

Universidad Nacional Autónoma de México



FACULTAD DE QUÍMICA

PROPIEDADES REOLÓGICAS EN FLUJO ESTACIONARIO Y NO ESTACIONARIO DE PAPILLAS PARA INFANTES PREPARADAS CON DOS DIFERENTES HARINAS DE MAÍZ NIXTAMALIZADO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

QUÍMICO DE ALIMENTOS

PRESENTA:

LEONEL VELÁZQUEZ ARRIAGA



MÉXICO, D.F.

2010



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: Profesor: María de los Ángeles Valdivia López

VOCAL: Profesor: Alberto Tecante Coronel

SECRETARIO: Profesor: Luis Medina Torres

1er. SUPLENTE: Profesor: Armando Conca Torres

2° SUPLENTE: Profesor: Hiram Ramírez Cahero

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO 313 DEPARTAMENTO
DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA FACULTAD DE QUÍMICA-CONJUNTO "E"

ASESOR DEL TEMA: DR. ALBERTO TECANTE CORONEL

SUPERVISOR TÉCNICO: I.A. MARIANA RAMÍREZ GILLY

SUSTENTANTE: LEONEL VELÁZQUEZ ARRIAGA

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a su Facultad de Química por la valiosa oportunidad que me brindaron para formarme como un profesionalista.

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Alberto Tecante Coronel, por todos sus consejos, disponibilidad y sobre todo la oportunidad que me dio de poder trabajar en su laboratorio.

A la Ingeniera en Alimentos Mariana Ramírez Gilly por su apoyo técnico en las pruebas reológicas y sus consejos.

DEDICATORIAS

A mis Padres:

Leonel Andrés Velázquez y Leticia Arriaga Linares.

Gracias por darme la vida y por haberme inculcado buenos valores, gracias por el amor y la confianza que en mi depositaron y sobre todo por no dejar que me desviara del camino correcto para poder ser lo que ahora soy.

A mi Hermana:

Elizabeth Velázquez Arriaga.

Por haberme apoyado en esta etapa de mi vida.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS.....	III
NOMENCLATURA.....	VII
RESUMEN.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1 GENERALIDADES.....	5
1.1 Almidón.....	5
1.2 Reología y reometría.....	6
1.3 Nixtamalización.....	7
1.4 Gelatinización y retrogradación.....	7
1.5 Propiedades viscoelásticas de los biopolímeros de alimentos.....	7
1.6 Caracterización del comportamiento viscoelástico de biopolímeros.....	8
1.7 Viscosidad de papillas para infantes.....	8
1.8 Efecto de factores físicos optimización de la viscosidad y la densidad energética de papillas de maíz para infantes destetados en países en desarrollo	13
1.9 Hipótesis y objetivos.....	19
1.9.1 Hipótesis.....	19
1.9.2 Objetivo general.....	19
1.9.3 Objetivos particulares.....	19
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
2.1 Materiales.....	20
2.2 Obtención del harina de maíz nixtamalizado.....	20
2.3 Preparación de las papillas.....	21
2.4 Determinaciones reológicas.....	22

2.5 Análisis Químico Proximal.....	23
2.6 Análisis Estadístico.....	26
CAPITULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
3.1 Composición proximal.....	27
3.2 Densidad energética.....	28
3.3 Caracterización reología de las papillas preparadas con HCM.....	29
3.3.1 Pruebas de cizalla no estacionaria oscilatoria.....	29
3.3.2 Pruebas de cizalla estacionaria circular.....	31
3.3.3 Pruebas de cizalla no estacionaria circular.....	33
3.4 Caracterización reología de papillas preparadas HMN.....	34
3.4.1 Pruebas de cizalla no estacionaria oscilatoria.....	34
3.4.2 Pruebas de cizalla estacionaria circular.....	35
3.4.3 Pruebas de cizalla no estacionaria circular.....	36
3.5 Caracterización reología de papillas preparadas con mezclas de HCM y HMN	
3.5.1 Pruebas de cizalla no estacionaria.....	37
3.5.2 Pruebas de cizalla estacionaria circular.....	44
3.5.3 Pruebas de cizalla no estacionaria circular.....	49
CONCLUSIONES.....	53
REFERENCIAS.....	55
ANEXO A Análisis estadístico de la HCM.....	58
ANEXO B Determinación de la densidad energética para la HCM.....	63
ANEXO C Análisis estadístico para las 3 concentraciones de las mezclas.....	66
ANEXO D Zona de viscoelasticidad lineal.....	71

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

Cuadros

Cuadro 1.1. Viscosidad aparente y parámetros del modelo de Ostwald - de Waele.

Cuadro 3.1. Composición base seca del HCM

Cuadro 3.2. Composición base seca de las fracciones de HMN

Cuadro 3.3. Densidades energéticas (kJ/100 g de papilla) de las papillas elaboradas con HCM.

Cuadro 3.4. Densidades energéticas (kJ/100 g de papilla) de las papillas elaboradas con HMN.

Cuadro 3.5. Densidades energéticas (kJ/100 g de papilla) de las papillas elaboradas con HMN y HCM (M).

FIGURAS

Figura 1.1 Diferentes tipos de respuesta ante una reducción repentina de la velocidad de cizalla (a): (b) viscoelástico; c) inelástico tixotrópico; d) más general.

Figura 1.2 Estructura de la amilosa

Figura 1.3 Estructura de la amilopectina

Figura 1.4 Flujo de cizalla o corte entre dos placas paralelas.

Figura 1.5 Influencia de la concentración de sólidos sobre la viscosidad aparente a 45°C de papillas preparadas con harina de maíz (A), harina de casava (B) y

harina de arroz (C). Viscosidades obtenidas con 10min de cizalla en diferentes viscosímetros: (♦)Haake VT500, 83S^{-1} , (◇)Rion VT04 spindle 1, 62.5rpm (+)Brookfield RVT, spindle 6 , 20rpm.

Figura 1.6 Influencia de la velocidad de cizalla sobre la viscosidad aparente a 45°C de papillas preparadas con diferentes concentraciones de harina de maíz (A) y harina con multicomponentes (D) preparadas a diferentes concentraciones para un tiempo de cizalla de 10 min.

Figura 1.7 Influencia del tiempo de cizalla sobre la viscosidad aparente a 45°C de las papillas preparadas con diferentes concentraciones de harina de maíz (A), harina de casava (B) y harina de arroz (C) para una velocidad de cizalla de 83s^{-1} .

Figura 1.8 Variaciones de la viscosidad aparente de papillas preparadas con diferentes harinas durante su enfriamiento desde 70 hasta 30°C , para una velocidad de cizalla de 83s^{-1} .

Figura 2.1. Diagrama general.

Figura 2.2. Tanque enchaquetado de acero inoxidable con agitación mecánica utilizado para preparar las papillas.

Figura 3.1. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de papillas con diferente concentración de sólidos de HCM.

Figura 3.2. Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de las papillas preparadas con diferentes concentraciones de HCM antes y después de someterlas a dos ciclos de ascenso y descenso de velocidad de cizalla.

Figura 3.3. Ciclos de ascenso y descenso de papillas preparadas con diferentes concentraciones de HCM.

Figura 3.4 Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de papillas con diferente concentración de sólidos de HMN.

Figura 3.5. Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de las papillas preparadas con diferentes concentraciones de HMN antes y después de someterlas a dos ciclos de ascenso y descenso de velocidad de cizalla.

Figura 3.6. Ciclos de ascenso y descenso de papillas preparadas con diferentes concentraciones de HMN.

Figura 3.7 Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de papillas con 7% de sólidos totales (a), y dependencia de G' (b) y G'' (c), a 6.28 rad/s, con la proporción de HCM en la mezcla (%).

Figura 3.8 Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de papillas con 8% de sólidos totales (a) y dependencia de G' (b) y G'' (c), a 6.28 rad/s, con la proporción de HCM en la mezcla (%).

Figura 3.9 Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de papillas con 9% de sólidos totales (a) y dependencia de G' (b) y G'' (c), a 6.28 rad/s, con la proporción de HCM en la mezcla (%).

Figura 3.10 Variación de $\tan \delta$ con la frecuencia de papillas con 7 (arriba), 8 (centro) y 9% (abajo) de sólidos y diferentes proporciones de HCM y HMN.

Figura 3.11 Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de papillas con 7% de sólidos, preparadas con HCM y HMN. (a) comportamiento sin y con precizalla de las papillas individuales de HCM y HMN. Variación de la viscosidad aparente a 1 s^{-1} de las papillas sin precizalla (b) y con precizalla (c) con diferentes proporciones de HCM y HMN.

Figura 3.12 Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de papillas con 8% de sólidos, preparadas con HCM y HMN. (a) comportamiento sin y con precizalla de las papillas individuales de HCM y HMN. Variación de la viscosidad aparente a 1 s^{-1} de las papillas sin precizalla (b) y con precizalla (c) con diferentes proporciones de HCM y HMN.

Figura 3.13 Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de papillas con 9% de sólidos, preparadas con HCM y HMN. (a) comportamiento sin y con precizalla de las papillas individuales de HCM y HMN. Variación de la viscosidad aparente a 1 s^{-1} de las papillas sin precizalla (b) y con precizalla (c) con diferentes proporciones de HCM y HMN.

Figura 3.14 Variación del esfuerzo de cizalla con la velocidad de cizalla de las papillas con 7% de sólidos y diferentes proporciones de HCM y HMN, durante dos ciclos consecutivos de ascenso y descenso de la velocidad de cizalla.

Figura 3.15 Variación del esfuerzo de cizalla con la velocidad de cizalla de las papillas con 9% de sólidos y diferentes proporciones de HCM y HMN, durante dos ciclos consecutivos de ascenso y descenso de la velocidad de cizalla.

NOMENCLATURA

γ	Deformación	Adimensional
$\dot{\gamma}$	Velocidad de cizalla	s^{-1}
$\tan \delta$	Tangente del ángulo de desfase	
η	Viscosidad aparente	Pa·s
σ	Esfuerzo de cizalla	Pa
ω	Frecuencia de oscilación	rad/s
G'	Módulo de almacenamiento	Pa
G''	Módulo de pérdida	Pa
HCM	Harina de maíz comercial Maseca	
HMN	Harina de maíz nixtamalizado	

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue determinar las propiedades reológicas de papillas preparadas con harina de maíz nixtamalizado (HMN) obtenida en el laboratorio, harina comercial (HCM) y mezclas de ambas en diferentes proporciones, por medio de pruebas de cizalla oscilatoria de baja amplitud, cizalla estacionaria circular y cizalla transitoria circular. Se prepararon papillas con diferentes concentraciones de sólidos totales en agua, siguiendo un tratamiento térmico que incluyó calentamiento (1.5 °C/min) desde temperatura ambiente hasta 90 °C seguido de 10 min a 90 °C y posterior enfriamiento (1.5 °C/min) hasta temperatura ambiente siempre bajo agitación constante (76rpm). Las papillas fueron conservadas en refrigeración a 8 °C durante 24 h previo a su examen reológico. En todas las papillas la concentración de sólidos influyó en el predominio del carácter elástico sobre el viscoso, así como en el nivel de viscosidad y tixotropía lo que dio como resultado una interesante gama de “consistencias” que van desde fluidas hasta tipo gel.

El análisis químico proximal del HCM y el HMN llevado a cabo para conocer su composición y determinar el contenido energético de las papillas preparadas, mostró que es posible aumentar el contenido energético pero a expensas de un aumento en la concentración de sólidos totales que trae como consecuencia la formación de papillas con comportamiento similar al de un gel con poca tendencia a fluir. No obstante, algunas otras papillas fueron más fluidas aunque con un menor contenido energético.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se estudiaron las propiedades viscoelásticas de papillas preparadas con harina de maíz nixtamalizado producida en el laboratorio (HMN), harina de maíz nixtamalizado comercial (HCM) y mezclas de ambas harinas en diferentes proporciones y se determinó la densidad energética de las papillas individuales y sus mezclas. Uno de los propósitos de este trabajo fue complementar la información proveniente de un trabajo previo (Muñoz, 2009) en el cual se estudió la presencia de efectos de dependencia del tiempo de la viscosidad de las papillas, el efecto del tamaño de partícula sobre las propiedades reológicas, además de los aspectos abordados en el presente trabajo.

Cabe mencionar que en México no existen, hasta donde sabemos, este tipo de estudios en alimentos de complemento y por lo tanto este trabajo y el trabajo previo (Muñoz, 2009) aportan información más completa sobre las propiedades viscoelásticas de papillas sobre la base de una aplicación de los principios fundamentales de la reología y no en pruebas empíricas o semi-empíricas.

Los cereales han sido una de las principales fuentes de alimentación para el ser humano desde tiempo atrás, debido a que son constituyentes fundamentales en la dieta por lo que son de gran importancia a nivel mundial (Tscheuschner 2001). Entre los principales cereales que se consumen están el trigo, el arroz, el maíz y la cebada (Callejo González 2002).

Las papillas a base de maíz, mijo y sorgo se caracterizan por ser de baja densidad energética y gran volumen; por esta razón es necesario buscar proporciones de harina y agua que representen un buen balance entre consistencia y aporte energético (Trèche & Mbome 1999; Kikafunda et al. 1997).

Las propiedades reológicas del almidón de maíz en medio acuoso han sido ampliamente estudiadas. Sin embargo, el análisis basado en los principios fundamentales de la reología y no en pruebas empíricas o semi-empíricas, en alimentos de complemento preparados a partir de cereales como el maíz es aún escaso en México.

Existen diversos reportes acerca de la viscosidad aparente de las papillas en los que se establece su dependencia con la velocidad de cizalla (Lorri & Svanberg

1993; Gimbi et al. 1997, Trèche & Mbome, 1999). Sin embargo, dada la naturaleza de las papillas, su viscosidad aparente no es necesariamente la mejor propiedad para caracterizarlas reológicamente. El almidón sufre cambios durante la cocción e interacción con otros componentes como lípidos y proteínas. Todo ello tiene impacto sobre las propiedades de viscoelásticas del alimento. Un aspecto hasta ahora no tratado en la literatura en el caso de papillas para infantes, es la probable presencia de comportamiento tixotrópico o incluso anti-tixotrópico.

Una posible definición establece que la tixotropía es un incremento seguido de una disminución de la viscosidad aparente cuando un material que fluye es sometido a un aumento y una disminución, respectivamente, de la velocidad de cizalla sobre un intervalo definido. En este caso la viscosidad aparente obtenida al aumentar la velocidad de cizalla, es mayor que la obtenida al disminuirla, de tal forma que el resultado neto de la deformación continua del material en forma creciente y luego decreciente es una disminución de la viscosidad aparente. Otra posible definición, establece que la tixotropía es la disminución reversible de la viscosidad aparente cuando un material se somete a una velocidad de cizalla constante durante un intervalo de tiempo dado. En esta definición, reversible significa que el material recuperará su viscosidad aparente inicial después de algún tiempo de haber suspendido la velocidad de cizalla. Ambas definiciones consideran la existencia de condiciones isotérmicas.

La tixotropía y la viscoelasticidad expresan tiempo y los efectos de la historia de cizalla. Fenómenos tales como reducción, histéresis y sobreesfuerzos en experimentos de aumento de la velocidad de cizalla son comunes a ambas. En viscoelasticidad reflejan comportamientos no lineales. No son claramente convenientes para decidir sobre la naturaleza tixotrópica de una muestra como se hace con frecuencia (Suetsugu & White, 1984; Mewis & Dullaert, 2005). Además, los materiales tixotrópicos pueden exhibir efectos elásticos. Por ejemplo, después de un período de relajación un gel se convierte, en un sólido elástico débil. Incluso durante el flujo elástico los componentes del esfuerzo se pueden detectar en los materiales tixotrópicos (Solomon et al. 2001). Una fuente adicional de confusión entre la viscoelasticidad y la tixotropía es el hecho de que hayan sido los modelos

viscoelásticos no lineales para los polímeros, precursores para derivar los modelos lineales por medio de un procedimiento similar según lo utilizado dentro de la tixotropía. Los modelos resultantes describen fenómenos tales como esfuerzos de cizalla e histéresis en experimentos de arranque, sin necesariamente modelar las transiciones de la viscosidad requeridos por la definición de la tixotropía.

Es posible concluir por lo tanto que los materiales tixotropicos pueden ser o no ser viscoelásticos. El experimento para determinar la tixotropía consiste en hacer disminuir la velocidad de cizalla. En tal experimento, dicha velocidad de cambio se sigue después de una reducción repentina en la velocidad de cizalla como se ilustra en la Figura 1a). Los líquidos viscoelásticos normales, ya sea que estén o no en la región lineal, reaccionarían a tal historia de cizalla por medio de una disminución monótona del esfuerzo hasta un valor de la nueva meseta (Fig.1b).

Durante la relajación del esfuerzo la microestructura debe recuperarse a su nuevo nivel de estado estacionario. En cambio, bajo condiciones similares el esfuerzo de cizalla en un material tixotrópico inelástico caería instantáneamente hasta un valor más bajo, para aumentar posteriormente de manera gradual hasta su nuevo estado estacionario (Fig. 1c). La respuesta más general sería una combinación de estos dos tipos, es decir, una caída rápida instantánea en el esfuerzo seguida de una relajación relativamente rápida y finalmente un aumento lento, gradual en la viscosidad (Fig. 1d). Debido a la recuperación dependiente del tiempo de la viscosidad en la Fig. 1c y d, estos dos casos serán considerados tixotrópicos. El caso inelástico constituye una clase especial de materiales dentro de la mecánica racional de medios continuos, el elástico es un subgrupo de los materiales viscoelásticos no lineales.

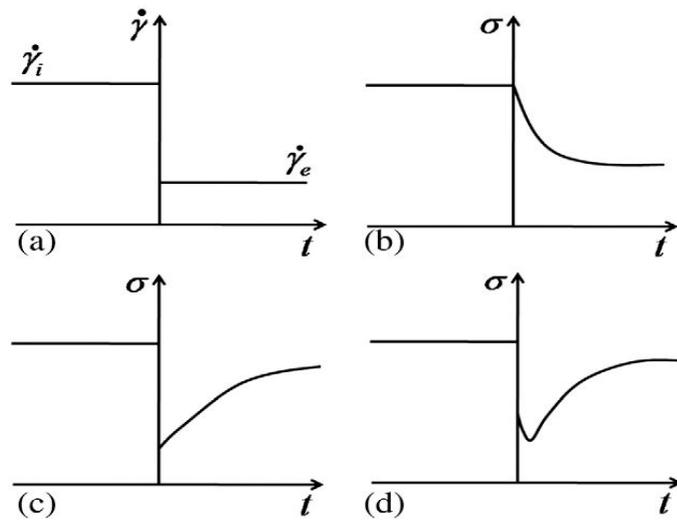


Fig. 1.1 Diferentes tipos de respuesta ante una reducción repentina de la velocidad de cizalla (a): (b) viscoelástico; c) inelástico tixotrópico; d) más general.

Por todo lo anterior, el propósito central de este estudio es examinar las propiedades reológicas de papillas preparadas a partir de harina de maíz nixtamalizado, usando pruebas fundamentales, para determinar de qué manera la preparación y la proporción de los principales ingredientes afectan el carácter elástico-viscoso de este alimento.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Almidón

El almidón se encuentra en semillas, raíces y tubérculos que son almacenes de energía para las plantas. En algunos cereales, como el maíz, esta macromolécula constituye el 70% del peso del grano. El almidón está compuesto por dos polímeros distintos, ambos de glucosa: (1) Amilosa (Figura 1.2) formada por unidades de glucosa unida por enlaces $\alpha(1-4)$ formando cadenas largas esencialmente lineales y que se encuentran en una proporción 20-25% y (2) amilopectina (Figura 1.3), formada por unidades de glucosa unidas por enlaces $\alpha(1-4)$ y en la cual cada cierto número de monómeros tiene uniones $\alpha(1-6)$ que dan lugar a la formación de ramificaciones. Por ello posee una estructura tipo árbol con 20 o 25 unidades por ramificación. La amilopectina tiene un peso molecular más grande que la amilosa (Callejo González, 2002).

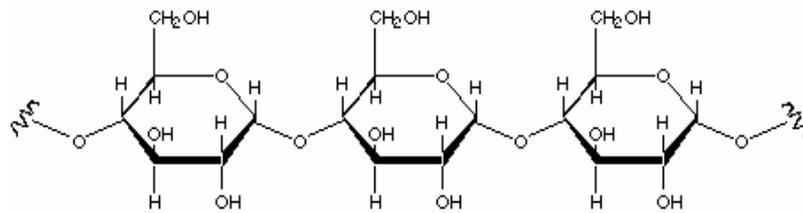


Figura 1.2 Estructura de amilosa.

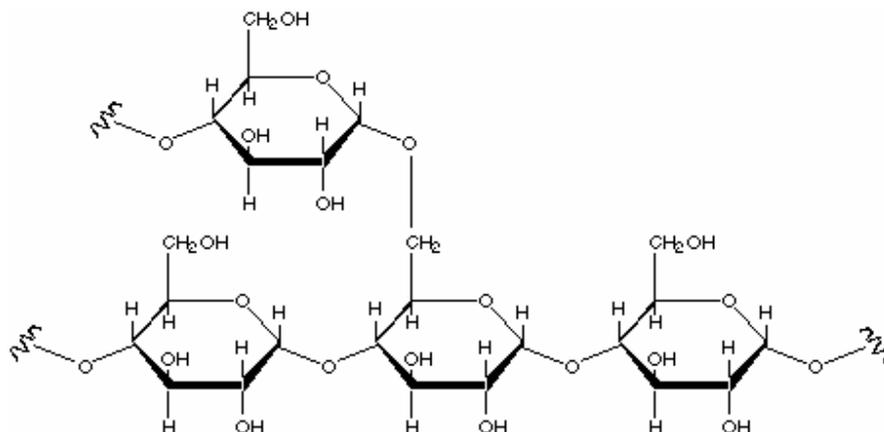


Figura 1.3 Estructura de amilopectina.

1.2 Reología y reometría

La reología es una disciplina científica que estudia la deformación y el flujo de los materiales. La reometría es un conjunto de técnicas para llevar a cabo mediciones reológicas y el equipo para tal propósito se llama reómetro. En los reómetros de torsión, una muestra colocada entre dos elementos mecánicos (ej. dos platos paralelos o dos cilindros coaxiales, uno de los cuales es móvil) se somete a la aplicación de una deformación de cizalla ya sea por medio de movimiento circular uniforme o de oscilación armónica simple.

Los fluidos pueden ser estudiados sujetándolos a una cizalla continua a velocidad constante. Lo anterior puede llevarse a cabo usando dos placas paralelas con un fluido en el espacio entre ellas. La placa inferior está fija y la placa superior se mueve a una velocidad constante, u , la cual puede ser considerada como un incremento en el cambio de posición dividida por un pequeño periodo de tiempo, $\delta L/\delta t$. Se requiere una fuerza por unidad de área en la placa para que el movimiento resulte en un esfuerzo de cizalla en la placa superior (Figura 1.4). El flujo resultante es de cizalla simple estacionaria para el cual la velocidad de cizalla queda definida como la velocidad de cambio de la deformación.

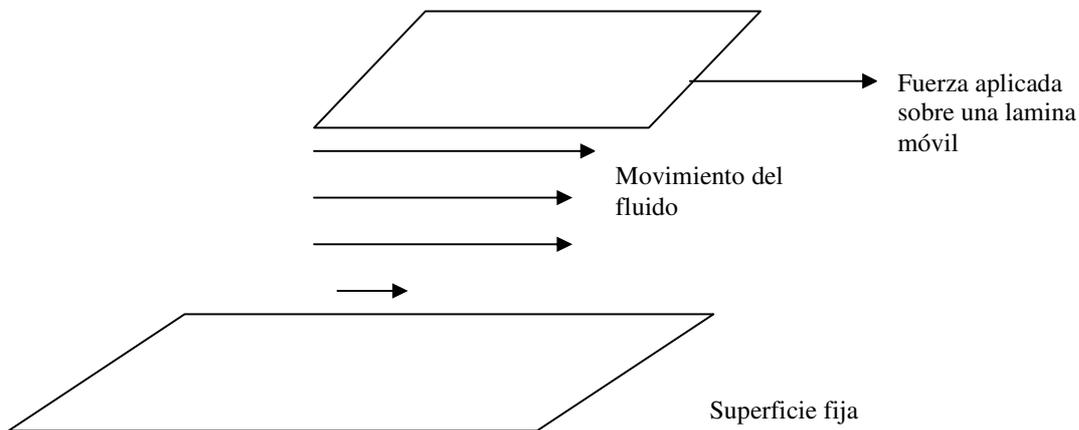


Figura 1.4 Flujo de cizalla o corte entre dos placas paralelas.

1.3 Nixtamalización

Se conoce como nixtamalización a la cocción en medio alcalino del grano de maíz seguida de reposo a temperatura ambiente con duración de 8 a 16 horas. Algunas de las consecuencias más importantes de la nixtamalización son la absorción de calcio en el grano de maíz, el desprendimiento del pericarpio y la gelatinización parcial del almidón contenido en el endospermo del grano.

1.4 Gelatinización y retrogradación

La gelatinización es un conjunto de modificaciones que ocurre cuando los gránulos de almidón se tratan con calor en medio acuoso. Cuando aplicamos calor a una suspensión de almidón, se hinchan los gránulos por absorción de agua. Una vez que el hinchamiento es máximo, la amilosa que es soluble, es liberada en el medio acuoso dando como resultado gránulos muy hinchados rodeados por una gran cantidad de cadenas de amilosa. De esta manera se forma una pasta que tiene una alta viscosidad (Eliasson & Gudmundsson, 1996).

El término retrogradación como se aplica al almidón, significa el regreso del estado solvatado, disperso, amorfo a una condición insoluble agregada o cristalina y puede tener los siguientes efectos en las pastas o dispersiones del almidón (Swinkels, 1985):

- Incremento en viscosidad.
- Desarrollo de opacidad y turbidez.
- Formación de capa insoluble sobre la superficie de pastas calientes.
- Precipitación de partículas de almidón insoluble.
- Formación de geles.
- Sinéresis de la pasta.

1.5 Propiedades viscoelásticas de los biopolímeros de alimentos

Las proteínas y los polisacáridos son los dos principales tipos de biopolímeros usados en la industria de alimentos, de los cuales el almidón es uno de los más populares. Los biopolímeros son usados generalmente como agentes espesantes o gelantes e imparten características sensoriales deseables.

En la caracterización viscoelástica de pastas y geles de almidón es frecuente el uso de cizalla oscilatoria de baja amplitud. El comportamiento de los módulos dinámicos (G' , G'' , G^*), así como la tangente del ángulo de pérdida ($\tan \delta$) ha proporcionado información acerca del carácter elástico de estos sistemas (Evans & Haisman, 1979; Alloncle & Doublier, 1991; Evans & Lips, 1992; Eidam & Kulicke, 1995; Abdulmola et al., 1996; Tecante & Doublier, 1999), lo cual ha sido asociado con la presencia de partículas deformables en suspensión (gránulos hinchados, fragmentos de gránulos hinchados, gránulos no hinchados).

1.6 Caracterización del comportamiento viscoelástico de biopolímeros

Las características reológicas de los sistemas en los cuales los biopolímeros están presentes, ya sea como componentes naturales o añadidos, son influenciadas por su estructura, tamaño, forma molecular, conformaciones (i.e. orientación en el espacio) adoptadas en disolución, interacción con otros constituyentes y el medio químico y físico. Los alimentos son medios acuosos multicomponentes, en donde ocurren diferentes tipos de interacciones. Las propiedades funcionales de los biopolímeros en tales medios se han estudiado, pero no necesariamente en presencia de todos los componentes normalmente encontrados en los alimentos. Es más simple estudiar su comportamiento como componentes aislados, razón por la cual el almidón ha sido estudiado ampliamente, en medio acuoso. Sólo así es que otros componentes, como iones, mono o disacáridos, o incluso otros biopolímeros pueden ser incorporados y las posibles modificaciones que surjan de su presencia pueden ser entendidas y explicadas en términos más racionales y menos empíricos (Tecante, 2005).

1.7 Viscosidad de papillas para infantes

- **Influencia de la concentración de la papilla**

Se ha estudiado (Mouquet & Trèche, 2001) la viscosidad de papillas preparadas con diferentes concentraciones de sólidos de harina de maíz, arroz y casava (i.e. yuca o mandioca). Los resultados muestran (Figura 1.5) una marcada influencia

del contenido de materia seca de la papilla ya que los valores de viscosidad aparente se incrementan rápidamente con el contenido de materia seca.

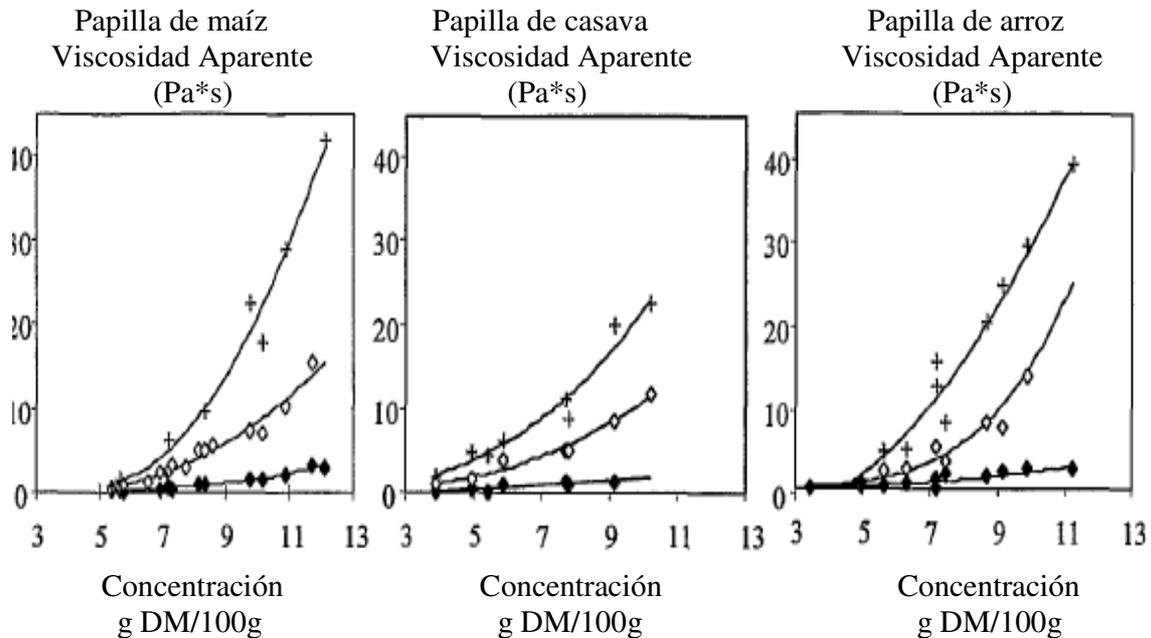


Figura 1.5. Influencia de la concentración de sólidos sobre la viscosidad aparente a 45 °C de papillas preparadas con harina de maíz (A), harina de casava (B) y harina de arroz (C). Viscosidades obtenidas con 10 min de cizalla en diferentes viscosímetros: Haake VT500, 83 s⁻¹ (♦), Rion VT04 spindle 1, 62.5 rpm (◇) y Brookfield RVT, spindle 6, 20 rpm (+).

- **Influencia del sistema de determinación de viscosidad**

En la Figura 1.5 también se observa cómo diferentes viscosímetros producen diferentes valores de viscosidad aparente de las papillas sobretodo para concentraciones de sólidos mayores de 7%. Esto se debe a los diferentes patrones de flujo generados en cada viscosímetro. De hecho sólo para el Haake VT500 la velocidad de cizalla está definida, mientras que para los otros dos esto no sucede. No obstante, es muy común usar instrumentos en los cuales la velocidad de cizalla no está definida. Esta situación hace difícil comparar los valores de viscosidad ya que debido al comportamiento no newtoniano de las papillas (Figura 1.6) es necesario conocer la velocidad de cizalla. Por lo tanto, se hace necesaria una caracterización más rigurosa y formal basada en el uso de

instrumentos que proporcionen propiedades reológicas fundamentales con patrones de flujo definidos.

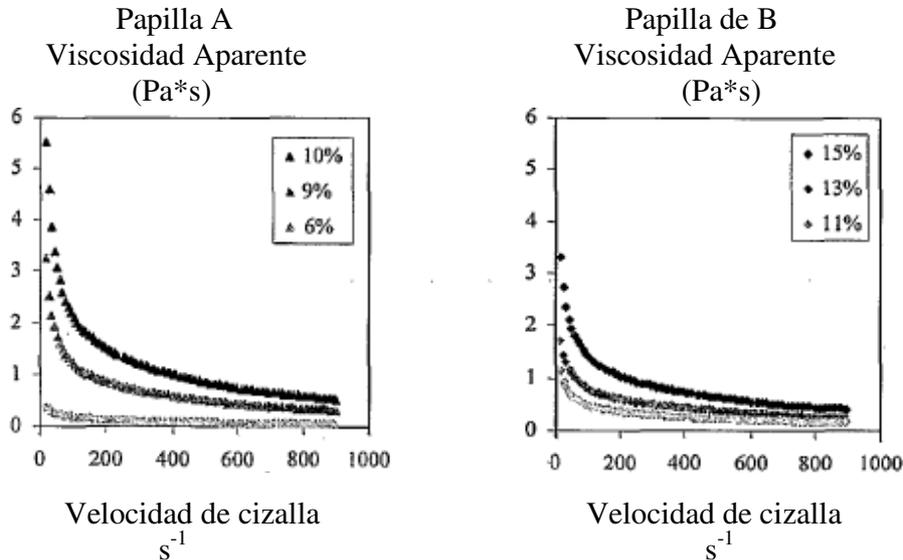


Figura 1.6 Influencia de la velocidad de cizalla sobre la viscosidad aparente a 45 °C de papillas preparadas con diferentes concentraciones de harina de maíz (A) y harina con multicomponentes (D) preparadas a diferentes concentraciones para un tiempo de cizalla de 10 min.

- **Velocidad de cizalla**

El comportamiento no-newtoniano de las papillas (Figura 1.6) es de adelgazamiento por cizalla, ya que la viscosidad aparente disminuye al aumentar la velocidad de cizalla. La Figura 1.6 ilustra el efecto del contenido de materia seca de las papillas preparadas con harina simple o con multicomponentes; la viscosidad aparente disminuye más drásticamente con el aumento de la velocidad de cizalla al incrementar el contenido de materia seca de la papilla. Este fenómeno de adelgazamiento por cizalla es usualmente explicado en términos de la orientación que sufren los gránulos de almidón y sus componentes solubles con la dirección del flujo. El movimiento circular en el viscosímetro orienta y separa algunas partículas y cadenas que ofrecen resistencia a la velocidad llevándolas a disminuir la viscosidad aparente. Estas interacciones empiezan a ocurrir otra vez y la viscosidad aparente se eleva cuando la velocidad de cizalla disminuye.

El comportamiento adelgazado por cizalla de productos de almidón, se describe de manera más precisa con ecuaciones empíricas que ajustan la viscosidad

aparente sobre un amplio intervalo de velocidades de cizalla. Uno de ellos es el modelo de Ostwald de Waele o ley de potencia (Evans & Haisman, 1979). Los valores de los coeficientes k (índice de consistencia) y n (índice de flujo) obtenidos para las papillas preparadas con diferentes concentraciones de harina de maíz y multicomponentes se presentan en el Cuadro 1.1. Los valores de los coeficientes de correlación mayores que 0.99, indica la calidad del ajuste entre los datos experimentales y los del modelo (Launay et al. 1986). El índice n es inferior a 1 lo que indica un comportamiento de adelgazamiento por cizalla y disminuye cuando la concentración de la papilla aumenta.

Cuadro 1.1. Viscosidad aparente y parámetros del modelo de Ostwald - de Waele.

Concentración de la papilla (g/100 g)	η a 83 s ⁻¹ (Pa·s)	k (Pa·s)	n	r^2
Harina de maíz				
5.9	0.16	0.04682	0.68	0.9985
6.8	0.21	0.578	0.68	0.9992
8.7	1.05	3.934	0.59	0.9982
9.1	1.37	5.686	0.57	0.9979
10.3	2.41	11.41	0.54	0.9973
Harina multicomponentes				
9.1	0.16	0.428	0.69	0.9987
10.7	0.33	0.997	0.66	0.9989
11.4	0.54	2.378	0.59	0.9995
12.5	0.72	2.643	0.62	0.9995
13.4	0.89	3.631	0.60	0.9996
15.7	1.59	7.920	0.57	0.9996

- **Tiempo de cizalla**

El tiempo de cizalla es otro factor importante que modifica la viscosidad aparente e indica la presencia de tixotropía o antitixotropía. Los valores de viscosidad de las papillas de harina simple se registraron durante 15 min. La Figura 1.7 muestra que las papillas son tixotrópicas, es decir, su viscosidad disminuye con el tiempo

cuando la velocidad de cizalla es constante. La tixotropía es usualmente atribuida a la ruptura progresiva de agregados de partículas en suspensión por efecto de la velocidad de cizalla aplicada.

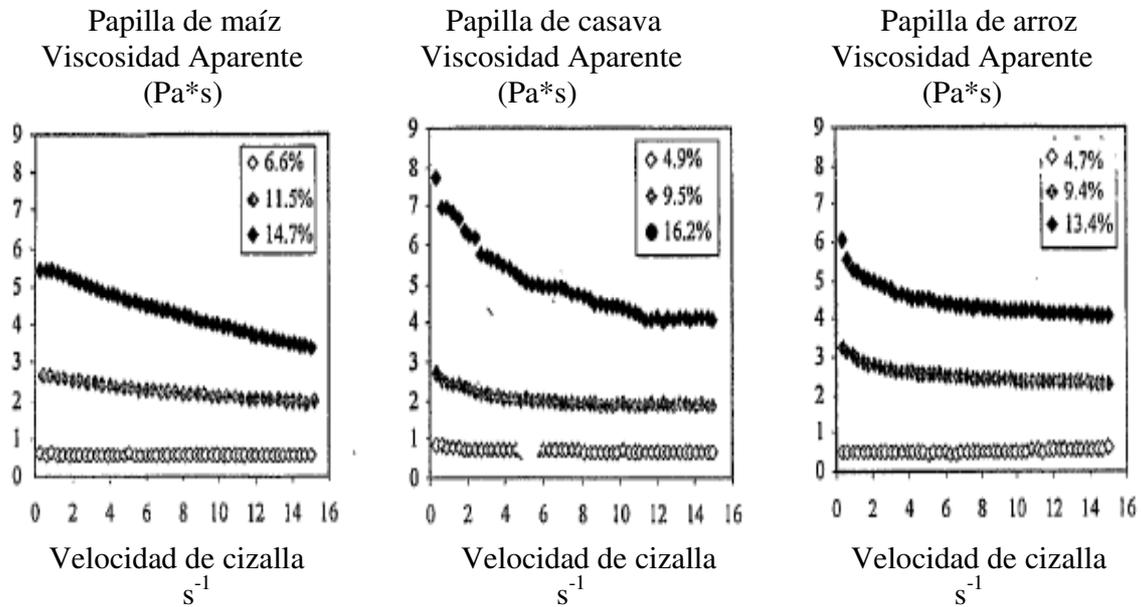


Figura 1.7 Influencia del tiempo de cizalla sobre la viscosidad aparente a 45°C de las papillas preparadas con diferentes concentraciones de harina de maíz (A), harina de casava (B) y harina de arroz (C) para una velocidad de cizalla de 83 s⁻¹.

Las papillas son suspensiones de gránulos de almidón hinchados que pueden mostrar comportamiento tixotrópico cuando son preparadas a altas concentraciones. Este comportamiento depende, sin embargo, de la concentración de materia seca y al parecer también del tipo de almidón como lo ilustra la Figura 1.7. La dependencia de la viscosidad con el tiempo de cizalla tiene un límite y en el caso de las papillas de casava y arroz, 10 minutos parecen ser suficientes para que la viscosidad aparente llegue a un valor prácticamente constante; no así para la papilla de maíz cuya viscosidad muestra un comportamiento de disminución continuo la intensidad del cual depende de la concentración de materia seca.

- **Temperatura de la papilla**

Un tercer factor que puede modificar substancialmente la viscosidad de las papillas es la temperatura ya que en general la viscosidad aumenta si la papilla

está fría. Este es un fenómeno muy común que ocurre con todos los tipos de papillas, independientemente de la concentración (Figura 1.8). Por lo tanto, es importante llevar a cabo las pruebas de viscosidad bajo condiciones de temperatura controlada.

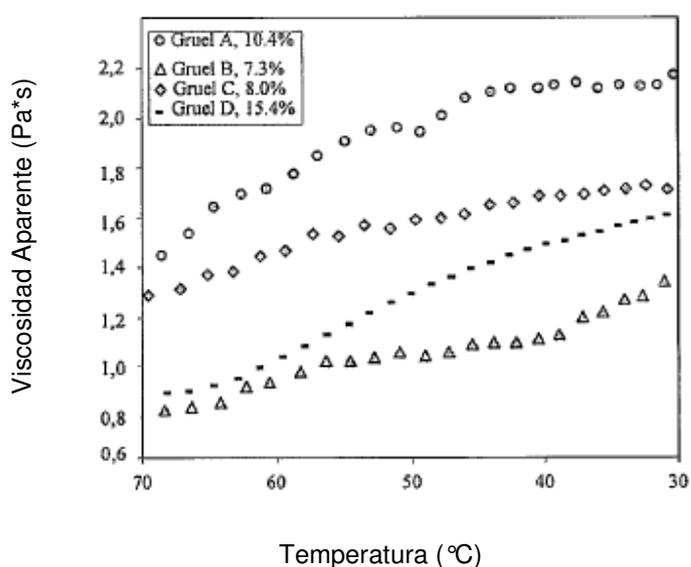


Figura 1.8. Variación de la viscosidad aparente de papillas preparadas con diferentes harinas durante su enfriamiento desde 70 hasta 30 °C, para una velocidad de cizalla de 83 s^{-1} .

La viscosidad es determinada a una temperatura muy cercana a la que la papilla es usualmente consumida por los infantes. El intervalo de temperatura es de 40 a 50 °C pero varía según la zona geográfica. En la literatura las temperaturas más comunes de medición de la viscosidad son 40 °C (Svanberg, 1987; Araya et al., 1991; Wanink et al., 1994) y 45 °C (John & Gopaldas, 1988; Hayes et al., 1995; Trèche & Mbome, 1999).

1.8 Efecto de factores físicos y optimización de la viscosidad y la densidad energética de papillas de maíz para infantes destetados en países en desarrollo

- **Viscosidad de la papilla: Efecto de los factores físicos**

Se ha estudiado (Kikafunda et al. 1997) la optimización de la viscosidad y la densidad energética de papillas de maíz para infantes destetados en países en desarrollo, a través del efecto del tiempo de cocción sobre la viscosidad. Se ha

observado un aumento significativo ($P < 0.0001$) del tiempo con el aumento de la concentración en el caso de una harina con tamaño de partícula promedio de 1.6 mm. Por otro lado, la viscosidad de una papilla de maíz disminuye significativamente con el aumento de la velocidad de cizalla y la temperatura. El tiempo de cizalla reduce la viscosidad pero su efecto no es significativo. El tamaño de partícula y el tiempo de cocción interactúan significativamente; cuando este último aumenta se observa una mayor viscosidad para la harina con tamaño de partícula de 0.8 mm que para la harina con tamaño de partícula de 1.6 mm.

La concentración y el tiempo de cocción aunque interactúan significativamente tienen un efecto diferente ya que con mayores tiempos de cocción se observa un mayor aumento en la viscosidad que con concentraciones de 8%. Asimismo, el tiempo de cocción interactúa significativamente con la velocidad de cizalla; con velocidades de cizalla de 256 rpm la viscosidad aumenta más que con tiempos de cocción de 60 min.

La velocidad de cizalla interactúa significativamente con la concentración; al aumentar la velocidad de cizalla disminuye la viscosidad más que con concentraciones de 6%.

La interacción entre velocidad de cizalla y tamaño de partícula es también significativa, ya que cuando aumenta la velocidad de cizalla disminuye la viscosidad más visiblemente para la harina con tamaño de partícula de 0.8 mm.

- **Efecto de la adición de ingredientes complementarios**

La viscosidad de la papilla se reduce significativamente ($P < 0.0001$) al añadir nuez molida. El efecto de reducción de la nuez molida en la viscosidad de la papilla es significativo y se ve influido por el tamaño de partícula de la harina. La nuez molida disminuye la viscosidad de harinas finas (0.8mm) y gruesas (1.6mm), pero la reducción es mayor para partículas finas. La adición de nuez molida reduce la viscosidad 57.4% para harinas con tamaño de partícula gruesa y 60.7% para harinas con tamaño de partícula fina. El efecto de reducción de la nuez molida interactúa significativamente con la concentración; con la adición de nuez

molida y una alta concentración, la viscosidad disminuye más para una harina con tamaño de partícula fina.

Para el harina con tamaño de partícula de 0.8 mm al adicionar la nuez molida, en promedio la concentración de la papilla, el tiempo de cocción, la velocidad de cizalla, el tiempo de cizalla y la temperatura a la que se midió la viscosidad, reducen la viscosidad de la papilla en 36.3% a una concentración de 6% y en 66.5% a una concentración de 8%. Para el harina con tamaño de partícula de 1.8 mm el efecto de la reducción es muy similar para ambas concentraciones de nuez molida ya que reducen la viscosidad en 59.3% y 56.9% para las concentraciones de 6% y 8% respectivamente.

La adición de nuez molida interacciona significativamente con la velocidad de cizalla ya que disminuye la viscosidad más que con altas velocidades de cizalla. La adición de nuez molida también interacciona significativamente con los tiempos de cocción ya que se lleva a cabo más efectivamente que con largos tiempos de cocción.

La viscosidad de la papilla se redujo significativamente por la adición de leche de vaca. La leche interaccionó con el tamaño de partícula haciendo que la reducción de la viscosidad sea más efectiva si se tiene un harina con tamaño de partícula de 0.8 mm. En promedio considerando la concentración de la papilla, el tiempo de cocción, la velocidad de cizalla, el tiempo de cizalla y la temperatura a la que se midió la viscosidad, la adición de leche reduce la viscosidad de la papilla en 21.1% para el harina con tamaño de partícula de 1.6 mm comparado con 34.4% para el harina con tamaño de partícula de 0.8 mm. Las interacciones entre las concentraciones y la leche fueron muy significativas ya que con la adición de leche disminuye más la viscosidad que para las concentraciones altas especialmente para el harina con tamaño de partícula de 0.8 mm.

Para una concentración de 8% la reducción de viscosidad fue de 22.8% en comparación con 15.0% para la concentración de 6% en el harina con tamaño de partícula de 1.6 mm. Para la harina con tamaño de partícula de 0.8 mm la reducción en la viscosidad fue el doble para la concentración de 8%: 38.3% a 8% en comparación con 19.4% a 6%. El efecto combinado de la nuez molida y la

leche reduce la viscosidad de la papilla de maíz. Al 6% de concentración la leche por sí sola reduce la viscosidad de la papilla a 17.5%, la nuez molida por sí sola la redujo a 47.6% y la leche más la nuez molida a 56.7%. Al 8% de concentración la leche reduce la viscosidad a 34.4%, la nuez molida a 64.6% y la leche más la nuez molida a 63.0%. En promedio en las dos concentraciones la viscosidad de la papilla fue reducida a 26%, 56.1% y 64.9% por la adición de leche, nuez molida y leche más nuez molida, respectivamente.

- **Densidad energética de la papilla de maíz**

Sólo tres de los factores investigados por Kikafunda & Walter (1997); concentración, nuez molida y leche, tienen efecto sobre la densidad energética de la papilla. La densidad energética de la papilla de maíz aumenta al aumentar la concentración adicionándole nuez molida o leche.

Por ejemplo, una papilla preparada sólo con harina de maíz sin adicionarle nuez molida o leche tiene una densidad energética de 22.1 kcal (92.8 kJ) por 6 mL a 6% de concentración en comparación con la misma papilla al 8% la cual tiene una densidad energética de 29.4 kcal (123.5 kJ). Si se sustituye 25% peso del harina de maíz por nuez molida aumenta en igual grado la densidad energética para las concentraciones de 6 y 8% de la papilla y muy poco 11.3% y 11.6%, respectivamente, sustituyendo 10% del agua con leche (v/v) aumentará la densidad energética para las concentraciones de 6 y 8% de la papilla en 28.1 y 21.8% respectivamente. Añadiendo nuez molida y leche la densidad energética para las concentraciones 6 y 8% aumenta 39.4 y 33.3%, respectivamente. En promedio para las dos concentraciones, 6 y 8%, la densidad energética aumenta a 11.5, 25 y 36.4% para la nuez molida, la leche y la nuez molida más la leche, respectivamente.

Discusión

- **Viscosidad**

La viscosidad de los alimentos para niños recién destetados es una característica físico-química importante ya que no sólo influye en la calidad del alimento sino que también puede causar una insuficiente ingesta de densidad energética en el infante (Moshá & Svanberg, 1990).

El almidón de los cereales necesita estar bien gelatinizado para prevenir la indigestión y diarrea resultante del inadecuado cocimiento del almidón. Además, cuando la temperatura disminuye la viscosidad aumenta (Bourne, 1982).

La viscosidad de las papillas es reducida por la adición de una pequeña cantidad de nuez molida o leche. Los mecanismos por los cuales la nuez molida y la leche disminuyen la viscosidad de la papilla es probablemente por la cantidad de grasa que contienen; la grasa reduce la viscosidad de dos maneras formando complejos insolubles con los gránulos de almidón o formando una capa grasa alrededor de los gránulos de almidón (Collison, 1968). Ambos modos reducen la capacidad de absorción de agua de los granos de almidón durante los procesos de cocción de tal manera reducen la viscosidad. La nuez molida fue más efectiva en la reducción de la viscosidad que la leche debido a su mayor contenido de grasa, en promedio 10 veces más que el harina de maíz sola.

- **Densidad energética**

La adición de pequeñas cantidades de nuez molida o leche aumenta la densidad energética de la papilla de maíz. En total el aumento de la densidad de los nutrientes de la nuez molida es responsable del aumento del contenido energético de la papilla (Afolabi et al. 1988). Estos autores encontraron que el aporte nutricional de una mezcla 3:1 maíz y nuez molida fue mayor que el de una papilla sin complementos debido al mayor contenido de proteína y grasa. En un estudio comparativo entre granos de soya y nuez molida Fashakin & Ogunsola (1982) compararon mezclas 3:1 de maíz:soya y maíz:nuez molida y concluyeron que la mezcla maíz:soya tiene una calidad superior de proteína que la mezcla maíz:nuez

molida. En ese mismo estudio la adición de leche tiene mayor efecto sobre la densidad energética de las papillas que la adición de nuez molida.

- **Interrelaciones viscosidad-densidad energética**

La viscosidad o característica de consistencia de un alimento es crítica durante el destetado porque los niños están aprendiendo nuevas técnicas de alimentación cambiando de una dieta puramente líquida a una dieta de sólidos (Walker, 1990). Una papilla concentrada tiene mayor densidad energética que una papilla diluida, pero es más viscosa y los infantes tienen mayor dificultad para comerla (Mosha & Svanberg, 1983). Debido a esto las madres diluyen la papilla con agua para poder dársela al bebé con cuchara. Un niño de un año de edad puede obtener 264.6 kcal (1106.0 kJ) de energía de una papilla sin complementar comparada con 352.8 kcal (1474.7 kJ) de una papilla con adición de leche y cereales (Kikafunda et al. 1997). Asumiendo que los niños obtienen la mitad de sus necesidades energéticas de la leche materna, las papillas no complementadas aportan sólo el 55.7% de las necesidades energéticas del infante en comparación con las papillas complementadas que aportan el 74.3%.

En conclusión los resultados de trabajos previos muestran que es posible reducir la viscosidad y aumentar la densidad energética de papillas de maíz para destetados si ocurre una combinación adecuada de alimentos con propiedades y un control de condiciones de operación.

1.9 Hipótesis y objetivos

1.9.1 Hipótesis

Un menor tamaño de las partículas de harina, requiere una menor concentración de la misma para preparar papillas para niños que comienzan una dieta semisólida y favorece la disminución de su viscosidad sin que la densidad energética se vea alterada. Al mezclar harina de maíz nixtamalizado (HMN) con harina de maíz comercial (HCM) aumenta el aporte energético y se obtienen propiedades de flujo y viscoelásticas más cercanas a las de este tipo de alimentos.

1.9.2 Objetivo general

Evaluar la influencia de diferentes contenidos de sólidos sobre la densidad energética y las propiedades reológicas de papillas preparadas con harina de maíz nixtamalizado (HMN), harina de maíz nixtamalizado comercial (HCM) y mezclas de ambas en diferentes proporciones, para determinar las composiciones que permiten obtener papillas con adecuado aporte energético y propiedades viscoelásticas.

1.9.3 Objetivos particulares

Evaluar la influencia de diferentes contenidos de sólidos sobre la densidad energética, por medio de la determinación mediante análisis fisicoquímicos, de la composición de los componentes de las papillas para conocer la aportación energética de los diferentes contenidos de sólidos y las harinas.

Evaluar la influencia de diferentes contenidos de sólidos sobre las propiedades de flujo de cizalla angular y de cizalla oscilatoria de baja amplitud para obtener papillas con las características de flujo y viscoelasticidad adecuadas para este tipo de alimentos.

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Se utilizó harina de maíz nixtamalizado Maseca (HCM) con una humedad determinada experimentalmente de 10.5%, la cual se obtuvo en un comercio local y se almacenó de acuerdo con las recomendaciones del fabricante señaladas en el envase. Se obtuvo harina de maíz nixtamalizado (HMN) con una humedad determinada experimentalmente de 7.53% para la fracción de malla 60, usando como materia prima maíz blanco proveniente de la ciudad de Ixtepec Oaxaca, proporcionado por la Dra. Maria del Carmen Wachter Rodarte. El HMN fue almacenada en un lugar fresco y seco en un envase impermeable. La Figura 2.1 muestra el diagrama general de trabajo adoptado en esta tesis.

2.2 Obtención de la harina de maíz nixtamalizado

Para obtener el HMN se mezclaron 2.5 kg de maíz y 1% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en una relación volumen maíz:agua de 1:3. Se calentó a ebullición durante 65 minutos hasta observar el desprendimiento del pericarpio. Posteriormente se dejó en reposo 12 horas a temperatura ambiente. Se lavó el grano para remover el pericarpio, frotando el maíz con las manos. Se realizaron tantos lavados como fueron necesarios hasta que el pH del agua de lavado fue neutro. El grano se trituroó en húmedo con un molino de mano y se deshidrató en un secador convectivo APEX SSE 70 (APEX, Gravesend & Dartford Kent, USA) durante 5 horas a 40 °C. El harina seca se molió nuevamente en un molino (JK MF 10 Basic IKA Werke, IKA Works Inc. USA) para reducir aún más el tamaño de partícula. Se obtuvieron diversas fracciones tamizando el harina a través de las mallas 20 (0.710 mm), 40 (0.425 mm) y 60 (0.250 mm). Las fracciones fueron empacadas al vacío para ser utilizadas posteriormente en pequeñas porciones evitando su hidratación y el desarrollo de microorganismos.

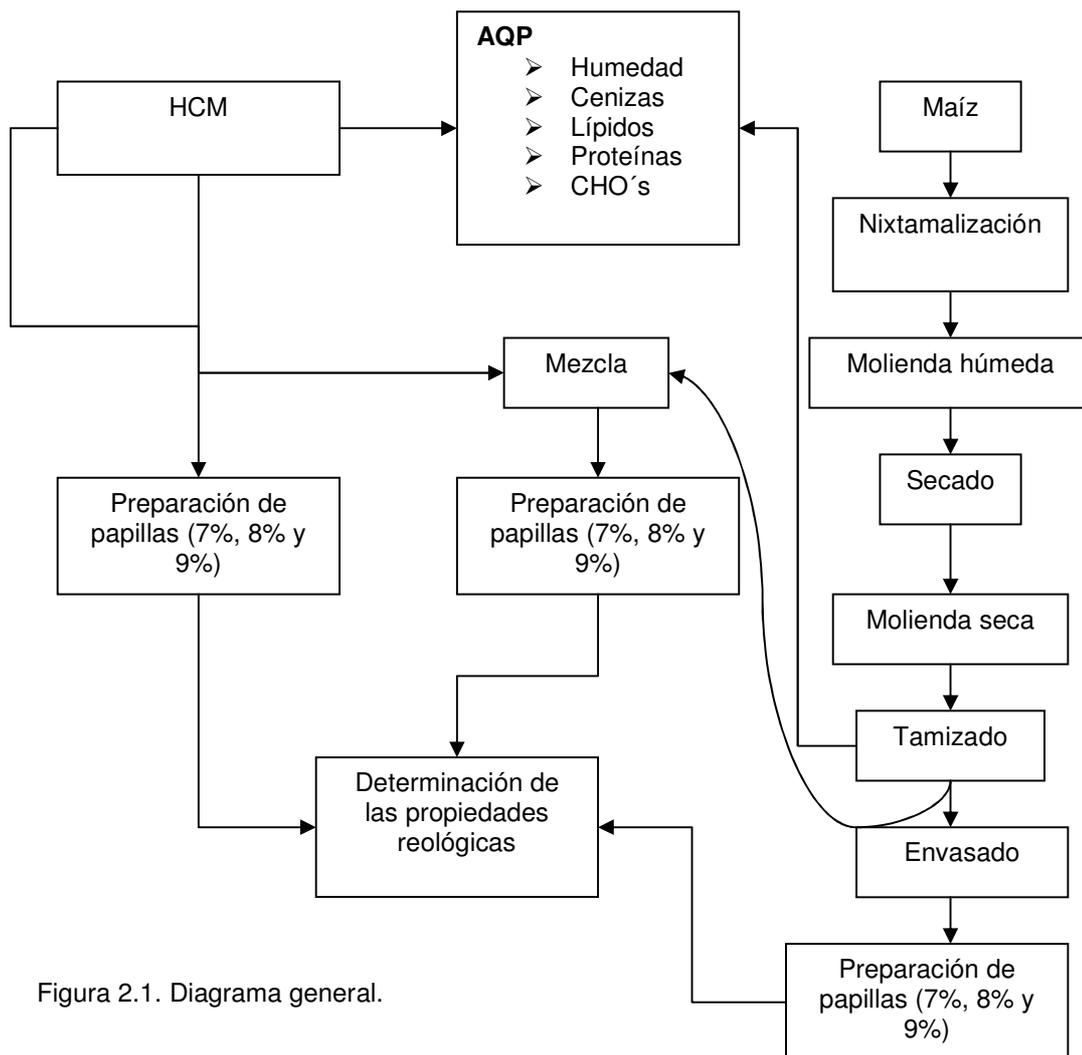


Figura 2.1. Diagrama general.

2.3 Preparación de las papillas

Las concentraciones totales de sólidos fueron 7, 8 y 9% base seca ya que fueron las mejores condiciones para preparar las papillas. Se prepararon tres tipos de papillas: 1) HCM, 2) HMN usando las fracciones de mallas 20, 40 y 60 y 3) HMN con HCM usando únicamente la fracción malla 60 de HMN. Se suspendió el harina en agua y se coció la suspensión en un recipiente de acero inoxidable, enchaquetado con una capacidad aproximada de 0.5 kg, provisto de agitación mecánica de diseño propio (Figura 2.2). Se pesó la cantidad apropiada de harina considerando su humedad y se adicionó la cantidad correspondiente de agua destilada. El calentamiento de las papillas se realizó gradualmente (1.5 °C/min) desde 25 °C hasta 90 °C agitando constantemente. Al llegar a 90 °C, esta

temperatura se mantuvo constante durante 10 min sin interrumpir la agitación y luego las papillas obtenidas se enfriaron (1.5 °C/min) hasta temperatura ambiente con agitación constante.



Figura 2.2. Tanque enchaquetado de acero inoxidable con agitación mecánica utilizado para preparar las papillas.

2.4 Determinaciones reológicas

Las propiedades reológicas se determinaron a 25 °C en un reómetro ARES RFS III (TA Instruments, USA) usando la geometría de placas paralelas de 25 mm de diámetro con una separación de 2 mm. Las pruebas de flujo circular no estacionario y estacionario incluyeron el examen del comportamiento dependiente del tiempo de la viscosidad y su variación con la velocidad de cizalla, respectivamente. Las no estacionarias, también denominadas “thixotropic loop” (TL), consistieron en la aplicación de dos ciclos consecutivos de ascenso y descenso de velocidad de cizalla con una duración de cuatro minutos por ciclo, seguidos de las estacionarias que consistieron únicamente en aumentar de manera logarítmica la velocidad de cizalla. Las pruebas de cizalla oscilatoria incluyeron la determinación de la viscoelasticidad lineal por medio de un barrido de deformación a una frecuencia constante de 6.28 rad/s. Una vez determinada esta zona, se hizo un barrido de frecuencia, a deformación constante, en el intervalo de 0.1 a 100 rad/s.

2.5 Análisis químico proximal

Los análisis proximales, para el cálculo de la densidad energética de cada harina se hicieron siguiendo procedimientos estándar (AOAC, 1990). La humedad se determinó por desecación en estufa (BG HCF-45, Aparatos de Laboratorio BG, México) a 100 °C. Se pesó una masa de 2 a 3 g de muestra en un pesafiltro con tapa, previamente pesado después de tenerlo a peso constante 2 h a 130 °C. Se secó la muestra en la estufa (BG HCF-45, Aparatos de Laboratorio BG, México) durante 2 h a 100 –110 °C. Se retiró de la estufa y se dejó enfriar en el desecador y se pesó tan pronto como se equilibró con la temperatura ambiente. Se repitió hasta obtener peso constante y se calculó el porcentaje de humedad, reportándolo como pérdida por secado a 100 - 110°C (Ver Anexo A).

Las cenizas se determinaron por calcinación en una mufla a 550 °C. Se puso a peso constante un crisol 2 h aproximadamente en la mufla a 600 °C. Se pesó una masa de 3 a 5 g de muestra en el crisol sin que la muestra sobrepasara la mitad del crisol previamente pesado. Se calcinó la muestra, primero con un mechero en la campana hasta que no hubo desprendimiento de humos y posteriormente se metió en la mufla 2 h cuidando de que la temperatura no fuese mayor de 550 °C. Se repitió la operación anterior hasta conseguir unas cenizas blancas o ligeramente grises, homogéneas. Se enfrió en desecador y se pesó. Se calculó el contenido de cenizas y se expresó en porcentaje (Ver Anexo A).

Los lípidos se determinaron por el método de Soxhlet el cual considera las características de solubilidad de la fracción lipídica presente en el sistema biológico objeto de estudio. La selección del disolvente adecuado depende de ello y de las características físicas de la muestra. La determinación es gravimétrica, es decir, se determina el peso de grasa en un peso de materia seca y se expresa el resultado por peso de materia fresca. Se colocó a peso constante un matraz bola de fondo plano con perlas o piedras de ebullición en la estufa a 100 °C, aproximadamente 2 h. Se pesó una masa de 4 a 5 g de muestra sobre un papel, se enrolló y se colocó en un cartucho de celulosa, se tapó con algodón sin apretar el algodón contra la muestra y se colocó el cartucho en el extractor. Se conectó el matraz al extractor, en el que se introdujo previamente el cartucho con la muestra,

y posteriormente se conectó éste al refrigerante sin engrasar las juntas. Se agregaron dos cargas de disolvente, éter etílico, por el refrigerante y se calentó el matraz con parrilla a ebullición suave. Para verificar que la extracción de toda la grasa, se dejó caer una gota de la descarga sobre papel filtro, al evaporarse el disolvente no debe dejar residuo de grasa.

Una vez extraída toda la grasa, se quitó el cartucho con la muestra desengrasada, y se siguió calentando hasta la casi total eliminación del disolvente, recuperándolo antes de que se descargue. Se retiró el matraz y se secó el extracto en la estufa (BG HCF-45, Aparatos de Laboratorio BG, México) a 100 °C por 30 min, se enfrió y pesó. Se calculó el contenido de grasa y se expresó como porcentaje (Ver Anexo A).

La proteína se determinó a partir de la cantidad de nitrógeno total por el método de Kjeldhal el cual se basa en la destrucción de la materia orgánica con ácido sulfúrico concentrado, formándose sulfato de amonio que en exceso de hidróxido de sodio libera amoníaco, el que se destila recibiendo en:

- a) Ácido sulfúrico donde se forma sulfato de amonio y el exceso de ácido es valorado con hidróxido de sodio en presencia de rojo de metilo, o
- b) Ácido bórico formándose borato de amonio el que se valora con ácido clorhídrico.

Se pesó una masa de 0.1 a 0.2 g de muestra y se introdujo en un tubo de Kjeldahl. Se agregó 0.15 g de sulfato de cobre pentahidratado, 2.5 g de sulfato de potasio o sulfato de sodio y 10 ml de ácido sulfúrico concentrado. Se encendió el aparato y se precalentó a 360 °C. Se colocaron los tubos en el portatubos del equipo Kjeldahl y se colocó en el bloque de calentamiento. Se colocó la unidad de evacuación de gases con las juntas colocadas sobre los tubos de digestión. Se accionó la trampa de succión de gases antes de que se produjeran estos. Se calentó hasta total destrucción de la materia orgánica, es decir, hasta que el líquido quedó transparente, con una coloración azul verdosa.

Una vez finalizada la digestión, sin retirar la unidad de evacuación de gases, se colgó el portatubos para enfriar. Después del enfriamiento, se completó la digestión con la tecla "stop" y se desconectó la trampa. En un matraz Erlenmeyer

de 250 mL se adicionaron 50 mL de HCl 0.1 N y unas gotas de indicador rojo de metilo 1% o bien 50 mL de ácido bórico 4% con indicadores (fenolftaleina 0.035 mg, rojo de metilo 6.6 mg, verde de bromocresol 3.3 mg). Se conectó el aparato de destilación y se esperaron unos instantes para que se generara vapor. Se colocó el tubo de digestión con la muestra diluida y las sales disueltas en un volumen no mayor de 10 mL de agua destilada, en el aparato de destilación cuidando de introducir la alargadera hasta el fondo de la disolución. Se presionó el botón blanco para adicionar sosa al 36%, hasta 40 mL aproximadamente. Se colocó la palanca de vapor en posición "ON" hasta alcanzar un volumen de destilado en el matraz Erlenmeyer de 100 a 150 mL, se lavó la alargadera con agua destilada, se recogió el agua de lavado sobre el destilado. Una vez finalizada la destilación, se regresó la palanca de vapor a la posición original.

Se tituló el exceso de ácido (en el caso de recibir el destilado en HCl 0.1N) con una disolución de NaOH 0.1 N. En el caso de recibir con ácido bórico, con una disolución de HCl 0.1N. Se calculó la cantidad de proteína como porcentaje considerando las reacciones que se llevan a cabo (Ver Anexo A).

Los hidratos de carbono se determinaron por diferencia (Ver Anexo A).

La densidad energética se obtuvo empleando las fórmulas y factores siguientes:

$$\begin{array}{ll}
 100 \text{ g de muestra} & \text{-----} \text{ g Grasa} & & 1 \text{g Grasa} & \text{-----} & 9 \text{ kcal} \\
 x \text{ g de muestra} & \text{-----} & x \text{ g Grasa} & x \text{ g grasa} & \text{-----} & x \text{ kcal}
 \end{array}$$

Lípidos = 9 kcal/g (Bender, 1994).

$$\begin{array}{ll}
 100 \text{ g de muestra} & \text{----} \text{ g Proteína} & & 1 \text{g de Proteína} & \text{---} & 4 \text{ kcal} \\
 x \text{ g de muestra} & \text{-----} & x \text{ g Proteína} & x \text{ g Proteína} & \text{-----} & x \text{ kcal}
 \end{array}$$

Proteína = 4 kcal/g (Bender, 1994).

$$\begin{array}{ll}
 100 \text{ g de muestra} & \text{-----} \text{ g Hidratos de carbono} \\
 x \text{ g de muestra} & \text{-----} & x \text{ g Hidratos de carbono}
 \end{array}$$

1 g de Hidratos de carbono --- 4 kcal

x g de hidratos de carbono --- x kcal

Hidratos de carbono = 4 kcal/g (Bender, 1994).

Densidad energética = x kcal de grasa + x kcal de proteína + x kcal de hidratos de carbono (Ver Anexo B).

2.6 Análisis estadístico

Se hizo un análisis de varianza (ANOVA) para cada concentración 7, 8 y 9% de sólidos totales con el programa Excel de Windows. Los resultados se incluyen en el Anexo C. El análisis estadístico de las harinas por separado incluyó la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (C.V.) para cada componente de las harinas. Los resultados se muestran en el Anexo A.

CAPITULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Composición proximal

El análisis químico proximal de HCM y HMN se muestra en los Cuadros 3.1 y 3.2. El HCM tuvo una gran proporción (82%) de hidratos de carbono, seguida de proteínas (11%) y lípidos (6%). Estos componentes son los principales responsables del contenido energético y por lo tanto la cantidad en la que están presentes es importante. El HMN se tamizó y cada fracción fue analizada. Aunque el contenido de hidratos de carbono, proteína y lípidos fue similar al del HCM, existieron algunas diferencias entre las fracciones. La fracción de malla 60 mostró el mayor contenido de lípidos y proteínas y el menor contenido de hidratos de carbono que las fracciones de malla 40 y 20. Por otro lado, el contenido de lípidos de las fracciones de HMN fue superior al del HCM, siendo la fracción de malla 60 la que mostró las diferencias más notables. No obstante, el contenido de proteína del HCM fue ligeramente superior al de la fracción de la malla 60 y notablemente superior al de las otras dos fracciones. En el Anexo A se muestra el análisis estadístico de los datos de los Cuadros 3.1 y 3.2. En el Anexo B se muestra la contribución de aporte energético de los principales componentes.

Cuadro 3.1. Composición base seca del HCM.

Componente	Método	Composición (%)
Materia seca	Estufa 100 °C	89.5
Cenizas	Mufla 550 °C	1.45
Lípidos	Soxhlet	6.00
Proteínas	Kjeldahl	11.0
Hidratos de carbono	Diferencia	81.5

Cuadro 3.2. Composición base seca de las fracciones de HMN.

Malla	Materia seca	Lípidos	Hidratos de carbono totales	Proteína	Cenizas
20	91.6	6.29	84.7	6.03	2.4
40	90.3	9.06	82.1	6.1	1.7
60	92.5	12.1	76.4	9.4	2.1

3.2 Densidad energética

Las densidades energéticas (kJ/100 g de papilla) de las papillas preparadas con HCM y HMN se muestran en los Cuadros 3.3 y 3.4, respectivamente.

Cuadro 3.3. Densidades energéticas (kJ/100 g de papilla) de las papillas elaboradas con HCM.

Proporción de sólidos (%)	kJ /100 g
7	138.7
8	158.8
9	178.5

Cuadro 3.4. Densidades energéticas (kJ/100 g de papilla) de las papillas elaboradas con HMN.

Malla/Concentración de sólidos (%)	7	8	9
20	133.7	153.3	172.4
40	141.1	161.1	179.1
60	125.8	146.7	167.6

La leche materna tiene una densidad energética aproximada de 300 kJ/100 g (Lorri & Svanberg, 1993) y fue una referencia para mejorar las propiedades nutrimentales y energéticas de los alimentos de complemento investigados en este trabajo. Ninguna de las papillas preparadas con los dos tipos de harina tuvo la densidad energética de la leche materna ya que como máximo su valor fue 50 o

60% el de la leche. El Cuadro 3.5 muestra las densidades energéticas de papillas preparadas con mezclas de ambas harinas en diferentes proporciones.

Cuadro 3.5. Densidades energéticas (kJ/100 g de papilla) de las papillas elaboradas con HMN y HCM.

Proporción/Concentración de sólidos (%)	7	8	9
HMN	125.8	146.7	167.6
10HCM-90HMN	142.7	163.1	183.5
20HCM-80HMN	142.3	162.6	182.9
40HCM-60HMN	141.4	161.7	181.9
50HCM-50HMN	141.0	161.2	181.3
60HCM-40HMN	140.6	160.7	180.7
80HCM-20HMN	139.7	159.7	179.6
90HCM-10HMN	139.3	159.2	179.1
HCM	138.7	158.8	178.5

El aumento en la concentración de sólidos produjo mayores densidades energéticas tanto en las papillas preparadas con HMN, HCM y sus mezclas. Las densidades energéticas de todas las mezclas de ambas harinas fueron mayores que las de las harinas separadas. Pero sin igualar la densidad energética de la leche materna (300 kJ/100 g). Las mezclas con 90% de HMN, mostraron la mayor densidad energética. Al disminuir la proporción de HMN en las mezclas su densidad energética disminuyó.

3.3 Caracterización reológica de las papillas preparadas con HCM

3.3.1 Pruebas de cizalla no estacionaria oscilatoria

La Figura 3.1 muestra que G' fue mayor que G'' sobre todo el intervalo de frecuencias para las tres concentraciones de sólidos y G'' aumentó más rápidamente que G' con el incremento de la frecuencia. Esto indica que el

comportamiento de las papillas fue más elástico que viscoso, pero a pesar de ello fluyeron bajo el efecto de la velocidad de cizalla oscilatoria. Las papillas con una concentración de sólidos de 9% mostraron los módulos más grandes y una disminución en el contenido de sólidos produjo papillas con módulos menores. Entonces, el aumento en el contenido de sólidos tuvo un mayor efecto sobre el valor de los módulos que sobre su dependencia con la frecuencia. Esto se explica porque al concentrar la suspensión aumenta la fracción volumen de sólidos en suspensión. La escasa dependencia de los módulos con la frecuencia, sin llegar a ser la que se observa en geles autosoportables, se puede deber a la gelificación de amilosa una vez que la papilla ha sido enfriada una vez cocida y preparada. Sin embargo, el aumento en la concentración de sólidos tuvo mayor efecto en los módulos. Por lo tanto el comportamiento de las papillas es característico de suspensiones concentradas de sólidos rodeadas por un gel de amilosa que se encuentra en la fase acuosa.

En general, las disoluciones de biopolímeros se caracterizan por la presencia, a una frecuencia de oscilación dada, de un punto en el cual $G' = G''$ (i.e. $\tan \delta = 1$). Este punto divide la dependencia de los módulos con la frecuencia en dos regiones: (1) La zona terminal, que ocurre antes de que $G' = G''$, donde las disoluciones fluyen como líquidos de viscosidad alta con $G'' \propto \omega$ y usualmente mayor que G' . Aquí el comportamiento es controlado por el movimiento translacional de las macromoléculas, (2) La zona de "plateau" o meseta, que ocurre más allá del punto donde $G' = G''$, donde los sistemas despliegan su carácter elástico con G' mayor que G'' y ambos prácticamente independientes de la frecuencia. En el lado de la zona terminal, cerca del punto donde $G' = G''$, G' se incrementa debido a una distorsión macromolecular y se aproxima a G'' . En la zona de "plateau", cerca del mismo punto pero en la región de las altas frecuencias, el tiempo del período de oscilación es lo suficiente bajo para prevenir que se deshaga el entrecruzamiento físico y G' predomine sobre G'' mostrando un pequeño cambio con la frecuencia (Tecante, 2005).

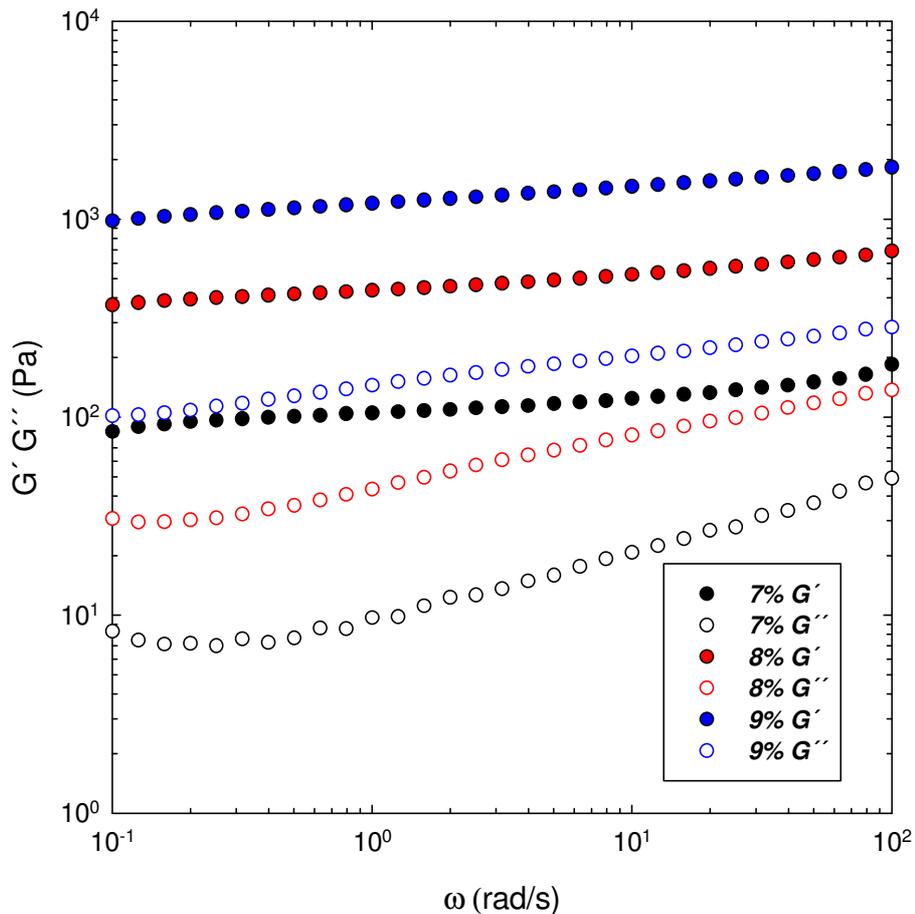


Figura 3.1. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de papillas con diferente concentración de sólidos de HCM.

3.3.2 Pruebas de cizalla estacionaria circular

En la Figura 3.2 se observa el comportamiento de las papillas antes y después de la prueba de cizalla no estacionaria circular o “thixotropic loop” (TL). Esta prueba consistió en someter la papilla a dos ciclos consecutivos de ascenso y descenso de velocidad de cizalla con una duración de cuatro minutos cada uno. Después de estos ciclos las papillas fueron sometidas a una prueba de cizalla estacionaria circular. Antes de la prueba TL se observó un comportamiento no newtoniano de adelgazamiento por cizalla, independientemente de la concentración de sólidos usada, en el cual la viscosidad aparente disminuyó con el aumento de la velocidad de cizalla. Los valores de viscosidad aparente y su cambio con la velocidad de cizalla fueron prácticamente iguales para las papillas con 7 y 8% de sólidos,

mientras que las papillas con 9% de sólidos tuvieron viscosidades diez veces mayores sobre todo el intervalo de velocidad de cizalla.

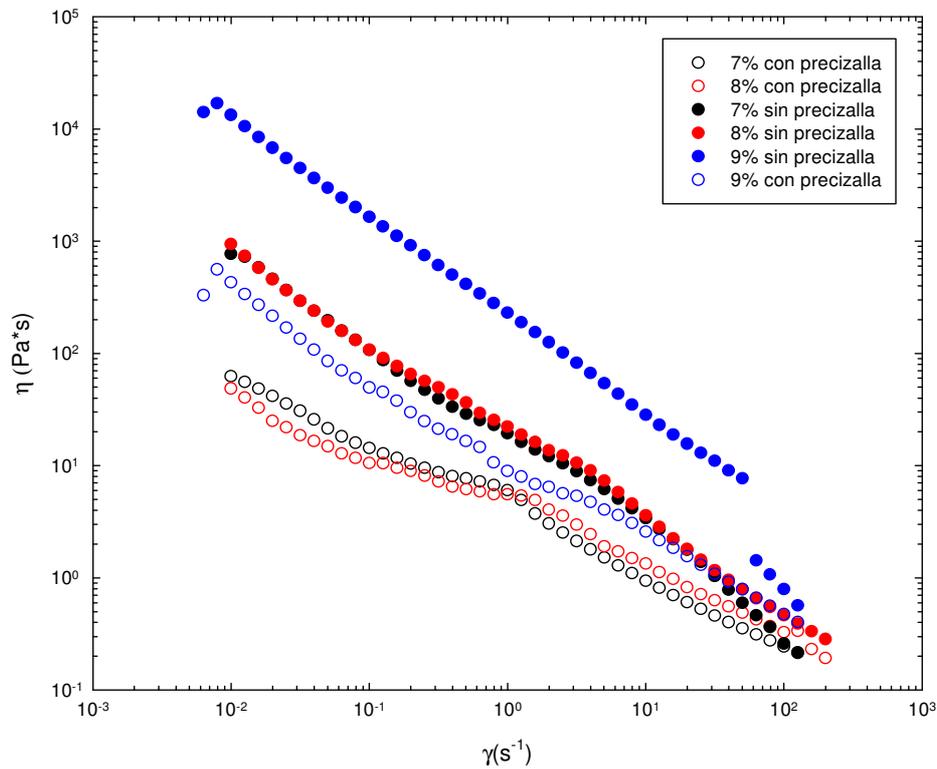


Figura 3.2. Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de las papillas preparadas con diferentes concentraciones de HCM antes y después de someterlas a dos ciclos de ascenso y descenso de velocidad de cizalla.

El adelgazamiento por cizalla de las papillas después de la prueba TL fue similar al que mostraron antes de dicha prueba. Sin embargo, sus viscosidades fueron diez veces menores para las correspondientes concentraciones de sólidos. Esto significa que la cizalla en dos ciclos afectó la viscosidad de las papillas, pero no su comportamiento de flujo. Esto muestra que la viscosidad de la papilla puede disminuir si ésta se somete a un esfuerzo mecánico. Esto sería de gran ayuda ya que se podrían preparar papillas con mayor concentración de sólidos y por ende con mayor densidad energética, pero con una menor viscosidad dado que podrían

ser sometidas a una cizalla previa antes de ser consumidas, lo cual sería más conveniente sensorialmente para el infante.

3.3.3 Pruebas de cizalla no estacionaria circular

En la Figura 3.3 se muestra la variación del esfuerzo de cizalla con la velocidad de cizalla durante la prueba TL de papillas preparadas con diferente concentración de HCM. En ambos ciclos los esfuerzos durante el ascenso fueron superiores que durante el descenso mostrando lo que se conoce como histéresis. Tanto la superioridad del esfuerzo en el ascenso como la histéresis indican una dependencia de la viscosidad con el tiempo (Steffe, 1996) atribuible a un comportamiento tixotrópico. El grado de histéresis fue notable en todas las papillas y más intenso para mayores concentraciones de sólidos. De hecho, en el ascenso ocurrió un sobreesfuerzo (stress overshoot) después del cual el esfuerzo disminuyó hasta un valor prácticamente estacionario. En el segundo ciclo la histéresis disminuyó considerablemente y para las concentraciones de 7 y 8% de sólidos prácticamente desapareció.

Este comportamiento muestra que las papillas son suspensiones en las cuales las partículas sólidas pueden acomodarse en la dirección del flujo de tal manera que la histéresis del primer ciclo sirve para acomodarlas u orientarlas y una vez que alcanzan esta condición una cizalla posterior ya no tiene mayor efecto sobre su acomodo. Es posible incluso que durante el primer ciclo las partículas se rebasen unas con otras a lo largo de una misma línea de cizalla circular e incluso que intercambien posiciones sobre diferentes líneas concéntricas de cizalla circular tanto hacia el interior como hacia el exterior de la posición radial. No obstante, logran acomodarse de tal modo que en el segundo ciclo estos movimientos ya no ocurren o son mínimos o aun imperceptibles si las partículas involucradas son lo suficientemente pequeñas. Otro efecto que puede contribuir es la destrucción del gel de amilosa que pudiera haberse formado al enfriar la papilla. Tal destrucción explicaría también el aumento inicial del esfuerzo y su máximo para una velocidad de cizalla dada. Además, cabe mencionar que para las concentraciones de 8 y 9% se observaron ligeras inflexiones en la curva de viscosidad (Fig. 3.2) los cuales

podrían ser debidas al tamaño no homogéneo de las partículas o incluso a la formación de aglomerados en la papilla los cuales serían desintegrados más allá de una cierta velocidad de cizalla.

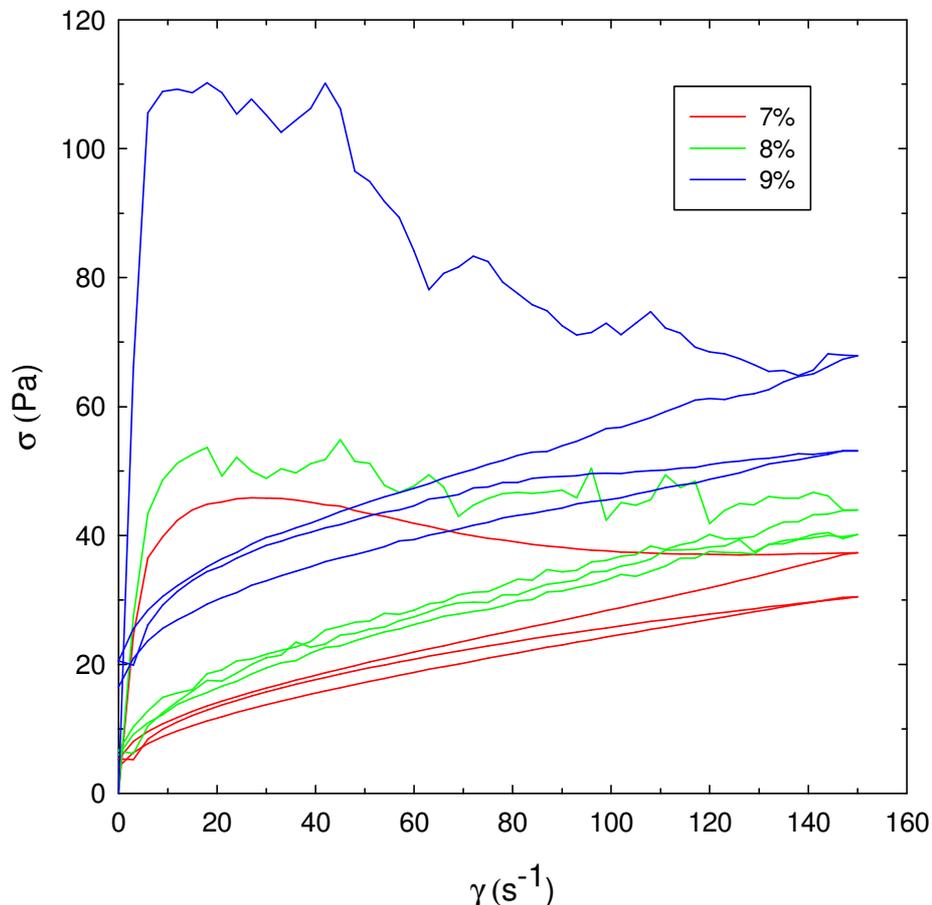


Figura 3.3. Ciclos de ascenso y descenso de papillas preparadas con diferentes concentraciones de HCM.

3.4 Caracterización reológica de papillas preparadas HMN

3.4.1 Pruebas de cizalla no estacionaria oscilatoria

La Figura 3.4 muestra el comportamiento viscoelástico de las papillas preparadas con HMN. Su comportamiento siguió la misma tendencia que el de las papillas preparadas con HCM. El módulo G' fue superior a G'' sobre todo el intervalo de frecuencias y este último fue más dependiente de la frecuencia. Las observaciones hechas para el comportamiento de las papillas de HCM se aplican igualmente al comportamiento de estas papillas. Vale la pena mencionar que el

comportamiento de los módulos G' y G'' de esta papillas prácticamente no presentó diferencia significativa ($P < 0.05$) con el de las papillas preparadas con las fracciones de malla 20 y 40. Por esa razón sólo se muestran los resultados para la malla 60. Es posible afirmar que el tamaño de partícula no afectó el comportamiento viscoelástico de las papillas.

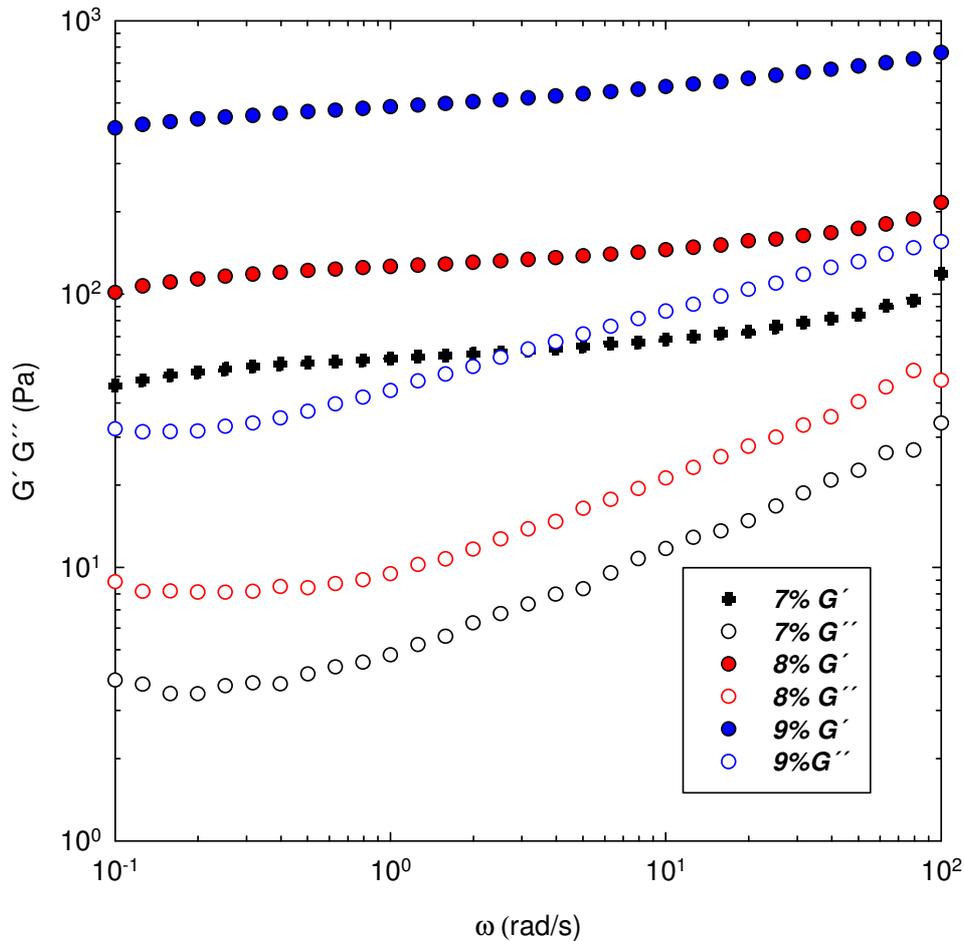


Figura 3.4 Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de papillas con diferente concentración de sólidos de HMN.

3.4.2 Pruebas de cizalla estacionaria circular

La Figura 3.5 muestra el comportamiento de las papillas antes y después de la prueba TL. Antes de esta prueba se observó un comportamiento no newtoniano de adelgazamiento por cizalla, en el cual independientemente de la concentración de sólidos, la viscosidad aparente disminuyó con el aumento de la velocidad de

cizalla como sucedió con las papillas de HCM, solo que aquí se observó más claramente la diferencia entre las papillas preparadas con 7 y 8% de sólidos.

El comportamiento de las papillas después de la prueba TL fue muy parecido al mostrado por las papillas elaboradas con HCM, es decir, la viscosidad aparente también disminuyó diez veces (un ciclo logarítmico). Al igual que sucedió con las pruebas de cizalla oscilatoria, no hubo diferencia significativa entre el comportamiento de las papillas preparadas con diferentes fracciones de mallas 20, 40 y 60. Por ello, sólo se presentan los resultados para la malla 60.

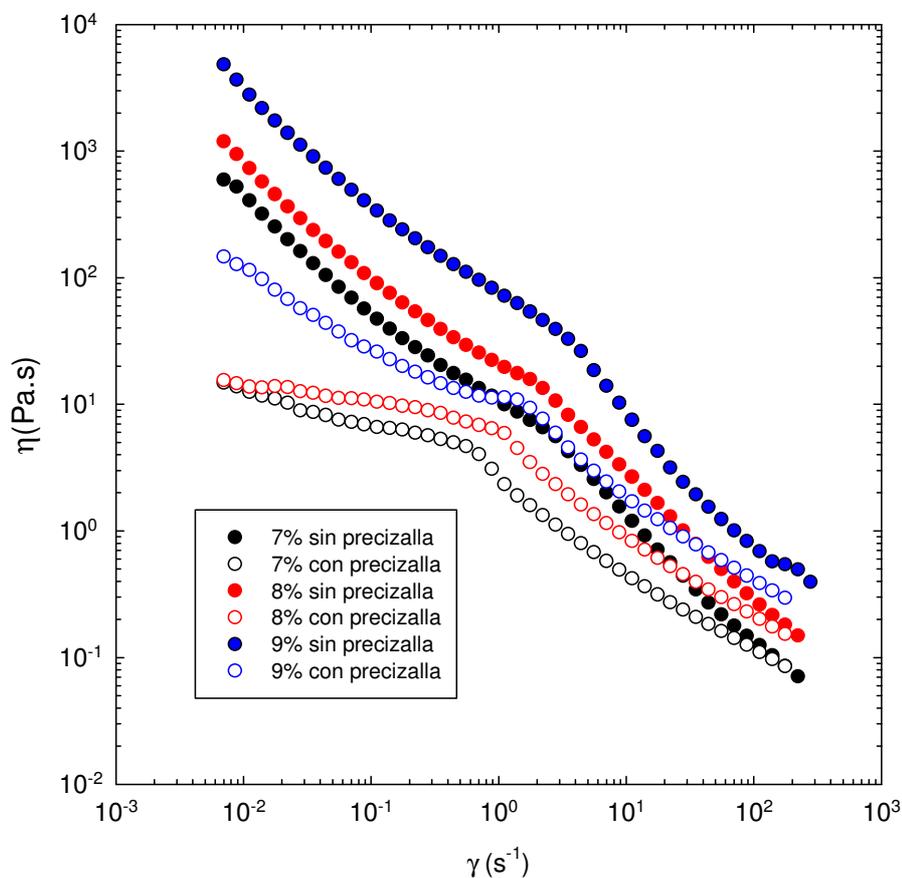


Figura 3.5. Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de las papillas preparadas con diferentes concentraciones de HMN antes y después de someterlas a dos ciclos de ascenso y descenso de velocidad de cizalla.

3.4.3 Pruebas de cizalla no estacionaria circular

En la Figura 3.6. Se muestran los datos de la prueba TL para las papillas de HMN. Al igual que en las papillas de HCM, en el primer ciclo las tres papillas mostraron

una histéresis muy marcada al inicio y casi nula en el segundo ciclo. Sin embargo, la variación del esfuerzo fue más suave y con menos “picos” que para las papillas de HCM (Fig. 3.3). Esto puede deberse a que el HMN podría tener un menor contenido de almidón y por lo tanto se formarían menos grumos. Solo para la concentración de 9% se observó un sobreesfuerzo muy pronunciado incluso de mayor magnitud que para las papillas de HCM.

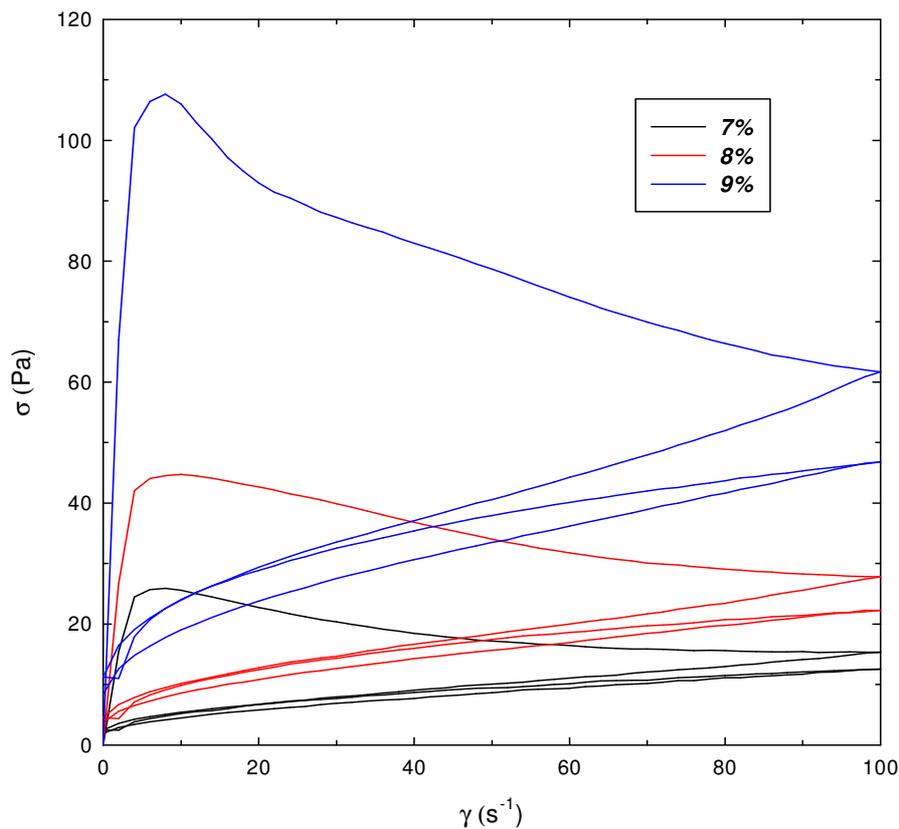


Figura 3.6. Ciclos de ascenso y descenso de papillas preparadas con diferentes concentraciones de HMN.

3.5 Caracterización reológica de papillas preparadas con mezclas de HCM y HMN

3.5.1 Pruebas de cizalla no estacionaria

La Figura 3.7 muestra el comportamiento viscoelástico de las papillas con 7% de sólidos. La dependencia de los módulos dinámicos de las mezclas fue similar al comportamiento de las papillas preparadas con HCM y HMN (Fig. 3.7a); G' fue mayor que G'' y este último mostró una mayor dependencia con la frecuencia.

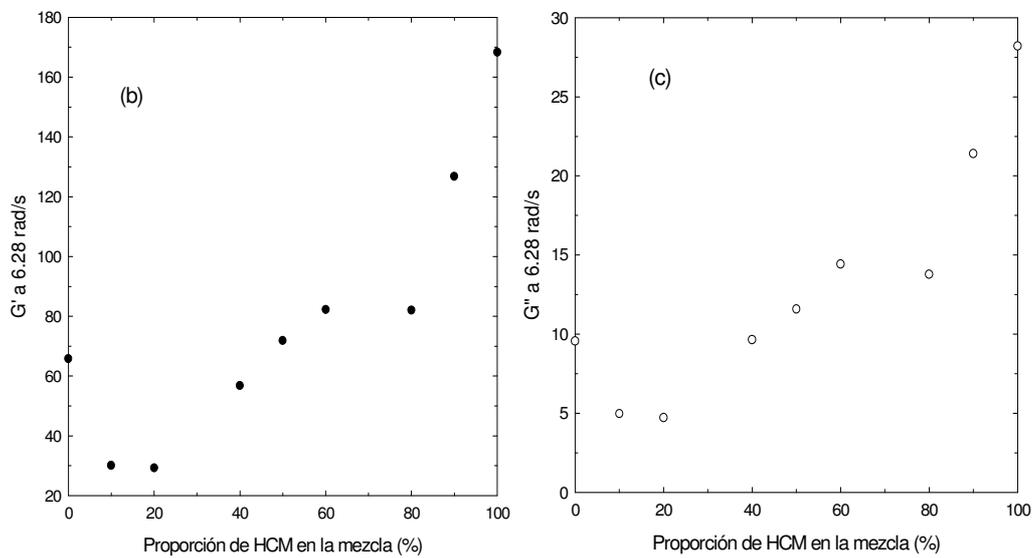
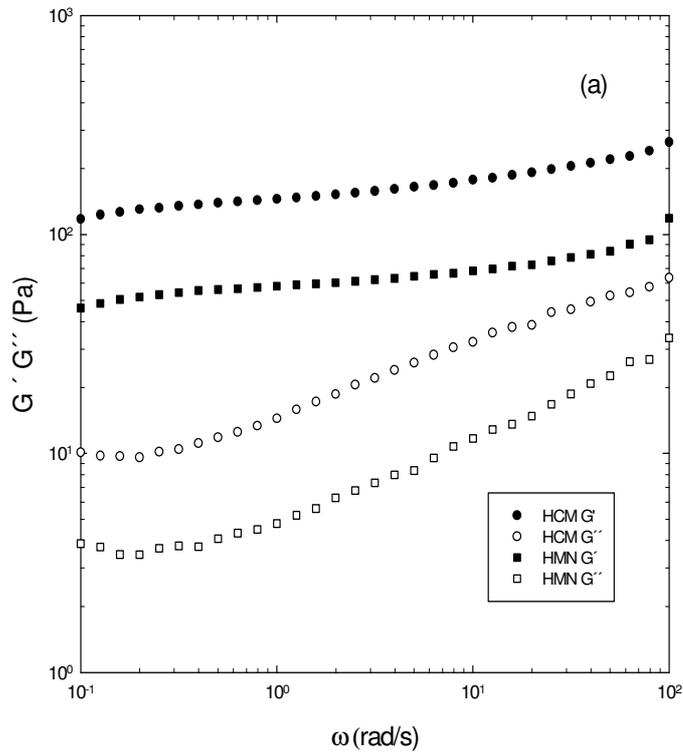


Figura 3.7. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de papillas con 7% de sólidos totales (a), y dependencia de G' (b) y G'' (c), a 6.28 rad/s, con la proporción de HCM en la mezcla (%).

Sin embargo, aunque la tendencia con la frecuencia fue similar, los módulos dinámicos dependieron de la proporción de HCM en las mezclas según se ilustra en las Figuras 3.7b y 3.7c. Para mostrar este efecto, se tomaron los módulos G' y G'' a 6.28 rad/s, pero el comportamiento es similar a menores y mayores frecuencias, lo único que cambia son los valores de los módulos dinámicos.

En las mezclas con 10, 20 y 40% de HCM, G' fue menor que el módulo de almacenamiento de la papilla con HMN sin agregar HCM. Las dos primeras proporciones también mostraron menores módulos de pérdida que la papilla con HMN solamente, pero para 40% de HCM el módulo de pérdida fue igual al de la papilla HMN sola. Esto significa que cuando parte del HCM se reemplaza por HMN se producen papillas menos viscoelásticas que la papilla que contiene sólo HCM. Por lo tanto se puede mantener el aporte energético sin aumentar la viscoelasticidad del material. Proporciones de HCM superiores de 40% hacen que se incrementen los módulos dinámicos hasta que finalmente se alcanza su máximo valor para las papillas con HCM sola.

En la Figura 3.8 se muestra el comportamiento viscoelástico de las papillas con 8% de sólidos. El comportamiento de los módulos dinámicos con la frecuencia fue similar al de las papillas con 7% aunque con valores 4 a 5 veces mayores (Fig. 3.8a). Asimismo, G' y G'' a 6.28 rad/s para las papillas con 10 y 20% de HCM fueron aproximadamente 1.5 veces menores que para la papilla con HMN solamente (Figs. 3.8b y 3.8c). Esto contrasta con las papillas con 7% de sólidos totales, en las cuales los módulos dinámicos de las papillas con 10 y 20% de HCM fueron dos veces menores que aquellos de la papilla con HMN solamente. Por arriba de 40% de HCM los módulos de las papillas aumentaron, pero a 8% también se observaron módulos constantes para 60 y 80% de HCM como en el caso de las papillas con 7% de sólidos totales.

La Figura 3.9 muestra el comportamiento viscoelástico de las papillas con 9% de sólidos totales. Estas papillas tuvieron un comportamiento cada vez más cercano al de un sólido elástico con módulos 4 a 5 veces mayores que las papillas con 8% de sólidos.

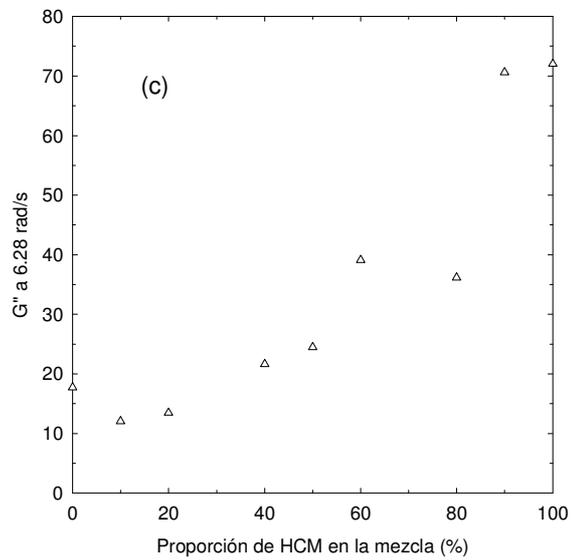
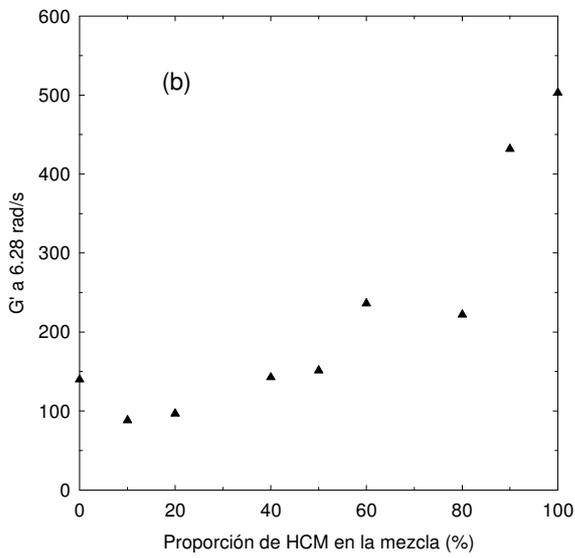
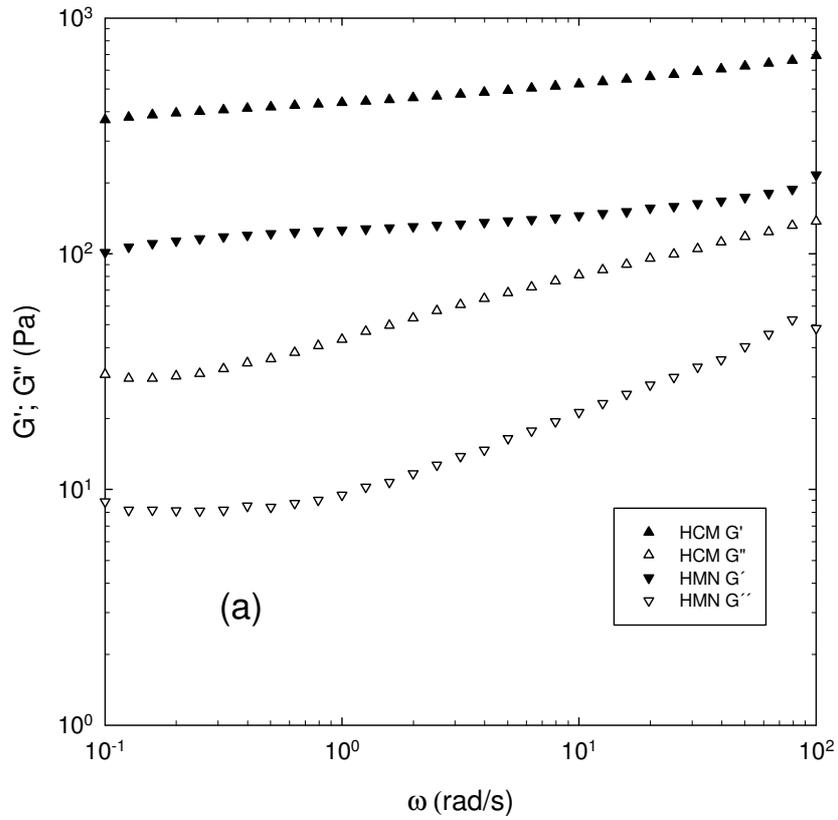


Figura 3.8. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de papillas con 8% de sólidos totales (a) y dependencia de G' (b) y G'' (c), a 6.28 rad/s, con la proporción de HCM en la mezcla (%)

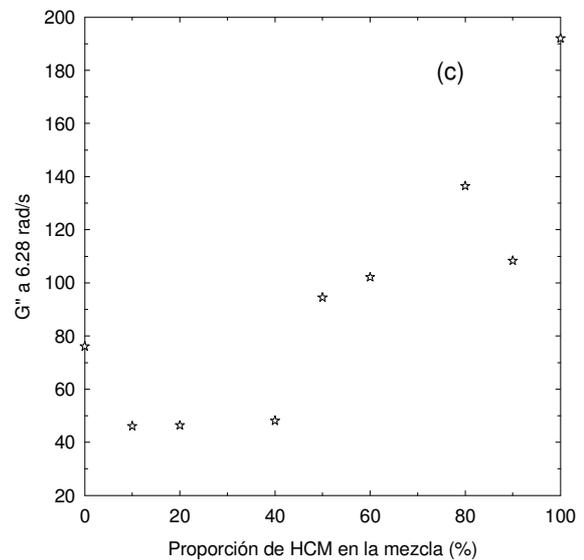
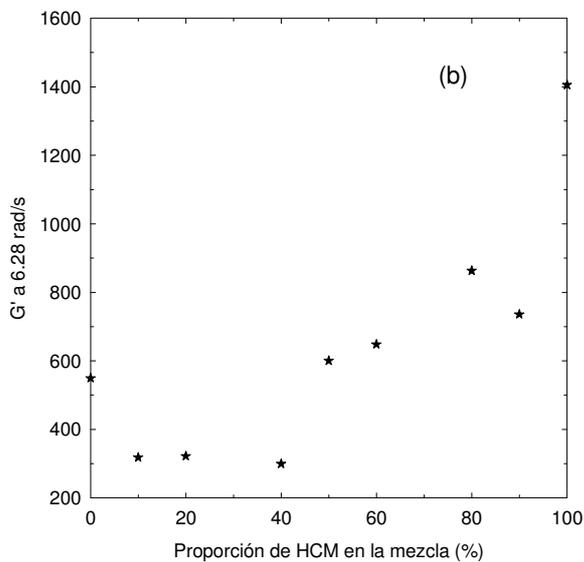
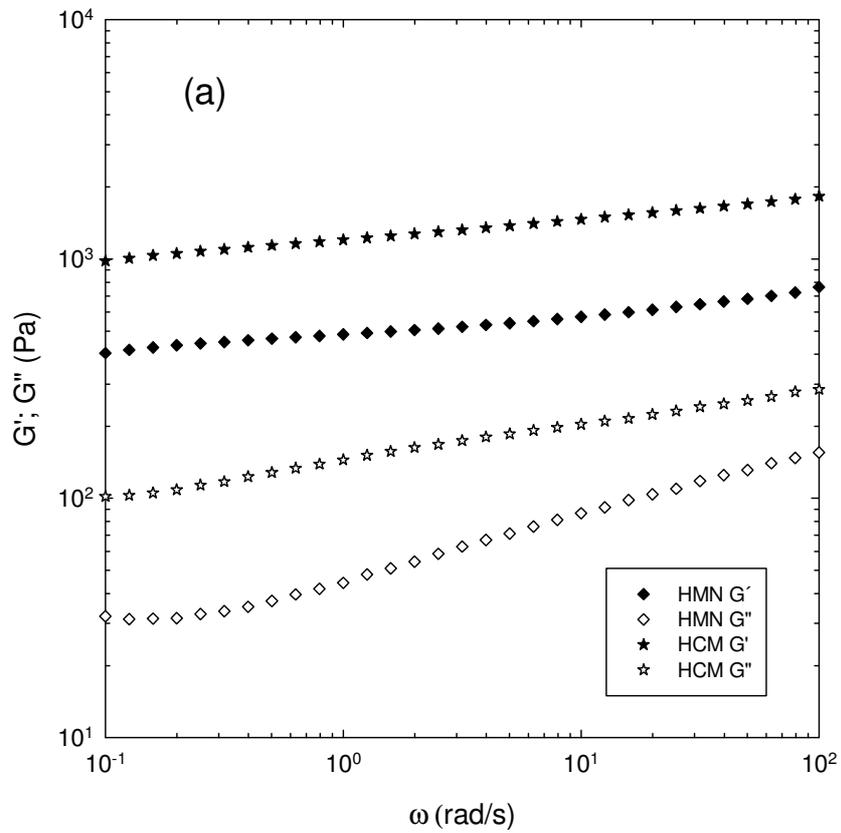


Figura 3.9. Variación de los módulos dinámicos con la frecuencia de papillas con 9% de sólidos totales (a) y dependencia de G' (b) y G'' (c), a 6.28 rad/s, con la proporción de HCM en la mezcla (%)

Al igual que en las papillas con 7 y 8% de sólidos totales, las mezclas con 10, 20 e incluso 40% mostraron módulos dinámicos menores que las papillas preparadas sólo con HMN. Por arriba de 40% los módulos aumentaron mostrando nuevamente un comportamiento singular entre 60 y 80% de HCM en la mezcla.

La Figura 3.10 muestra la dependencia con la frecuencia de la tangente del ángulo de desfase ($\tan \delta$) para las papillas con 7, 8 y 9% de sólidos así como para dos proporciones extremas de las mezclas; 10-90 y 90-10. A bajas frecuencias (< 1 rad/s) $\tan \delta$ fue menor de 0.10 y mayor de 0.05, lo que significa un intervalo de ángulos de desfase de 3 a 6 grados. Este comportamiento indica un alto carácter sólido a bajas frecuencias. Para frecuencias mayores de 1 rad/s, $\tan \delta$ aumentó continuamente pero en ningún caso fue superior de 0.4, es decir 22 grados. Esto indica un mayor carácter viscoso para frecuencias intermedias y altas. Si se considera que el inverso de la frecuencia es el tiempo, entonces, las papillas fluyeron para tiempos cortos y dejaron de hacerlo para tiempos largos. Este comportamiento es característico de suspensiones concentradas de almidón (Tecante & Doublier, 1999). En el caso de las papillas, los sólidos en suspensión contribuyen a este comportamiento, pero la gelificación de amilosa en la fase continua también contribuye al carácter sólido.

Las papillas con 7% de sólidos con los componentes individuales y las mezclas en las diferentes proporciones examinadas, mostraron el mismo carácter viscoelástico como se observa en la parte superior de la Fig. 3.10. Al aumentar la concentración de sólidos hasta 8 y 9% las papillas con HCM sola mostraron una menor dependencia de $\tan \delta$ con la frecuencia. Este comportamiento fue muy similar al de las papillas con la mayor proporción de HCM (90-10). Un caso particular lo constituye la papilla 90-10 con 9% de sólidos (parte baja de la Fig. 3.10). La $\tan \delta$ de esta papilla mostró una considerable dispersión, pero a pesar de ello puede apreciarse una tendencia hacia una menor dependencia con la frecuencia. Esta tendencia puede explicarse por el aumento de la concentración de sólidos, mientras que la dispersión podría deberse a destrucción durante la oscilación del gel de amilosa en la fase continua.

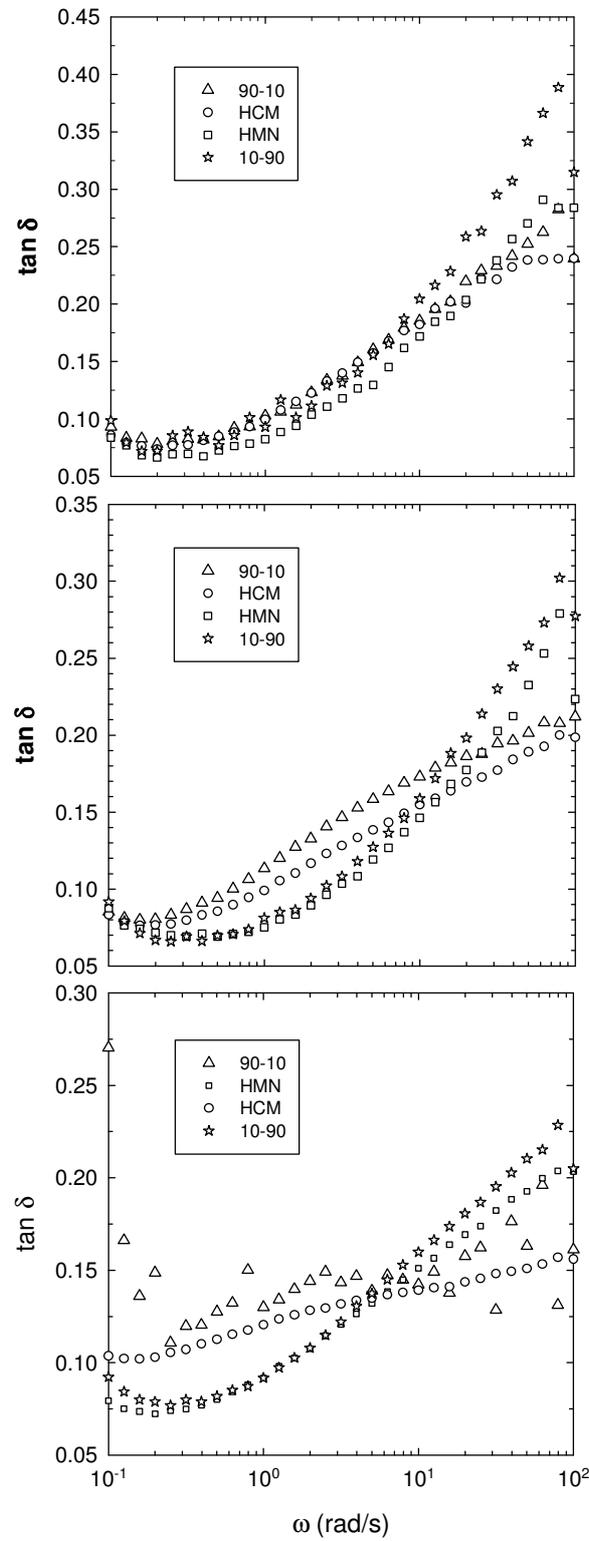


Figura 3.10. Variación de la $\tan \delta$ con la frecuencia de papillas con 7 (arriba), 8 (centro) y 9% (abajo) de sólidos y diferentes proporciones de HCM y HMN.

Vale la pena hacer notar que el hecho de que todas las papillas sean menos elásticas (mayor $\tan \delta$) a frecuencias mayores de 1 rad/s las hace más fluidas y por lo tanto de más fácil deglución.

3.5.2 Pruebas de cizalla estacionaria circular

La Figura 3.11 muestra la dependencia de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de papillas preparadas con 7% de sólidos de HCM y HMN, así como el efecto de la proporción de HCM sobre la viscosidad aparente a 1 s^{-1} de las papillas preparadas con mezclas de HCM y HMN. Las papillas que no fueron sometidas a los dos ciclos de ascenso y descenso de velocidad de cizalla se identifican como “sin precizalla”, mientras que las identificadas como “con precizalla” sí fueron sometidas a los dos ciclos mencionados. Las papillas preparadas con los componentes individuales (Fig. 3.11a) fueron muy sensibles al tratamiento mecánico de precizalla; sus viscosidades fueron menores que las de las papillas sin precizalla. Las papillas sin precizalla preparadas con HCM fueron más viscosas que las preparadas con HMN. Lo mismo ocurrió con aquellas con precizalla.

Las viscosidades aparentes de las papillas con 10 y 20% de HCM fueron menores que las papillas preparadas únicamente con HMN. Proporciones de HCM mayores de 40% resultaron en papillas más viscosas, aunque entre 60 y 80% de HCM la viscosidad aparente disminuyó ligeramente en el caso de las papillas sin precizalla (Fig. 3.11b) o se mantuvo constante en el caso de las papillas con precizalla (Fig. 3.11c). Vale la pena hacer notar que el comportamiento mostrado en las Figs. 3.11b y 3.11c es el mismo que se observó en las pruebas oscilatorias para las papillas con 7% de sólidos como lo ilustra la Fig. 3.7.

Las papillas preparadas con 8% de sólidos, constituyeron un caso singular. Aquellas preparadas con HCM con precizalla fueron más viscosas que las correspondientes sin precizalla (Fig. 3.12a). La razón de este comportamiento no es aparente, pero quizá podría atribuirse a una mayor gelificación de amilosa en la papilla que al ser cizallada produjo una mayor viscosidad.

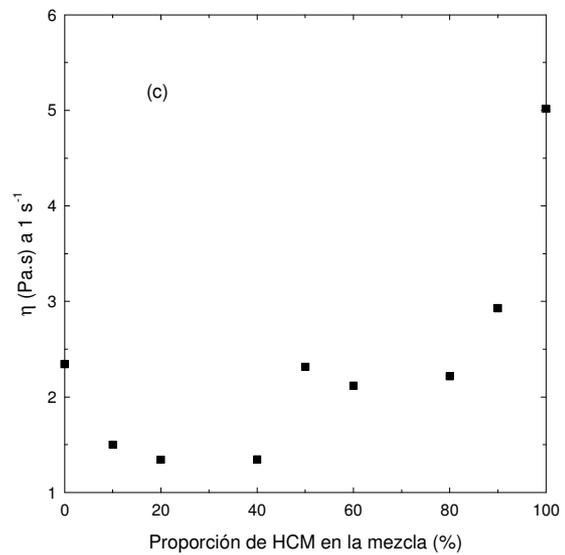
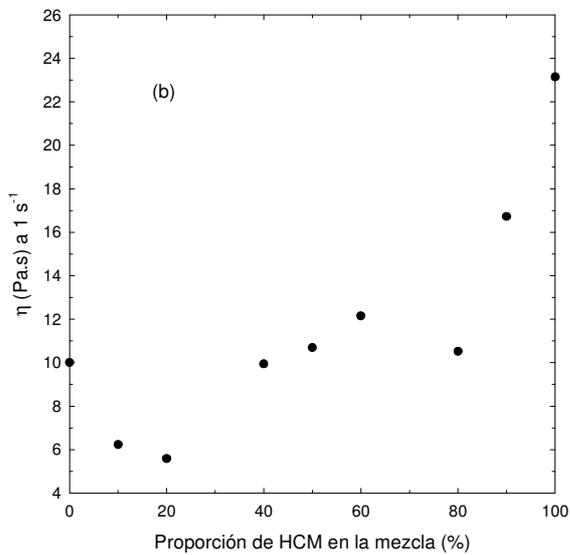
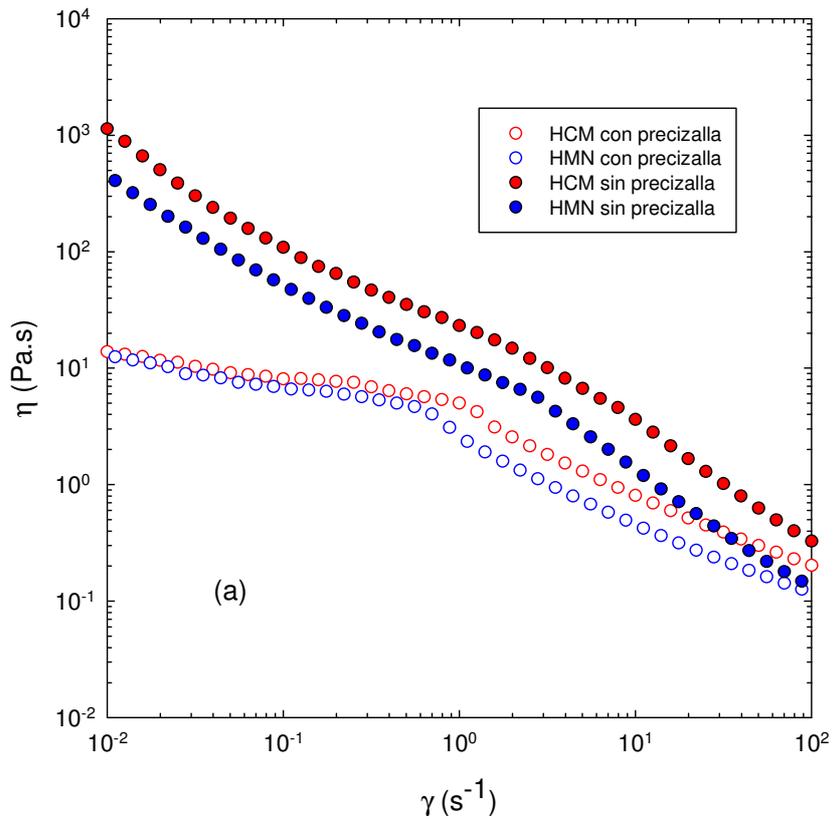


Figura 3.11 Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de papillas con 7% de sólidos, preparadas con HCM y HMN. (a) comportamiento sin y con precizalla de las papillas individuales de HCM y HMN. Variación de la viscosidad aparente a 1 s^{-1} de las papillas sin precizalla (b) y con precizalla (c) con diferentes proporciones de HCM y HMN.

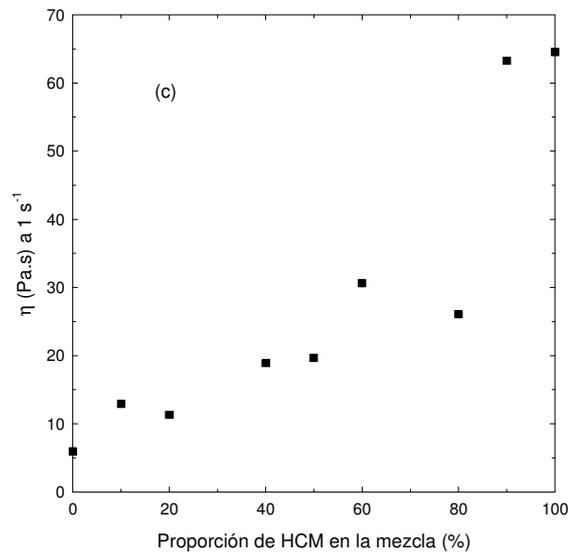
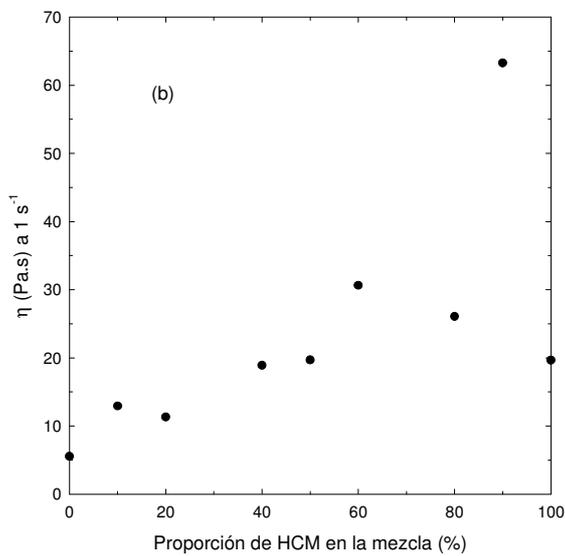
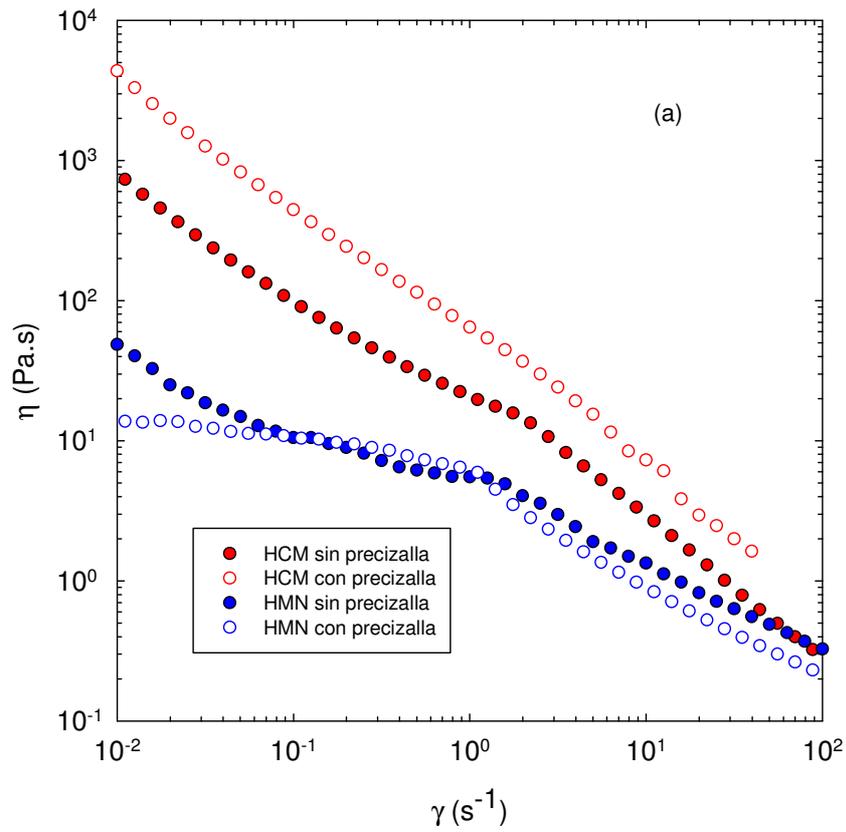


Figura 3.12 Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de papillas con 8% de sólidos, preparadas con HCM y HMN. (a) comportamiento sin y con precizalla de las papillas individuales de HCM y HMN. Variación de la viscosidad aparente a 1 s^{-1} de las papillas sin precizalla (b) y con precizalla (c) con diferentes proporciones de HCM y HMN.

Las papillas preparadas con HMN fueron menos viscosas que las preparadas con HCM, como ocurrió en el caso de 7% de sólidos, pero la viscosidad de aquellas con precizalla y sin precizalla fue muy similar como lo muestra la Fig. 3.12a. Para velocidades de cizalla entre 0.1 y 1 s⁻¹ las viscosidades fueron muy cercanas. Antes y después de ese intervalo, las viscosidades de las papillas sin precizalla fueron entre 2 a 5 veces mayores que aquellas con precizalla, dependiendo de la velocidad de cizalla. A diferencia de las papillas con 7% de sólidos, la viscosidad aparente a 1 s⁻¹ no fue menor al agregar 10 y 20% de HCM. En el caso de las papillas con 8% de sólidos la viscosidad aparente aumentó hasta 60% de HCM, después descendió y finalmente aumentó cuando la proporción de HCM fue 100% (Figs. 3.12b y c).

Las papillas preparadas con 9% de sólidos mostraron el mismo comportamiento que aquellas con 7%, es decir, las papillas sin precizalla fueron más viscosas que con precizalla (Fig. 3.13a) y la viscosidad aparente a 1 s⁻¹ fue menor que la preparada con HMN (0% de HCM) cuando la proporción de HCM fue de 10 a 40%. Proporciones mayores de 40% produjeron papillas más viscosas, pero en las papillas sin precizalla se observó un escalón de viscosidad aparente (Fig. 3.13b). En las papillas con precizalla este escalón no se observó ya que la viscosidad aparente aumentó continuamente. Sin embargo, la papilla con 100% de HCM fue menos viscosa incluso que la papilla con HMN sola. El efecto de la cizalla previa podría explicar esta diferencia, aunque no se espera que una papilla con el mayor contenido de HCM sea menos viscosa que una con menor contenido de este componente, aunque se trate de una mezcla.

En general las tendencias mostradas por las papillas con 7, 8 y 9% de sólidos muestran que las no cizalladas son más viscosas que las cizalladas y que al mezclar el HMN con proporciones de HCM de 10 y 20% y ocasionalmente 40%, se obtienen menores viscosidades que para las papillas con HMN únicamente. Las papillas que muestran este comportamiento serían más fáciles de deglucir que aquellas con una mayor proporción de HCM.

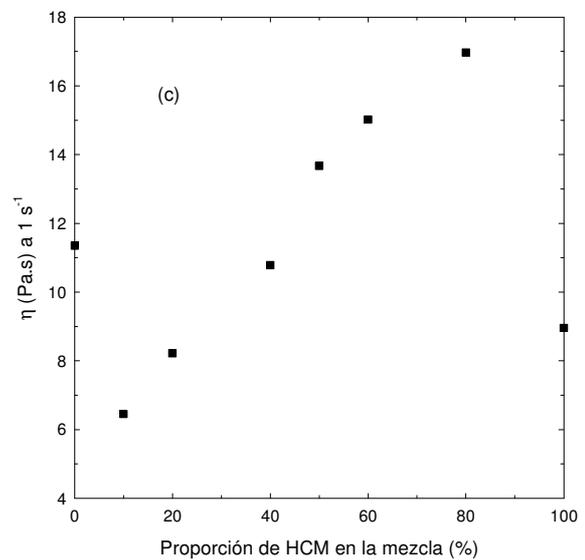
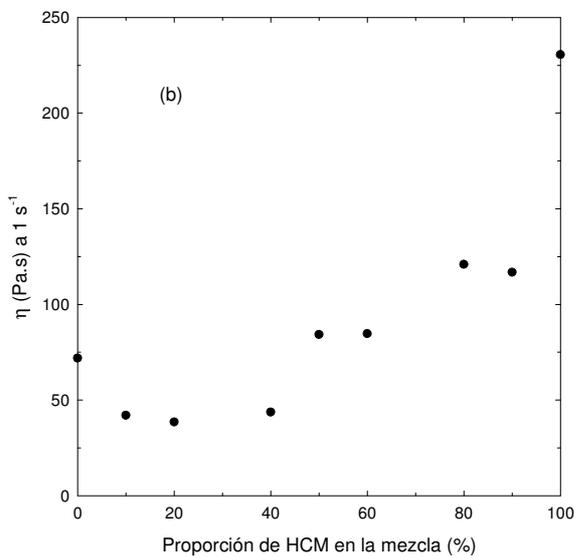
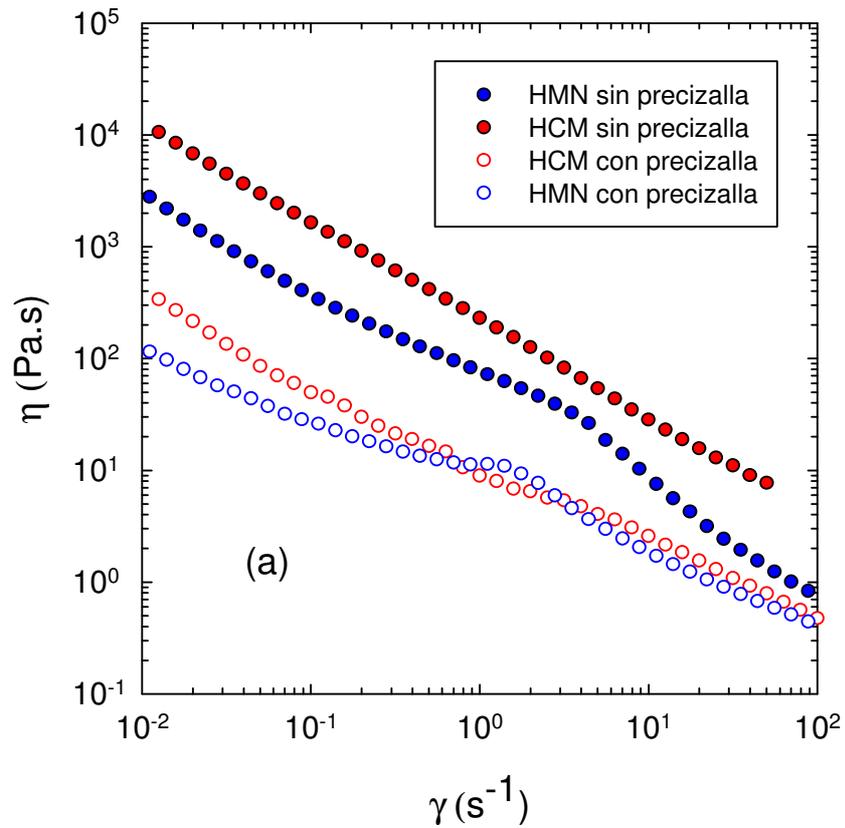


Figura 3.13 Variación de la viscosidad aparente con la velocidad de cizalla de papillas con 9% de sólidos, preparadas con HCM y HMN. (a) comportamiento sin y con precizalla de las papillas individuales de HCM y HMN. Variación de la viscosidad aparente a 1 s⁻¹ de las papillas sin precizalla (b) y con precizalla (c) con diferentes proporciones de HCM v HMN.

3.5.3 Pruebas de cizalla no estacionaria circular

El comportamiento en cizalla no estacionaria circular de las papillas con 7% de sólidos se observa en la Figura 3.14. Las pruebas consistieron en dos ciclos consecutivos de ascenso y descenso de velocidad de cizalla llevados a cabo con el propósito de examinar la dependencia de la viscosidad con el tiempo al igual que en el caso de las papillas preparadas con HCM y HMN por separado.

Las papillas con los componentes individuales y sus mezclas mostraron una histéresis muy marcada durante el primer ciclo. El grado de histéresis fue mayor en las papillas con HCM sola, mientras que en las mezclas aumentó al incrementar la proporción de HCM en la mezcla.

En algunos casos también se observó un sobreesfuerzo (stress overshoot), es decir, un aumento considerable del esfuerzo de cizalla hasta alcanzar un máximo para luego disminuir de manera asintótica. Este comportamiento es muy característico de materiales viscoelásticos y se presenta porque al iniciar el ascenso de velocidad de cizalla, el material desarrolla un esfuerzo notable debido a su carácter sólido. Conforme la velocidad de cizalla aumenta el esfuerzo continua aumentando hasta que finalmente su carácter viscoso hace que el esfuerzo se disipe y relaje una vez que la velocidad de cizalla ha alcanzado un valor tal que no es posible concentrar más esfuerzo en el seno del material. En el caso de las papillas la concentración de esfuerzos que lleva al sobreesfuerzo estaría dada por las partículas en suspensión. Estas partículas no son rígidas, sino que se deforman y además se orientan en la dirección del flujo. Es la elasticidad de las partículas la que les permite tratar de recuperar su forma cuando va cambiando la velocidad de cizalla y por lo tanto disipar el esfuerzo.

Durante el segundo ciclo, la histéresis disminuyó considerablemente en todas las papillas y ya no se observó un sobreesfuerzo. Esto significa que las papillas fluyeron más fácilmente y que de alguna manera, su organización estructural inicial fue modificada produciendo una nueva organización en la que muy posiblemente las partículas están ordenadas formando diferentes estratos como consecuencia de la cizalla aplicada en el primer ciclo.

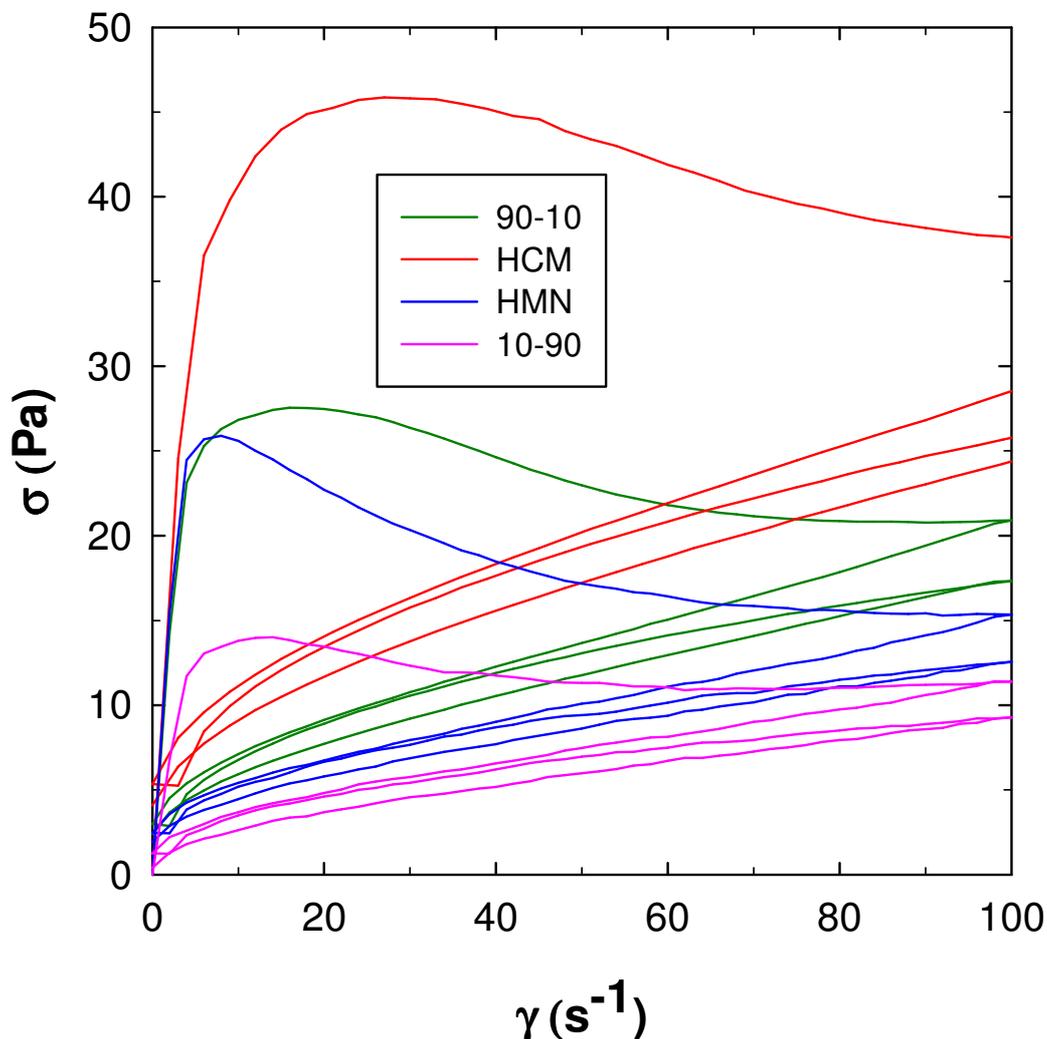


Figura 3.14. Variación del esfuerzo de cizalla con la velocidad de cizalla de las papillas con 7% de sólidos y diferentes proporciones de HCM y HMN, durante dos ciclos consecutivos de ascenso y descenso de la velocidad de cizalla.

Otra característica de las papillas es que el esfuerzo de cizalla durante el ascenso fue mayor que durante el descenso. Esto ocurrió en ambos ciclos e indica que la viscosidad disminuye con el tiempo. Este comportamiento es considerado por muchos investigadores como tixotropía, es decir, la disminución de la viscosidad aparente con el tiempo. Sin embargo, esta prueba no es estrictamente la forma de determinar el comportamiento tixotrópico ya que no se ajusta a la definición de este último. No obstante, es muy significativa y no se espera que conduzca a una falsa conclusión sobre la presencia de dicho comportamiento, por el contrario es

una prueba sintomática y tal comportamiento es confirmado cuando se hace la prueba definitiva siguiendo la definición de tixotropía. De acuerdo con esta, el material debe ser sometido a una velocidad de cizalla constante durante un cierto tiempo para observar el cambio de la viscosidad. Si esta disminuye conforme transcurre el tiempo, entonces el comportamiento se considera tixotrópico. A veces la prueba se alarga suspendiendo la velocidad de cizalla por un cierto tiempo y reanudándola enseguida para saber si se recuperó el nivel inicial de viscosidad, es decir, si el fenómeno es reversible. En sistemas con partículas en suspensión, es muy raro recuperar la viscosidad aparente inicial debido a los cambios de estructura o arquitectura a los que ya se ha hecho alusión.

Las papillas con 8% de sólidos también mostraron los comportamientos y características ya señaladas para las papillas con 7% de sólidos, aunque con valores de viscosidad aparente mayores.

En el caso de las papillas con 9% de sólidos, las mezclas 80-20, 90-10 y HCM fueron particularmente difíciles de caracterizar debido a que no mostraron señales nítidas de esfuerzo de cizalla como en los otros casos (Fig. 3.15). La papilla preparada con HCM solamente mostró cierta inestabilidad en el primer ciclo, pero a pesar de ello fue posible caracterizarla obteniendo una señal nítida en el segundo ciclo. La papilla preparada con la mezcla 90-10 no fue posible caracterizarla ya que mostró un gran sobreesfuerzo y al alcanzar una velocidad de cizalla de 80 s^{-1} se salió de la geometría de prueba impidiendo completar incluso el primer ciclo. La papilla con la mezcla 80-20 mostró también una gran histéresis y sobreesfuerzo con una marcada inestabilidad para altas velocidades de cizalla. No obstante, produjo señales nítidas en el segundo ciclo de cizalla. La gran concentración de sólidos explica este comportamiento dado que al cizallar las papillas, es más difícil que las partículas se orienten debido a que la muestra está confinada en un espacio muy reducido dado por la geometría del reómetro. De esta forma, las partículas al tratar de acomodarse u orientarse en la dirección del flujo se obstaculizan y provocan su segregación abandonando la geometría.

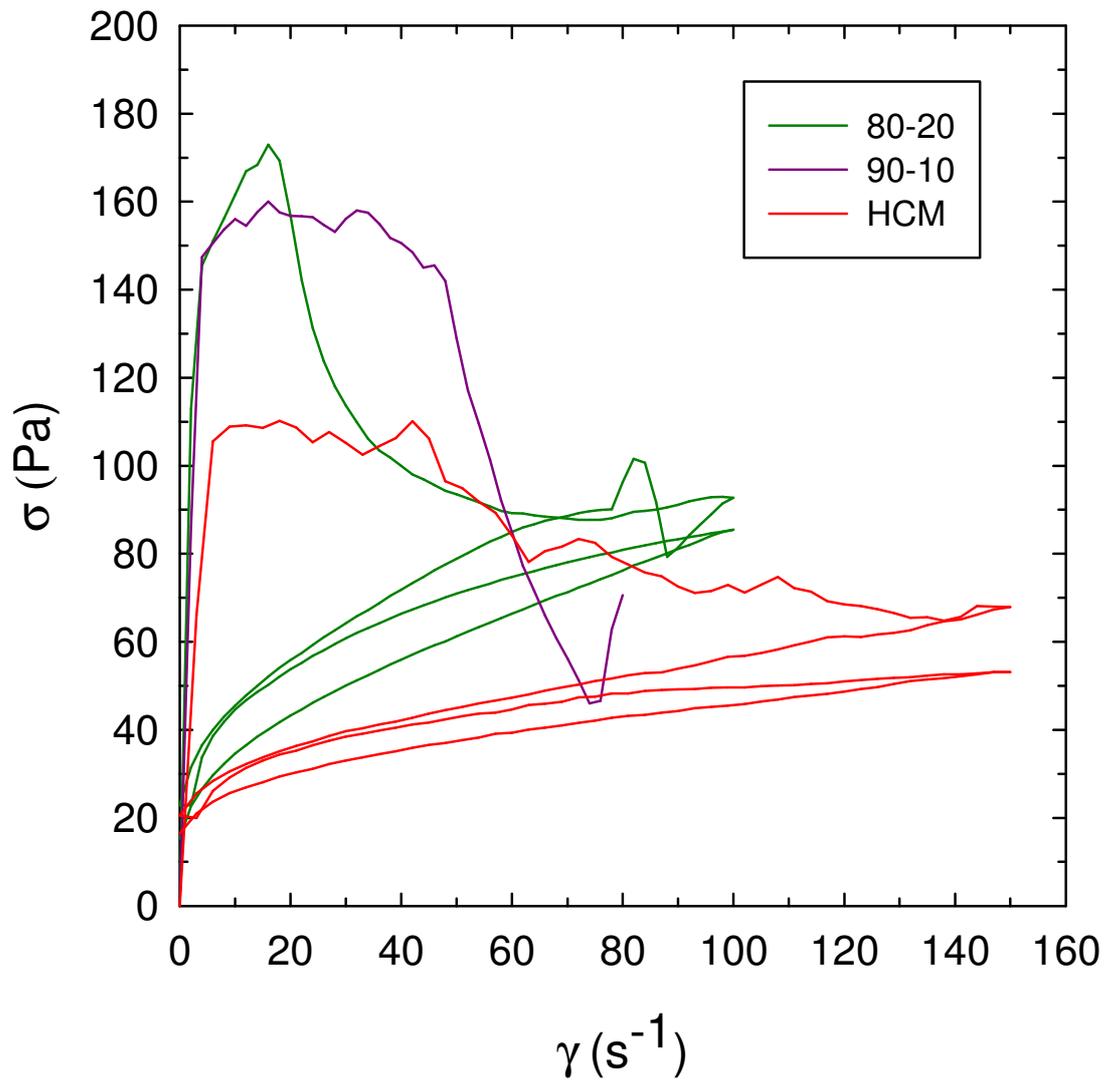


Figura 3.15. Variación del esfuerzo de cizalla con la velocidad de cizalla de las papillas con 9% de sólidos y diferentes proporciones de HCM y HMN, durante dos ciclos consecutivos de ascenso y descenso de la velocidad de cizalla.

CONCLUSIONES

El análisis químico proximal de las harinas indica que la densidad energética de las papillas preparadas con HCM y HMN se incrementó al aumentar la concentración de sólidos. Sin embargo, una mayor concentración no es muy adecuada ni conveniente ya que las papillas presentan una consistencia poco fluida y tienden a formar una estructura parecida a la de un gel en el caso de las papillas elaboradas con HCM y HMN por separado.

En el caso de las papillas preparadas con las mezclas la tendencia fue similar, pero para una misma concentración de sólidos y las siete diferentes proporciones de cada componente, la densidad energética aumentó conforme disminuyó el contenido de sólidos de HCM y aumentó con el contenido de sólidos de HMN. Esto es de suma importancia ya que permitiría preparar papillas con una mayor cantidad de sólidos de HMN sin aumentar de manera problemática la viscosidad aparente de las papillas dando como resultado papillas más fluidas.

La proporción harina-agua afectó de manera sustancial las propiedades viscoelásticas de las papillas preparadas con las harinas de manera individual o con la mezcla de ambas. Las papillas que pueden ser preparadas asignando diferentes proporciones de los dos componentes van desde las suspensiones semi-diluidas hasta las tipo gel.

Aunque no se haya podido encontrar la proporción de componentes (harina-agua) para obtener una papilla que cubra las necesidades energéticas de un alimento de suplemento para infantes recién destetados se pudo obtener información de cómo se comporta el HCM y HMN al mezclarse, y se podría decir que la preparación de papillas mezclando las dos harinas es benéfica siempre y cuando la cantidad de HMN sea mayor que la de HCM, debido a que esta última tiene una mayor cantidad de hidratos de carbono que al momento de preparar las papillas y dejarlas reposar tienden a gelificar y retrogradar haciendo que el producto pierda sus propiedades reológicas iniciales y pase de un líquido viscoso a un sólido elástico.

Cualquier factor que produzca una disminución de la viscoelasticidad sería favorable para la preparación de las papillas. Por ejemplo, un tratamiento mecánico como la agitación previo al consumo ayudaría a hacer la papilla más fluida. Asimismo, una menor cantidad de hidratos de carbono, una hidrólisis parcial del almidón o una mayor cantidad de lípidos reducirían la viscosidad ya que se reduciría la capacidad de retención de agua de los gránulos de almidón durante su cocción y se producirían papillas menos viscoelásticas.

Se podrían probar concentraciones más grandes de las harinas solas y mezcladas para alcanzar un contenido energético adecuado siempre y cuando las pruebas reológicas se realicen el mismo día sin que haya reposo.

Es posible obtener una gama de viscosidades dependiendo de la cantidad de harina y agua que se use, lo cual ofrece la posibilidad de preparar papillas con diferentes “consistencias” y grados de viscoelasticidad.

REFERENCIAS

- Abdulmola, N.A. Hember, M.W.N. Richardson, R.K. & Morris, E.R. (1996) Application of polymer blending laws to starch-gelatin composites. *Carbohydr. Polym.*, 31, 53-63.
- Afolabi, O.A. Ojofeitimi, E.O. & Oke O.I. (1988). Chemical and clinical evaluation of groundnut-maize gruel mixture (Epa-ogi) in the amelioration of PEM in developing countries. *Nutr. Rep. Int.* 38 (3), 621-628.
- Alloncle, M. Y Doublier, J.L. (1991). Viscoelastic properties of maize starch/hydrocolloid pastes and gels. *Food Hydrocoll.*, 5, 455-467.
- AOAC. (1990). *Official Methods of Analysis*. 15 th edn. Washington, DC: Association of Official Analytical Chemists. pp: 777
- Araya, H. Alvina, M. Vera, G. & Pak, N. (1991). Valores recomendables de densidad energética en preparaciones de consistencia tipo sopa o crema espesa, destinadas a la alimentación del preescolar. *Arch. Latinoam. Nutr.* 41, 53-61.
- Bender, A.E. (1994): *Diccionario de nutrición y tecnología de los alimentos*. Zaragoza, España: Acribia, 341p.
- Bourne, C.M. (1982). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. London: Academy Press.
- Callejo González, M. J. (2002). *Industrias de Cereales y Derivados*. Colección: Tecnología de Alimentos. Primera edición, AMV Ediciones. Madrid, España.
- Collison, R. (1968). Swelling and gelation of starch. In starch and its derivatives. 4th end. Ed. JA Radley. London: Chapman.
- Eidam, D. & Kulicke, W.M. (1995). Formation of maize starch gels selectively regulated by the addition of hydrocolloids. *Starch*, 47, 378-384.
- Eliasson & Gudmundsson, (1996). Viscoelastic behaviour during the gelatinization of starch. 1. Comparison of wheat, maize, potato and waxy-barley starches. *Journal of Texture Studies*, 17, 253-265.
- Evans, I.D. & Haisman, D.R. (1979). Rheology of gelatinised starch suspensions. *Journal of Texture Studies*, 10, 374-370.

- Evans, I.D. & Lips, A. (1992). Viscoelasticity of gelatinized starch dispersions. *J. Texture Stud.* 23, 69-86.
- Fashakin, J.B. & Ogunsola, F. (1982). The utilisation of local foods in formulation of weaning foods. *J. Trop. Paediatr.* 28 (2), 93-96.
- Gimbi, D.M., Kamau, D. & Almazán, M. (1997). Improved corn and millet based weaning foods: Formulation, viscosity, and nutritional and microbial quality.
- Gopaldas & Jhon, (1988) Studies on a wheat-based amylase-rich food. *Food. Nutr. Bull.* 10, 55-59.
- Hayes, R.E. Mwale, J.M. Tembo, P. & Wadsworth, J.I. (1995). Computer-optimized weaning food blends. *Food Nutr. Bull.* 16, 245-262.
- James F. Steffe (1996). *RHEOLOGICAL METHODS IN FOOD PROCESS ENGINEERING*. Second Edition. Freeman Press, USA.
- *Journal of Food Processing and Preservation* 21(6), 507-524.
- Kikafunda, J. K., Walker, A. F. & Abeyasekera, S. (1997). Optimising viscosity and energy of maize porridges for child weaning in developing countries. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 48, 401-409.
- Lorri, W. & Svanberg, U. (1993). Lactic acid-fermented cereal gruels: viscosity and flour concentration. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 44(3), 207-213.
- Launay, B. Doublier, J.L. & Cuvelier, G. (1986). Flow properties of aqueous solutions and dispersions of polysaccharides. In *Functional Properties of Food Macromolecules*, eds JR Mitchell & DA Ledward, 1-78. London: Elsevier Applied Science Publishers.
- Mewis, J. & Dullaert, K. (2005). Thixotropy, *Advances in Colloid and Interface Science*, 216-217.
- Mosha, A.C. & Svanberg U. (1990). The acceptance and intake of bulk-reduced weaning foods: the Luganga village study. *Food Nutr. Bull* 12, 69-74.
- Mosha, A.C. & Svanberg U. (1983). Preparation of weaning foods with high nutrient density using flour of germinated cereals. *Food Nutr. Bull.* 5, 10-14.

- Mouquet, C. & Trèche, S. (2001). Viscosity of gruels for infants: a comparison of measurement procedures. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 52, 393-394.
- Muñoz, A.L.; (2009). Comportamiento en cizalla estacionaria y no estacionaria de papillas para infantes recién destetados elaboradas con harina de maíz nixtamalizado.
- Solomon, M.L. Almusallam, A.S. Seefeldt, K.F. Songwangthanarog, A. & Varadan, P. (2001). *Macromolecules* 34.
- Suetsugu, Y. & White, J.L. (1984). *Non-Newton Fluid Mech*, 14.
- Svanberg, U (1987). Dietary bulk in weaning foods, PhD thesis of Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.
- Swinkels, J.J.M. (1985). Sources of Starch, its chemistry and Physics. In *Starch Conversion Technology* (eds. Van Beynum, G.M.A. y Ruelo, J.A.) Marcel Dekker, Inc. New York, 15-46.
- Tecante, A., (2005). Viscoelasticity, en *Food Engineering*, Barbosa-Cánovas, G.V. (ed) *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, UNESCO, pp. 285-303.
- Tecante, A. & Doublier, J.L. (1999). Steady flow and viscoelastic behavior of crosslinked waxy corn starch- κ -carrageenan pastes and gels. *Carbohydrate Polymers*, 40, 221-231.
- Trèche, S. & Mbome, I. (1999). Viscosity, energy, density and osmolality of gruels for infants prepared from locally produced commercial flours in some developing countries. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 50 (2), 117-125.
- Tscheuschner, H. D. (2001). *Fundamentos de Tecnología de los Alimentos*. 2ª. Edición, editorial Acribia S.A., Zaragoza, España.
- Walter, A.F. (1990). The contribution of weaning foods to protein-energy malnutrition. *Nutr. Res. Rev.* 3, 25-47.
- Wanink, J.F. Van Vliet, T. & Nout, M.J.R. (1994). Effect of roasting and fermentation on viscosity of cereal-legume based food formulas. *Plant Food Human Nutr.* 46, 117-126.

Anexo A

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA HCM

Humedad

Pesafiltro	Peso (g)	Peso harina (g)	Peso harina seca (g)	Humedad (%)
1	13.6944	2.0574	1.8372	10.70
2	12.3926	2.0972	1.8781	10.45
3	13.8110	2.0451	1.8809	10.47
Promedio				10.54
σ				0.1389
C.V.				1.3178

$(13.6944 \text{ g} + 2.0574 \text{ g muestra}) - (13.6944 \text{ g} + 1.8372 \text{ g muestra}) = 0.2202 \text{ g agua}$

$$\begin{array}{rcl} 0.2202 \text{ g agua} & \text{-----} & 2.0574 \text{ g muestra} \\ X & \text{-----} & 100 \text{ g muestra} \end{array}$$

$X = 10.70\%$

$100\% - 10.54\% = 89.46\%$ de materia seca

Cenizas

Crisol	Peso (g)	Peso harina (g)	Cenizas	Cenizas (%)
1	20.5543	3.0336	0.0399	1.3152
2	14.9682	3.0108	0.0395	1.3119
3	20.5914	3.0432	0.0391	1.2848
Promedio				1.3039
σ				0.0136
C.V.				1.0445

$$\begin{array}{rcl} 0.0399 \text{ g cenizas} & \text{-----} & 3.0336 \text{ g muestra} \\ X & \text{-----} & 100 \text{ g muestra} \end{array}$$

$X = 1.3152\%$

Base seca = $(1.3039 / 100 - 10.54) \times 100 = 1.45\%$

Lípidos

Matraz	Peso (g)	Peso harina (g)	Peso harina seca (g)	Peso extracto (g)	Lípidos (%)
1	101.3087	4.6066	4.0416	0.2098	5.1910
2	280.5400	4.7498	4.0080	0.2290	5.7135
3	101.3092	4.5550	3.9937	0.2085	5.2207
Promedio					5.3751
σ					0.2934
C.V.					5.4585

$$0.2098 \text{ g grasa extraída} \quad \text{-----} \quad 4.0416 \text{ g muestra}$$

$$X \quad \text{-----} \quad 100 \text{ g muestra}$$

$$X = 5.1910\% \text{ Lípidos}$$

$$\text{Base seca} = (5.3751 / 100 - 10.54) \times 100 = 6.008\%$$

Proteína

Muestra	Vol. muestra (mL)	Vol. blanco (mL)	Peso muestra (g)	N (%)	P (%)
1	14.4	1.45	0.1124	1.6628	10.3930
2	15.2	1.45	0.1313	1.5129	9.4554
Promedio					9.9243
σ					0.4687
C.V.					4.72

$$\%N = \frac{(14.4 \text{ mL} - 1.45 \text{ mL}) \times 0.014 \text{ meq} \times 0.0103 \text{ N} \times 100}{0.1124 \text{ g muestra}}$$

$$\%N = 1.6628$$

$$\%P = F \times \%N$$

$$\%P = 6.25 \times 1.6628$$

$$\%P = 10.3930$$

$$\text{Base seca} = (9.9243 / 100 - 10.54) \times 100 = 11.0936\%$$

Hidratos de carbono

100 g muestra – 1.45 g de cenizas – 6.008 g de lípidos – 11.0936 g de proteínas

Hidratos de carbono = 81.5%

Análisis estadístico de la HMN (malla 60)

Humedad

Pesafiltro	Peso (g)	Peso harina (g)	Peso harina seca (g)	Humedad (%)
1	7.5760	2.0076	1.844	8.15
2	7.8346	2.0075	1.8414	8.27
3	7.5909	2.0070	1.8832	6.17
Promedio				7.53
σ				1.1793
C.V.				15.66

$(7.5760 \text{ g} + 2.0076 \text{ g muestra}) - (7.5760 \text{ g} + 1.844 \text{ g muestra}) = 0.1636 \text{ g agua}$

$$\begin{array}{r} 0.1636 \text{ g agua} \text{ -----} \\ X \qquad \qquad \qquad \text{-----} \end{array} \begin{array}{l} 2.0076 \text{ g muestra} \\ 100 \text{ g muestra} \end{array}$$

$X = 8.1490\%$

$100\% - 7.53\% = 92.47\%$ de materia seca

Cenizas

Crisol	Peso (g)	Peso harina (g)	Cenizas	Cenizas (%)
1	17.2364	3.0333	-----	----
2	19.7552	3.0344	0.0602	1.9840
Promedio				----
σ				-----
C.V.				-----

$$\begin{array}{r} 0.0602 \text{ g cenizas} \text{ -----} \\ X \qquad \qquad \qquad \text{-----} \end{array} \begin{array}{l} 3.0344 \text{ g muestra} \\ 100 \text{ g muestra} \end{array}$$

$$X = 1.9840\%$$

$$\text{Base seca} = (1.9849 / 100 - 7.53) \times 100 = 2.1412\%$$

Lípidos

Matraz	Peso (g)	Peso harina (g)	Peso harina seca (g)	Peso extracto (g)	Lípidos (%)
1	101.45	5.5686		0.47	8.4402
2	280.68	4.0081		0.56	13.9717
Promedio					11.2059
σ					3.9113
C.V.					34.9039

$$0.47\text{g grasa extraída} \quad \text{-----} \quad 5.5686 \text{ g muestra}$$

$$X \quad \quad \quad \text{-----} \quad 100 \text{ g muestra}$$

$$X = 8.4402\% \text{ Lípidos}$$

$$\text{Base seca} = (11.20 / 100 - 7.53) \times 100 = 12.1120\%$$

Proteína

Muestra	Vol. muestra (mL)	Vol. blanco (mL)	Peso muestra (g)	N (%)	P (%)
1	14.2	3	0.1081	1.49	9.34
2	12.0	3	0.1019	1.27	7.96
Promedio					8.65
σ					0.9758
C.V.					11.2809

$$\%N = \frac{(14.2 \text{ mL} - 3.0 \text{ mL}) \times 0.014 \text{ meq} \times 0.0103 \text{ N} \times 100}{0.1081\text{g muestra}}$$

$$\%N = 1.49$$

$$\%P = F \times \%N$$

$$\%P = 6.25 \times 1.49$$

$$\%P = 9.34$$

$$\text{Base seca} = (8.65 / 100 - 7.53) \times 100 = 9.3544\%$$

Hidratos de carbono

100 g muestra – 2.1412 g de cenizas – 12.1120 g de lípidos – 9.3544 g de proteínas

Hidratos de carbono = 76.3924%

Nota: Para las otras dos mallas (20 y 40) se siguió el mismo método de análisis.

Anexo B

Determinación de la densidad energética para papillas con diferente concentración de HCM a partir del aporte energético de cada componente.

Aporte energético individual (kcal)			
Componente	Concentración de sólidos (%)		
	7	8	9
Lípidos	4.22	4.86	5.43
Proteínas	3.44	3.92	4.43
Hidratos de carbono	25.49	29.16	32.80
Total (kcal)	33.15	37.94	42.66
Total (kJ)	138.75	158.80	178.55

Ejemplo de cálculos

100 g de muestra ----- 6.0 g grasa
 8.94 g de muestra ----0.54 g grasa

1g grasa ----- 9 kcal
 0.54 g grasa ----- 4.86 kcal

Lípidos = 9 kcal/g (Bender, 1994).

100 g de muestra ---- 11 g proteína
 8.94 g de muestra ----- 0.98 g proteína

1g de Proteína --- 4 kcal
 0.98 g Proteína ----- 3.92 kcal

Proteína = 4 kcal/g (Bender, 1994).

100 g de muestra ----- 81.5 g hidratos de carbono
 8.94 g de muestra ----- 7.29 g hidratos de carbono

1 g de hidratos de carbono --- 4 kcal
 7.29 g de hidratos de carbono --- 29.16 kcal

Hidratos de carbono = 4 kcal/g (Bender, 1994).

Densidad energética = 4.86 kcal de grasa + 3.92 kcal de proteína + 29.16 kcal de hidratos de carbono

Densidad energética = 37.94 kcal

1cal ----- 4.1855 J
 37940 cal ----- 158.80 kJ

Determinación de la densidad energética para las tres fracciones de la HMN

Aporte energético individual (kcal)			
Malla 20	Concentración de sólidos (%)		
Componente	7	8	9
Lípidos	4.32	4.94	5.56
Proteínas	1.84	2.10	2.37
Hidratos de carbono	25.79	29.58	33.27
Total (kcal)	31.95	36.62	41.20
Total (kJ)	133.73	153.27	172.44
Malla 40			
Lípidos	6.33	7.22	9.03
Proteínas	1.90	2.17	2.71
Hidratos de carbono	25.48	29.10	31.06
Total (kcal)	33.71	38.49	42.80
Total (kJ)	141.09	161.10	179.14
Malla 60			
Lípidos	7.24	8.45	9.65
Proteínas	2.49	2.90	3.31
Hidratos de carbono	20.32	23.71	27.08
Total (kcal)	30.05	35.06	40.04
Total (kJ)	125.77	146.74	167.59

Se hacen los mismos cálculos que para la HCM.

Determinación de la densidad energética para las mezclas de HCM y HMN con diferentes concentraciones de sólidos totales.

	Lípidos	Proteínas	Hidratos de carbono	Total (kcal)	Total (kJ)
7%					
10M-90HMN	7.84	2.89	23.37	34.10	142.75
20M-80HMN	7.44	2.95	23.61	34.00	142.32
40M-60HMN	6.64	3.07	24.08	33.79	141.45
50M-50HMN	6.23	3.14	24.32	33.69	141.01
60M-40HMN	5.83	3.20	24.56	33.59	140.58
80M-20HMN	5.03	3.32	25.03	33.38	139.72
90M-10HMN	4.63	3.38	25.27	33.28	139.29
8%					
10M-90HMN	8.96	3.30	26.71	38.98	163.14
20M-80HMN	8.50	3.38	26.98	38.86	162.64
40M-60HMN	7.58	3.52	27.52	38.62	161.66
50M-50HMN	7.12	3.58	27.79	38.50	161.16
60M-40HMN	6.66	3.65	28.06	38.38	160.66
80M-20HMN	5.75	3.79	28.61	38.15	159.68
90M-10HMN	5.29	3.86	28.88	38.03	159.18
9%					
10M-90HMN	10.08	3.72	30.05	43.85	183.53
20M-80HMN	9.56	3.80	30.35	43.72	182.98
40M-60HMN	8.53	3.95	30.96	43.45	181.86
50M-50HMN	8.02	4.03	31.27	43.32	181.31
60M-40HMN	7.50	4.11	31.57	43.18	180.75
80M-20HMN	6.46	4.27	32.18	42.92	179.64
90M-10HMN	5.95	4.35	32.49	42.79	179.09

Anexo C

ANÁLISIS DE varianza para las mezclas preparadas con diferentes concentraciones

7%

FS G'

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	595018.723	8	74377.3404	164.435664	4.008E-99	1.97277927
Dentro de los grupos	122126.073	270	452.31879			
Total	717144.796	278				Se rechaza Ho

FS G''

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	11690.6922	8	1461.33652	14.3688198	1.925E-17	1.97277927
Dentro de los grupos	27459.5176	270	101.701917			
Total	39150.2098	278				Se rechaza Ho

SS G'

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	242397.732	8	30299.7165	1224.5565	2.509E-128	2.0032509
Dentro de los grupos	3563.05257	144	24.7434206			
Total	245960.784	152				Se rechaza Ho

SS G''

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	35420.1738	8	4427.52173	287.796841	1.5135E-84	2.0032509
Dentro de los grupos	2215.32358	144	15.3841915			
Total	37635.4974	152				Se rechaza Ho

RS sin cizallar

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	283964.735	8	35495.5918	1.75631598	0.08419728	1.9623414
Dentro de los grupos	7821368.23	387	20210.2538			
Total	8105332.97	395				Se acepta Ho

RS cizallado

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	503.397724	8	62.9247155	4.2634139	6.3186E-05	1.9623414
Dentro de los grupos	5711.82284	387	14.7592322			
Total	6215.22057	395				Se rechaza Ho

TL

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	53961.3322	8	6745.16653	216.514623	4.724E-257	1.94354044
Dentro de los grupos	56076.119	1800	31.1533994			
Total	110037.451	1808				Se rechaza Ho

tan δ

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.02236367	8	0.00279546	0.4437204	0.89403499	1.97277927
Dentro de los grupos	1.70101204	270	0.00630004			
Total	1.72337571	278				Se acepta Ho

8%

FS G'

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5132971.58	8	641621.448	246.080339	2.831E-119	1.97277927
Dentro de los grupos	703988.753	270	2607.36575			
Total	5836960.34	278				Se rechaza Ho

FS G''

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	102297.405	8	12787.1756	29.289175	1.0325E-32	1.97277927
Dentro de los grupos	117877.592	270	436.583674			
Total	220174.997	278				Se rechaza Ho

SS G'

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2439182.24	8	304897.781	6898.85096	5.399E-182	2.0032509
Dentro de los grupos	6364.14392	144	44.1954439			
Total	2445546.39	152				Se rechaza Ho

SS G''

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	70158.9268	8	8769.86586	453.640596	4.5613E-98	2.0032509
Dentro de los grupos	2783.83525	144	19.3321893			
Total	72942.7621	152				Se rechaza Ho

RS sin cizallar

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	5104127.31	7	729161.044	3.92111373	0.0003936	2.03622719
Dentro de los grupos	63969427.2	344	185957.637			
Total	69073554.5	351				Se rechaza Ho

RS cizallado

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	9054.70477	7	1293.52925	9.6185955	6.2061E-11	2.03622719
Dentro de los grupos	46261.8543	344	134.482134			
Total	55316.559	351				Se rechaza Ho

TL

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	331849.604	8	41481.2004	374.329591	0	1.94354044
Dentro de los grupos	199466.359	1800	110.814644			
Total	531315.963	1808				Se rechaza Ho

tan δ

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.01266006	8	0.00158251	0.43555936	0.89915144	1.97277927
Dentro de los grupos	0.98098455	270	0.00363328			
Total	0.99364461	278				Se acepta Ho

9%

FS G'

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	8623339.61	7	1231905.66	98.8784912	4.561E-67	2.04786232
Dentro de los grupos	2990107.9	240	12458.7829			
Total	11613447.5	247				Se rechaza Ho

FS G''

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	198396.341	7	28342.3344	24.2698688	7.1437E-25	2.04786232
Dentro de los grupos	280271.818	240	1167.79924			
Total	478668.159	247				Se rechaza Ho

SS G'

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	4088443.7	7	584063.385	118.630713	1.4274E-52	2.08245154
Dentro de los grupos	625268.517	127	4923.37415			
Total	4713712.21	134				Se rechaza Ho

SS G''

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	200701.91	7	28671.7015	161.400062	4.8885E-60	2.08245154
Dentro de los grupos	22560.7478	127	177.643683			
Total	223262.658	134				Se rechaza Ho

RS sin cizalla

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	80158935.5	7	11451276.5	3.61432724	0.00090452	2.0370301
Dentro de los grupos	1058212525	334	3168300.97			
Total	1138371461	341				Se rechaza Ho

RS cizallado

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	184222.356	6	30703.726	5.65396824	1.3944E-05	2.12875051
Dentro de los grupos	1634572.59	301	5430.47373			
Total	1818794.95	307				Se rechaza Ho

TL

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	512226.428	7	73175.2039	143.617139	1.136E-160	2.01592343
Dentro de los grupos	734212.293	1441	509.515818			
Total	1246438.72	1448				Se rechaza Ho

tan δ

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.01264072	7	0.00180582	1.01538277	0.42090447	2.04786232
Dentro de los grupos	0.42683012	240	0.00177846			
Total	0.43947083	247				Se acepta Ho

Anexo D

Zona de viscoelasticidad lineal

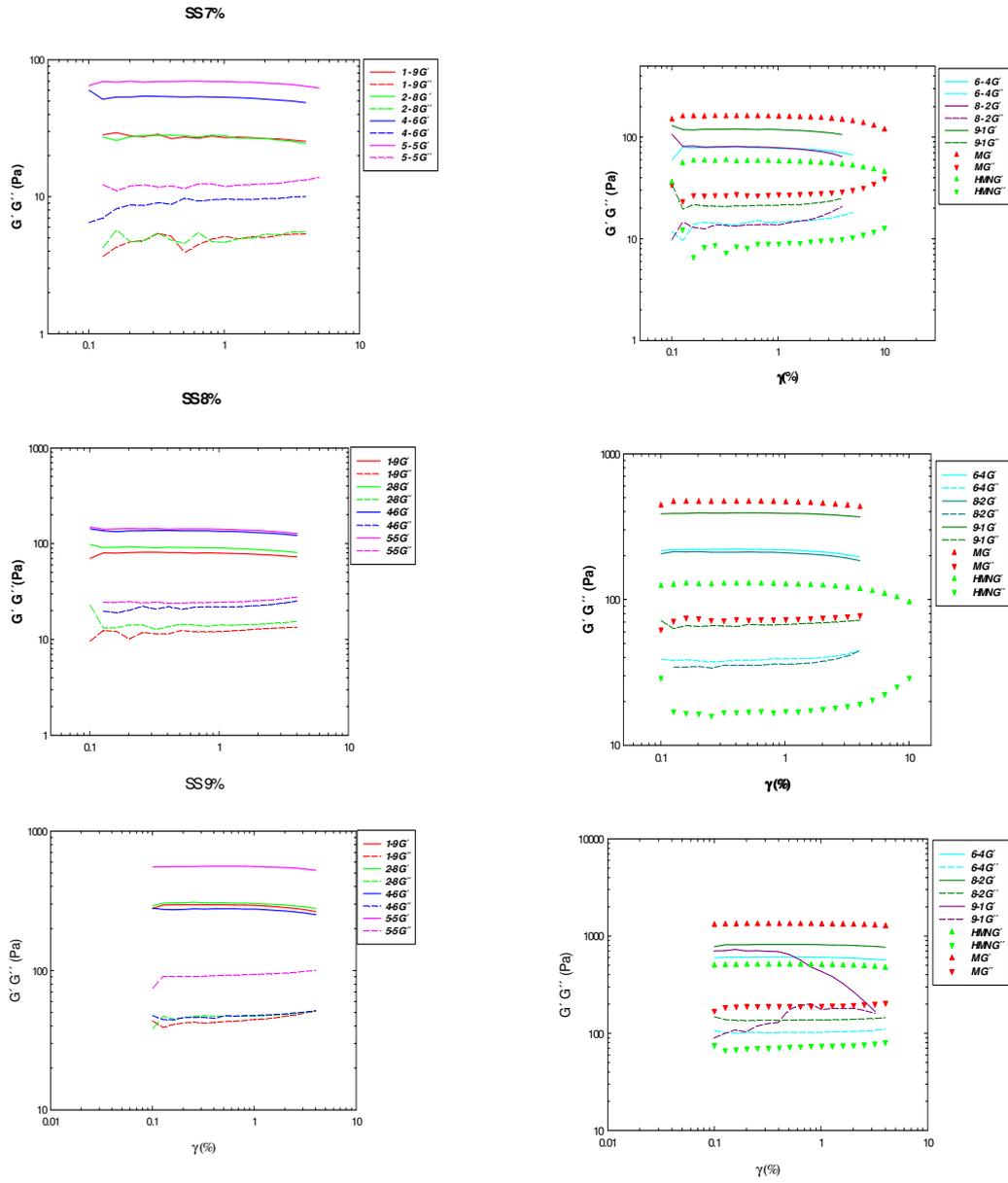


Figura D.1 Barridos de deformación para las papillas elaboradas con la mezcla de Maseca-HMN en diferentes proporciones.