temperatura absoluta (K).

Calcular a) Las constantes C y (D/R) ; b) predecir la viscosidad del aceite vegetal a 45°C .

Problema 14. Del viscosímetro cónico concéntrico é invertido de radio R y altura H , gira a una velocidad angular ω , siendo la superficie móvil la interior del cono, Determinar la viscosidad absoluta " μ " en función del torque viscoso " T_o " que actúa en el eje que gira a una velocidad angular " ω ". Si el espacio entre la superficie móvil y fija en " α " es ocupado por un fluido newtoniano.



CAPITULO V

ALIMENTOS VISCOELASTICOS

5.1 Introducción

Los alimentos visco-elásticos tienen características viscosas y elásticas, por responder a pruebas que siguen y no siguen la ley de viscosidad de Newton o se comportan como sólidos. Durante las fases de su fabricación y transporte, el uso de envases y su posterior almacenamiento, los parámetros reológicos juegan un papel muy importante para los controles de los procesos o el diseño de los mismos con el objeto de optimizar las formulaciones o las instalaciones de equipamiento que incidirán en la calidad del producto, asunto ineludible de todo objetivo de los procesos industriales (Yogesh & Otros, 2017).

Como ya se definió en los capítulos precedentes que la Reología es la ciencia encargada de estudiar el flujo y la deformación de la materia, es decir su campo de estudio y análisis en la industria de alimentos comprende las propiedades de deformación en alimentos sólidos, semisólidos y líquidos; para ello la Ingeniería de Alimentos debe estudiar previamente a la materia-prima y la composición físico-química del alimento para poder relacionar las variables involucradas en el proceso de la deformación o fluidez de la materia.

La evaluación de los parámetros reológicos se realizan usando una variedad muy amplia de instrumentos de laboratorio desde los más simples, pasando desde viscosímetros capilares, viscosímetros rotacionales, reómetros, consistómetros, e instrumentos de alta precisión para cuantificar el perfil de textura del alimento.

5.2 Propiedades fundamentales

Cuando un objeto está sometido a una fuerza normal o tangencial sobre una superficie se puede decir que el objeto esta bajo un esfuerzo



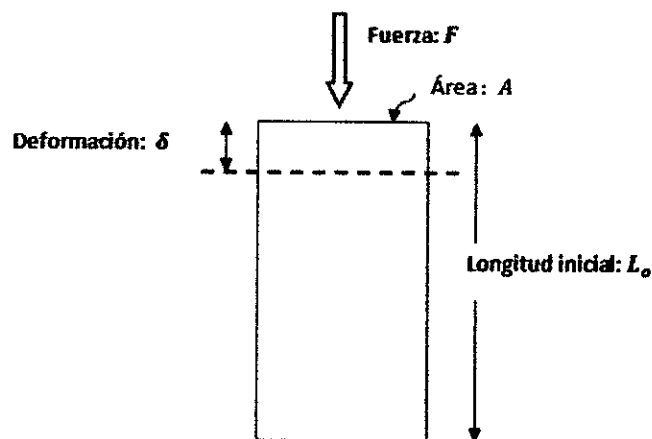
normal o esfuerzo de corte, el termino esfuerzo puede usarse como equivalencia a tensión o tracción (Renaud, Dion, Chevallier, Tawfiq & Lemaire, 2012).

$$Tensión = \frac{Fuerza}{Área} \equiv \left(\frac{N}{m^2} \right) \equiv (Pa) \quad (5.1)$$

5.2.1 Modulo de Young

Un sólido ideal se define como aquel en el cual la deformación observada es proporcional a la fuerza aplicada; En la Fig. 5.1, se observa esta relación, la fuerza normal aplicada F sobre una superficie A , es el esfuerzo o la tensión de deformación normal: σ_n en las unidades de N/m^2 , la deformación unitaria producida ϵ es: $\frac{\delta}{L_0}$, siendo δ la deformación o extensión si fuera sido el caso de una fuerza de tracción (de estiramiento o flexión), las variables se combinan mediante la siguiente ecuac. 5.2:

FIGURA 5.1
RELACIONES DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN EN UN SOLIDO



Fuente: elaboración propia (2018)

$$Tensión = (Modulo)(Deformación Unitaria) \quad (5.2)$$

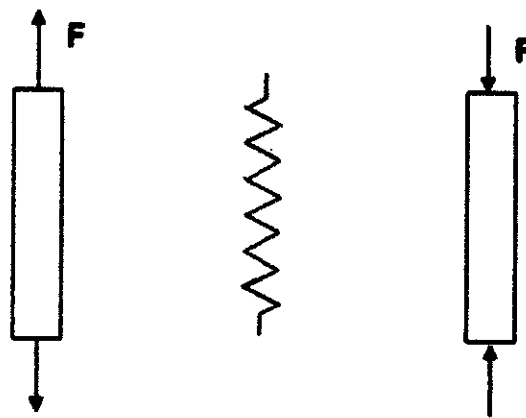
Es decir:

$$\sigma_n = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\delta}{L_0} \quad (5.3)$$

Donde: E , es el módulo de elasticidad o de Young.

El modelo más sencillo para un sólido ideal es el de un resorte o muelle (Nishinari, 2014), al cual puede someterse fuerza de compresión o de tracción, tal como se presenta en la Fig.5.2.

FIGURA 5.2
MODELO SIMPLE TIPO RESORTE O MUELLE PARA EL SÓLIDO
IDEAL



Fuente: elaboración propia (2018)

En la tabla 5.1, se presenta algunos valores del módulo de Young, en alimentos.

TABLA 5.1
VALORES DEL MÓDULO DE YOUNG

Material	Modulo de Young $E (N \cdot m^{-2}) 10^{-7}$
Zanahoria	2 a 4
Peras	1,2 a 3
Patatas	0,6 a 1,4
Manzanas	0,6 a 1,4
Gelatina (gel)	0,02
Melocotón	0,2 a 2
Plátano	0,08 a 0,3

Fuente: Guo & Campanela (2017)

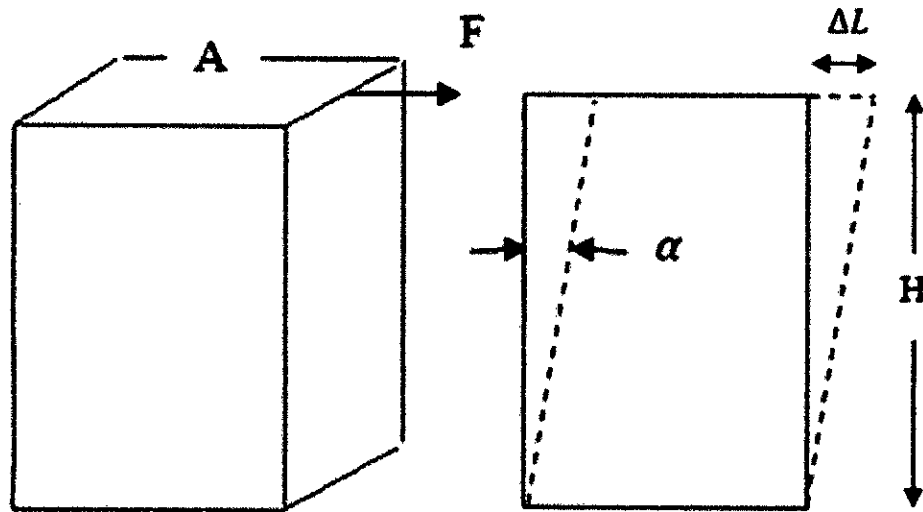
5.2.2 Modulo de Cizalla o de Corte

En la Fig. 5.3, se presenta el efecto de la acción de una fuerza cortante, de cizalla o tangencial en un punto de la arista del bloque de área superficial A, observándose una deformación angular al terminar la acción de dicha fuerza.

La tensión de cizalla o de corte, es producida por la fuerza F sobre el área A, que se expresa como:

$$\sigma_c = \frac{\text{Fuerza de corte}}{\text{Area}} = \frac{F}{A} \quad (5.4)$$

FIGURA 5.3
MODELO SIMPLE DE CORTE O CIZALLA



Fuente: Elaboración propia (2018)



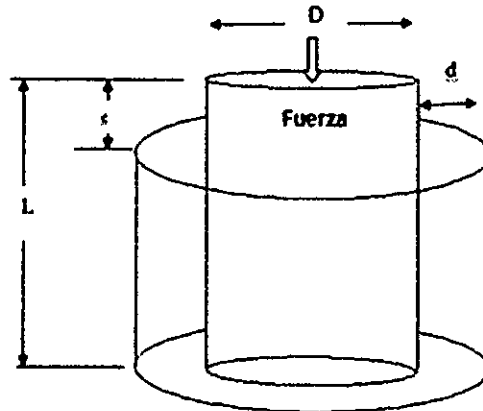
La cantidad de cizalla, viene dada por $\Delta L/H$ o también por $\text{tang } \alpha$. En el caso de la cizalla, el modulo se denomina MODULO DE RIGIDEZ G , y matemáticamente se expresa como:

$$G = \frac{\sigma_c}{\text{Tang } \alpha} \quad (5.5)$$

5.2.3 Relación de Poisson

Cuando un cuerpo sufre una compresión o una tracción, su anchura cambiará de dimensión. En la Fig.5.4, se presenta un cuerpo de forma cilíndrica donde una fuerza se aplica inicialmente en la área de diámetro "D", tras comprimir, su diámetro aumentará y su longitud o altura disminuirá por efecto de la compresión.

FIGURA 5.4
CUERPO COMPRIMIDO Y DEFORMACIONES OBSERVADAS



Fuente: elaboración propia (2018)

La relación de Poisson:

$$\mu_p = \frac{d/D}{e/L} \quad (5.6)$$

O también se puede anotar:

$$\mu_p = \frac{d \cdot L}{D \cdot e} \quad (5.7)$$

5.2.4 Modulo de Volumen

Cuando un cuerpo es sumergido en agua, la presión ejercida sobre él debida a la profundidad del agua en aumento comprime el cuerpo. A la inversa, cuando ascienden las burbujas de aire se incrementa su tamaño. La deformación originada por la presión hidrostática desde todos los lados se denomina deformación volumétrica. La relación entre la presión hidrostática y la deformación volumétrica se denomina modulo de volumen K (Guo & Campanela, 2017);

$$K = \frac{\text{Presión hidrostática (Nm}^{-2}\text{)}}{\text{Deformación volumetrica unitaria } \left(\frac{\Delta V}{V}\right)} \quad (5.8)$$

Donde ΔV es el cambio en volumen y V es el volumen original

5.2.5 Relaciones matemáticas entre estas propiedades

Según Guo & Campanela (2017); si el material es isotrópico, las cuatro constantes elásticas son interconvertibles, y se resume del modo siguiente:

$$\text{Modulo de Cizalla: } G = \frac{9EK}{9K - E} \quad (5.9)$$

$$\text{Modulo de Young: } E = \frac{9GK}{3K + G} = 2G(1 + \mu_p) = 3K(1 - 2\mu_p) \quad (5.10)$$

$$\text{Modulo de Volumen: } K = \frac{E}{3(1 - 2\mu_p)} = \frac{EG}{9G - 3E} = \frac{2G(1 + \mu_p)}{3(1 - 2\mu_p)} \quad (5.11)$$

$$\text{Relación de Poisson: } \mu_p = \frac{E - 2G}{2G} = \frac{(1 - E)/3K}{2} \quad (5.12)$$

5.3 Viscoelasticidad

Se ha mencionado que los alimentos presentan un comportamiento visco-elástico, es decir bajo condiciones de deformación, esto es, al aplicar un esfuerzo de deformación sobre ellos, éstos se pueden comportar como sólidos, ó líquidos, o una combinación de los dos. En el caso de los sólidos, al aplicárseles un esfuerzo de deformación, si éstos se recuperan totalmente, entonces son denominados alimentos completamente elásticos; mientras que si no lo hacen totalmente, entonces su grado de recuperación estará en función del intervalo de tiempo mientras que estuvo sometido al esfuerzo de deformación. Pueden suceder dos cosas, que no recupera su estado final o se rompa (Shuai, Duan, & Wang, 2016).



5.4 Modelos viscoelásticos

Los productos biológicos de consistencia dura, muestran un comportamiento mecánico frente a los esfuerzos de deformación, dicho comportamiento mecánico se puede modelar mediante una estructura de resortes y amortiguadores, donde el resorte es considerado como un sólido ideal que físicamente se formula mediante la ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (5.13)$$

Donde:

- σ : Esfuerzo de deformación normal (Pa)
- E : Modulo de elasticidad (Pa)
- ε : Deformación unitaria (m/m)

Los fluidos que siguen la ley de la viscosidad de Newton, son representados mediante un sistema de cilindro-pistón, en el cual se manifiesta la parte viscosa del fluido y consiguientemente la dependencia del factor tiempo.

$$\sigma = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (5.14)$$

Donde:

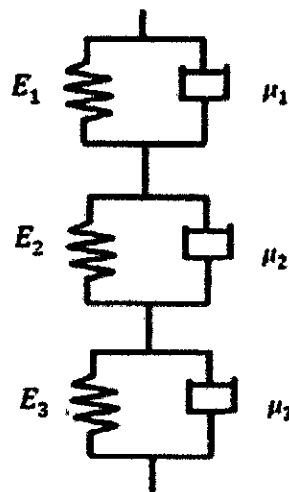
- σ : Esfuerzo cortante (Pa)
- μ : Coeficiente de viscosidad (Pa.s)
- $\dot{\gamma}$: Velocidad de corte angular (s⁻¹)

En función de cómo sean dispuestos entre si, el resorte ideal y el amortiguador ideal, se presentaran diferentes configuraciones o arreglos combinadas denominados **MODELOS VISCOELASTICOS IDEALES:**

5.4.1 Modelo de Kelvin

Este modelo considera una instalación del resorte y el amortiguador conectados en paralelo, en esa estructura se considera que cuando actúa un esfuerzo, la deformación tendrá el mismo valor en cada componente (Nishinari, 2014). Este modelo es útil para simular el comportamiento de algunos materiales que siguen el comportamiento del modelo de Kelvin. El modelo es representado en la Fig. 5.5.

FIGURA 5.5
MODELO DE KELVIN GENERALIZADO

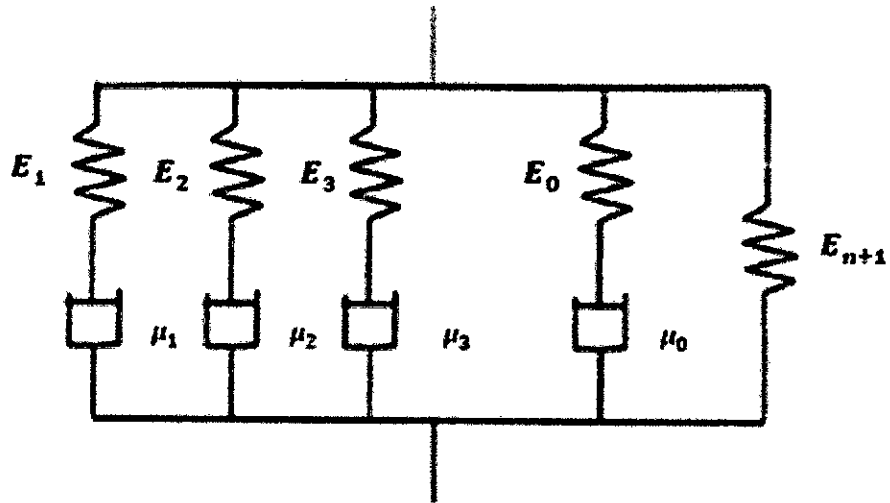


Fuente: Elaboración propia (2019)

5.4.2 Modelo de Maxwell

Este modelo considera que el resorte y el amortiguador están conectados en serie, en el cual el esfuerzo aplicado es soportado por cada elemento y la deformación es la suma de las deformaciones producidas por cada elemento individual (Nishinari, 2014). Que se observa en la Fig. 5.6.

FIGURA 5.6
MODELO DE MAXWELL GENERALIZADO



Fuente: Elaboración propia (2019)

CAPITULO VI

MODELOS REOLOGICOS

En relación al comportamiento de los fluidos (independientes del tiempo) en un reograma, se han caracterizado y propuestos diversas ecuaciones que simulan dicho comportamiento y son capaces de reproducir los valores del esfuerzo cortante, velocidad de corte o la viscosidad absoluta o dinámica o simplemente la viscosidad aparente según sea el caso. La descripción precisa del flujo, necesaria para el diseño de sistemas de bombeo, tuberías, etc. requiere una ecuación que exprese la relación en (σ) y ($\dot{\gamma}$) en cualquier punto.

Se presentan los modelos reológicos básicos (Steffe & Daubert, 2006):

1. Los fluidos que siguen el comportamiento newtoniano, muestran una relación lineal entre el esfuerzo cortante o cizallante (σ) "valor sigma" y la velocidad angular de corte o simplemente velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) "valor gamma punto":

$$\sigma = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (6.1)$$

Donde μ : es la viscosidad absoluta o dinámica o también denominada verdadera (kg/m.s).

2. Los fluidos que siguen la ley de potencia (Ostwald-de-Waele): Pseudoplásticos y Dilatantes, muestran una relación no lineal entre σ versus $\dot{\gamma}$.

$$\sigma = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (6.2)$$

Donde K y n son constantes de la curva de flujo del fluido “adelgazante: shear thinning” o engrosante: “shear thickening”; el valor K : se le denomina “constante de consistencia” y n : índice de comportamiento del flujo. Los valores de K y n son obtenidos experimentalmente desde una matriz de datos de σ versus $\dot{\gamma}$. Para fluidos Pseudoplásticos el valor de n debe ser menor a la unidad, mientras que para fluidos dilatantes deber ser mayor a la unidad.

3. Los plásticos de “Bingham” necesitan de un esfuerzo inicial mínimo (σ_0) antes que comiencen a fluir, y cuando comienzan a fluir, van generando una curva de flujo de forma lineal en la relación σ versus $\dot{\gamma}$:

$$\sigma = \sigma_0 + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (6.3)$$

4. Los plásticos Generales (Casson plastic) o de Herschel & Bulkley, representan un comportamiento mas general que engloba al de todos los anteriores con la ecuación:

$$\sigma = \sigma_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (6.4)$$

Existen muchos modelos que han sido testados en la industria, y también se han observado que algunos modelos propiamente simulan muy bien el comportamiento de la relación (σ) versus ($\dot{\gamma}$) con los datos experimentales. Así por ejemplo, es de practica conocida por la información de los investigadores que el modelo de CASSON es el aceptado en la industria del chocolate.

Existen otros modelos que se dan a continuación (Owens, 2012):



El modelo de Casson:

$$\sigma^{0,5} = (\sigma_o)^{0,5} + K_1 \cdot \dot{\gamma}^{0,5} \quad (6.5)$$

El modelo de Casson modificado:

$$\sigma^{0,5} = (\sigma_o)^{0,5} + K_1 \cdot \dot{\gamma}^{n_1} \quad (6.6)$$

El modelo de Herschel & Bulkley modificado:

$$\sigma^{n_1} = (\sigma_o)^{n_1} + K_1 \cdot \dot{\gamma}^{n_2} \quad (6.7)$$

El modelo de Vocadlo:

$$\sigma = \{(\sigma_o)^{1/n_1} + K_1 \cdot \dot{\gamma}\}^{n_1} \quad (6.8)$$

Modelo de serie de potencias:

$$\sigma = K_1 \cdot \dot{\gamma} + K_2 \cdot \dot{\gamma}^3 + K_3 \cdot \dot{\gamma}^5 \dots \quad (6.9)$$

Modelo de Powell & Eyring:

$$\sigma = K_1 \cdot \dot{\gamma} + \left(\frac{1}{K_2}\right) \sinh^{-1}(K_3 \cdot \dot{\gamma}) \quad (6.10)$$

6.1 Ejemplo aplicativo para fluido No Newtoniano: En la siguiente tabla, se dan los datos del reograma para el zumo de naranja de 65°Brix,

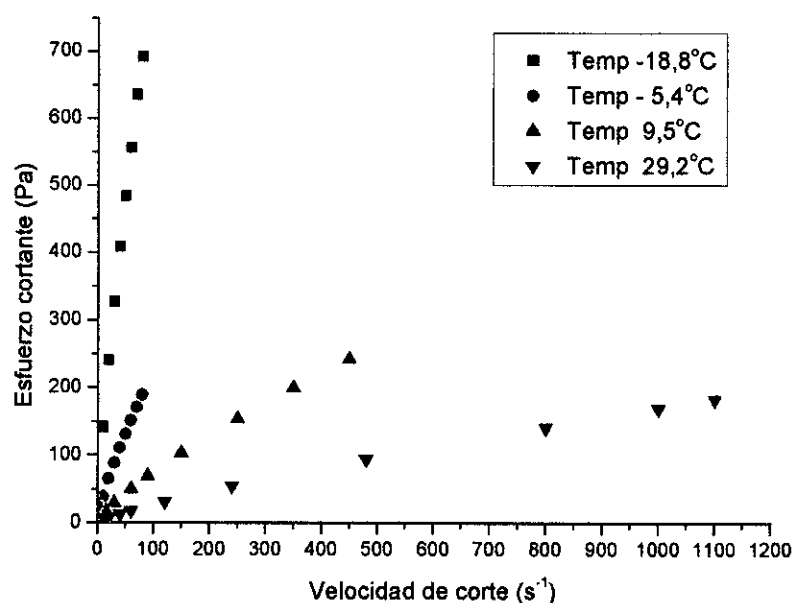
para diferentes temperaturas. Determinése los parámetros reológicos y la energía de activación (Steffe & Daubert, 2006).

TABLA 6.1
VALORES DE ESFUERZO CORTANTE Y VELOCIDAD DE CORTE DE ZUMO DE NARANJA A 65°BRIX PARA DIFERENTES TEMPERATURAS

T= -18,8°C		T= -5,4°C		T= 9,5°C		T= 29,2°C	
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	σ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	σ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	σ (Pa)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	σ (Pa)
0,5	14,4	0,6	4,3	1,1	2,6	8	3,6
1	24,3	1	6,5	8	10,3	20	7,6
10	141,9	10	38,4	15	17,1	40	13,1
20	240,4	20	65,4	30	29,5	60	17,5
30	327,2	30	88,7	60	50,3	120	31,2
40	408	40	111,1	90	69,4	240	54,5
50	483,9	50	131,9	150	103,3	480	94,4
60	555,9	60	151,7	250	153,8	800	141,7
70	635,2	70	171,3	350	199,8	1000	170
80	692,5	80	189,4	450	242,8	1100	183,2

Fuente: Steffe & Daubert (2006).

GRÁFICO 6.1
REOGRAMA PARA EL ZUMO DE NARANJA A 65°BRIX PARA DIFERENTES TEMPERATURAS



Fuente: elaboración propia (2019)

Se observa cualitativamente que el comportamiento del zumo de naranja de 65°Brix sigue un modelo de potencia, que es de la forma:

$$\sigma = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

Usando el programa de Solver, de la Microsoft Excel, se realizó una estimación tangente de derivadas progresivas usando el modelo de newton con un nivel de convergencia de 10^{-4} , calculándose el esfuerzo cortante. El resultado se presenta en la tabla N°6.2;

TABLA 6.2
VALORES CALCULADOS DEL ESFUERZO CORTANTE PARA EL
ZUMO DE NARANJA A 65°BRIX

T= -18,8°C			T= -5,4°C			T= 9,5°C			T= 29,2°C		
$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	σ_{EXP} (Pa)	σ_{CAL} (Pa)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	σ_{EXP} (Pa)	σ_{CAL} (Pa)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	σ_{EXP} (Pa)	σ_{CAL} (Pa)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	σ_{EXP} (Pa)	σ_{CAL} (Pa)
0,5	14,4	14,1393	0,6	4,3	4,3807	1,1	2,6	2,4081	8	3,6	3,5809
1	24,3	24,0731	1	6,5	6,4915	8	10,3	11,0177	20	7,6	7,4476
10	141,9	141,0096	10	38,4	38,2180	15	17,1	17,8370	40	13,1	12,9595
20	240,4	240,0792	20	65,4	65,1685	30	29,5	30,3414	60	17,5	17,9191
30	327,2	327,7499	30	88,7	89,0460	60	50,3	51,6119	120	31,2	31,1810
40	408	408,7522	40	111,1	111,1238	90	69,4	70,4221	240	54,5	54,2581
50	483,9	485,1316	50	131,9	131,9533	150	103,3	104,1686	480	94,4	94,4146
60	555,9	558,0181	60	151,7	151,8391	250	153,8	154,0866	800	141,7	142,0150
70	635,2	628,1226	70	171,3	170,9729	350	199,8	199,4157	1000	170	169,7391
80	692,5	695,9304	80	189,4	189,4858	450	242,8	241,7738	1100	183,2	183,1731
K = 24,0729 n = 0,7677			K = 6,4915 n = 0,7699			K = 2,2385 n = 0,7664			K = 0,6796 n = 0,7992		

Fuente: elaboración propia (2019)

Se determinaron los valores de n y K , que se presentan en la tabla N° 6.3;

TABLA 6.3
VALORES DE n Y K EN FUNCIÓN A LA TEMPERATURA DEL ZUMO
DE NARANJA A 65°BRIX

Temperatura (°C)	K (Pa · s ⁿ)	n (--)
-18,8	24,0729	0,7677
-5,4	6,4915	0,7699
9,5	2,2385	0,7664
29,2	0,6796	0,7992

Fuente: elaboración propia (2019)

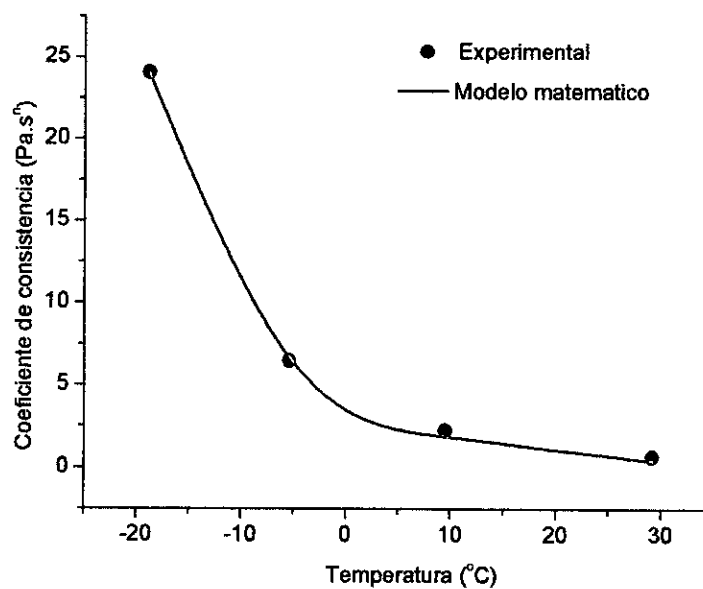
Obsérvese de la Tabla 6,2, que el valor del índice al flujo “n” (< 1) corresponde al comportamiento de un fluido No Newtoniano de tipo PSEUDOPLASTICO.

Los valores del coeficiente de consistencia y el modelo matemático que simula dicho comportamiento en función de la temperatura, se presentan en la Fig.6.2; se puede apreciar que el zumo de naranja tipificado como un fluido no newtoniano de tipo pseudoplastico que sigue la ley de potencia, el valor de K es variable, éste cae conforme aumenta la temperatura, siendo el índice de comportamiento al flujo según la tabla 6.3 prácticamente inalterable.

La ecuac. 6.11, que modeliza el comportamiento del coeficiente de consistencia y la Temperatura, tiene la forma de:

$$\text{Log } K = \frac{2\,803,26729}{T} - 9,6469 \quad (6.11)$$

GRÁFICO 6.2
COMPORTAMIENTO DEL COEFICIENTE DE CONSISTENCIA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL ZUMO DE NARANJA A 65°BRIX



Fuente: elaboración propia (2019)

CAPITULO VII

MEDIDAS DE PARAMETROS REOLOGICOS

Seleccionar un método instrumental para determinar los parámetros reológicos de los productos debe ser un procedimiento final que implica las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el propósito de las mediciones de los parámetros reológicos?
2. ¿Es necesario determinar los parámetros reológicos fundamentales o será suficiente una impresión global en el contexto del control de calidad?;
3. ¿Qué parámetros deben tomarse en cuenta y en qué condiciones (por ejemplo, escala de tiempo, nivel de estrés, temperatura)?;
4. ¿Qué método de medición se puede utilizar;
5. ¿Qué instrumentos de medición deben seleccionarse y equiparse con qué geometría de medición.

Una prueba mecánica siempre implica una combinación de un método de medición con una técnica de medición (instrumento más geometrías de medición). Un factor de complicación es que con varios instrumentos se puede realizar una medición por diferentes métodos de medición y viceversa, por lo que no siempre se obtendrán los mismos resultados, luego la referencia del equipo usado para las determinaciones reológicas es fundamental (Chung, Olson, Degner & McClements, 2013).

7.1 Métodos de medidas

La determinación de las propiedades reológicas de un material implica la medida de la relación de su deformación y el esfuerzo cizallante sobre el producto como una función del tiempo.



Se puede hacer una primera división de los métodos de medición dependiendo de si la pieza de prueba está sujeta a una tensión σ , o una velocidad de deformación $\dot{\gamma}$. Se puede hacer otra distinción entre los métodos que implican la aplicación de un constante esfuerzo de deformación σ y los métodos en los que la variable aplicada varía en el tiempo (a menudo sinusoidalmente), lo que se denomina pruebas dinámicas. Esta última división es algo arbitraria. Los experimentos en los que se determina la reacción de un material ante un cambio repentino de σ , $\dot{\gamma}$. en lo que se denomina prueba de transiente, se pueden considerar como pruebas dinámicas o de estado estacionario.

7.1.1 Prueba de Estrés de relajación

En estas pruebas, el material es sujeto a un cierto valor de esfuerzo cortante, y el stress resultante σ es medido como una función del tiempo. Idealmente, el material se deforma en una función escalonada, pero en la práctica la deformación siempre lleva algún tiempo.

Para un líquido, σ será finito durante la deformación y será cero para todos los t positivos. Para un material puramente elástico, σ permanece constante con el tiempo, mientras que en general para la mayoría de los otros materiales sólidos (o sólidos), σ Inicialmente disminuye bastante rápidamente y luego gradualmente más lentamente. En última instancia, σ puede llegar a ser cero o acercarse a un valor limitado.

A partir de la respuesta al estrés, se puede calcular el espectro de relajación. En el análisis de la respuesta al estrés, se debe recordar que la relajación del estrés ya comenzó durante el tiempo finito requerido para lograr la deformación establecida. Esta relajación será más extensa en el caso de enlaces de relajación rápida y una tasa de deformación lenta. El



resultado es un proceso de relajación más lento después de que se haya obtenido la deformación establecida y un tiempo de relajación aparente más largo. Además, se deduce que el espectro de relajación se puede calcular con precisión solo para t "tiempo de deformación".

7.1.2 Prueba a una tasa de deformación constante

En muchos instrumentos utilizados para la determinación de la viscosidad de un material, se aplica un conjunto γ , y el σ resultante se mide en función del tiempo. Para los productos con un Stress inicial de flujo σ_y , σ puede repeler un sobreimpulso. De hecho, estos productos primero se deforman "elásticamente" hasta que σ supera a σ_y y la estructura del material se descompone. Con la deformación continua, la estructura del material se desglosa aún más, lo que resulta en tiempo (comportamiento tixotrópico). Las mediciones de "rebase" son útiles para determinar la descomposición de la estructura de fluidos plásticos debido a grandes deformaciones.

Las propiedades de fractura de los materiales sólidos se determinan principalmente al deformarlos a una cierta velocidad en la compresión o extensión uniaxial. Sin embargo, debido a la forma en que se ejecutan los experimentos, la tasa de tensión aumenta (experimentos en compresión uniaxial) o disminuye (experimentos en extensión uniaxial) en cierta medida durante estos experimentos. Este tipo de medición se tratará más adelante en la sección posterior "Grandes - Deformación y prueba de fractura con instrumentos de tensión-compresión".

7.1.3 Prueba a Estrés Constante

En muchos instrumentos nuevos, se puede aplicar una tensión constante en lugar de una tasa de tensión constante. Estos instrumentos se pueden usar para determinar la viscosidad absoluta o dinámica o la



viscosidad aparente de líquidos y materiales líquidos, midiendo $\dot{\gamma}$ en función de σ . Un tipo particular de prueba que se puede hacer con estos instrumentos es la llamada prueba de fluencia.

Las pruebas de fluencia son especialmente útiles para la caracterización de materiales viscoelásticos. Se aplica una σ constante y la carrera resultante se determina en función del tiempo. Para líquidos, se observará un aumento constante en la tensión con el tiempo, mientras que para un material elástico, la tensión del observador será constante en el tiempo. En este último caso, el material recuperará su forma original después de la eliminación de la tensión.

Para un material viscoelástico, primero hay un aumento instantáneo en la tensión seguido de una respuesta elástica retardada, y para los materiales que contienen un componente viscoso un aumento constante en la tensión durante un tiempo prolongado. A partir de la pendiente del aumento constante, se puede calcular una viscosidad. Este componente viscoso conduce a una deformación permanente después de la eliminación de la tensión aplicada.

Normalmente, los resultados de una prueba de fluencia no se expresan como módulos sino como cumplimiento de fluencia ($J \equiv \gamma/\sigma$). Para materiales idealmente elásticos, $J = 1/G$. Pero para los materiales viscoelásticos, $J(t)$, puede recalcularse en $G(t)$ y, a la inversa, pero para un recálculo preciso, $J(t)$, debe conocerse en un rango bastante amplio de t .

Si se aplican tensiones suficientemente grandes, se puede determinar el proceso de fractura de los materiales viscoelásticos. Y se puede estudiar su dependencia del tiempo. Este método no es muy adecuado para estudiar el comportamiento de fractura de materiales independientes del tiempo.



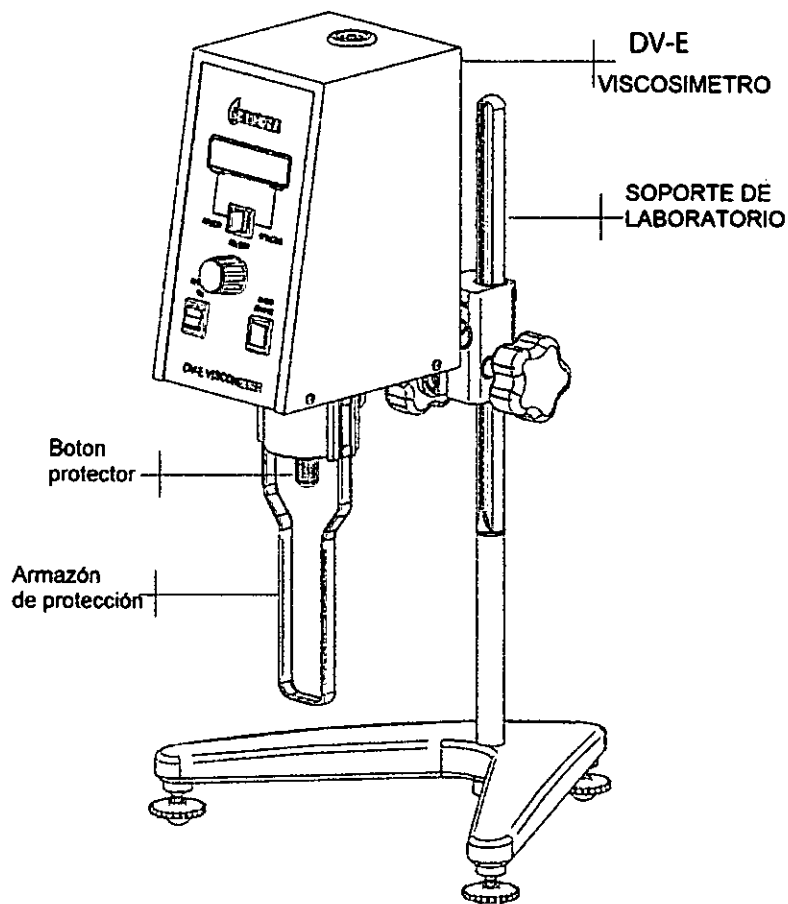
CAPITULO VIII

EXPERIMENTOS DE LABORATORIO

8.1 Usando viscosímetro de Brookfield y Miel Industrializada

Se realizó una experiencia de laboratorio con un viscosímetro concéntrico rotacional de Brookfield de discos usado para la valoración de la viscosidad de la miel industrializada se presenta en la Fig. 8.1, se trata de un viscosímetro del tipo RVDV-E que cuenta con un set de Husillos (spindless de los números de 2 al 7).

FIGURA 8.1
VISCOSÍMETRO CONCÉNTRICO DE BROOKFIELD TIPO RVDV-E



Fuente: Brookfield (2017)

En la Fig. 8.2, se presenta el juego de los husillo o splindes del equipo.

FIGURA 8.2
HUSILLOS O SPLINDES PARA EL VISCOSIMETRO CONCÉNTRICO DE
BROOKFIELD TIPO RVDV-E

Spindles

LV Spindles (cP/Pa.s)			
SPINDLE	RANGE*	VELOCITY RANGE*	VELOCITY RANGE*
LV-1 (S1)	15 - 20K	100 - 1000	100 - 1000
LV-2 (S2)	50 - 100K	100 - 1000	100 - 1000
LV-3 (S3)	200 - 400K	100 - 1000	100 - 1000
LV-4 (S4)	1K - 2M	100 - 1000	100 - 1000
LV-5 (S5)	2K - 4M	100 - 1000	100 - 1000
LV-2C	50 - 100K	100 - 1000	100 - 1000
LV-3C	200 - 400K	100 - 1000	100 - 1000

RV/HAND Spindles (cP/Pa.s)			
SPINDLE	RANGE*	VELOCITY RANGE*	VELOCITY RANGE*
RV-1 HAND-1	100 - 20K	200 - 40K	200 - 160K
RV-2 HAND-2	100 - 80K	200 - 40K	200 - 160K
RV/HAND-3	100 - 200K	200 - 160K	200 - 160K
RV/HAND-4	200 - 400K	200 - 160K	200 - 160K
RV/HAND-5	400 - 800K	200 - 160K	200 - 160K
RV/HAND-6	1K - 2M	2K - 4M	2K - 4M
RV/HAND-7	4K - 8M	8K - 16M	8K - 16M

* Range is based on standard 1-10 rpm
 ** The spindle number is in order

RV/HAND Spindle Set includes spindles #2 - #7 and is supplied with standard Brookfield Viscometers and Rheometers.
 Spindle #1 is available as an option.
 Spindle Rack is also available as an option with both LV and RV/HAND spindle sets.

Fuente: Brookfield (2017)

El principio de operación del DV-E es la rotación del husillo, el cual es inmerso en el seno del fluido. Se mide el torque del husillo y el equipo mide la viscosidad absoluta o dinámica (en centipoise: cP o milipascal segundo: mPa.s) para cada velocidad de rotación empleado. Para el equipo empleado el torque al 100% equivale 7,187 dinas.cm equivalente a 0,7187 miliNewton.m.

El equipo en conjunto operó con una baño termostático en el cual se fija y controla la temperatura del baño fluido donde debe encontrarse la

sustancia problema dentro de un Vaso tipo Becker de 500ml de capacidad.

Las velocidades de rotación se calibró en el viscosímetro rotacional y fueron testados diferentes valores de velocidad de rotación: 0.3, 0.5, 0.6, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 10, 12, 20, 30, 50, 60 y 100 RPM.

En las experiencias debe usarse una velocidad de rotación y un husillo que de el mayor torque posible, se recomienda un valor que supere el 40% de torque.

La temperatura del ambiente de operación del equipo fue con una media de 25°C en un rango de humedad relativa de 75 a 80% durante todas las experiencias.

El husillo o spindle usado para todos los testes fue el N°02, de tipo disco con un diámetro de 47mm.

El material testado en el laboratorio de Miel industrializada, según la información de la etiqueta se le ha añadido en su composición agua, jarabe, azúcar y glucosa. Por datos bibliográficos, la miel ligera o industrializada, se sabe que es de comportamiento newtoniano (Messel & otros, 2010; Kayacier & Karaman, 2012; Lazaridou & otros, 2014; Kermiche & otros, 2012; Maldonado & otros, 2018; Silvano & otros, 2014; Oroian & otros, 2016; Slawomir & otros, 2016; Terrab & otros, 2014). Fue testada a diferentes temperaturas de: 20, 30, 40, 50 y 60°C.

Se empleó según el protocolo de pruebas un Vaso tipo Beacker con 500ml de la muestra y se introdujo el Husillo o spindle hasta alcanzar la marca en el respectivo husillo.

8.2 Resultados del experimento

Los datos de análisis de la viscosidad absoluta o dinámica de la miel industrializada, el porcentaje de torque para los tiempos en segundos, usando un viscosímetro rotacional de Brookfield de disco (husillo N° 02), se presentan en el apéndice VI en las tablas correspondientes: VI.1, VI.2, VI.3, VI.4 y VI.5.

En la tabla N° 8.1, se presentan los datos correspondientes a la miel industrializada (T: temperatura, RPM: revoluciones por minuto, %T: porcentaje de lectura de torque del equipo, T: torque calculado y μ : viscosidad dinámica en centipoises, los cuales representan para el mayor torque la viscosidad leída en el equipo.

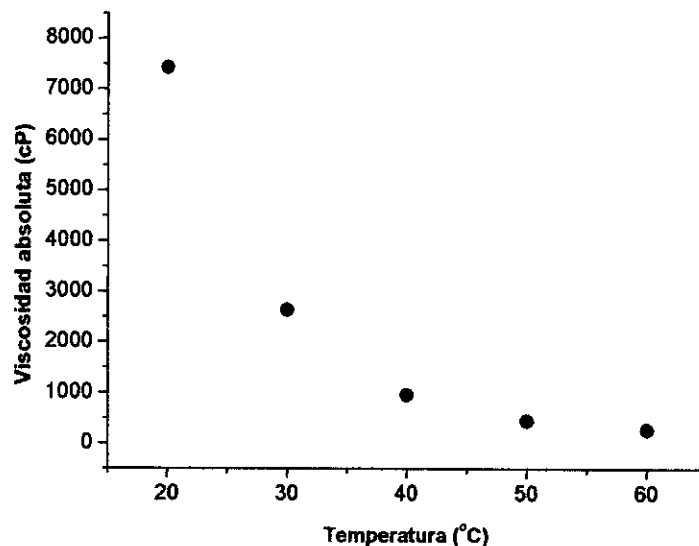
TABLA 8.1
VALORES DE LA VISCOSIDAD VERSUS LA TEMPERATURA DE LA
MIEL INDUSTRIALIZADA

T(°C)	RPM	%T	T(dina.cm)	μ (cP)
20	3	55,7	4 003,2	7 430
30	10	65,9	4 736,2	2 636
40	30	71,6	5 145,9	955
50	60	66	4 743,4	440
60	100	66,91	4 808,1	267,6

Fuente: elaboración propia (2018)

En el gráfico 8.1, se presenta el comportamiento no lineal de la miel industrializada con respecto a la temperatura, se observa que la viscosidad disminuye conforme aumenta la temperatura de la miel, el valor cae cerca de 500cP/°C de 20 a 30°C, para luego caer: 168, 51 y 17cP/°C respectivamente.

GRÁFICO 8.1
VISCOSIDAD ABSOLUTA VERSUS TEMPERATURA DE LA MIEL INDUSTRIALIZADA



Fuente: elaboración propia (2018)

En la tabla 8.2, se proponen tres ecuaciones que fueron utilizadas para modelar dicho comportamiento que representan una función con la temperatura y constantes numéricas.



TABLA 8.2
ECUACIONES MATEMÁTICAS USADAS PARA MODELAR EL COMPORTAMIENTO DE LA VISCOSIDAD ABSOLUTA DE LA MIEL INDUSTRIALIZADA VERSUS LA TEMPERATURA

Denominación	Modelo matemático
Ecuación de Arrhenius	$\mu = A \cdot \exp\left(\frac{B}{T}\right)$
Ecuación de Muller	$\text{Log } \mu = \frac{B}{T} + C$
Ecuación empírica propuesta en este proyecto	$\mu = A \cdot \exp\left(-\frac{t}{B}\right) + C$

Fuente: elaboración propia (2018)

En la tabla 8.3, se presentan las ecuaciones con los valores de las constantes y el valor correspondiente del coeficiente de determinación, el cual indica la eficiencia del grado de ajuste de la ecuación hacia los datos experimentales.

TABLA 8.3
ECUACIONES DE AJUSTE PARA EL COMPORTAMIENTO DE LA MIEL
INDUSTRIALIZADA EN FUNCIÓN A LA TEMPERATURA

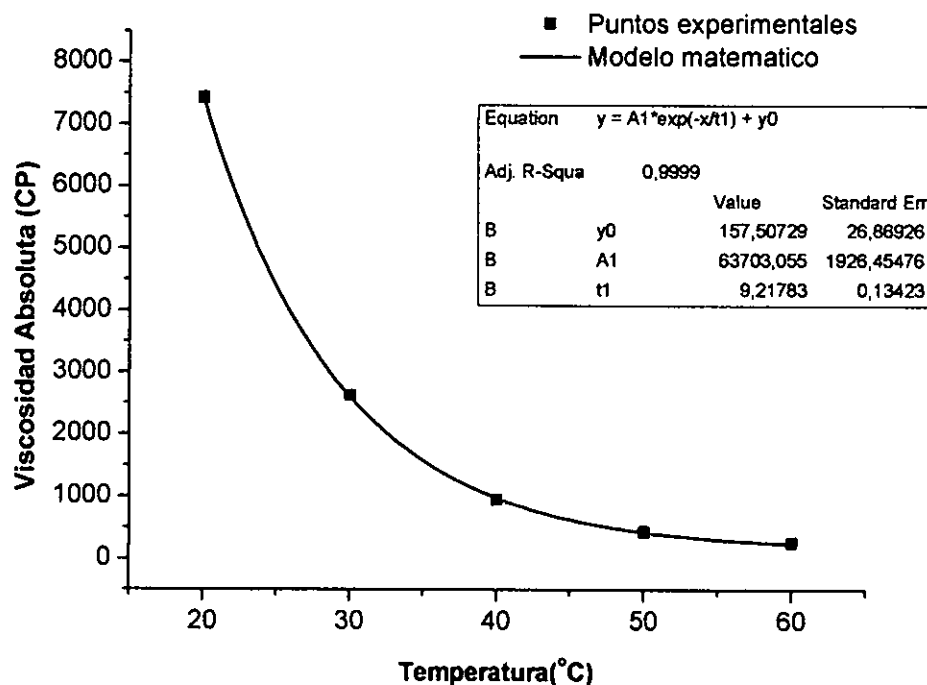
Denominación	Modelo matemático	R ²
Ecuación de Arrhenius	$\mu = 3,75567E - 09 \cdot \exp\left(\frac{8\ 266,7}{T}\right)$	0,98698
Ecuación de Muller	$\text{Log } \mu = \frac{3\ 590,2}{T} - 8,4252$	0,9870
Ecuación empírica propuesta en este proyecto	$\mu = 63\ 703,05549 \cdot \exp\left(-\frac{t}{9,21783}\right) + 157,50729$	0,9999

Fuente: elaboración propia (2019)

En la Fig. 8.4, se presenta la ecuación propuesta en este proyecto, que ajusta a los datos experimentales de la viscosidad de la miel industrial versus la temperatura, con un coeficiente de determinación de 0,9999.

La ecuación propuesta, es una ecuación exponencial de 03 constantes, y que da un buen resultado dentro de la faja de temperaturas analizadas, resultando un coeficiente de determinación de 0,9999.

GRÁFICO 8.2
VARIACIÓN DE LA VISCOSIDAD DE LA MIEL INDUSTRIAL VERSUS LA
TEMPERATURA Y AJUSTE MATEMÁTICO PROPUESTO EN ESTE
PROYECTO



Fuente: elaboración propia (2019)

La ecuación propuesta como resultado de un trabajo experimental usando el viscosímetro rotacional de discos de Brookfield, es una ecuación de 3 constantes, y que da como resultado dentro de la faja de temperaturas analizadas, resultando un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,9999$, siendo éste un valor bastante alto y próximo a la unidad, por lo que esta ecuación es más efectiva que las otras dos ecuaciones (Arrhenius y Muller) pues se ajustan notablemente a los datos experimentales.

En el anexo VII, se presenta el análisis matemático de la relación de las variables involucradas.

V REFERENCIALES

ALEXANDRE W.; CORNELIA R.; DELGADO, A. **Dynamics and long-time behavior of a small bubble in viscous liquids with applications to food rheology.** *Archive of Applied Mechanics*. Vol. 86(1), pp. 979–1002, Sept-2016.

AUGUSTO, P. E.; MIANO, A. C.; ROJAS, M. L. **Evaluating the Guo–Campanella viscoelastic model.** *Journal of Texture Studies*. Vol. 49(1), pp. 121-128, Jan-2018.

BROOKFIELD. **Concenter Viscometers.** Disponible en: www.brookfieldengineering.com; artículo web. Consultada el 10 de Julio del 2017.

CHUNG, C.; OLSON, K.; DEGNER, B.; MCCLEMENTS, D. J. **“Textural properties of model food sauces: correlation between simulated mastication and sensory evaluation methods,”** *Food Research International*. Vol. 51 (1), pp. 310–320, Feb-2013.

GOODWIN, J. W.; HUGHES, R. W. **Rheology for Chemists : An Introduction.** New York, USA; ed. Cambridge: Royal Society of Chemistry 2nd., 2008.

GUO, W.; CAMPANELLA, O. H. **A relaxation model based on the application of fractional calculus for describing the viscoelastic behavior of potato tubers.** *Transactions of the ASABE*, Vol 60 (1), pp. 259– 264, 2017.

KAYACIER, A.; KARAMAN, S. **Rheological and some physico chemical characteristics of selected turkish honeys.** *Journal of texture studies*, Vol 39(1), pp:17-27, 2012.

KERMICHE, F.; BOULEKBACHE, L.; FÉLIX M.; HARKAT, L.; REMINI, H; MADANI, K.; ROMERO, A. **Effects of the incorporation of cantaloupe pulp in yogurt: Physicochemical, phytochemical and rheological properties.** *Food Science and Technology International*, Vol. 24 (7), pp. 585-597; 2012.

LAZARIDOU, A. **Composition, thermal and rheological behaviour of selected greek honeys.** In *Journal of Food Engineering*, 64(1), pp:9-21, 2014.

MALDONADO, G. E.; NAVARRO, A. S.; YAMUL, D. K. **A comparative study of texture and rheology of Argentinian honeys from two regions.** *Journal of Texture Studies*. Vol. 49 (4), pp. 424-433, 2018.

MESSEL, B.; BHANDARI, B.; D'ARCY, B.; CAFFIN, N. **Use of Arrhenius model to predict rheological behaviour in some cristalization honeys.** *Labensmittel-Wissenschaft and Technologie*. Vol. 33 (1), pp. 545-552, 2010.

MITCHELL, G.; HAUPPAUGE, N. **Rheology : Theory, Properties and Practical Applications.**, New York USA, Nova Science Publishers, 1st. edition 2013.

NISHINARI, K. **Rheology, Food Texture and Mastication.** *Journal of Texture Studies*. Vol. 35(2), pp.113-124, 2014.

OROIAN, M.; PADURET, S.; AMARIEI, S.; GUTT, G. **Chemical composition and temperature influence on honey texture properties.** *Journal of food science and technology*. Vol. 53 (1), pp. 431-440, 2016.

OWENS, R. G.; PHILLIPS, T. N. **Computational Rheology.** England, London: Imperial College Press 1st edition, , 2012.

REHMAN,T.; SHARIF, M. K.; MAJEED, M.; HUSSAIN, M. B.; KHAN, M. U.; RODIONOVA, N. S.; SHARIATI, M. A.; SHEVALDOVA, T. V. **Effects of rheological behavior on cereal legumes blended flours.** *Journal of Microbiology, Biotechnology & FoodSciences*. Vol. 7(6), pp. 636-640, 2018.

RENAUD, F., DION, J.-L., CHEVALLIER, G., TAWFIQ, I., & LEMAIRE, R. **"A new identification method of viscoelastic behavior: application to the generalized Maxwell model,** *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 25 (3), pp. 991–1010, 2012.

ROJAS, V. M.; MARCONI, L. F.; GUIMARÃES-INÁCIO, A; LEIMANN, F.V. **Formulation of mayonnaises containing PUFAs by the addition of microencapsulated chia seeds, pumpkin seeds and baru oils.** *Food Chemistry*, Vol. 274(2), pp. 220-227, 2019.

SHUAI, C. J.; DUAN, J. A.; WANG, J. A. **Method of establishing generalized Maxwell model for viscoelastic material,** *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. Vol. 38 (4), pp. 565–569, 2016.

SILVANO, M. F.; VARELA, M. S.; PALACIO, M. A.; RUFFINENGO, S.; YAMUL, D.K. **Physicochemical parameters and sensory properties of honeys from Buenos Aires región.** *Food Chemistry*. Vol. 152 (1), pp. 500-507, 2014.

SLAWOMIR, B.; KRZYSZTOF, M.; BAKOMIUK, J.R. **Rheological properties of some honeys in liquified and cristallised states.** *J. Apic. Sci.* Vol. 60 (2), 2016.

STEFFE, J. F.; DAUBERT, C. R. **Bioprocessing Pipelines. Rheology and Analysis Engineering.** New York, USA, East Lansing, MI: Freman Press, 1st edit., 2013.

TERRAB, A., DIEZ, M. J. & HEREDIA, F. J. **Characterization of moroccan mifloral honeys by their physicochemical characteristics.** *Food Chemistry.* Vol. 79 (1), pp. 373-379, 2014.

VON, B. E; FONSECA, M. R.; AGUILAR, M. A. **Tapioca starch-galactomannan systems: Comparative studies of rheological and textural properties.** *International Journal Of Biological Macromolecules.* Vol. 122 (1), pp. 1173-1183, 2019.

YOGESH K. S.; TYAGIA , R. K.; VISHWAKARMAA A. A.; ANU, K. **Textural, microstructural, and dynamic rheological properties of low-fat meat emulsion containing aloe gel as potential fat replacer.** *International Journal of Food Properties.* Vol. 20 (1), pp. 1132–1144, 2017.



VI APENDICE

TABLA VI.1
DATOS PARA LA MIEL INDUSTRIALIZADA A LA TEMPERATURA DE 20°C

N° RPM	0s		15s		30s		45s		60s	
	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad
	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP
1	9.8	3900	17.8	7040	18	7200	18	7200	18	7200
	704		1279.3		1293.7		1293.7		1293.7	
2	38.3	7660	36.2	7240	37	7400	37.1	7420	37.1	7420
	2752.6		2601.7		2659.2		2666.4		2666.4	
3	51.6	6880	55.6	7410	55.7	7430	55.7	7430	55.7	7430
	3708.5		3996		4003.2		4003.2		4003.2	

Fuente: elaboración propia (2019)

TABLA VI.2
DATOS PARA LA MIEL INDUSTRIALIZADA A LA TEMPERATURA DE 30°C

N° RPM	0s		15s		30s		45s		60s	
	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad
	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP
1	6.9	2760	6.5	2600	6.6	2640	6.5	2600	6.6	2640
	495.9		467.2		474.3		467.2		474.3	
2	16.5	3300	13.2	2640	13.1	2620	13.1	2620	13.1	2620
	1185.9		948.7		941.5		941.5		941.5	
3	17.3	2310	19.4	2590	19.7	2630	19.7	2630	19.7	2630
	1243.4		1394.3		1415.8		1415.8		1415.8	
5	33.3	2664		2632		2640		2632		2640
	2393.3		0.0		0.0		0.0		0.0	
10	59.9	2398	65.8	2632	65.9	2636	65.8	2632	65.9	2636
	4305.0		4729.0		4736.2		4729.0		4736.2	

Fuente: elaboración propia (2019)

TABLA VI.3
DATOS PARA LA MIEL INDUSTRIALIZADA A LA TEMPERATURA DE 40°C

N° RPM	0s		15s		30s		45s		60s	
	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad
	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP
3	2.4	320	7.3	970	7.2	960	7.2	960	7.2	960
	172.5		524.7		517.5		517.5		517.5	
10	31.1	1244	23.5	940	23.4	936	23.4	936	23.5	940
	2235.2		1688.9		1681.8		1681.8		1688.9	
20	50.8	1016	47	940	47.4	948	47.5	950	47.5	950
	3651.0		3377.9		3406.6		3413.8		3413.8	
30	72.3	964	71.6	955	71.5	953	71.5	953	71.6	955
	5196.2		5145.9		5138.7		5138.7		5145.9	
	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	

Fuente: elaboración propia (2019)

TABLA VI.4
DATOS PARA LA MIEL INDUSTRIALIZADA A LA TEMPERATURA DE 50°C

N° RPM	0s		15s		30s		45s		60s	
	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad	% T	Viscosidad
	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP
10	5.1	204	11.2	448	11.5	460	11.7	468	11.6	464
	366.5		804.9		826.5		840.9		833.7	
20	23.2	464	21.4	428	21.1	422	20.8	416	20.7	414
	1667.4		1538.0		1516.5		1494.9		1487.7	
50	53.9	431.2	53.5	428	53.6	428	53.5	428	53.4	427.2
	3873.8		3845.0		3852.2		3845.0		3837.9	
60	76.9	512.7	65.4	436	65.6	437.3	65.9	439.3	66	440
	5526.8		4700.3		4714.7		4736.2		4743.4	

Fuente: elaboración propia (2019)

TABLA VI.5
DATOS PARA LA MIEL INDUSTRIALIZADA A LA TEMPERATURA DE
60°C

N° RPM	0s		15s		30s		45s		60s	
	%T	Viscosidad	%T	Viscosidad	%T	Viscosidad	%T	Viscosidad	%T	Viscosidad
	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP	dinas.cm	cP
30	18.1	241	17.1	228	16.3	217	15.8	211	15.6	208
	1300.8		1229.0		1171.5		1135.5		1121.2	
60	38.1	254	33.5	223.3	33.6	224	33.9	226	34.1	227.3
	2738.2		2407.6		2414.8		2436.4		2450.8	
100	63.4	255.6	65.5	262	66.1	264.4	66.5	266	66.9	267.6
	4556.6		4707.5		4750.6		4779.4		4808.1	

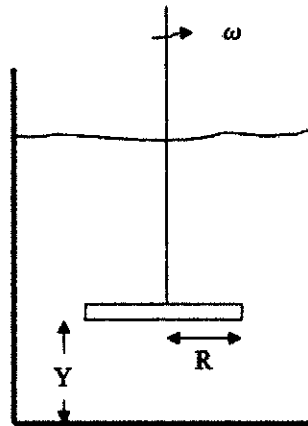
Fuente: elaboración propia (2019)

VII ANEXO

Análisis matemático del viscosímetro concéntrico de discos. Relaciones de Torque, velocidad de giro, radio, distancia y viscosidad absoluta

La Fig. VII.1, presenta el esquema de trabajo del viscosímetro concéntrico de disco.

FIGURA N° VII.1
ESQUEMA DE TRABAJO DEL VISCOSÍMETRO CONCÉNTRICO DE DISCO



Fuente: elaboración propia (2019)

Suponiendo comportamiento Newtoniano, la ley de la viscosidad de Newton puede aplicarse para un diferencial de área:

$$\frac{F}{A} = \sigma = \frac{dF}{dA} = \mu \left(\frac{\omega \cdot r}{Y} \right) \quad (1)$$

Siendo el diferencial de área:

$$dA = 2\pi \cdot dr \quad (2)$$

Sustituyendo en la ecuac. 1 y despejando el diferencial de fuerza:

$$dF = \mu \left(\frac{\omega \cdot r}{Y} \right) 2\pi r \cdot dr \quad (3)$$

El diferencial de torque, será (teniendo en cuenta la doble área)

$$dT = 2(dF)r \quad (4)$$

Sustituyendo (3) en (4)

$$dT = 2 \frac{\mu \left(\frac{\omega \cdot r}{Y} \right) 2\pi r \cdot dr \cdot r}{Y} \quad (5)$$

Integrando para un torque total y para todo el radio R:

$$\int_0^T dT = \frac{4\pi \cdot \mu \cdot \omega}{Y} \int_0^R r^3 dr \quad (6)$$

Despejando la viscosidad absoluta, se tiene:

$$\mu = \frac{T \cdot Y}{\pi \omega R^4} \quad (7)$$

Que expresa la relación de la viscosidad absoluta (μ), el torque aplicado (T), la velocidad angular de giro (ω), el radio del disco (R) y la distancia del disco hacia el fondo del depósito (Y).