



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO.

10529
22

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

REOLOGIA Y TEXTURA DE MATERIALES BIOLÓGICOS
PROPIEDADES DE FLUJO EN CIZALLA ESTACIONARIA DE
SALSAS COMERCIALES EN GEOMETRÍAS
NO - CONVENCIONALES

TRABAJO DE SEMINARIO
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

PRESENTA

COSME RIVÉRA VARGAS

ASESORA: DRA. LAURA PATRICIA MARTÍNEZ PADILLA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO. 2003

A

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Ecología y Textura de materiales biológicos:

Propiedades de flujo en cizalla estacionaria de salsas comerciales
en geometrías no - convencionales.

que presenta el pasante: Cosme Rivera Vargas

con número de cuenta: 9361458-6 para obtener el título de:
Ingeniero en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 20 de Septiembre de 2002

MODULO	PROFESOR	FIRMA
<u>I</u>	<u>I.A. María Eugenia Ramírez Ortiz</u>	<u>M. Ramírez</u>
<u>II</u>	<u>M.C. Virginia A. Delgado Reyes</u>	<u>Virginia Delgado Reyes</u>
<u>III</u>	<u>Dra. Laura Patricia Martínez Padilla</u>	<u>L. Martínez</u>

B

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

DEDICATORIA

Para la gente que aportó su apoyo en esta tesis, dedicó con absoluto respeto y admiración a mis profesores, padres y familiares quienes con sus valiosos consejos, ayuda y estímulos supieron guiarme por el camino de la verdad, la razón y la superación a la que nos enfrentamos todos en la vida.

LAURA PATRICIA:

Mi guía que me ayudó con sus sabios consejos, pero sobre todo por ser sincera y profesional en su trabajo dándome las herramientas para presentarles hoy este texto.

ERIKA:

Esposa y amiga que decidió compartir su vida con la mía, para ella este trabajo que con su apoyo y dedicación a hecho que esta meta este realizada para un mejor futuro para los dos.

LUCIA:

Mujer de inmensa fortaleza y sencillez quien con sus valiosos consejos y ejemplo de superación me brindo su apoyo incondicional.

ANGELA TONANTZIN Y EDUARDO GIOVANNI:

Mis dos hijos que son el impulso para alcanzar la meta formada desde el inicio de mi carrera y que se ve plasmada en estas pagina y en el libro de mi vida.

A MIS SUEGROS Y DE MAS FAMILIARES:

Les agradezco sus deseos que de una o de otra forma influenciaron para mi superación profesional y personal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue la caracterización reológica de diversas salsas mexicanas comerciales utilizando tres diferentes geometrías. Los productos estudiados se dividen en dos clases, las salsas homogéneas, como son las salsas "Barbecue", Chipotle y Valentina, y las salsas heterogéneas, que son las salsas Verde, Ranchera y Taquera.

Las geometrías utilizadas fueron, una convencional (cilindros concéntricos) y dos no-convencionales (cinta helicoidal y paleta), en las que se aplicó la analogía Couette-Searle para el cálculo de los parámetros reológicos. Las salsas homogéneas se caracterizaron en las tres geometrías propuestas. Las salsas heterogéneas se evaluaron únicamente en las geometrías no-convencionales. En el caso del dispositivo de cinta helicoidal éste se adaptó a un reómetro con velocidad de cizalla controlada, manteniendo una relación de radios de 1:10. La geometría de paleta se utilizó en un reómetro de esfuerzo de cizalla controlado en dos recipientes, el primero con una relación de radios de 1:10 y el segundo, con una relación de radios de 2.0 (considerada como medio infinito). Esta última se utilizó en un recipiente con deflectores con el fin de evitar efectos de deslizamiento. Al comparar las curvas de flujo de las salsas homogéneas, los resultados en los cilindros concéntricos y la paleta en los dos recipientes, se observa una aceptable concordancia entre ellas confirmando la validez de los métodos propuestos. En las muestras heterogéneas, la paleta en medio infinito resultó ser la más adecuada para la caracterización de las propiedades de flujo de

TESIS CON
FALLA DE CUBIEN

estas salsas ya que las curvas muestran una tendencia de un modelo de la ley de la potencia y coinciden para el resto de las salsas de este tipo.

Las mediciones en el dispositivo helicoidal en todas las salsas evaluadas presentaron curvas de flujo con valores inferiores a las obtenidas con las otras geometrías, llegando a ser desde un 50 % y hasta un 100 % de diferencia entre los esfuerzos obtenidos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

I. INTRODUCCIÓN

Las propiedades reológicas de productos alimenticios y suspensiones biológicas son importantes en la aplicación de la ingeniería, en el control de calidad, en el dimensionamiento de las líneas de proceso, en el desarrollo de nuevos productos, así como en las operaciones de mezclado, homogeneización y tratamiento térmico (Martínez-Padilla y Delgado-Reyes, 2001). Las salsas comerciales tipo mexicano tienen una alta aceptación debido a su amplia variedad y presentación en el mercado nacional. Su popularidad radica en la comodidad de uso en el hogar: "listas para servirse". Sin embargo, pueden presentar una gran variación en las propiedades reológicas, como consecuencia de la diversidad de formulaciones. Algunas salsas mexicanas son suspensiones que contienen partículas relativamente grandes (milimétricas) en las que se encuentran trozos de pulpa de tomate, chile y semillas, las cuales pueden sedimentar, provocando la separación en dos fases. En este estado de inestabilidad, la fase continua se encuentra generalmente en la parte superior de la salsa y consiste en líquido libre de grandes partículas, la parte sedimentada está constituida por la pulpa de los ingredientes principales y partículas de mayor tamaño (Arriaga-Orihuela *et al.*, 1997). La caracterización de las propiedades de flujo de estas suspensiones no es recomendable en una geometría convencional (cilindros concéntricos, conopla, placa-placa), debido a las características de las partículas, ya que éstas, por su tamaño igual o mayor al espacio destinado al cizallamiento en el reómetro, imposibilita su evaluación (Martínez-Padilla y Delgado-Reyes, 2001). Además, se presentan interferencias de las partículas entre la pared y la geometría, migración

de partículas, destrucción de las mismas y deslizamiento provocado por la formación de una capa de fluido de baja viscosidad ya sea en la pared en movimiento o en la pared del recipiente contenedor (Cantú-Lozano *et al.*, 2000).

Para la solución de estos problemas durante varios años se han desarrollado y adaptado diferentes mezcladores denominados geometrías de tipo no-convencional, entre las que se puede mencionar, paletas, cintas helicoidales y tornillos (Brito de la Fuente *et al.*, 1992) las cuales mejoran el mezclado y permiten evaluar la viscosidad aparente de la suspensión en función del consumo de potencia o par de torsión medido, cuando la suspensión fluye de manera casi homogénea.

Con el objeto de lograr una mejor aproximación del cálculo de las propiedades de flujo, se seleccionan impulsores que eliminan zonas estáticas, además de que inducen una distribución uniforme de velocidades de cizalla durante el mezclado (Chavan y Ulbrecht, 1973). También, se han realizado modificaciones al recipiente que contiene la suspensión, agregando deflectores o aumentando la rugosidad de la pared interna, con el fin de evitar el deslizamiento. Una propuesta es aplicar la analogía Couette-Searle que consiste en establecer un flujo similar al que ocurre entre dos cilindros concéntricos. En este caso, se mide el par de torsión en un impulsor que es el único elemento que se mueve a una velocidad de rotación determinada. El recipiente que contiene la muestra se mantiene inmóvil, de preferencia con un pequeño espacio entre la pared del recipiente y el impulsor (Barnes y Carnali, 1990). Este método se ha usado aceptablemente con paletas en medios de cultivo de fermentación (Kemblowski y

Kristiansen,1986) y en cultivos con filamentos utilizando impulsores tipo cinta helicoidal y de paleta (Allen y Robinson, 1990).

Considerando que no existen reportes de propiedades de flujo de las salsas mexicanas, probablemente debido a la dificultad en la medición por las grandes partículas presentes en la suspensión, el objetivo de este estudio es determinar con diferentes geometrías las propiedades de flujo de seis salsas comerciales y proponer el método más adecuado para su caracterización.

II. MATERIALES Y METODOS

MATERIALES

Las salsas mexicanas estudiadas se dividen en dos clases. Homogéneas, en las cuales las partículas, finamente picadas, están distribuidas uniformemente en la suspensión. En este grupo se estudiaron la salsa Valentina (marca Tamazula), la salsa "Barbecue" (marca Heinz) y la salsa Chipotle (marca Griffith). Las heterogéneas que incluyen salsa Verde (marca Búfalo), salsa Ranchera y salsa Taquera (marca Conservas la Costeña), éstas se caracterizan por contener partículas milimétricas de diferentes tamaños.

De acuerdo en lo declarado en la etiqueta por el fabricante, las salsas están constituidas de:

Valentina: mezcla de chiles secos, puyas y serrano, ácido acético, sal yodatada, condimentos y especias y 0.1% de benzoato de sodio.

"Barbecue": azúcar, pasta de tomate, proteína vegetal hidrolizada, almidón, sal, especias, ácido acético, humo líquido, color artificial, goma y 0.1% de benzoato de sodio.

Chipotle: chile chipotle, pasta de tomate, cebolla fresca, aceite de soya, vinagre blanco de caña, ácido láctico, bisulfito de sodio, goma xantana, sal yodatada, condimentos y benzoato de sodio.

Verde: tomate, cebolla, chile serrano, sal yodatada y cilantro.

Taquera: tomate, cebolla, chile de árbol, sal yodatada, aceite vegetal, glutamato monosódico y especias.

Ranchera: tomate verde, chile jalapeño, agua, cebolla, chile pasilla y sal yodatada.

MÉTODOS

Caracterización Reológica

Geometría convencional

Se utilizó para la caracterización de las salsas homogéneas un reómetro de control de esfuerzos de cizalla (Haake, Modelo RT20, Alemania), con el sensor de cilindros concéntricos Z20 de 10 mm de radio (R_b), 30 mm de altura efectiva, con terminación cónica que se ajusta a la norma Din 53019 y el recipiente cilíndrico de radio 10.85 mm (R_c). Se usó un programa de velocidad de cizalla lineal de 0-500 (s^{-1}) en 50 pasos y se registraron los esfuerzos de cizalla (Pa) correspondientes en un tiempo total de 60 segundos. La prueba se realizó por duplicado.

Para la obtención de las curvas de flujo se ocuparon los factores geométricos de esfuerzo y de velocidad de cizalla instalados en el programa por el

proveedor, los cuales se multiplican por la velocidad de rotación del cilindro (Ω) y el par de torsión (M) medido. Los valores respectivos calculados corresponden al esfuerzo de cizalla promedio (σ_{bc}) y la velocidad de cizalla promedio (γ_{bc}) entre los dos cilindros, considerando que no hay modificación del perfil de velocidades por efecto del comportamiento no-newtoniano. Los factores geométricos F_{σ} y F_{γ} corresponden a las expresiones matemáticas dentro de los paréntesis en las siguientes ecuaciones, respectivamente:

$$\sigma_{bc} = F_{\sigma} M = \left(\frac{1}{4\pi h (R_b^2 + R_c^2)} C \right) M = 44600M \quad (1)$$

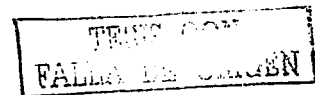
$$\gamma_{bc} = F_{\gamma} \Omega = \left[\frac{\alpha^2 + 1}{\alpha^2 - 1} \right] \Omega = 12.3\Omega \quad (2)$$

donde:

$\alpha = \frac{R_c}{R_b}$, C es un factor empírico igual a 1.1 para las geometrías que se ajustan a la norma din, h es la altura total del cilindro que gira e incluye efectos terminales.

Geometrías no-convencionales.

En las dos geometrías no-convencionales utilizadas, paleta y cinta helicoidal, se trató de obtener un flujo desarrollado entre el recipiente estático y la geometría en movimiento, similar al que se obtiene entre dos cilindros concéntricos con un espacio anular pequeño, conocido como flujo Couette-Searle



(relación existente entre el diámetro del recipiente y la geometría, de 1.10 aproximadamente).

Cinta helicoidal

Se utilizó una cinta helicoidal con dos vueltas de acero inoxidable con una adaptación de entrada al viscosímetro Rheomat modelo RT115 (Contraves-Mettler; Suiza), que controla la velocidad de cizalla. Las dimensiones de la cinta son: diámetro (d_i) = 0.0698 cm; longitud (L) = 0.0673 cm; ancho (w) = 0.01044 cm, paso (s) = 0.0355 cm. El diámetro del recipiente (D_v) es de 0.08344 cm.

Se usó el control manual de 15 velocidades de rotación (N) preestablecidas en el viscosímetro y se calcularon los valores de velocidad angular ($\Omega=2\pi N$) en rad/s, se registró el 0/00 del par de torsión (M) calculándose el valor correspondiente en N.m, después de un minuto de cizallamiento. Dependiendo de la muestra, se registraron únicamente los valores en donde no era evidente la turbulencia fijando como límite la formación de vórtice y salida de la muestra. En los resultados se reporta la curva de flujo promedio de tres réplicas, debido a que las curvas mostraron mayores fluctuaciones.

Para esta geometría se utilizó el método propuesto por Martínez Padilla *et al.* (1999). El factor geométrico (k_γ), que define la velocidad de cizalla promedio $\dot{\gamma} = k_\gamma \Omega$, se obtuvo de la relación propuesta por Brito *et al.* (1992):

$$k_{\gamma} = \frac{4\pi \left[\left(\frac{D_v}{d_c} \right)^2 - 1 \right]^{n-1}}{\left[n \left(\frac{D_v}{d_c} \right)^{2/n} - 1 \right]^{n-1}} \quad (3)$$

donde "n" corresponde al índice de comportamiento (adimensional). Este parámetro se estima de la pendiente de la gráfica log M vs log Ω . Para el cálculo del diámetro equivalente (d_c) se utilizó la siguiente ecuación (Chavan y Ulbrecht, 1973,1974):

$$\frac{d_c}{d_i} = \frac{D_v}{d_i} - \frac{2(w/d_i)}{\ln \left(\frac{(D_v/d_i) - [1 - (2w/d_i)]}{(D_v/d_i) - 1} \right)} \quad (4)$$

La velocidad promedio de cizalla (s^{-1}) queda definida como:

$$\gamma = 21 \Omega \quad (5)$$

El esfuerzo promedio de cizalla (Pa) se obtuvo con la relación propuesta por Kemblowsky y Kristiansen (1986):

$$\sigma = \frac{2\pi M k_{\gamma}}{k_p d_i^3} \quad (6)$$

en donde la constante de proporcionalidad k_p necesaria para el cálculo del esfuerzo de cizalla promedio se estima con la potencia consumida del impulsor ($P = M \Omega$) dada en J/s y la relación entre los números adimensionales, $N_p = k_p / Re$, donde N_p es el número de potencia y Re el número de Reynolds. Esta misma constante de proporcionalidad puede obtenerse a partir de la relación

de Chavan y Ulbrecht (1973,1974), para fluidos newtonianos ($n=1$) de la siguiente manera:

$$k_p = 2.5\pi a B \left(\frac{d_c}{d_i} \right) \left(\frac{D_v}{d_c} \right)^2 \left[\frac{4\pi}{n \left(\frac{D_v}{d_c} \right)^{2/n} - 1} \right]^n \quad (7)$$

donde "a" corresponde al área del cilindro hipotético, que se calcula por:

$$a = \left[1 - \left(1 - 2 \left(\frac{w}{d_i} \right)^2 \right) \right] \left(\frac{l/d_i}{d_i} \right) \left(\frac{s/d_i}{d_i} \right) \left(\frac{\pi \sqrt{s/d_i + \pi^2}}{(s/d_i)^2} + \ln \left[\frac{\pi}{s/d_i} + \frac{\sqrt{(s/d_i)^2 + \pi^2}}{s/d_i} \right] \right) \quad (8)$$

donde B es el número de cintas (adimensional). Por lo tanto, el esfuerzo de cizalla se puede calcular por:

$$\sigma = 1937 M \quad (9)$$

Geometría de Paleta

Para esta caracterización se utilizó la paleta de cuatro aspas FL40 de la marca Haake, en el mismo reómetro de esfuerzo de cizalla controlado (Haake modelo RT20). Se aplicó un programa lineal de ascenso-descenso de la velocidad angular (Ω) y se registraron los respectivos pares de torsión (M), 50 pasos en un tiempo total de 60 segundos para cada segmento. Dependiendo de la muestra, se registraron únicamente los valores en donde no era evidente la turbulencia (formación de vórtice y salida de la muestra).

Las dimensiones de la paleta son: radio (R_b) de 0.020 m y altura (h) de 0.055 m. Esta geometría se utilizó en recipientes diferentes. El primero se denominó D40, que corresponde al recipiente del cilindro Z40 cuyas dimensiones son: radio (R_c) de 0.0217 m y altura 0.060 m. La relación de radios paleta-recipiente es cercana a 1.10. La paleta se colocó a 5 mm de separación del fondo. La muestra cubrió completamente la paleta. La prueba se realizó por duplicado.

Para el cálculo de la velocidad y esfuerzo de cizalla promedios se utilizaron las ecuaciones 1 y 2, con los respectivos radios, suponiendo el flujo Searle-Couette con la paleta, considerando despreciables los efectos terminales y $C=1$.

$$\gamma = k_{\gamma} \Omega = 12.3 \Omega \quad (10)$$

$$\sigma = K_{\sigma} M = 6690 M \quad (11)$$

El segundo recipiente se denominó D80, este envase contiene ocho deflectores internos de 1 cm x 1cm, con el fin de evitar el efecto de deslizamiento en la pared. Las dimensiones son: radio real de 0.05 m, radio efectivo (R_c) de 0.04 m, altura del recipiente 0.1 m. La paleta se colocó a 30 mm de la base del recipiente de separación del fondo con el fin de minimizar los efectos terminales. La muestra cubrió completamente la paleta. La prueba se realizó por duplicado y se usó un programa similar al del recipiente D40. En esta geometría la relación de radios paleta-recipiente es de 2.0 y se consideró infinita. La velocidad de cizalla promedio en este arreglo se dedujo a partir de la ecuación que relaciona la

variación de velocidad angular (ω) y el esfuerzo de cizalla (σ) de un cilindro en medio infinito propuesta por Steffe (1996) y que se presenta a continuación:

$$\int_0^{\Omega} \omega = \frac{1}{2} \int_{\sigma}^{\sigma_b} \frac{\tau(\sigma)}{\sigma} \quad (12)$$

donde σ_b y σ_c corresponden al esfuerzo de cizalla en la superficie del sensor y el interior del recipiente contenedor, respectivamente. Integrando la ecuación anterior desde cero (límite del recipiente estático) a la velocidad máxima Ω , para

fluidos de la potencia, $\tau(\sigma) = \left(\frac{\sigma}{K}\right)^n = \gamma$, se tiene:

$$\Omega = \frac{n}{2K^{1/n}} \left[\left(\frac{M}{2\pi h R_b^2}\right)^{1/n} - \left(\frac{M}{2\pi h R_c^2}\right)^{1/n} \right] = \frac{n}{2K^{1/n}} \left(\frac{M}{2\pi h R_b^2}\right)^{1/n} \left[1 - \left(\frac{R_b}{R_c}\right)^2 \right] \quad (13)$$

donde K , es el índice de consistencia y n el índice de comportamiento de la ley de la potencia.

Acomodando la ecuación 13 y sustituyendo las ecuaciones 1 y 2 se obtiene la velocidad y el esfuerzo de cizalla promedio para la paleta en medio infinito para un fluido de la potencia, considerando un índice de comportamiento (n) promedio de 0.3 (obtenido experimentalmente) para las salsas estudiadas:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{bc} \left(\frac{1 - \alpha^{-2}}{n(1 - \alpha^{-2/n})} \right) = k_{\dot{\gamma}} \Omega = 3.63 \Omega \quad (14)$$

$$\sigma = K_{\sigma} M = 4521.4 M \quad (15)$$

III. RESULTADOS Y DISCUSION

Las curvas de flujo obtenidas de la caracterización de diferentes salsas homogéneas: "Barbecue", Chipotle y Valentina se presentan en las Figuras 1, 2 y 3. Las salsas heterogéneas: Taquera,⁴ Ranchera y Verde se muestran en las Figuras 4, 5 y 6. Cabe resaltar que los intervalos de esfuerzo de cizalla obtenidos fueron menores en las geometrías no-convencionales. Para la geometría de cilindros concéntricos, la velocidad máxima de cizalla fue 500 s^{-1} , en la geometría de cinta helicoidal 400 s^{-1} y 100 s^{-1} para la geometría de paletas.

En la Figura 1 se muestran las curvas de flujo de la salsa "Barbecue". Se observa una superposición de las curvas de flujo obtenidas con los diferentes sistemas, excepto con la cinta helicoidal, en donde la tendencia mostrada con este dispositivo está por debajo del resto de las geometrías utilizadas. El comportamiento observado corresponde al de un fluido fluidificado por cizalla, que se ajusta aceptablemente al modelo de la ley de la potencia en todas las curvas. La curva de ajuste se superpone en la misma figura. En el Cuadro 1 se presentan los parámetros reológicos de la salsa "Barbecue" con las diferentes geometrías utilizadas y el intervalo de velocidad de cizalla en el que se evaluaron.

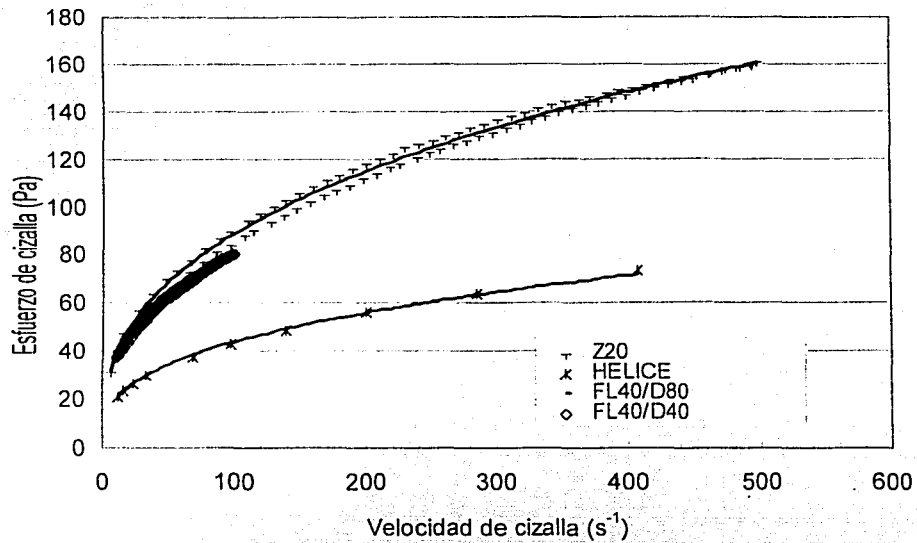


Figura 1. Comportamiento de flujo de la salsa "Barbecue" obtenido en las 4 geometrías a 25 °C. FL40/D80: Dispositivo de paleta en medio infinito. Z20: Dispositivo de cilindros concéntricos, FL40/D40: Dispositivo de paletas con espacio anular pequeño, HELICE: Dispositivo de cinta helicoidal. Las líneas continuas corresponden al ajuste del modelo de la potencia.

Cuadro 1. Parámetros de la ley de la potencia (n, K) obtenidos con las diferentes geometrías para la salsa "Barbecue".

	n	K (Pa.s ⁿ)	R ²	Intervalo de velocidad de cizalla (s ⁻¹)
1FL40/D80	0.31	19.21	0.997	10-84
2FL40/D80	0.32	18.13	0.999	10-84
1FL40/D40	0.33	16.52	0.995	10-100
2FL40/D40	0.33	15.90	0.996	10-100
1Z20	0.36	16.35	0.995	6-500
2Z20	0.36	16.12	0.995	6-500
1HELICE	0.35	8.79	0.999	11-400

R²= coeficiente de determinación. Paleta (FL40), (Cilindro Z20), Cinta helicoidal (HELICE), Recipiente de 40 mm (D40), Recipiente de 80 mm (D80).

El índice de consistencia (K) muestra similitud en el orden de magnitud con los valores obtenidos en cada una de las geometrías utilizadas, excepto con la geometría de cinta helicoidal, para la cual el valor cuantificado equivale aproximadamente a la mitad del promedio obtenido con las otras geometrías.

El índice de comportamiento (n) de la salsa "Barbecue", puede considerarse constante para todas las geometrías, a excepción de las geometrías de cilindros concéntricos y hélice, para las cuales n fue ligeramente superior.

Los parámetros promedio para la salsa "Barbecue" son, n = 0.335 K =17.04 Pa.sⁿ, con un coeficiente de variación de 6.2 y 7.8%, respectivamente. Los promedios se calcularon sin tomar en cuenta los valores obtenidos con la cinta

helicoidal. De las salsas homogéneas estudiadas, ésta fue la que presentó la mayor consistencia.

De igual manera que en la salsa "Barbecue", la tendencia de las curvas de flujo de la salsa Chipotle (Figura 2), obtenida con los cilindros concéntricos y la paleta en espacio anular pequeño, es semejante. Las curvas registradas con ambas geometrías, en este caso, se observan ligeramente por arriba de las demás. La curva registrada con la paleta en medio infinito coincide con las otras sólo en el inicio. Se observa también una ligera separación entre el ascenso y descenso en la zona de bajas velocidades de cizalla ($0.1-50 \text{ s}^{-1}$) y una superposición de la curva de 50 a 100 s^{-1} , mostrando sin embargo, una curva inferior en esta parte a la obtenida con cilindros concéntricos.

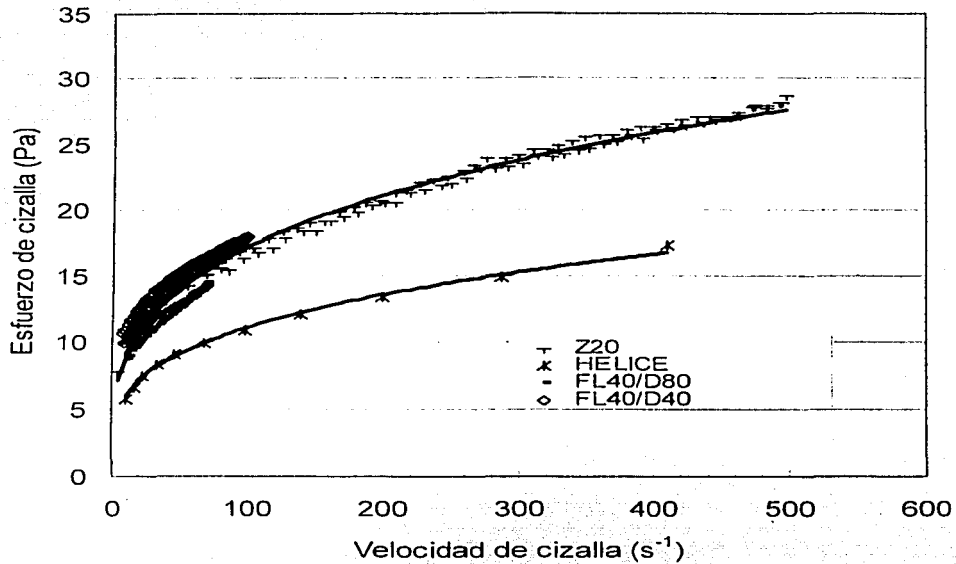


Figura 2. Comportamiento de flujo de la salsa Chipotle obtenido en las 4 geometrías a 25 °C. FL40/D80: Dispositivo de paleta en medio infinito. Z20: Dispositivo de cilindros concéntricos. FL40/D40: Dispositivo de paletas con espacio anular pequeño, HELICE: Dispositivo de cinta helicoidal. Las líneas continuas corresponden al ajuste del modelo de la potencia.

En el cuadro 2 se observa que hay una mayor variación entre los valores de los parámetros reológicos obtenidos con la paleta en espacio pequeño y espacio infinito. Asimismo, en la cinta helicoidal el valor de K es también casi la mitad del promedio. Los parámetros de flujo promedio son, $n = 0.25$ $K = 5.15 \text{ Pa.s}^n$, con un coeficiente de variación de 14.5 y 14 % respectivamente, sin considerar los resultados de la cinta helicoidal. El valor alto del coeficientes de variación puede ser atribuido a la heterogeneidad y sedimentación de partículas en la muestra.

Cuadro 2. Parámetros de la ley de la potencia (n, K) obtenidos con las diferentes geometrías para la salsa Chipotle.

	n	K (Pa.s ⁿ)	R ²	Intervalo de velocidad de cizalla (s ⁻¹)
1FL40/D80	0.24	5.0	0.963	10-70
2FL40/D80	0.23	5.29	0.92	10-70
1FL40/D40	0.21	5.83	0.989	10-100
2FL40/D40	0.23	6.07	0.973	10-100
1Z20	0.30	4.28	0.991	6-500
2Z20	0.29	4.43	0.990	6-500
1HELICE	0.29	2.94	0.996	11-400

R²= coeficiente de determinación. Paleta (FL40), (Cilindro Z20), Cinta helicoidal (HELICE), Recipiente de 40 mm (D40), Recipiente de 80 mm (D80).

En la salsa Valentina como en las otras salsas homogéneas se observa un comportamiento al flujo muy similar por la superposición de curvas obtenidas con

la geometría de paletas con espacio anular pequeño y paleta en medio infinito y con cilindros concéntricos (Figura 3). La curva de flujo obtenida con la geometría de cinta helicoidal está también muy por debajo del resto de las curvas de las otras geometrías. Este comportamiento se refleja de igual manera en los parámetros reológicos obtenidos de la ley de potencia (Cuadro 3).

El índice de consistencia de la salsa Valentina, a diferencia de la salsa "Barbecue", presenta valores superiores con la paleta en espacio pequeño, correspondiendo a un 22 % del valor obtenido en cilindros concéntricos o en paleta en espacio infinito, que resultaron similares, cuyos valores promedio son $n = 0.3$ $k = 3.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, con un 6 y 11 % de coeficiente de variación, respectivamente.

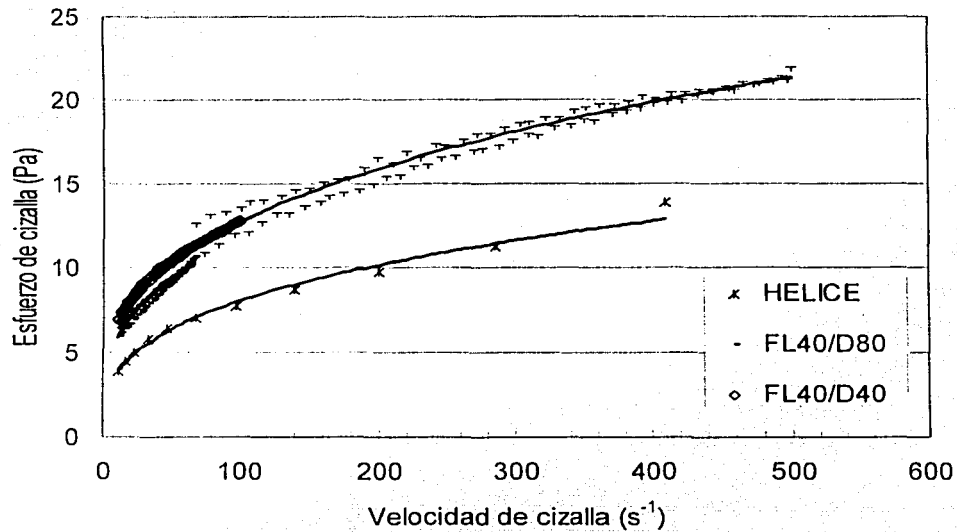


Figura 3. Comportamiento de flujo de la salsa Valentina obtenido en las 4 geometrías a 25 °C. FL40/D80: Dispositivo de paletas en medio infinito. Z20: Dispositivo de cilindros concéntricos, FL40/D40: Dispositivo de paletas con espacio anular pequeño, HELICE: Dispositivo de cinta helicoidal. Las líneas continuas corresponden al ajuste del modelo de la potencia.

Cuadro 3. Parámetros de la ley de la potencia (n, K) obtenidos con las diferentes geometrías para la salsa Valentina.

	n	K (Pa.s ⁿ)	R ²	Intervalo de velocidad de cizalla (s ⁻¹)
1FL40/D80	0.32	2.86	0.947	10-70
2FL40/D80	0.32	2.88	0.960	10-70
1FL40/D40	0.28	3.53	0.996	10-100
2FL40/D40	0.32	3.50	0.990	10-100
1Z20	0.32	2.86	0.945	6-500
2Z20	0.28	2.88	0.968	6-500
1HELICE	0.33	1.75	0.990	11-400

R²= coeficiente de determinación. Paleta (FL40), Cilindro Z20), Cinta helicoidal (HELICE), Recipiente de 40 mm (D40), Recipiente de 80 mm (D80).

Existen diversas explicaciones para las inconsistencias en estos resultados. La primera razón está relacionada con las diferencias que pudieran existir entre lotes, ya que se requirió una mayor cantidad de muestra para las pruebas con la paleta en medio infinito. Además, otra explicación es que se observan variaciones del índice de consistencia, dependiendo del intervalo de velocidad de cizalla aplicado.

Es importante remarcar que en la geometría de cinta helicoidal se obtienen por lo general, también coeficientes de determinación altos e índices de comportamiento similares ligeramente superiores al resto de las geometrías. Sin embargo, el índice de consistencia cuantificado es mucho menor (casi la mitad) de

los obtenidos en las otras geometrías. Este comportamiento se podría atribuir a la migración de partículas y posible deslizamiento en las paredes del recipiente. Además de que las partículas heterogéneas interfirieron en la respuesta de las lecturas del par de torsión.

En las salsas heterogéneas, los resultados no fueron tan satisfactorios, ya que se observan mayores fluctuaciones debidas a interferencias de las partículas grandes. Las curvas de flujo de las salsas en la geometría de paleta con espacio pequeño presentaban saltos durante su caracterización, posiblemente debido a la obstrucción de partículas entre el espacio anular entre la paleta y el recipiente contenedor. Estas curvas de flujo son las que presentan mayor resistencia al flujo. Al igual que en las salsas homogéneas, los valores de esfuerzo de cizalla de la curva en la geometría de cinta helicoidal está, debajo de las dos geometrías anteriores.

En la Figura 4, se muestran las curvas de flujo obtenidas en la salsa Verde.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

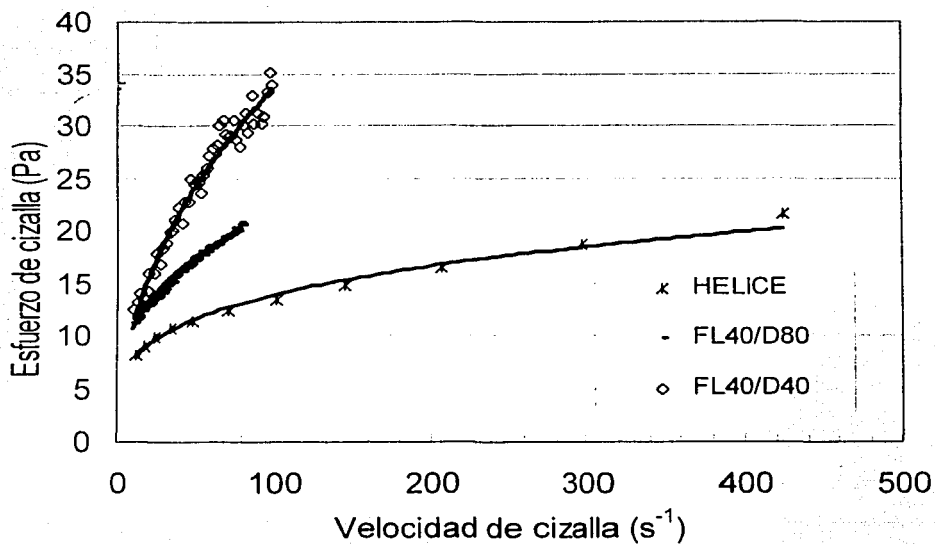


Figura 4. Comportamiento de flujo de la salsa Verde obtenido en las 3 geometrías a 25 °C. FL40/D80: Dispositivo de paleta en medio infinito, FL40/D40: Dispositivo de paletas con espacio anular pequeño, HELICE: Dispositivo de cinta helicoidal. Las líneas continuas corresponden al ajuste del modelo de la potencia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los parámetros de la ley potencia para esta salsa se muestran en el Cuadro 4. Los valores promedio calculados con los datos de la paleta en medio infinito, considerados aquí como los más representativos de las propiedades de flujo, son $n = 0.3$ $k = 5.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, con 0 % y 1.87 % de coeficiente de variación, respectivamente. Se menciona que son los más representativos porque es la geometría que tiene menos de desviaciones por la interferencia con las partículas en suspensión y la geometría de cinta helicoidal ya había sido descartada en el estudio de salsas homogéneas.

Cuadro 4. Parámetros de la ley de la potencia (n , K) obtenidos con las diferentes geometrías para la salsa Verde.

	n	K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)	R^2	Intervalo de velocidad de cizalla (s^{-1})
1FL40/D80	0.30	5.37	0.986	10-80
2FL40/D80	0.30	5.23	0.978	10-80
1FL40/D40	0.47	3.78	0.977	10-100
2FL40/D40	0.29	8.25	0.899	10-100
1HELICE	0.26	4.25	0.989	11-400

R^2 = coeficiente de determinación. Paleta (FL40), Cinta helicoidal (HELICE), Recipiente de 40 mm (D40), Recipiente de 80 mm (D80).

La caracterización de la salsa tipo Taquera se muestra en la Figura 5. Al igual que en la salsa Verde, se observaron grandes variaciones del esfuerzo de cizalla conforme se va aumentando la velocidad de cizalla en la geometría de paletas con espacio anular pequeño, presumiéndose una obstrucción de las partículas a la cizalla resultando esfuerzos mayores, por lo que se calculan índices mayores de consistencia. Los coeficientes de determinación son los más bajos que se obtuvieron.

La curva de flujo obtenida en la geometría de paletas en medio infinito también se asemeja a un comportamiento de la potencia. La geometría de cinta helicoidal, en las velocidades iniciales, muestra una tendencia cercana de la curva de paleta en medio infinito, lo cual se refleja en la cercanía de los parámetros reológicos (Cuadro 5). Los valores promedio obtenidos con la paleta en medio infinito, considerados también como los más representativos de las propiedades de flujo de esta salsa, son $n = 0.26$ $K = 8.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, con 0 % y 10 % de coeficiente de variación, respectivamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

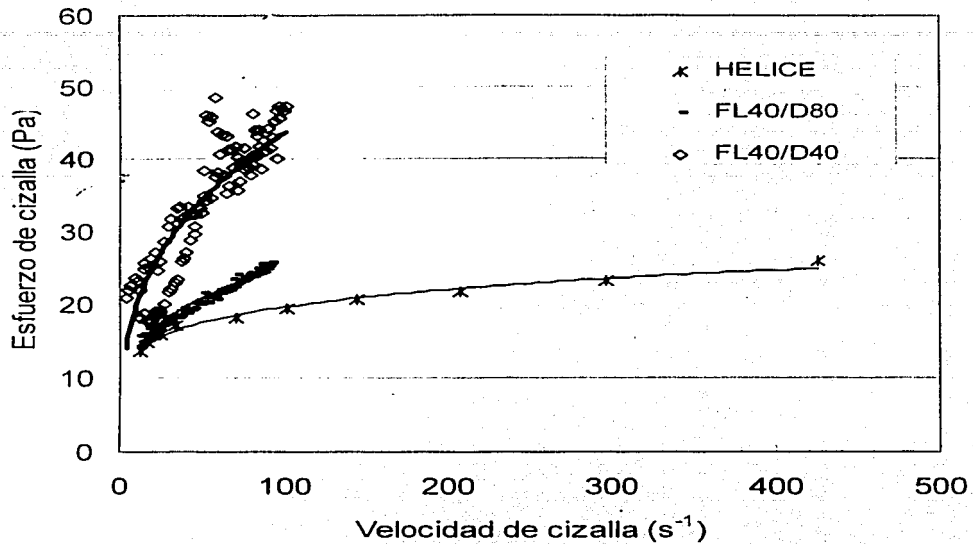


Figura 5. Comportamiento de flujo de la salsa Taquera obtenido en las 3 geometrías a 25 °C. FL40/D80: Dispositivo de paleta en medio infinito, FL40/D40: Dispositivo de paletas con espacio anular pequeño, HELICE: Dispositivo de cinta helicoidal. Las líneas continuas corresponden al ajuste del modelo de la potencia.

TESIS CON
FALDA DE ORIGEN

Cuadro 5. Parámetros de la ley de la potencia (n, K) obtenidos con las diferentes geometrías para la salsa Taquera.

	n	K (Pa.s ⁿ)	R ²	Intervalo de velocidad de cizalla (s ⁻¹)
1FL40/D80	0.26	7.51	0.956	10-92
2FL40/D80	0.26	7.71	0.952	10-92
1FL40/D40	0.33	15.26	0.454	10-100
2FL40/D40	0.29	16.49	0.759	10-100
1HELICE	0.16	9.25	0.987	11-400

R²= coeficiente de determinación. Paleta (FL40),Cinta helicoidal (HELICE), Recipiente de 40 mm (D40), Recipiente de 80 mm (D80).

En la Figura 6 se presentan los resultados obtenidos para la salsa Ranchera. Esta salsa mostró las partículas mayores, por lo que en la cinta helicoidal se tuvo que reducir la velocidad máxima de cizalla a 200 s⁻¹. Sin embargo, al igual que con las otras salsas la curva de flujo se encuentra debajo de las curvas obtenidas con las paletas. En el Cuadro 6 se muestran las variaciones de los parámetros reológicos del modelo de la ley de la potencia, evaluados con las diferentes geometrías. De igual manera se observaron grandes fluctuaciones de la paleta en espacio anular pequeño, con bajos coeficientes de determinación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

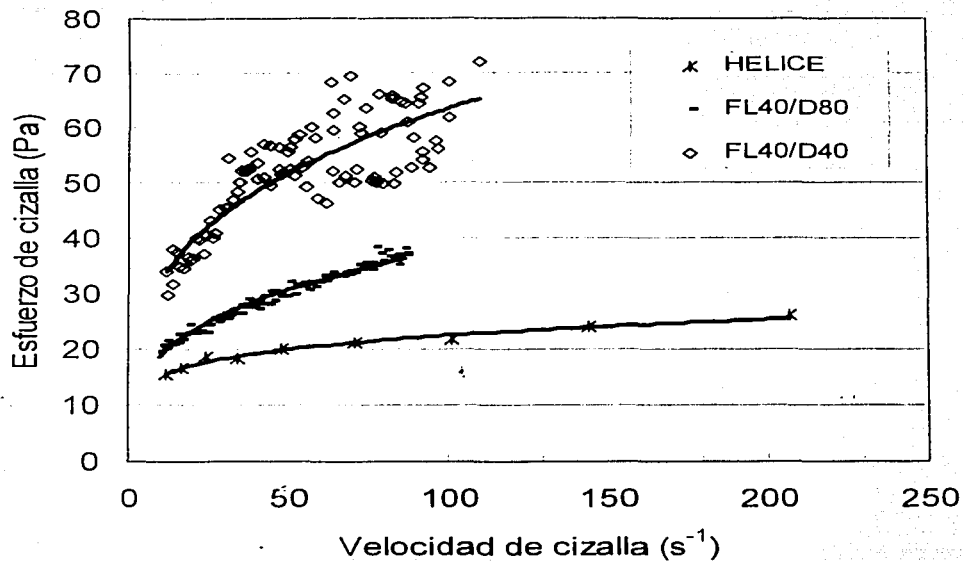


Figura 6. Comportamiento de flujo de la salsa Ranchera obtenido en las 3 geometrías a 25 °C. FL40/D80: Dispositivo de paleta en medio infinito, FL40/D40: Dispositivo de paletas con espacio anular pequeño, HELICE: Dispositivo de cinta helicoidal. Las líneas continuas corresponden al ajuste del modelo de la potencia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cuadro 6. Parámetros de la ley de la potencia (n , K) obtenidos con las diferentes geometrías para la salsa Ranchera.

	n	K ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)	R^2	Intervalo de velocidad de cizalla (s^{-1})
1FL40/D80	0.24	12.28	0.953	10-87
2FL40/D80	0.29	11.27	0.901	10-87
1FL40/D40	0.45	5.13	0.639	25-100
2FL40/D40	0.34	8.98	0.731	10-100
1HELICE	0.17	10.19	0.972	11-200

R^2 = coeficiente de determinación. Paleta (FL40); Cinta helicoidal (HELICE), recipiente de 40 mm (D40); Recipiente de 80 mm (D80).

Los valores promedio obtenidos con la paleta en medio infinito, considerados también como los más representativos de las propiedades de flujo de esta salsa, son $n = 0.26$ $K = 11.8 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, con 13 % y 6 % de coeficiente de variación, respectivamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONCLUSIONES

Las propiedades de flujo de seis salsas mexicanas analizadas, presentan un comportamiento fluidificante a la cizalla que puede representarse por el modelo de la ley de la potencia.

La salsa más consistente de las homogéneas fue la salsa "Barbecue", seguida de la Chipotle y finalmente la salsa Valentina. Mientras que el orden de consistencia de las salsas heterogéneas fue la Ranchera, seguida de la Taquera y finalmente la salsa Verde. El índice de comportamiento al flujo (n) promedio de las salsas fue de 0.3, lo que indica una fuerte dependencia de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla.

Las salsas homogéneas con los cilindros concéntricos y la paleta en los dos recipientes, muestran comportamientos reológicos similares, tanto en la tendencia de las curvas de flujo, como en los parámetros reológicos, por lo que cualquiera de estas geometrías es recomendada para su caracterización. En el caso de las salsas heterogéneas, la geometría de paletas con espacio anular infinito, es la que se recomienda para dichas salsas que contienen grandes partículas en suspensión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

REFERENCIAS

- ALLEN, D. G. y ROBINSON, C. W. 1990. Measurement of rheological properties of filamentous fermentations broths. *Chem. Eng. Sci.* **45** (1):37-48.
- ARRIAGA-ORIHUELA, R. M., MONTIEL-NAVARRO, A. y BERISTAIN, F. 1997. Cálculo de las curvas de flujo en mezcladores que emplean impulsores helicoidales. *Rev. Información Tecnológica*, **8** (6), 13-19.
- BARNES H. A. y CARNALI J. O. 1990. The vane-in-cup as a novel rheometer geometry for shear-thinning and thixotropic materials *J. Rheol.* **34**, 841-866.
- BRITO DE LA FUENTE, E., LEULIET, J. C., CHOPLIN, L. y TANGUY, P. A. 1992. On the effect of shear-thinning behavior on mixing with helical ribbon impeller, en *Process Mixing. Chemical and Biochemical Applications.* (G. B. Tatterson and R. V. Calabrese, eds.): *AIChE Symp. Series* **286** (88), 28-32.
- CANTU-LOZANO, D., RAO, M. A., y GASPARETTO, C. A. 2000. Rheological properties of noncohesive apple dispersion with helical and vane impellers: effect of concentration and particle size. *J. Food Process Eng.* **23**, 373-385.
- CHAVAN, V. V. y ULBRECHT, J. 1973. Power correlations for close-clearance helical impellers in Non-Newtonian liquids. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.* **12** (4), 472-476.
- CHAVAN, V. V. y ULBRECHT, J. 1974. Correction. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.* **13** (3), 309.
- KEMBŁOWSKY, Z. y KRISTIANSEN, B. 1986. Rheometry of fermentation liquids. *Biotechnol. Bioeng.* **28**, 1474-1483.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MARTÍNEZ-PADILLA L. P., CORNEJO ROMERO C., CRUZ CRUZ, C. M., JÁQUEZ HUACUJA, C. C. y BARBOSA CÁNOVAS, G. V. 1999. Rheological Characterization of a model food suspension containing discs using three different geometries. *J. Food Process Eng.* 22, 55-79.

MARTINEZ-PADILLA L. P. y DELGADO-REYES V. 2001. Apuntes del Módulo II, Reología de fluidos. Seminario de Titulación: Reología y textura de materiales biológicos UNAM. FES Cuautitlán pp 47-55. Abril -junio.

STEFFE, J. F. 1996. *Rheological Methods in Food Process Engineering*. 2d ed. Freeman Press. East Lasting, MI. USA.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN