

6.4



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**VISCOSIDAD DE PROCESO EN ALIMENTOS  
HETEROGENEOS**

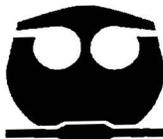
**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**QUÍMICO DE ALIMENTOS**

**P R E S E N T A:**

**ROBERTO SEVILLA MEJORADA**



**MÉXICO, D.F.**

**2002**



**EXAMENES PROFESIONALES  
FACULTAD DE QUIMICA**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

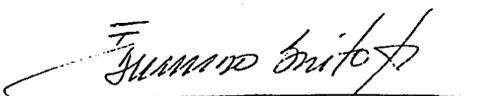
Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE	HUGO RUBEN CARREÑO ORTIZ
VOCAL	EDMUNDO BRITO DE LA FUENTE
SECRETARIO	GREGORIA FLORES RODRIGUEZ
1er SUPLENTE	LUIS MEDINA TORRES
2do SUPLENTE	LUIS ANTONIO PEREZ ENRIQUEZ

LUGAR DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:  
FAC. DE QUÍMICA DEPTO. DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA CONJUNTO E,  
LABORATORIO 313.

  
EDMUNDO BRITO DE LA FUENTE  
(ASESOR DEL TEMA)

  
LUIS MEDINA TORRES  
(SUPERVISOR TÉCNICO)

  
ROBERTO SEVILLA MEJORADA  
(SUSTENTANTE)

## DEDICATORIAS

*A mi Madre gracias por todo lo que me has otorgado, por darme la oportunidad de llegar hasta aquí, por escucharme y apoyarme en todo momento. Gracias Dios mío por solamente con brindarme una mañana más por tenerla, cada día.*

*A mi Hermano Armando por darme fortaleza y tu apoyo, la vida esta llena de enormes y encantadas proezas que lo hacen a uno la vida más alegre y feliz a estas dos palabras las llamo "HERMANO" y no lo cambiaría por nada*

*A FELIPE, CESAR, JORGE, IVAN, IÑIGO, EDUARDO F., MIGUEL A., ALFREDO,...*  
*por ser una parte en mi vida, por su compañía, por sus palabras y consejos otorgados incondicionalmente por que siempre estuvieron a mi lado cuando los necesite, por aguantarme y los más importante por ser su amigo.*

*A ROSARIO, ARMINDA, CINTHIA A., KARLA E, NAIVI, ROSA Ma. LETICIA IRAIS G., ELIDETH Y .DEYANIRA,...*  
*Por ser mis amigas, parte de mis buenos y malos momentos, por todos los alegres momentos que hemos pasado, además de "corromper" mi vida con ese mágico toque de ternura.*

*Especialmente a Janet Angélica L. y a Lilia Teresa G., por brindarme la oportunidad de compartir mis alegrías, mis tristeza, mis sueños, proezas y fracasos; además por ser cómplices incondicionales de mis secretos, pero sobre todo por ser esa maravillosa luz que me acompaña siempre.*

**CADA AMIGO REPRESENTA UN MUNDO PARA NOSOTROS  
UN MUNDO NACE HASTA QUE ELLOS LLEGAN  
Y ES UNICO POR ESTA REUNION  
QUE UN NUEVO MUNDO NACE.**

## AGRADECIMIENTO

*Con especial afecto al Dr. Edmundo Brito y al M en C Luis Medina por el apoyo y dedicación que plasmaron en este proyecto, además por ser parte fundamental de mi desarrollo profesional.*

*A todos mis profesores del CCH-SUR y especialmente a los profesores de la carrera de Química de Alimentos por compartir sus conocimientos y experiencias profesionales.*

*A la Universidad Nacional Autónoma de México con especial afecto a la Facultad de Química y CCH-SUR que abrió sus puertas y fue mi casa durante estos años.*

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico el contenido de mi trabajo de maestría.

NOMBRE: \_\_\_\_\_

FECHA: \_\_\_\_\_

SIGNA: \_\_\_\_\_

## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	4
Nomenclatura	7
CAPITULO I Revisión de la Literatura.	8
1.1 Introducción a la Reología	8
1.2. Propiedades Viscosas	10
1.3 Reometría	14
1.4 Estimación de Funciones Materiales	14
1.5 Estimación de Propiedades Viscosas Empleando los Principios de Mezclado	19
1.6. Estudios sobre la Estimación de Propiedades Viscosas Empleando los Principios de Mezclado	25
CAPITULO II. Objetivos e Hipotesis	28
CAPITULO III Materiales y Métodos	29
3.1 Materiales	29
3.2 Equipo y Metodología para Estimación de Viscosidad de Proceso	30
Capítulo IV. Análisis y Discusión de Resultados	34
4.1. Torque vs Velocidad Angular	34
4.2. Potencia consumida vs. Velocidad Angular	39
4.3 Viscosidad de Proceso	43

---

Capítulo V. Conclusiones	48
Bibliografía	49
Anexos	61
Anexo A Ejemplos de geometrías empleadas en la reometría convencional	53
Cóno y plato	53
Anexo B Modelo de Ostwald- de Waele	55
ÍNDICE DE FIGURAS.	
1.1 Clasificación reológica de materiales	9
1.2 Distribución de velocidad de un fluido viscoso entre dos placas	10
1.3 Representación del modelo newtoniano de viscosidad	11
1.4 Comportamiento reológico de fluidos no newtonianos independientes del tiempo	12
1.5 Comportamiento reológico de fluidos no newtonianos dependiente del tiempo	13
1.6 Estimación de funciones materiales	16
1.7 Reometría de proceso basada en los principios de mezclado	20
1.8 Algoritmo para estimación de viscosidades de proceso con un agitador helicoidal	22
3.1 Reometro Haake CV 20N	30
3.2 Sistemas de agitación helicoidal	30
3.3 Sistemas de agitación helicoidal para estimación de viscosidad de proceso	31
3.4 Clasificación reologica resultante de la aplicación de flujos de cizalla simple	33
4.1 El torque como una función de la velocidad rotacional para la mermelada de naranaja	35

4.2 El torque como una función de la velocidad rotacional para el aderezo	36
4.3 El torque como una función de la velocidad rotacional para el yoghurt de durazno	37
4.4 La potencia como una función de la velocidad rotacional para la mermelada de naranja	40
4.5 La potencia como una función de la velocidad rotacional para el aderezo	41
4.6 La potencia como una función de la velocidad rotacional para el yoghurt de durazno	42
4.7 La viscosidad de proceso para la mermelada de naranja	45
4.8 La viscosidad de proceso para el aderezo	46
4.9 La viscosidad de proceso para el yoghurt de durazno	47
A.1 Diagrama de un sistema de cono y plato	55

## INDICE DE TABLAS

I. Productos y características reológicas en sistemas de mezclado	26
II. Propiedades físicas de los fluidos alimenticios	29
III. Propiedades de flujo de los fluidos de este trabajo	38

## INTRODUCCIÓN

En el área de ingeniería de alimentos, la mayoría de los fluidos presenta un comportamiento no-Newtoniano. Debido a que se conoce poco acerca del impacto que tiene el mezclado en la industria.

En la industria de los alimentos existe un grupo importante de alimentos que esta constituidos por una fase dispersante en la que se encuentra una gran variedad de componentes relativamente solubles y una fase dispersa, compuesta por partículas con distintas propiedades de tamaño, forma, volumen, densidad, composición, etc., tal es el caso de concentrados de frutas, aderezos, yoghurt con frutas salsas, entre otros. Los cuales tiene propiedades reológicas dependientes tanto de las características de la fase continua como la concentración de partículas y propiedades de las partículas.

Las propiedades reológicas dependientes tanto de las características de la fase continua en la que se encuentra disueltos azúcares, ácidos, proteínas, sales y otros componentes. Para la manipulación de estos productos en la industria alimentaria es necesario conocer sus propiedades reológicas especialmente cuando se trata de someterlos a operaciones como: Transporte, mezclado, homogeneización, esterilización.

La medición de las propiedades reológicas en suspensiones no sólo resulta compleja por las propiedades inherentes a la suspensión y la respuesta de las partículas al cizallamiento, sino también por problemas debidos al tamaño y/o concentración de las mismas lo que limita el empleo de geometrías convencionales.

En los viscosímetros con geometría convencionales (cilindros concéntricos, cono plato placa paralelas) lo que imposibilita la obtención de parámetros de flujo en suspensiones, así se pueden tener otro tipo de problemas durante la medición como son por ejemplo, cuando se usan de cilindros concéntricos, la falta de homogeneidad debido a la formación de capas menos densas sobre la superficie de los cilindros causada por la interacción de partículas.

Con el objeto de lograr una mejor aproximación al cálculo de propiedades de flujo, se ha empleado la reometría en sistemas de mezclado, en los cuales la geometría del impulsor resulta fundamental para el mantenimiento de la uniformidad en la distribución de la velocidad de deformación durante el mezclado, lo cual debe ser considerado al seleccionar el impulsor a utilizar.

En este sentido los impulsores de proximidad (pequeño espacio entre la pared del recipiente y el agitador) son los más recomendados, entre los más eficientes se encuentra los helicoidales, los impulsores helicoidales han demostrado ser eficientes en el mezclado de fluidos de reología compleja se deriva su empleo en viscosimetría de mezclado.

Lo anterior resulta ventajoso para la evaluación de características de diversos productos como lo pueden ser los fluidos alimenticios con partículas en suspensión.

Sin embargo los impulsores helicoidales no han sido empleados hasta el momento en la obtención de propiedades de flujo en sistemas alimenticios, por lo que se considera necesario contar con técnicas para emplear impulsores helicoidales y verificar la utilidad de los mismos con fluidos que siguen el modelo Newtoniano y de Ostwald -de Waele, en la evaluación de propiedades de flujo de suspensiones en alimentos.

Considerando las diferentes situaciones expuestas anteriormente se propuso este trabajo. El objeto es la caracterización reológica en sistemas alimenticios heterogéneos mediante el uso de un agitador helicoidal con la ayuda de un reómetro (Haake CV 20N). Los objetivos generales y particulares se presenta a continuación. En los capítulos posteriores, se presenta aspectos generales de la reología en alimentos. Después, se describe los materiales y análisis de resultados experimentales. En el siguiente se presenta conclusiones. Finalmente los anexos que conforma esta tesis.

## NOMENCLATURA

Diámetro del impulsor	d
Índice de consistencia	m
Constante de potencia	$K_p$ (newtoniano)
Constante de potencia	$K_{p(n)}$ (no newtoniano)
Constante de proporcionalidad	$K_s$
Índice de comportamiento de flujo	n
Velocidad rotacional del impulsor	N
Número de potencia	$N_p$
Número de Reynolds	Re
Potencia	P
Torque	T
Torque máximo	$T_{Max}$
Porcentaje de deformación del rotavisco	%D
Porcentaje de torsión del rotavisco	% $\tau$
Velocidad de deformación	$\gamma$
Viscosidad aparente o de proceso	$\eta$
Esfuerzo de deformación	$\sigma$ ó $\tau$
Densidad	$\rho$

---

## Capítulo I – Revisión de la Literatura

### 1.1 Introducción a la Reología

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia. En otras palabras, esta ciencia estudia los cambios o deformaciones producidos por el flujo o la acción de esfuerzos sobre la materia. Entre las propiedades reológicas más comunes se pueden citar: la viscosidad, la elasticidad y la plasticidad. Esta ciencia que tiene sus orígenes en la mecánica de fluidos, es muy importante, no solo desde el punto de vista de determinación de propiedades de materiales y procesos, sino también desde una perspectiva industrial muy práctica [Mueller et al., 1973].

La justificación de estudios reológicos se puede encontrar en los siguientes argumentos:

- A. Contribución al conocimiento de propiedades fundamentales de los materiales.
- B. Generación de parámetros de control de calidad de procesos y productos.
- C. Utilización de información reológica para el diseño de productos y procesos, así como diseño de equipos de proceso.

El comportamiento reológico de los materiales alimenticios es muy diverso como diversa es la naturaleza misma de los alimentos. La clasificación reológica mas general esta basada en la mecánica de los medios continuos y se resume en la Figura 1.1. Como se puede apreciar, la mayoría de los sistemas alimenticios están clasificados como materiales visco-elásticos, esto quiere decir, que muestran propiedades viscosas y elásticas.

## CLASIFICACION REOLOGICA

		EJEMPLOS	
MECANICA DE MEDIOS CONTINUOS	FLUIDOS	Fluido no-viscoso (Caso Ideal $\mu = 0$ )	Ninguno
		Fluido viscoso lineal (Fluido Newtoniano)	Agua
		Material viscoso no-lineal (Fluido Newtoniano generalizado)	Soluciones poliméricas (diluidas)
	SOLIDOS	Material visco-elástico	Suspensiones Soluciones poliméricas (concentradas) Plásticos
		Material elástico no-lineal	Caucho
		Sólido elástico lineal	Resorte lineal (Hooke)
		Sólido no-deformable (Caso ideal $G = \infty$ )	Ninguno

$\mu$  = viscosidad de cizalla [newtoniana];  $G$  = modulo de Hooke

Figura 1.1. Clasificación reológica de materiales [E, Brito de la Fuente, 2002]

Existen otras clasificaciones del comportamiento reológico, sin duda, la más común es aquella valida para propiedades viscosas en flujos de cizalla unidireccional, en estado estacionario. Esta clasificación se discute en los párrafos siguientes. Es preciso mencionar en este punto que, la viscosidad es quizás la propiedad mas conocida y estudiada, aunque no en todos los casos de flujo, la mas importante.

## 1.2. Propiedades Viscosas

La viscosidad se considera como la resistencia al flujo de cada una de las capas del fluido en movimiento. En la Figura 1.2 se representa el flujo laminar [también conocido como flujo viscoso] entre dos placas paralelas, mismo que se define como el deslizamiento de entidades independientes de numerosas láminas del fluido infinitamente delgadas.

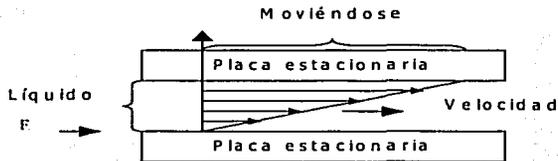


Figura 1.2 Distribución de velocidad de un fluido viscoso entre dos placas.

Uno de los primeros en definir el flujo viscoso fue Isaac Newton. El autor lo describió en los siguientes términos: "la resistencia ocasionada por la no deslizableidad de un líquido es proporcional, siempre que los demás factores se mantengan constantes, a la velocidad a que separa las distintas partes del fluido". Si el flujo se da en una sola dirección y en el estado estacionario, el concepto anterior forma la ley de Newton, dada por:

$$\sigma = \eta \gamma \quad (1-1)$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo cortante, esfuerzo de deformación o tensión de cizalla;  $\eta$  es el coeficiente de viscosidad y  $\gamma$  se define como la velocidad de deformación ó gradiente de velocidad. Esta definición supone que la viscosidad es independiente del tiempo y solo de la naturaleza del material y su estado termodinámico.

Para un líquido newtoniano, la ecuación (1-1) se ilustra gráficamente en la Figura 1-3:

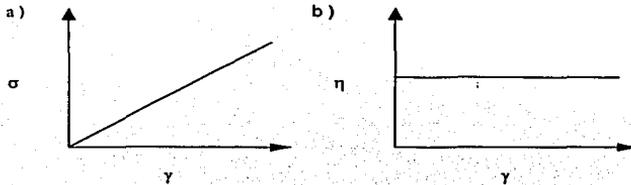


Figura 1.3 Representación del Modelo newtoniano de viscosidad.  
A) Curva de Flujo; B) Curva de Viscosidad

Como se puede apreciar de la Figura 1.3, la función  $\sigma - \gamma$  es una línea recta que pasa por el origen y cuya pendiente es la viscosidad [misma que es una constante, como se aprecia en la función  $\eta - \gamma$ ]

Existen otra serie de fluidos de enorme interés comercial y tecnológico cuyo comportamiento se desvía de la ley de Newton. Estos son llamados de manera general fluidos no Newtonianos. Para estos casos, la viscosidad no es constante, ya que depende de la velocidad de deformación y en ocasiones del tiempo de cizalla ( $t$ ). En otras palabras, de manera general, para los fluidos no-newtonianos,  $\eta = f(\gamma; t)$  además del estado termodinámico del material [Vg., temperatura].

Los fluidos no – Newtonianos se clasifican en independientes o dependientes del tiempo. Los fluidos independientes del tiempo son: pseudoplásticos (P) y dilatantes (D).

Los fluidos pseudoplásticos son menos espesos al someterlos a velocidades altas de deformación. Para estos fluidos, la viscosidad depende de la velocidad de deformación y no del tiempo. Al representarlos en un gráfico de  $\sigma$  vs  $\gamma$  no se obtiene una línea recta. Para estos fluidos, la velocidad de deformación aumenta en proporción más alta que el esfuerzo cortante, por lo tanto la viscosidad disminuye a medida que aumenta la velocidad de deformación.

Para los fluidos dilatantes, la viscosidad aumenta al incrementar la velocidad de cizalla y también es una función independiente del tiempo. Las relaciones  $\sigma - \gamma$  y  $\eta - \gamma$  para fluidos pseudoplásticos y dilatantes son ilustradas en la Figura 1.4.

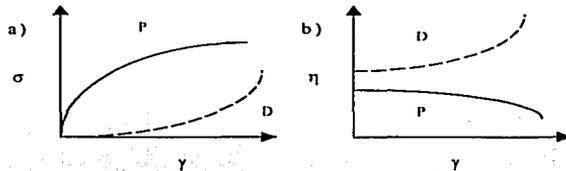


Figura 1.4 Comportamiento reológico de fluidos no newtonianos independiente del tiempo

En el caso de fluidos no-newtonianos dependientes del tiempo, el esfuerzo de cizalla cambia con el tiempo de cizallamiento. En otras palabras, la viscosidad depende de la magnitud y del tiempo de la deformación. Estos fluidos se clasifican en dos grupos:

- a) Tixotrópicos.- La deformación es definida como una transición reversible, causada por modificaciones estructurales sufridas por el material. En consecuencia, la viscosidad no solo depende de la velocidad de deformación, sino también de la historia [tiempo] de deformación. Para estos fluidos, la viscosidad disminuye conforme aumenta la velocidad de cizalla

[pseudoplasticidad], pero esta viscosidad es función del tiempo de cizalla o deformación y tiende a aumentar al terminar la deformación [Glicksman et al., 1969]. La tixotropía se caracteriza por la disminución de la viscosidad con respecto al tiempo a una velocidad de cizalla dada; la viscosidad inicial solamente se restaura después de un periodo de recuperación.

- b) Reopéticos .- Para estos fluidos la viscosidad se incrementa con el tiempo de cizallamiento a una velocidad de cizalla dada. En otras palabras, es un comportamiento dilatante dependiente del tiempo, lo opuesto del comportamiento tixotrópico.

Estos comportamientos dependientes del tiempo se muestran en la Figura 1.5

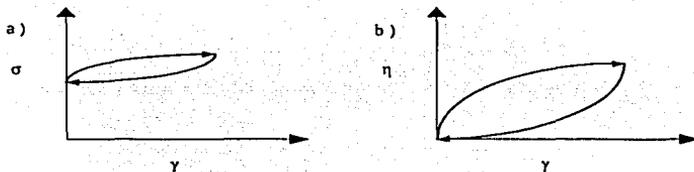


Figura 1.5 Comportamiento Reológico de Fluidos No newtonianos dependiente del Tiempo.  
a) Tixotrópico; b) Reopético

Existen muchos ejemplos de sistemas alimenticios que presentan comportamientos newtonianos y no-newtonianos, dependientes e independientes del tiempo. Para mayores detalles, se sugiere consultar el texto de Steffe [1996]

### 1.3 Reometría

La reometría es la parte de la reología que se encarga de las determinaciones de las propiedades reológicas. Estas propiedades no son otra cosa que el resultado de las interacciones entre dos tipos de variables, las cinemáticas [esfuerzos] y las dinámicas [deformaciones]. Cuando estas relaciones se expresan a través de ecuaciones matemáticas, los coeficientes de estas relaciones son conocidos como funciones materiales, como la viscosidad. Lo anterior quiere decir que, fijo el estado termodinámico del material [Vg., temperatura, pH, fuerza iónica, etc.] las propiedades reológicas dependen de la naturaleza del material fundamentalmente. En muchos casos, también dependen del tiempo y tipo de dinámica o cinemática impuesta sobre el material. La estimación de estas funciones materiales, es entonces el objetivo de la reometría.

### 1.4 Estimación de Funciones Materiales

La estimación de funciones materiales requiere normalmente de la aplicación de dinámicas [flujos o deformaciones] o cinemáticas bien conocidas. Esto quiere decir, el flujo o deformación, así como los esfuerzos involucrados, tienen una expresión matemática conocida. En la Figura 1-6 se muestran de manera resumida las condiciones que se tienen que cumplir para la determinación de una de las funciones materiales más conocida y estudiada, la viscosidad. En esta figura, se aplica un flujo, en una geometría muy específica y a través de la descripción matemática de este flujo, así como de variables medibles, como velocidad angular, torque y parámetros geométricos, es posible estimar la viscosidad. Esto quiere decir que, la viscosidad, como todas las funciones materiales que describen el comportamiento reológico de un material, no se miden directamente, sino que se estiman a partir de flujos conocidos. El cumplimiento riguroso de cada una de las

suposiciones y circunstancias descritas en la Figura 1-6, permite obtener estimaciones absolutas de las funciones materiales. Esto significa que, los resultados son independientes del equipo empleado, así como de la geometría y solo dependen de la naturaleza del material. El no-cumplimiento de alguna de las suposiciones o circunstancias descritas en la Figura 1-6, significa que las estimaciones o "mediciones" no son absolutas sino relativas.

Existen pocas geometrías que permitan establecer condiciones de flujo tales que el esfuerzo y velocidad de cizalla sean conocidas y en consecuencia sea posible obtener funciones materiales o mediciones absolutas. Así, el flujo entre los espacios anulares formado entre un cono y una placa; entre dos cilindros concéntricos y entre dos placas paralelas, son las geometrías clásicas empleadas para la estimación de funciones materiales. Las ecuaciones que permiten estimar la viscosidad con algunas geometrías son mostrada en el anexo A

Sin duda, una de las condiciones fundamentales en las que esta basada la reometría o la estimación de funciones materiales, es en la continuidad de los medios, como se anota también en la Figura 1-6. Esto quiere decir, que los materiales o medios tienen que ser homogéneos. Lo anterior permite entonces que la medición sea isotrópica, esto quiere decir, que no importa en donde se realice dentro del material, las propiedades estimadas o medibles no cambian. En otras palabras, si los medios son isotrópicos, la viscosidad es única y solo dependerá de la naturaleza del material y desde luego, del estado termodinámico en que este se encuentre. Existen criterios en la literatura, para juzgar si un medio puede o no ser considerado como un medio continuo. Estos se discuten en los párrafos siguientes.

## Reometría

### Medición de Funciones Materiales (v.g., viscosidad)

#### Suposiciones

- Flujo laminar
  - Estado estacionario
  - No "deslizamiento" en la pared
  - Homogeneidad del medio
- ⇒ medios continuos



Condiciones  
Frontera



Solución {torque, velocidad-RPM, geometría}



Aplicación de la Ley de Newton



VISCOSIDAD

### Flujo Viscométrico

Flujo en una geometría



Ecuaciones de movimiento  
(EDP)



conocida

ERDFEF



Instituto Nacional  
de Investigaciones de  
Materiales

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$



Figura 1-6. Estimación de funciones materiales [E. Brito de la Fuente, 2002]

Para determinar si un medio puede o no ser considerado como medio continuo y así saber si las interacciones entre el medio y las paredes de las geometrías empleadas son importantes o despreciables, se tiene que mirar a la relación de tamaños, entre las partículas del material y la dimensión de la geometría que los contiene [donde fluyen]. En otras palabras, se tiene que conocer la siguiente relación:

$$\frac{\text{tamaño de las partículas suspendidas}}{\text{dimension mas pequeña de la geometria que las contiene}} \quad (1-2)$$

Así, si este radio es  $< 0.1$  [en cono-placa y cilindros concéntricos], se puede considerar que el medio o material es continuo y por consecuencia, las interacciones con las paredes no afectaran las estimaciones de las funciones materiales [Barnes et al., 1997]. Si la relación es  $> 0.1$ , entonces el uso de la reometría convencional [Vg., cono-placa, placas paralelas y cilindros concéntricos] es cuestionable.

Desafortunadamente, en el área de alimentos, así como en otras áreas, muchos materiales son heterogéneos y no pueden cumplir con este requisito. Esto se debe en parte a su naturaleza, esto es, están compuestos de fibras, sólidos, surfactantes, polímeros [Vg., proteínas, carbohidratos, etc.], aditivos, etc., lo que los convierte en materiales complejos heterogéneos. En muchas ocasiones, cuando el alimento se encuentra en fase líquida, es común que tenga propiedades similares a las de las suspensiones. Para estos casos, las alternativas para estimar propiedades reológicas con sentido y significancia, no son obvias y se discuten en los párrafos siguientes.

Para poder determinar el comportamiento reológico de un fluido se pueden seguir dos aproximaciones:

- ❖ **Mediciones absolutas:** Proporcionan funciones materiales, estos es, respuesta del material bajo condiciones de esfuerzos y deformaciones bien definidos y condiciones geométricas rigurosamente controladas.
- ❖ **Mediciones relativas:** Respuestas del material dependientes de las condiciones de la prueba. Estas mediciones no pueden ser usadas como estándares de comparación, a menos de especificar todas las condiciones de la prueba. En este sentido, los resultados no son funciones materiales. El valor de estas mediciones radica en que pueden ser utilizadas como referencia interna en una fabrica o laboratorio.

Existen varias alternativas para manejar fluidos heterogéneos desde el punto de vista de determinaciones de propiedades reológicas. Entre estas se pueden citar [Brito et al., 1998]:

- Modificaciones de las superficies de cizallamiento [para evitar deslizamiento en la pared, en el caso de suspensiones]
- Modificaciones de las geometrías tradicionales [modificación de cilindros concéntricos para disminuir problemas de sedimentación]
- Uso de los principios de mezclado

## 1.5 Estimación de Propiedades Viscosas Empleando los Principios de Mezclado

Es probable que la estrategia más común para tratar de resolver el problema de la heterogeneidad de los medios, sea la referente al uso de los principios de mezclado. La idea consiste en reemplazar el sensor interno de una geometría tradicional [cono-placa; cilindros concéntricos; placas paralelas] por un agitador o impulsor. En otras palabras, el viscosímetro o reómetro funciona en este caso como un pequeño sistema de agitación, donde el tanque es el recipiente externo y el agitador de una determinada geometría, el sensor que impone o crea el flujo [Brito et al., 1998; Steffe 1996].

Diversas geometrías de agitadores han sido empleadas para estimaciones relativas principalmente de propiedades viscosas [Steffe 1996]. Sobresalen las turbinas de paletas anchas (vane), hélices (HR) y discos. Si bien los principios de uso para todas las geometrías son los mismos, es requisito contar con una caracterización hidrodinámica previa al uso de estas geometrías.

Las variables medibles en el caso de un viscosímetro o reómetro rotacional siguen siendo las mismas que cuando se emplean geometrías tradicionales, esto es, velocidad de agitación y torque. Sin embargo, para el caso del uso de geometrías de agitación, se requiere conocer la potencia consumida como función de la velocidad de agitación, no solo para el caso newtoniano, sino para otros tipos de comportamiento reológico [no-newtoniano]. A esta base de conocimientos se refiere la caracterización hidrodinámica para cada geometría de agitador. Desafortunadamente, esta información no está disponible y esto ha limitado el uso de esta estrategia a las geometrías de agitadores antes mencionadas.

Los principios hidrodinámicos empleados en esta estrategia de medición, se refieren en la Figura 1-7. Como se puede observar, las mediciones efectuadas en un viscosímetro o reómetro convencional, empleando una geometría dada de un agitador, son esencialmente la velocidad angular del agitador,  $N$  y el torque,  $T$ , requerido para mantener constante la velocidad angular. Al variar  $N$  cambia  $T$  en función de las características reológicas o viscosas del producto.

### Reometría no-convencional (uso del mezclado)

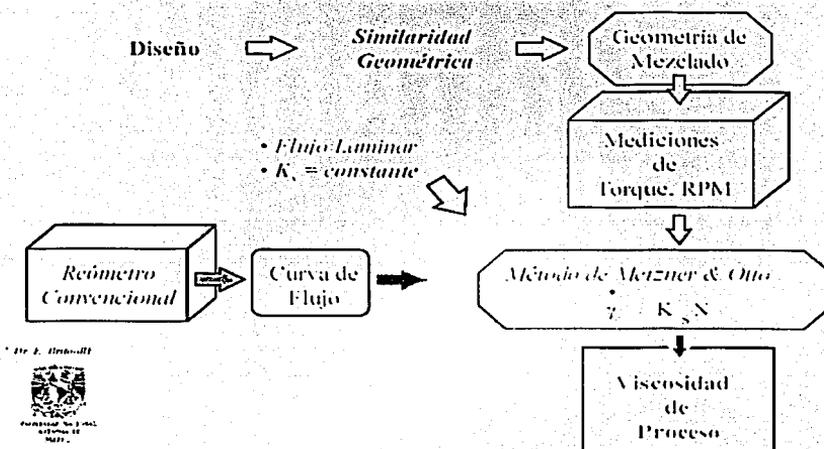


Figura 1.7 Reometría de proceso basada en los principios de mezclado  
 [Brito et al, 1998]

Por otro lado, el problema de estimación de la velocidad de cizalla,  $\gamma$ , es resuelto a través del uso de la metodología propuesta por Metzner y Otto (1957). Según estos autores, "si dos fluidos, uno de viscosidad constante y otro no-constante, son agitados por el mismo agitador y a la misma velocidad, si ambos consumen la misma potencia, significa entonces que tienen viscosidades equivalentes". Al estudiar fluidos pseudoplásticos, Metzner y Otto (1957) encontraron una relación para estimar la llamada "velocidad de cizalla equivalente o aparente". Esta relación esta dada por:

$$\gamma_e = K_s N \quad (1-3)$$

donde  $K_s$  fue reportada como constante, independiente del comportamiento reológico y con valores entre 11 – 13 para turbinas de paletas planas (tipo Rushton).

Como la Figura 1-7 lo sugiere, la estimación de la constante de Metzner y Otto,  $K_s$  supone el uso de un reómetro convencional, lo que aparentemente suena contradictorio en tanto que, "a priori" no se conoce el comportamiento reológico de un determinado material heterogéneo. Brito et al., (1998) discuten con mucho detalle estos principios y muestran de manera clara, como, a través del conocimiento de la curva de potencia [principios de mezclado] obtenida con fluidos homogéneos, es posible estimar la viscosidad de proceso de cualquier fluido heterogéneo. Los autores caracterizaron un agitador helicoidal para fines de estimación de viscosidad de proceso. En la Figura 1.8 se muestra el algoritmo empleado por estos autores para la estimación de viscosidades de proceso, empleando un agitador helicoidal y los principios de mezclado.

## VISCOSIDAD DE PROCESO CON UN AGITADOR HELICOIDAL

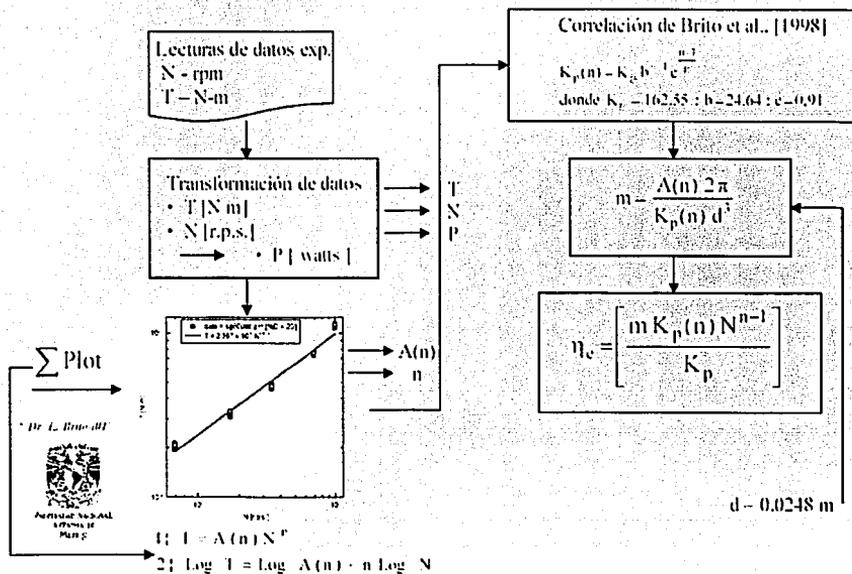


Figura 1.8 Algoritmo para estimación de viscosidades de proceso con un agitador helicoidal [Brito et al, 2002].

La representación tradicional del consumo de potencia, en el régimen laminar [ $Re \leq 10$ ] en tanques agitados [no importa la escala], esta dada en términos de números adimensionales por la ecuación:

$$N_p = K_p R_e^{-1} \quad (1.3)$$

donde la constante de potencia newtoniana laminar,  $K_p$ , depende de la geometría del agitador [Rushton et al., (1950); Chavan y Ulbrecht, (1973)]. Para el caso del agitador helicoidal estudiado por Brito et al., (1998), este valor es 162.55, como se muestra en la Figura 1.8. Por otro lado,  $N_p$  representa el numero de potencia y  $R_e$  el numero de Reynolds, ambos numeros adimensionales dados por:

$$N_p = \frac{P}{\rho d^3 N^3} \quad (1.4)$$

y

$$R_e = \frac{\rho d^2 N}{\eta(\gamma)} \quad (1.5)$$

donde  $P$  es la potencia [Nm/s];  $\rho$  es la densidad [ $\text{Kg}/\text{m}^3$ ];  $d$  es el diámetro del impulsor [m];  $N$  es la velocidad rotacional [r.p.s.] y  $\eta(\gamma)$  es la viscosidad [Pa.s].

Se debe subrayar que, el número de Reynolds en la ecuación (1.5) esta escrito para fluidos con una función de viscosidad  $\eta(\gamma)$ . Esta función se convierte en la viscosidad newtoniana  $\mu$ , si la función es una constante, independiente de la velocidad de deformación,  $\gamma$ .

Lo anterior significa que, para los fluidos newtonianos, no es necesario conocer la distribución de velocidades de deformación o los valores de las  $\gamma$ 's creadas por una determinada geometría de impulsor. En cualquier caso, la viscosidad es una constante.

Por el contrario, para el caso no newtoniano, es necesario conocer o estimar la velocidad de deformación en función de las condiciones de operación, para así poder definir la viscosidad que va en la definición del  $Re$  (ecuación 1.5). Este problema es superado al emplear la metodología propuesta por Metzner y Otto (1957) como se describe en la Figura 1.7.

La metodología propuesta por Metzner y Otto (1957) permite estimar un valor para la velocidad de deformación,  $\dot{\gamma}$  y entonces, usar un valor para la viscosidad en el  $Re$ . La ecuación (1.3) muestra la relación entre una velocidad de deformación aparente o efectiva y la velocidad del agitador. Esta relación tiene un coeficiente,  $K_s$  mismo que ha sido reportado, no solo como constante, sino también como una función de la geometría del agitador y las propiedades reológicas. En particular,  $K_s$  ha sido reportado como función del índice de flujo o nivel de pseudoplasticidad [Brito et al, (1998); Calderbak y Moo Young, (1959); Bourne y Butter (1969); Rieger y Novak (1973)]. En el algoritmo mostrado en la Figura 1.8, no se presupone un valor para  $K_s$  en tanto que este puede ser una función del índice de flujo,  $n$ , para el caso de fluidos pseudoplásticos que siguen el modelo de la Ley de la Potencia [Brito et al, (1998)].

A continuación, se presenta una breve revisión de la literatura relacionada con el uso del mezclado para la evaluación de las propiedades viscosas.

### 1.6 Estudios sobre la Estimación de Propiedades Viscosas Empleando los Principios de Mezclado

El uso de los principios de mezclado para la evaluación de propiedades reológicas no es algo novedoso. De hecho, es a partir del trabajo de Metzner y Otto (1957) que se abre esta posibilidad. Existen muchos trabajos reportados sobre el uso de esta técnica para diferentes clases de fluidos, entre otros, suspensiones, caldos de fermentación y alimentos [Castell-Pérez et al., 1992]. En los siguientes párrafos, se presentan algunos de los trabajos más relevantes.

Saravacos y Moyer (1967) realizaron estudios con purés de frutas y verificaron la validez de la ecuación (1.3).

Qiu y Rao (1967) reportaron la aplicación de un impulsor tipo vane para la medición de viscosidad y del punto de cedencia en purés de manzana.

Un trabajo que destaca es el realizado por Kemblowski y Kristiansen (1986), con caldos de fermentación pseudoplásticos y agitadores helicoidales. Los autores utilizaron el método de Metzner y Otto (1957), con un valor constante para  $K_s$ . Evidentemente, sus resultados son relativos del valor de  $K_s$ , empleado.

Di Lullo (1994), utilizó el impulsor helicoidal con tornillo y la geometría de Couette para estimar propiedades del flujo de suspensiones de carbón. En el caso de la geometría Couette, la heterogeneidad del material provocó inestabilidad en la curva de esfuerzo de cizalla, mientras que con la geometría helicoidal, en todo el rango de rapidez de cizalla aplicada, las curvas se presentaron más estables.

Brito et al., (1998) emplearon un sistema helicoidal adaptado a un reómetro, para la estimación de las propiedades reológicas de suspensiones acuosas de partículas de caolín. Los autores observaron valores de viscosidad más estables con la geometría helicoidal, que con las geometrías tradicionales (cilindros concéntricos, cono y plato). Por otro lado, no se presentaron problemas de sedimentación o deslizamiento en la pared, lo que explica la estabilidad de las estimaciones de viscosidad con el sistema helicoidal.

Medina y Gómez (2001) utilizando un impulsor helicoidal, estudiaron las propiedades reológicas de dispersiones proteicas de Ajonjolí. Observaron que las concentraciones de proteína de ajonjolí utilizadas no se observó un cambio marcado en la viscosidad de proceso. La mayoría de las soluciones presenta un comportamiento con tendencia de flujo newtoniano. Otros trabajos son mencionados en la Tabla I.

Tabla I. Productos y Características Reológicas en Sistemas de Mezclado

REFERENCIA	SISTEMA DE MEZCLADO	PRODUCTOS	ESTUDIO
Bongennar (1973)	Turbina	Suspensión de mohos	Esfuerzo de cedencia
Castell-Perez (1987)	Palas en forma de banderas	Puré de Albaricoque	Velocidad de deformación
Ducla (1983)	Turbina	Pseudoplásticos	Dependencia del tiempo deformación
Edwards (1976)	Ancla y hélice	Catsup y yoghurt	Dependencia del tiempo deformación
Ford & Steffe (1986)	Palas extremas	Puré de Albaricoque	Pseudoplásticidad
Kemblowski & Kristisen (1986)	Helicoidal con Tornillo	Caldos de Fermentación	Curvas de Flujo
Kemblowski (1988)	Helicoidal	Pseudoplásticos	Viscosidad
Leong (1987)	Vane	Suspensiones de hulla	Esfuerzo de Cedencia

Tabla I. (continuación)

REFERENCIA	SISTEMA DE MEZCLADO	PRODUCTOS	ESTUDIO
Quio y Rao	Vane y Estrella	Puré de Manzana	Pseudoplásticidad
Rao (1975)	Palas en Forma de Bandera	Puré de Manzana, Puré de Tomate	Esfuerzo de cedencia
Roa y Cooly (1984)	Bandera y Estrella	Pseudoplásticos	Viscosidad
Sadowska (1982)	Cuchilla	Emulsiones de carne	Viscosidad
Sestak (1982)	Ancla	Suspensiones agua bentonita	Dependencia del tiempo
Steffe (1988)	Palas en forma de Bandera	Fécula de comida	Viscosidad máxima
Tamura (1988)	Helicoidal con tornillo	Salsa de tomate	Viscosidad
Volcaldo y Charis (1971)	Cilindro Acanalado	Suspenciones de caolín	Esfuerzo de cizalla
Voisey (1988)	Palas en forma de Bandera	Fécula	Viscosidad máxima
Nguyen & Boger (1987)	Vane	Suspensiones de lodo rojo	Esfuerzo de cedencia.
Walker (1988)	Helicoidal	Harina de trigo	Viscosidad máxima

Si bien es cierto que hay un gran número de trabajos sobre el tema, aun falta mucho por cubrir, en particular para sistemas alimenticios, donde el universo de productos es bastante considerable. No solo faltan por analizar y describir muchos sistemas alimenticios, también se requiere generar más conocimiento en torno a la manera de estimar la llamada "velocidad de deformación efectiva o aparente". Sin duda, los trabajos recientes sobre simulación numérica en el área de mezclado, pueden contribuir a un mejor entendimiento de estos problemas complejos.

En este trabajo se estudian las viscosidades de proceso de varios alimentos. Se emplea una geometría helicoidal, ya que sobre esta se han reportado muchos trabajos relacionados con aspectos hidrodinámicos, como de estimación de viscosidades de proceso.

## Capítulo I Objetivos e Hipótesis

### Objetivo General:

Estimar la viscosidad de proceso en sistemas alimenticios heterogéneos, mediante el uso de un agitador helicoidal y los principios de mezclado, para conocer más sobre el comportamiento reológico de materiales complejos.

### Objetivos Particulares

- Estudiar el efecto de la pseudoplasticidad en el consumo de potencia, empleando sistemas alimenticios heterogéneos, con partículas de gran tamaño, a fin de estimar su impacto en la evaluación de la viscosidad de proceso.
- Evaluar la validez del concepto de viscosidad de proceso en fluidos con grandes partículas, a través de la estimación de señales de torque estables y reproducibles.

### Hipótesis

La mayoría de los sistemas alimenticios son medios heterogéneos, en donde la presencia de macro partículas no permite suponer la continuidad del medio. Por lo anterior, las mediciones reológicas no son iso-trópicas. Entonces, el empleo de un sistema de agitación, que logre altos niveles de homogeneidad, así como la aplicación de la teoría de mezclado, permitirá estimar viscosidades de proceso con mayor significado que las obtenidas con geometrías convencionales.

## Capítulo II Materiales y Métodos

En este capítulo se presenta la descripción de la parte experimental. Primero se describen los materiales empleados y posteriormente, los equipos y metodologías.

### 3.1. Materiales

Los materiales alimenticios empleados en el presente estudio fueron productos alimenticios comerciales, descritos a continuación:

- Aderezo Para ensalada de la marca Hellmann's.
- Mermelada de Naranja de la marca McCormick.
- Yoghurt de Durazno de la marca Alpura.

Estos productos fueron analizados tal cual, sin ningún pre-tratamiento, excepto la temperatura para la estimación de la viscosidad de proceso.

En la Tabla II. Se muestra las propiedades físicas de los fluidos alimenticios empleados en el presente trabajo

Tabla II Propiedades físicas de los fluidos alimenticios

Nº	Fluido	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
I	Mermelada de Naranja	1444.08
II	Aderezo	981.70
II	Yoghurt de Durazno	1084.30

### 3.2. Equipo y Metodología para Estimación de Viscosidad de Proceso

La estimación de la viscosidad de proceso se llevo a cabo utilizando un reómetro Marca Haake, Modelo CV 20N. El sistema cuenta con un baño para el control de temperatura, también de marca Haake. El equipo es operado a través de una computadora PC. En la Figura 3.2 se muestra el reómetro.



Figura 3.1 Reómetro Haake CV 20N.

En relación con el sistema de agitación empleado, si bien existen varias configuraciones propuestas para hélices helicoidales, como las mostradas en la Figura 3.2 (Villeón et al., 1998), el sistema empleado fue el construido por Brito et al., (1998). La ventaja de emplear este sistema es el conocimiento de la hidrodinámica, necesaria para la estimación de la viscosidad de proceso. El sistema y sus dimensiones geométricas son descritos en la Figura 3.3

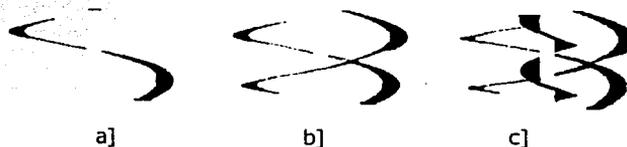


Figura 3.2 Sistemas de agitación helicoidal. Hélice sencilla [a]; doble hélice [b] y doble hélice con tornillo de Arquímedes al centro [c]

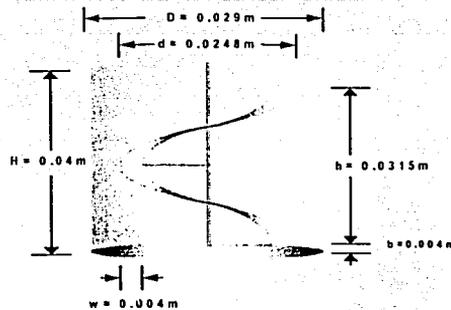


Figura 3.3 Sistema de agitación helicoidal para estimación de viscosidad de proceso (Brito et al., 1998)

Donde:

$D$ = diámetro interno del contenedor

$w$ = ancho de la banda

$h$ = altura del impulsor

$H$ = altura total del contenedor

$d$ = diámetro del impulsor

$b$ = espacio anular de fondo

El algoritmo de transformación de las variables medidas con el reómetro, torque y velocidad del agitador, en viscosidades de procesos, fue mostrado en la Figura 1.8 por lo que ya no se repite en esta sección. Solo es preciso indicar la transformación de las lecturas tomadas por el software en torque y velocidad angular del agitador. Estas transformaciones se realizaron a partir de las ecuaciones siguientes.

Para el torque, la lectura tomada (%  $\tau$ ), se transforma a torque, T, mediante:

$$T = \frac{(\% \tau) T_{\max}}{100} \quad (3.1)$$

donde  $T_{\max} = 1.022 \times 10^{-2}$  [Pa].

La velocidad angular, N [ $s^{-1}$ ] fue obtenida a través de transformar las lecturas (%D) mediante:

$$N = \frac{(\%D) N_{\max}}{6000} \quad (3.2)$$

donde  $N_{\max} = 200$  RPM.

Con los datos de torque y velocidad angular, se estimo la potencia consumida, P [watts] mediante la ecuación:

$$P = 2\pi NT \quad (3.3)$$

El resto de los cálculos siguen el Diagrama reportado en la Figura 1.8. Finalmente, todos los experimentos se realizaron al menos por triplicado y los resultados reportados son el promedio de cada medición.

Finalmente, la clasificación del tipo de comportamiento reológico de los materiales estudiados se baso en el Diagrama de flujo mostrado en la Figura 3.3

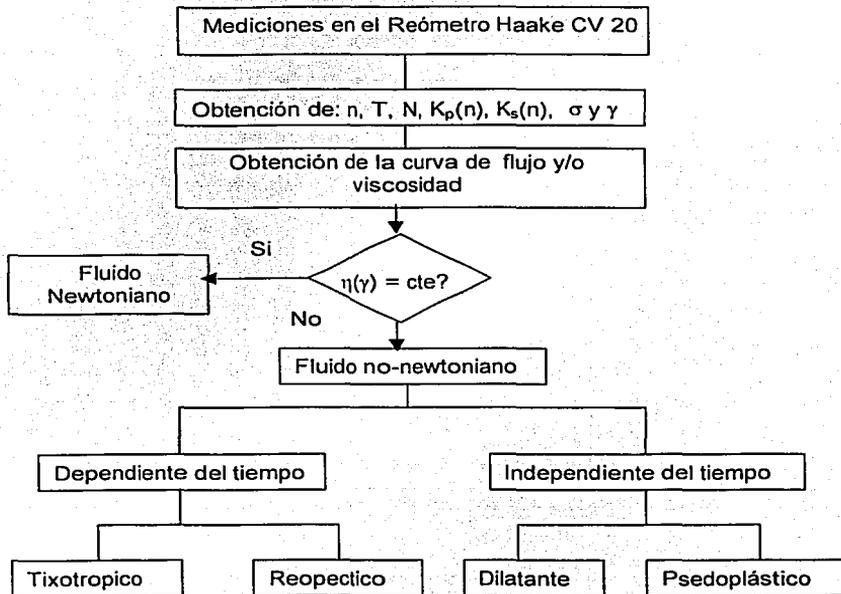


Figura 3.4 Clasificación reológica resultante de la aplicación de flujos de cizalla simple

### Capítulo III Análisis y Discusión de Resultados

#### 4.1 Torque vs. Velocidad Angular

En las Figuras 4.1 a 4.3 se presentan los resultados del torque como función de la velocidad rotacional del agitador helicoidal para los tres alimentos estudiados. Como se puede apreciar de las figuras antes mencionadas, los datos claramente sugieren un comportamiento del tipo no-newtoniano, en particular pseudoplástico. La anterior afirmación esta basada en el hecho de que los datos experimentales mostrados en las Figuras 4.1 a 4.3 están representados por la ecuación [ver Capítulo I, Figura 1.8]:

$$T = A(n)N^n \quad (4.1)$$

donde  $n$  es el índice de flujo del modelo Ley de la Potencia. Si  $n$  es igual a 1.0, entonces el fluido es newtoniano y si  $n < 1.0$  el fluido sigue un comportamiento pseudoplástico. Para los tres alimentos estudiados, el valor de  $n$  es inferior a 1.0, lo que denota un comportamiento pseudoplástico. Además, el alimento con mayor nivel de pseudoplasticidad es el yoghurt de durazno, ya que el valor de  $n$  es el más cercano a cero. Los valores de la función  $A(n)$  aparecen reportados en las Figuras 4.1 a 4.3 y estos dependen de la naturaleza de cada producto. Por otro lado, la representación de los datos experimentales por la ecuación (3.4) es adecuada, en tanto que los valores del coeficiente de correlación,  $r^2$  son cercanos a la unidad.

Los resultados mostrados en las Figuras 4.1 a 4.3 siguen la misma tendencia que los reportados previamente por Brito et al, (1998-b) para fluidos en dos fases, incluyendo una salsa tipo mexicana con partículas en suspensión. Para este ultimo fluido, los autores antes citados reportan un valor de  $n$  igual a 0.27.

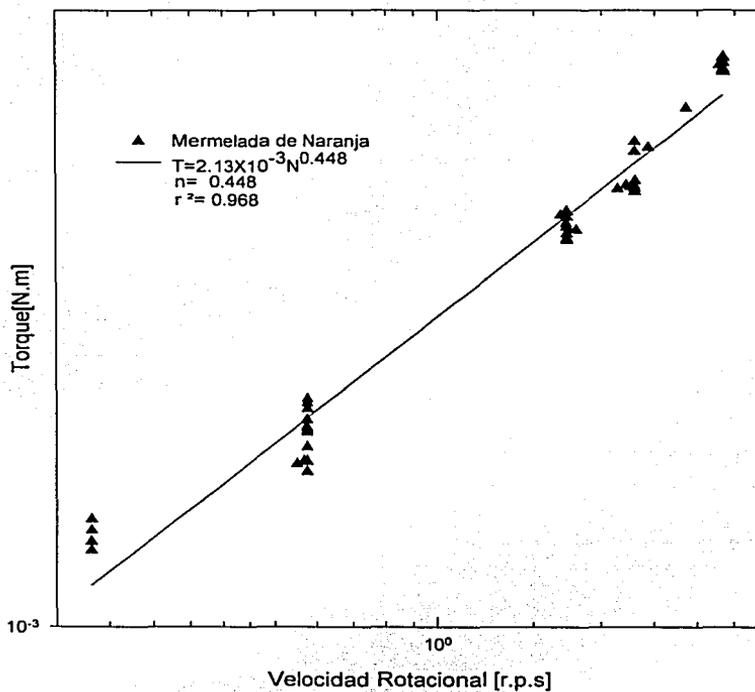


Figura 4.1 El torque como una función de la velocidad rotacional para la meremelada de naranja

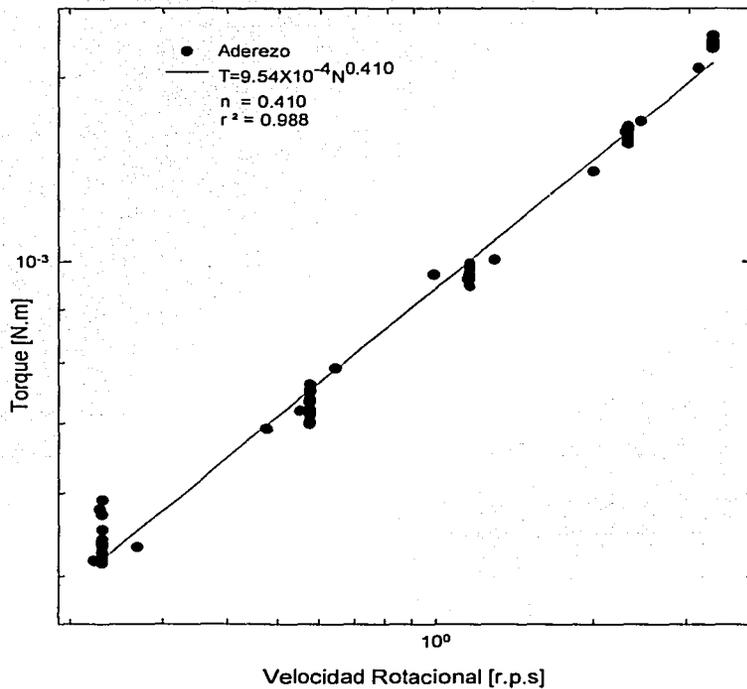
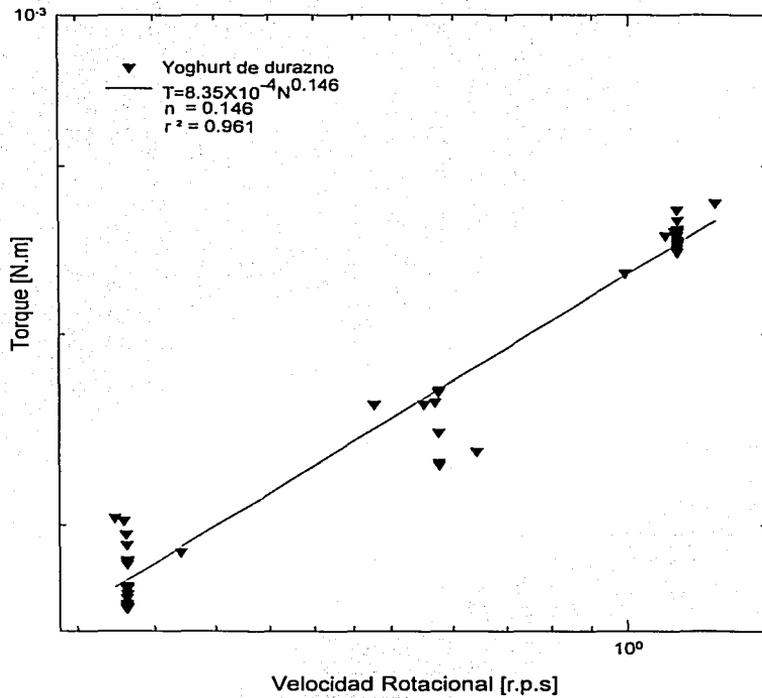


Figura 4.2 El torque como una función de la velocidad rotacional para el aderezo



Continuando con el algoritmo de cálculo propuesto para la determinación de la viscosidad de proceso, mostrado en la Figura 1.8 del Capítulo I de este trabajo, el siguiente paso es la estimación del índice de consistencia,  $m$ . Es conveniente recordar en este punto, que el algoritmo propuesto en la Figura 1.8, supone que los fluidos siguen el modelo de la Ley de la Potencia. Además, el valor de  $m$  no puede separarse de la constante  $A(n)$ , a menos que se use una calibración previa del sistema de agitación, la cual está implícita en la ecuación para la estimación de  $m$ , dada por:

$$m = \frac{A(n)2\pi}{K_p(n)d^3} \quad (4.2)$$

donde  $d$  es el diámetro del agitador helicoidal empleado y  $K_p(n)$  la función de calibración, previamente reportada en la literatura (Brito et al., 1998).

Los valores del índice de consistencia,  $m$  y la función  $K_p(n)$  para los fluidos estudiados en este trabajo, son reportados en la Tabla III

Tabla III Propiedades de flujo de los fluidos de este trabajo

Fluido	Índice de Flujo, $n$ [-]	$A(n)$ [ $N m/s^n$ ]	$K_p(n)$ [-]	Índice de Consistencia, $m$ [ $Pa s^n$ ]
Aderezo	0.41	$9.54 \times 10^{-4}$	29.71	13.22
Mermelada de Naranja	0.448	$2.13 \times 10^{-3}$	32.79	26.75
Yoghurt de Durazno	0.146	$8.35 \times 10^{-4}$	18.026	17.37

Como los datos de la Tabla III lo sugieren, la constante de potencia newtoniana,  $K_p(n)$  disminuye conforme la pseudoplasticidad aumenta. En otras palabras, el efecto que tiene la pseudoplasticidad es disminuir la potencia consumida. Este resultado esta de acuerdo con previos reportes de la literatura sobre el efecto de la pseudoplasticidad en el consumo de potencia [Brito et al., 1992; Castell-Perez y Steffe, 1992]

#### 4.2 Potencia consumida vs. Velocidad Angular

Los datos experimentales de torque como función de la velocidad rotacional del agitador son ahora transformados en potencia, a través de la siguiente ecuación:

$$P = 2\pi NT \quad (4.3)$$

Estos resultados son mostrados en las Figuras 4.4 - 4.6. Como los datos de estas figuras lo sugieren, el modelo  $P = \alpha N^\beta$  representa adecuadamente los resultados experimentales. Se debe notar que, el valor del coeficiente  $\beta$  es igual a 2 para el caso de mezclado newtoniano en la región laminar. Por otro lado, para el caso de fluidos que siguen el modelo de la Ley de la Potencia,  $\beta$  es igual a  $n+1$ , lo que significa que, en el caso pseudoplástico [como los fluidos de este trabajo],  $\beta$  deberá tener valores menores a 2, si es que el mezclado se efectúa en la región laminar [Brito et al., 1998]. Como se puede apreciar en las Figuras 4.4 a 4.6, para los fluidos estudiados en este trabajo,  $\beta$  es menor a 2, lo que confirma que, todas las determinaciones de torque fueron realizadas en la región de mezclado laminar. En consecuencia, el algoritmo mostrado en la Figura 1.8 del Capítulo I, puede ser utilizado para estimación de las viscosidades de proceso. En los párrafos siguientes se muestran y discuten los resultados de viscosidad de proceso.

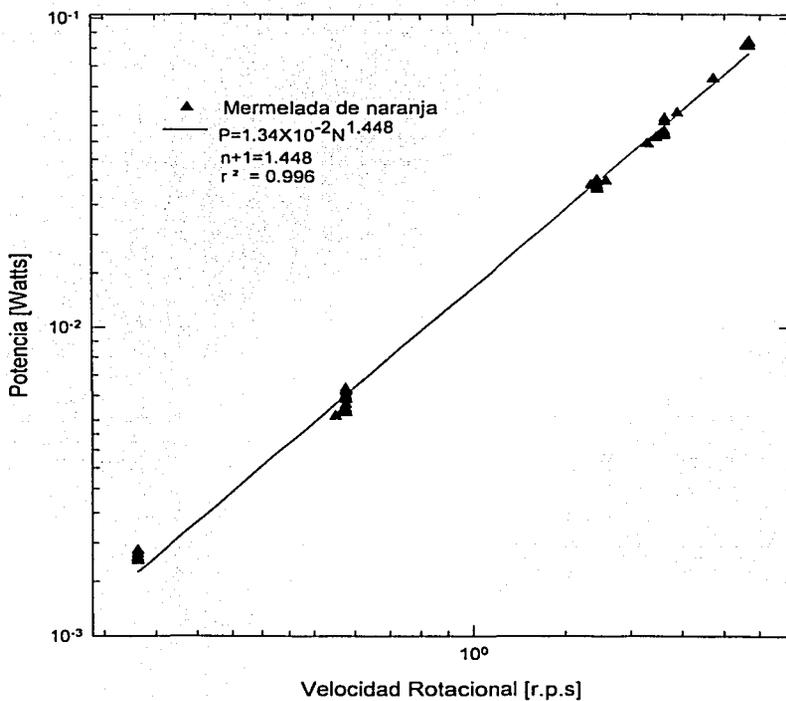
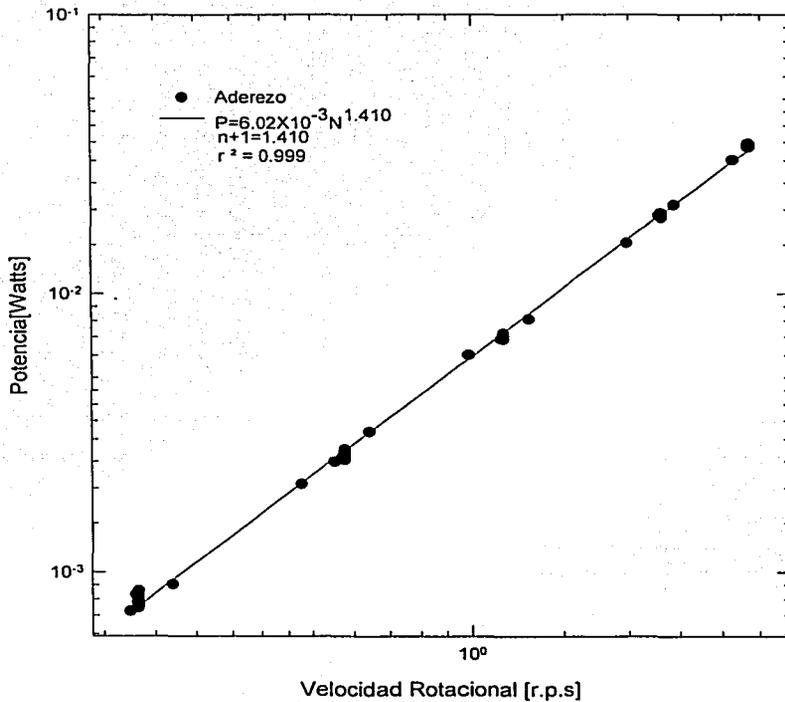


Figura 4.4 La potencia como una función de la velocidad rotacional para la mermelada de naranja



4.5 La potencia como una función de la velocidad rotacional para el aderezo

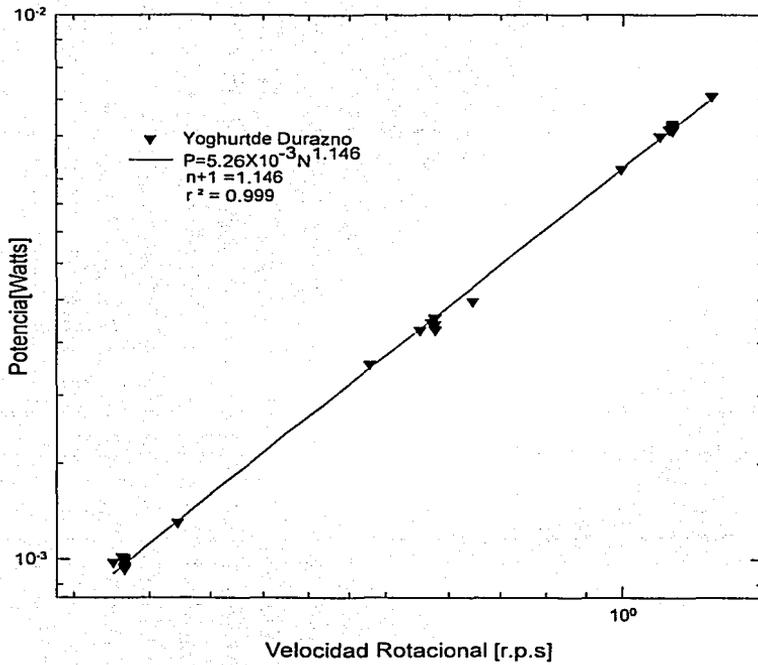


Figura 4.6 La potencia como una función de la velocidad rotacional para el yoghurt de durazno

### 4.3 Viscosidad de Proceso

La viscosidad como función de la velocidad angular del agitador es estimada a partir de la siguiente ecuación:

$$\eta_e = \frac{m K_p(n) N^{n-1}}{K_p} \quad (4.4)$$

utilizando los parámetros  $m$ ,  $K_p(n)$  previamente calculados. Los resultados se muestran en las Figuras 4.7 a 4.9.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, los datos de viscosidad de proceso como función de la velocidad angular del agitador, claramente muestran el carácter pseudoplástico de los fluidos analizados, esto es, su viscosidad disminuye conforme aumenta la velocidad de cizallamiento impuesta por el agitador. Además, se puede apreciar que los resultados tienen son repetibles y que las mediciones son reproducibles. En caso de usar geometrías convencionales como cono-placa, se ha demostrado en la literatura (Brito et al., 1998 y 1998-b) que, fluidos con partículas inferiores a las encontradas en los alimentos estudiados aquí, producen señales muy inestables de torque y consecuentemente, valores de viscosidad muy dispersos. En estos casos, las "mediciones o estimaciones de viscosidad" pierden todo valor.

Por otro lado, se debe hacer notar que, los resultados de viscosidad de proceso están en función de la velocidad del agitador. Esta representación no presupone ninguna correlación entre la velocidad de cizalla ( $\dot{\gamma}$ ) y la velocidad del agitador. En otras palabras, en la representación de los datos estimados de viscosidad de proceso presentados en las Figuras 4.7 a 4.9, la velocidad del agitador no se "transforma" en velocidad de cizalla. En caso de ser conveniente una estimación de la velocidad de cizalla, para este tipo de agitador helicoidal, se requiere la

estimación de la constante de Metzner-Otto,  $K_s(n)$  para cada uno de los fluidos estudiados (Brito et al., 1998).

Finalmente, los datos reportados en este trabajo, no pueden ser comparados con datos de la literatura ya que estos no existen para los productos comerciales estudiados aquí.

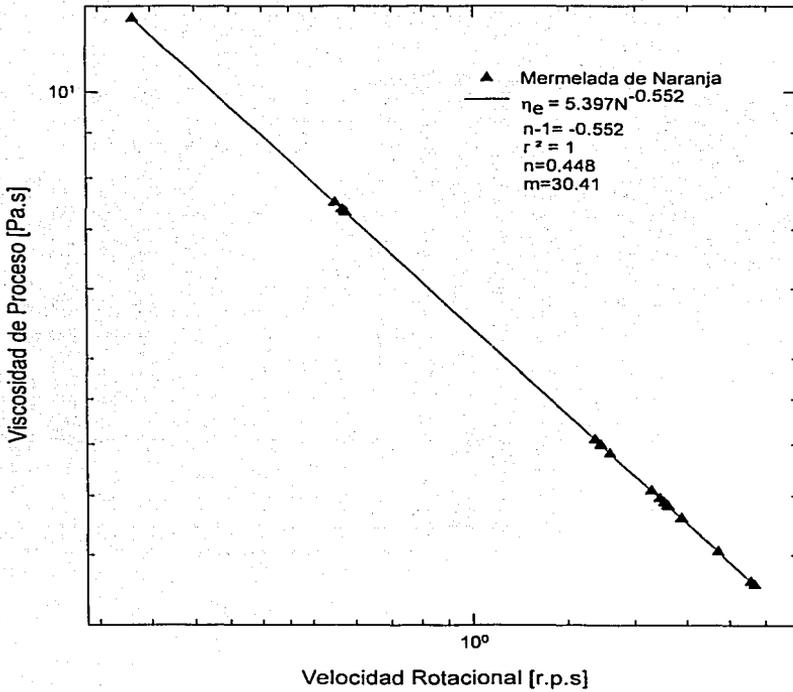


Figura 4.7 La viscosidad de proceso para la mermelada de naranja

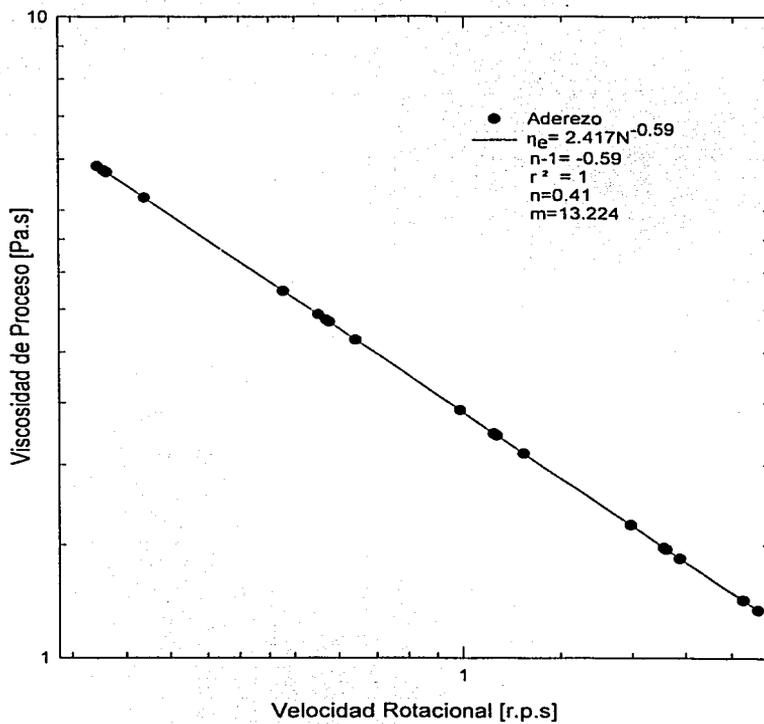


Figura 4.8 La viscosidad de proceso para el aderezo

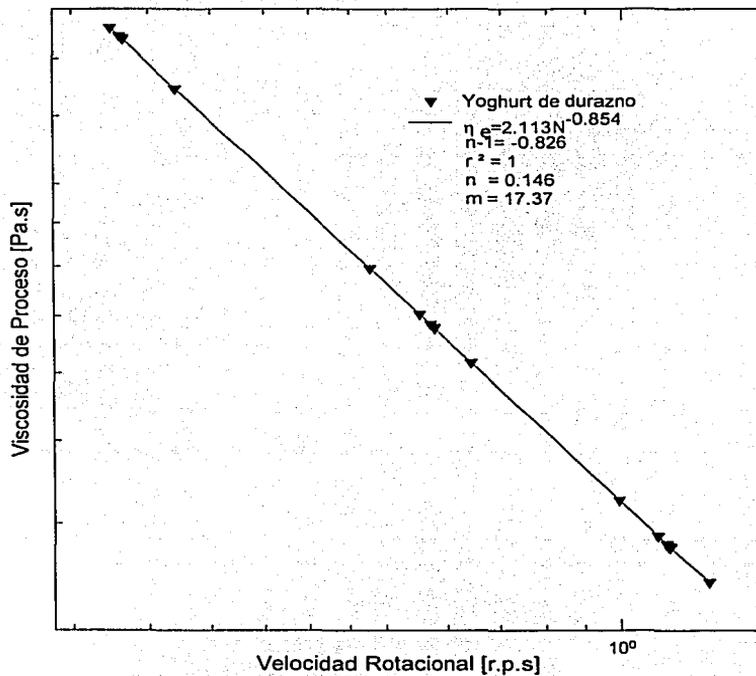


Figura 4.9 La viscosidad de proceso para el yoghurt de durazno

## Capítulo IV Conclusiones

Los datos experimentales de torque como función de la velocidad angular del agitador helicoidal, muestran que las determinaciones son estables y reproducibles. La presencia de las partículas en los alimentos estudiados, no interfiere con las señales de torque. Por otro lado, un análisis de los resultados del torque como función de la velocidad,  $N$ , confirma que las mediciones se realizaron en la región de mezclado laminar.

Los fluidos estudiados muestran un comportamiento pseudoplástico, esto es, su viscosidad disminuye conforme aumenta la velocidad del agitador. La presencia de grandes partículas, no impide la estimación de viscosidades de proceso, por el contrario, se pueden obtener resultados estables y reproducibles de viscosidades de proceso.

En la región laminar de mezclado, el consumo de potencia es directamente proporcional a la velocidad del impulsor y también función del índice de flujo o nivel de pseudoplasticidad. Para una misma velocidad de agitador, la pseudoplasticidad disminuye el consumo de potencia.

Los datos de este trabajo demuestran que, el agitador helicoidal empleado puede ser usado para estimaciones de viscosidades de proceso aun en el caso de fluidos heterogéneos con grandes partículas. Lo anterior puede ser explicado si se considera el gran desempeño que esta geometría de agitador tiene, desde el punto de vista de homogeneización.

La técnica y los resultados reportados en este trabajo, pueden ser aplicados en protocolos de control de calidad, desarrollo de nuevos productos e inclusive, diseño de procesos del área alimentaria.

**BIBLIOGRAFIA**

- Barnes, H., Edwards, M.F. and Woodcock, L.V., (1987) "Applications of computer simulations to dense suspension rheology", Chem. Eng. Sci., 42, 4, pp. 591-608
- Bird, R.B., Setward, W. E., Lightfoot, E. N., (1982), "fenómenos de transporte", Ed Reverté, S. A. (edición especial en español del original) Capitulo 3, p. 3-32. España, 1982.
- Bourne, J.R (1969) "Power consumption of helical ribbon impellers in viscous liquids" Trans. Instn. Chem engrs.47
- Brito de la Fuente, E; Nava, J. A; Medina, L; Ascaino, G y Tanguy, P. A. (1998). "Process viscometry of complex fluids and suspensions with helical ribbon agitators" The Canadian Journal of Chemical Engineering; vol. 76: 689.
- Brito de la Fuente, E., Leuliet, J. C. Choplin, L., Tanguy, P. A., (1992), "On the effect of shear thinning behavior on mixing with a helical ribbon impeller", AIChE Symp. Series (1992). pág.28-31.
- Brito de la Fuente, E; Leuliet J C ; Choplin L; Tanguy P A (1991), " On the role of elasticity on mixing with a helical ribbon impeller" Trans Instn Chem Engrs 69: pág 331-334
- Brito de la Fuente, Nava, J. A., Medina, L., Ascainop, G., Tanguy, P. A. "On the use of helical ribbon based viscometry for the detrmination of flow curves", AIChE Symp. Series (1996) pág. 672-673.
- Brito-de la Fuente, E., (2002) "principios de reología, notas del curso, operaciones unitarias II", Facultad de Química, UNAM

- Calderbak, P.H y Moo Young (1961) "The power characteristics of agitator for the mixing of newtonian and non-newtonian fluids" Trans. Instn. Chem Engrs pág. 39,26,
- Castell Perez, M.E. Steffe J. F.(1992) "Using mixing to evaluate rheological properties. ed. bristish library catologin in publication data" Gran Bretaña, Londres. Capítulo 10.
- Chavan, V. V y Ulbercht. (1973). "Power correlations for close clearence helical impellers in non-nextonian liquids". I. Eng Chem Process Des,:12(4),472-476
- Fellows, P. (1994) "Tecnología del procesado de los alimentos" Ed. Acribia, Zaragoza España pág. 95-110
- Geankoplis, C.J., (1989), "Procesos de transporte y operaciones unitarias", capítulo 2, tema: agitación y mezclado de fluidos y requerimientos de potencia. pág. 125-130 ed. cesa, 4ª impresión, México.
- Gómez Arellano Abel(2001) "Caracterización reológica y térmico de las proteínas de ajonjolí tesis de maestría", pág. 12-25, 50-69 y 114-120.
- Heldman, D. R. (1981) "Food process engineering", pág. 25-56 Ed. Avi, 2ª. edición. E.U.
- Kebloski y Kristiansen.(1986). "Rheometry of fermentations liquids". Biotech. Bioeng., 28, pág. 1974-1482
- Merquiol, T; Choplin. (1988) "Mixing of viscoelastic fermetation broth with helical ribbon screw (HRS) impeller". Abstrac 6th European. Conference on mixing. Pavia Italia may 465-472.

- Muller H. G. (1973) "Introducción a la reología de los alimentos", Editorial. Acribia. Zaragoza España, pág. 13-25
- Nava Ramirez Jose Antonio.,(1997) " Tesis características hidrodinámicas de un agitador helicoidal en fluidos de composición pseudoplástica." Pág.5-46
- Núñez Santiago María del Carmen " Introducción a la reología", Centros de desarrollo de productos bioticos. Departamento de desarrollo tecnológico. Capitulo 4, pág. 83-95.
- Qui, C. G y Rao M. A. (1985), "Role of pulp content and particle size on stress of apple sauce. J. Food Sci., 53 pág. 1165-1170.
- Rao M. A., y Steffe, J. F., (1992), "Viscosity properties of foods", Ed. British Library Catalog in Publication data. Gran Bretaña, Londres.
- Rushton, J.H., Costich, E.W. (1950) "Power characteristic of mixing impeller" párt 1. Chem. Eng. prog.:46(8)
- Steffe, J.F. (1996) "Rheological methods in food engineering", 2nd. Ed., Freeman Press, USA.
- Tanguy P. A.; Villéon, J; Labrie, R.(1998), "Numerical investigation of mixing efficiency of helical ribbons". Vol. 44,nº4 .pág. 972-977.
- Tanguy, P. A; Lacroix, F; Bertrand, L; Choplin and Brito de la Fuente.(1992)"Finite element analysis of viscous mixing with a helical ribbon-screw impeller". Vol. 38 nº6 pág. 939-944

# ANEXOS

## ANEXO A

## EJEMPLO DE GEOMETRÍAS EMPLEADAS EN LA REOMETRÍA CONVENCIONAL

## Cono y Plato

El flujo en el espacio creado entre una placa y un cono, es de los mas empleados para la estimación de funciones materiales. Sin embargo, las condiciones físicas en las que se debe crear este flujo, imponen restricciones geométricas, particularmente en el ángulo del cono, de manera que pueda aplicarse la solución matemática de acuerdo a lo descrito en el Capitulo I [ver Figura 1.6].

Para esta geometría, la velocidad de deformación,  $\gamma$  esta dada por:

$$(A-1) \quad \dot{\gamma}_{\theta_0} = \frac{\sin\theta}{r} \frac{\partial}{\partial\theta} \left( \frac{v_\theta}{\sin\theta} \right) \equiv \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial\theta} = -\frac{\omega}{\theta_0}$$

La aproximación para que  $\gamma$  no sea una función de la geometría, depende del valor del ángulo  $\theta_0$ . Así, si  $\theta_0$  es  $\approx \pi/2$ , entonces,  $\gamma$  no-sólo es conocida, sino también constante. Lo anterior es posible para valores de  $\theta_0$  menores a 0.09 radianes o 5°.

En relación con el torque, T requerido para mantener el flujo, este esta dado por:

$$(A-2) \quad T = \int_0^{2\pi} \int_0^r \tau_{\theta_0} r_{\theta_0} r^2 dr d\phi$$

Se debe notar que, como  $\gamma$  es constante, también el esfuerzo,  $\tau$  es constante. En consecuencia, el esfuerzo esta dado por:

$$(A-3) \quad \tau_{\theta_0} = \frac{3T}{2\pi R^3}$$

donde R es el radio del cono. La ecuación que describe la viscosidad, en esta geometría es:

$$(A-4) \quad \mu = \frac{\tau_{\phi 0}}{\dot{\gamma}_{\phi 0}} = \left( \begin{array}{c} 3T \\ 2\pi R^3 \\ \omega \\ \theta_0 \end{array} \right) = \frac{3T\theta_0}{2\pi R^3 \omega}$$

Es preciso mencionar aquí que, en tanto que la velocidad de deformación es constante, así como el esfuerzo, entonces la viscosidad calculada también es constante. Por otro lado, la misma ecuación (A-4) puede ser aplicada para el caso de fluidos no-newtonianos sin ninguna corrección, siempre y cuando se cumplan con las restricciones geométricas para el ángulo del cono, como se ha descrito previamente [Whortan et al., (1980)].

Las ventajas al utilizar la geometría de cono y plato con ángulos pequeño para el cono son:

- ☺ La velocidad de deformación es constante.
- ☺ El tamaño de la muestra es pequeño
- ☺ Existe gran facilidad de limpieza

Los inconvenientes al trabajar con esta geometría son:

No trabaja bien con dispersiones gruesas

El tamaño de partícula debe ser 10 veces más pequeñas que espacio entre el cono y placa

En la Figura A.1 se muestra una geometría cono y placa.

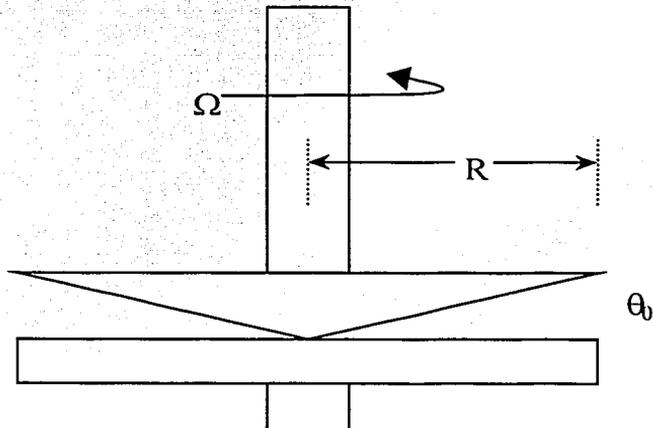


Figura A.1. Diagrama de un Sistema de Cono y Plato

**ANEXO B**

## Modelo de Ostwald- de Waele

Para muchos fluidos se han encontrado que hay una relación lineal cuando se representa la fuerza de cizalla frente al gradiente de cizalla en coordenada doblemente logarítmicas la ecuación que relaciona entre sí, se conoce como la ley de la potencia es una ecuación empírica, tiene la forma

$$\sigma = K \gamma^{n-1}$$

donde  $\sigma$  es la fuerza de cizalla, K es el índice de consistencia,  $\gamma$  es el gradiente de cizalla y (n) es el índice de flujo

El índice de flujo y el índice de consistencia pueden determinarse representando los datos experimentales bien en coordenadas normales o en coordenada logarítmicas. El índice de flujo es valor de la pendiente de la recta, mientras que el índice de consistencia es la ordenada de origen o valor de la fuerza de cizalla para un gradiente de cizalla. Los valores de K y n pueden emplearse para caracterizar un fluido por encima del rango de valores determinado experimental, es decir la viscosidad aparente o de proceso.

Para fluidos Newtonianos,  $n=1$ ; para fluidos pseudoplásticos,  $n<1$ ; para fluidos  $n>1$  dilatantes. Por consiguiente es fácil determinar si un fluido es o no Newtoniano.