

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LA MEZCLA
PREPARADA CON HARINA DE TRIGO Y AGUA A DIFERENTES
PROPORCIONES Y TIEMPOS DE REPOSO**

ENRIQUE HERNANDEZ RUEDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2015

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LA MEZCLA
PREPARADA CON HARINA DE TRIGO Y AGUA A DIFERENTES
PROPORCIONES Y TIEMPOS DE REPOSO**

ENRIQUE HERNANDEZ RUEDA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
químico**

Director

ARLEX CHAVES GUERRERO

Doctor en Ingeniería Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la vida, la sabiduría y la fortaleza necesaria para lograr mis metas, a mis padres Enrique Hernández Ardila y Esperanza Rueda Cabarique por el apoyo que me han brindado en la vida, especialmente en esta etapa universitaria, a mi esposa Sonia Becerra Mojica, a mi hija Sara Lucia que son mi mayor fuente de alegría, mi motor por quienes lucho y entrego lo mejor día tras día, a mis hermanos por acompañarme.

A la Universidad Industrial de Santander, en especial a la escuela de ingeniería química, por abrirme sus puertas y permitirme ser parte de una comunidad fiel a sus principios y al conocimiento profesional.

Al Doctor Arlex Chaves Guerrero por ser mi guía y mayor colaborador en el desarrollo de este proyecto.

A todos los miembros del cuerpo docente de la escuela de ingeniería química por su apoyo y por el conocimiento que me fue transmitido durante el transcurso de mi carrera y desarrollo de este proyecto.

Finalmente a todos los amigos y compañeros que siempre estuvieron acompañándome y ayudándome en este camino de aprendizaje y crecimiento integral.

A todos que Dios los bendiga.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. ANTECEDENTES	15
2. CONCEPTOS TEÓRICOS	18
2.1. HARINA	18
2.2. CONCEPTOS REOLOGICOS	19
2.2.1. Esfuerzo cortante, σ	19
2.2.2 Modelos generalizados para la descripción reológica de fluidos viscosos no Newtonianos	20
2.2.2.1 Modelos de Ostwald de Waele o Ley de la Potencia	20
2.2.2.2 Modelo de Plástico de Bingham	21
2.2.2.3 Modelo de Herschel-Bulkley	21
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	24
3.1 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA	24
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	24
3.3 METODOLOGÍA	28
3.3.1. Humedad	28
3.3.1.1 Procedimiento	28
3.3.2 Reología	29
3.3.2.1. Equipos, materiales y reactivos.	29
3.3.2.2. Preparación de la muestra	30
3.3.3 Montaje	31

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	33
4.1. HUMEDAD	33
4.2 PRUEBA REOLÓGICA	34
4.3 REGRESION Y ANALISIS DE AJUSTE	40
5. CONCLUSIONES	43
REFERENCIAS	44
BIBLIOGRAFIA	48
ANEXOS	52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Relación entre esfuerzo de corte y la velocidad de deformación de masas de maíz a diferentes tiempos de reposo.	16
Figura 2. Relación entre esfuerzo de corte y la velocidad de corte de masas de harina de yuca precocida y reposo a -20, -5 y 5 °C.	17
Figura 3. Etapas metodológicas del proyecto	24
Figura 44. Esquema de la influencia del tiempo de reposo en el gluten	26
Figura 5. Procedimiento de operación viscosímetro Brookfield dv-III	32
Figura 6. Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación – pasta alimenticia tiempo de reposo de 0 minutos y humedad de 20, 25y 30% p/p.	34
Figura 7. Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación – pasta alimenticia tiempo de reposo de 45 minutos y humedad de 20, 25y 30% p/p.	35
Figura 8. Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación – pasta alimenticia tiempo de reposo de 90 minutos y humedad de 20, 25y 30% p/p	36
Figura 9. Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación – pasta alimenticia tiempo de reposo de 45 minutos y humedad de 25% p/p	37
Figura 10. Interacciones esfuerzo de corte, humedad y tiempo de reposo.	
<i>Statgraphics centurión XVI.</i>	40

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Alimentos con los diferentes tipos de flujo.	22
Tabla 2. Modelos reológicos para fluidos independientes del tiempo.	23
Tabla 3. Factores y niveles de variables manipuladas.	26
Tabla 4. Diseño factorial 3^2 .	27
Tabla 5. Pesos registrados prueba de humedad en harina de trigo a diferentes intervalos de tiempo	33
Tabla 6. Porcentaje de humedad presente en la harina.	33
Tabla 7. Esfuerzo máximo [Pa] para tres repeticiones a diferentes condiciones de humedad y tiempo de reposo.	38
Tabla 8. Análisis de Varianza para esfuerzo cortante - Suma de Cuadrados Tipo III. Statgraphics centurión XVI.	39
Tabla 9. Parámetros del modelo de Herschel-Bulkley para describir la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de deformación.	41
Tabla 10. Análisis de varianza del modelo de Herschel-Bulkley para describir la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de deformación.	41
Tabla 11. Estadísticos del modelo de Herschel-Bulkley para describir la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de deformación.	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. ANOVA	52
ANEXO B. MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA VISCOSIMETRO BROOKFIELD DV-III	54
ANEXO C. NORMAS	57

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO REOLÓGICO DE LA MEZCLA PREPARADA CON HARINA DE TRIGO Y AGUA A DIFERENTES PROPORCIONES Y TIEMPOS DE REPOSO.¹

AUTOR: ENRIQUE HERNANDEZ RUEDA.**

PALABRAS CLAVES: REOLOGÍA, HARINA DE TRIGO, AGUA, HUMEDAD, TIEMPO DE REPOSO, PASTA.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto tiene como objetivo primordial el análisis del comportamiento reológico de la mezcla preparada con harina de trigo y agua al aplicarle un esfuerzo cortante, a través de la elaboración de las curvas características (esfuerzo cortante, velocidad de deformación) en diferentes condiciones de humedad y tiempo de reposo, siguiendo un diseño experimental factorial 3^K de dos factores, tres niveles y tres repeticiones, para ello se utiliza un viscosímetro marca Brookfield referencia dv-III.

El análisis contempla la caracterización del fluido, la significancia de los efectos de cada factor, mediciones a diferentes porcentajes de humedad y tiempos de reposo de la mezcla con el objeto de comprender el comportamiento reológico del mismo, determinando el modelo reológico al cual se ajusta, y calculando los parámetros necesarios para el modelo matemático que describe los datos experimentales, además determinar las condiciones en las cuales tendrán un comportamiento óptimo, para ello se realizó un análisis de varianza (ANOVA).

Al analizar los datos experimentales obtenidos que concluyó que el fluido presentó una tendencia característica del modelo reológico Herschel-Bulkley para los parámetros evaluados en este trabajo, adicionalmente se concluyó que los factores evaluados tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el fluido, teniendo la humedad un efecto más determinante, finalmente se determinó que las condiciones óptimas del fluido están dadas a una humedad de 25%p/p y tiempo de reposo de 45 minutos.

* Trabajo de Investigación

**Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Química. Director: Arlex Chaves Guerrero, Doctor en ingeniería química.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF THE BLEND OF WHEAT FLOUR AND WATER IN DIFFERENT PROPORTIONS AND DWELL TIME.²

AUTHOR: ENRIQUE HERNANDEZ RUEDA.**

KEYWORDS: RHEOLOGY, WHEAT FLOUR, WATER, HUMIDITY, DWELL TIME, DOUGH.

DESCRIPTION:

This project's main objective is the analysis of rheological behavior of the blend of wheat flour and water applying a shear stress, through the elaboration of the characteristic curves (shear stress, shear rate) in different conditions of humidity and dwell time, following a 3k factorial experimental design with two factors, three levels and three replicates, for this analysis a brand Brookfield viscometer DV-III reference is used.

The analysis provides fluid characterization, the significance of the effects of each factor, measurements at different moisture contents and dwell times of the blend in order to understand the rheological behavior thereof, determining which rheologic model adjusts, calculating the necessary parameters for the mathematical model describing the experimental data, and determine the conditions with optimal behavior, for this purpose was performed an analysis of variance (ANOVA).

By analyzing the experimental data obtained it was possible to conclude that the test fluid presented a characteristic behavior of the rheological model Herschel - Bulkley in the ranges of values evaluated in this research, also it was concluded that the effects of the evaluated factors are statistically significant on the test fluid, considering that moisture has a more decisive effect, finally it was determined that the optimum test fluid conditions are given to a humidity of 25 % w / w and a dwell time of 45 minutes.

* Research work

**Facultad de ingenierías Físico-Químicas. Escuela de ingeniería Química. Director: Arlex Chaves Guerrero, Doctor en ingeniería química.

INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria en Colombia ha buscado en los últimos años la tecnificación de los procesos productivos por lo cual se hace necesario invertir en estudios que conlleven a un conocimiento mayor de los productos con los cuales se trabaja actualmente; todo esto con el fin de desarrollar tecnologías que solventen sus necesidades, y que a su vez cumplan con los más altos estándares de calidad y seguridad industrial en Colombia. Lo anterior evidencia una clara necesidad de realizar estudios que permitan conocer y describir a profundidad las características y comportamientos de las materias primas, los productos semielaborados y elaborados.

Lamentablemente, en el momento de implementar dichas tecnologías, se presentan dos problemáticas claramente identificables, una gran parte de dichas tecnologías son importadas, lo que ocasiona grandes costos tanto de los equipos como de transporte, de tal modo que a pequeños y medianos productores les resulta casi imposible adquirirlos. Por otro lado las pocas tecnologías que se producen en el país son mayormente elaboradas por personas no calificadas, dejando como resultado productos de menor calidad que en muchas ocasiones no se ajustan total o parcialmente a las necesidades específicas del productor, sumado a esto muchos no cumplen con los mínimos estándares de seguridad e higiene ocasionando múltiples riesgos al momento de su implementación.

Teniendo en cuenta las cifras de consumo de pastas alimenticias en Colombia que revela Euromonitor Internacional [1] a cerca de los países latinoamericanos, se percibe estabilidad en el mercado, donde en 2005 el consumo era de 9 kilos por persona y en el 2010 bajó levemente, a 8,8 kilos. En total, el 2013 se consumieron 119,200 toneladas de pastas alimenticias, por valor de 217 millones de dólares. Y

si bien los volúmenes de venta del negocio de pastas alimenticias en Colombia disminuyen levemente, el incremento en los precios y las innovaciones, entre otros aspectos, favorecen al crecimiento del mercado. Según el informe anual del Grupo Nutresa [2], aunque en el año 2013 las ventas de la categoría bajaron 0,5%, los precios subieron 2,6 por ciento logrando así un incremento del 2,1%, con 377.434 millones de pesos.

Queda claro que tanto la industria dedicada a la producción de pasta alimenticia, como los diferentes sectores que usan este producto como materia prima para sus productos elaborados hacen parte importante de la economía del país, quedando en evidencia una vez más la importancia de ahondar en estudios que permitan conocer plenamente las características del producto.

Las necesidades de conocer el comportamiento reológico en la industria de las pastas alimenticias son muchas, entre otras se pueden mencionar el diseño de tuberías, selección de bombas, diseño y análisis de equipos de extrusión, selección y operación de equipos de mezclado, diseño y operación de intercambiadores de calor, procesos en los que se realizan recubrimientos, selección de envases [10]. Sin embargo, no se cuenta con la información reológica suficiente y precisa para cada tipo de producto.

Desde este punto de vista, el objetivo de este trabajo de grado es determinar el tipo de comportamiento reológico de la mezclas de harina de trigo y agua en las proporciones estándares del mercado nacional a diferentes valores de humedad y tiempo de reposo.

1. ANTECEDENTES

La masa de un producto amiláceo es un sistema complejo e inestable que sufre modificaciones continuas en sus características físicas por medio de fuerzas físicas, químicas y biológicas [3]. Cuando la masa se somete a fuerzas externas, los entrecruzamientos físicos y los puentes químicos débiles que sostienen los constituyentes de la masa se pueden romper y reorganizar, permitiendo su relajamiento, parcial o completo. La base para las interacciones almidón-almidón se debe a las fuerzas de Van der Waals y a los puentes de hidrógeno [4].

Las primeras evaluaciones sistemáticas de las propiedades reológicas fundamentales de la masa de trigo fueron realizadas durante los años treinta [5]. En estas se relacionan las propiedades reológicas de la masa con sus propiedades estructurales; sin embargo, estas investigaciones no han sido fáciles de efectuar debido a la estructura compleja de la masa que involucra diferentes componentes y al gran número de factores que influyen en su comportamiento.

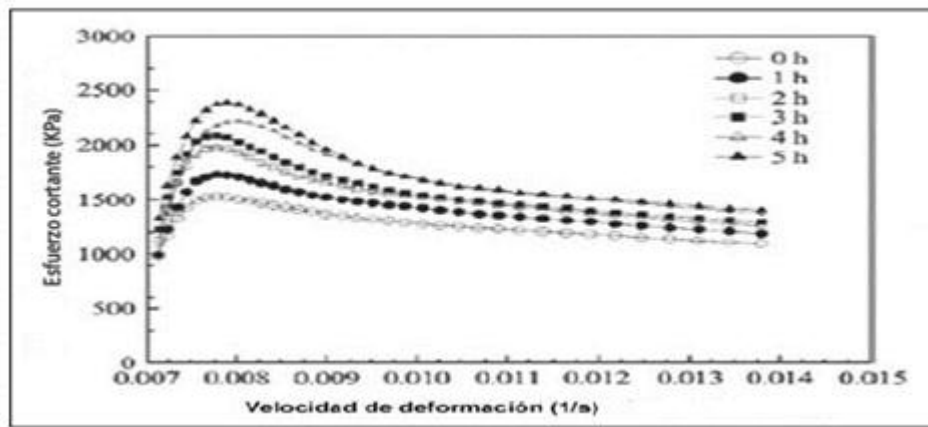
Las propiedades reológicas de la masa de trigo y su relación con la composición fue estudiado por Berland y Launay [5] utilizando la regla de Cox-Merz modificada. Los resultados de la experimentación demostraron que la humedad tiene efectos plastificantes, cambiando los valores de los parámetros reológicos pero sin modificar su estructura. Wikstrom [6] estudió el flujo extensional biaxial de masas de trigo para relacionar las propiedades reológicas de la masa y el gluten con su procesamiento observando una amplia variación en los resultados de la viscosidad de las masas con diferentes cultivares de trigo.

La influencia de algunos parámetros de mezcla en las propiedades reológicas de las masas de trigo y su relación con las propiedades micro y macroestructurales

fue investigado por Létang [7], verificaron que el almidón presente en la masa incrementa la rigidez del material.

Limanond estudio la viscosidad y el tiempo de reposo a temperatura ambiente (tiempos de reposo: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 h) (ver figura 1) sobre la estabilidad de las masas de maíz, utilizadas en la elaboración de tortillas y que posee características similares al producto de estudio [21] dado que son materiales viscoelásticos y que sus propiedades reológicas dependen de sus cadenas de proteínas. Las masas de maíz mostraron un comportamiento reológico de tipo adelgazante [23].

Figura 1. Relación entre esfuerzo de corte y la velocidad de deformación de masas de maíz a diferentes tiempos de reposo.



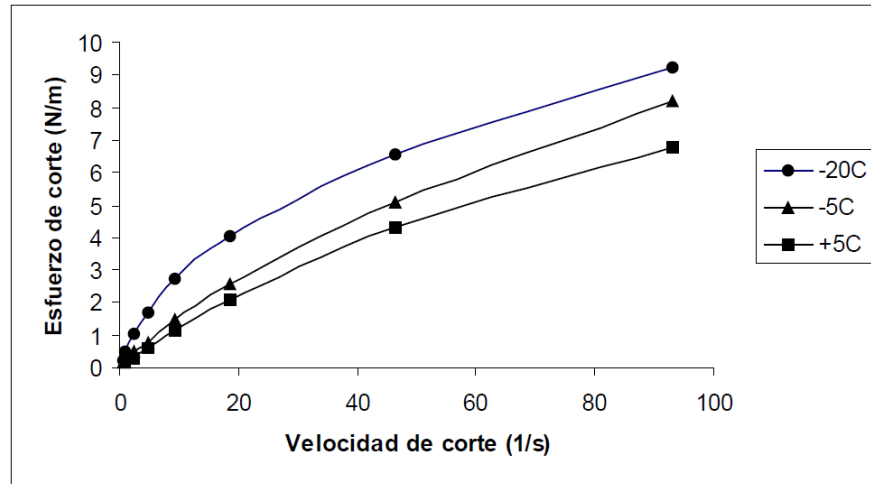
Fuente: Limanond, 1999

Sandoval y Quintero [24] investigaron el efecto de las condiciones de proceso en el comportamiento reológico de harinas de yuca precocidas. La inclusión de una etapa de reposo a baja temperatura de la yuca precocida influyó ampliamente en las características de la harina de yuca obtenida (ver figura 2).

Dado que el comportamiento de la masa depende múltiples variables de operación, constituyentes y de las posibles interacción entre ellos, y que una clara comprensión de las propiedades reológicas de un alimento es fundamental en la

investigación y desarrollo de nuevos productos, el diseño de equipos, el mejoramiento de procesos, y el control de calidad de materias primas, productos intermedios y terminados [22].

Figura 2. Relación entre esfuerzo de corte y la velocidad de corte de masas de harina de yuca precocida y reposo a -20, -5 y 5 °C.



Fuente: Sandoval y Quintero, 2006

2. CONCEPTOS TEÓRICOS

2.1. HARINA

La Norma Técnica Colombiana NTC 267 [8] define La harina de trigo como ***“Principal producto obtenido de la molienda y cernido del endospermo de granos de trigo común *Triticum aestivum* L., o trigo ramificado, *Triticum compactum* Host., o mezcla de ellos, con el fin de obtener un tamaño de partícula determinado”*** [8]. Existen diversas variedades de trigo y dependiendo de su contenido de proteínas, gluten, época de cosecha y grado de extracción, se obtiene harinas con usos diferentes: las que contienen alto porcentaje de sémola se utilizan para la producción de pastas.

En cuanto a su composición la harina de trigo posee componentes ideales para la formación de masas (proteína - gluten), el gluten es una proteína compleja que se forma por hidratación e hinchamiento de proteínas de la harina y le otorga a la pasta su elasticidad y consistencia [9]. La cantidad de proteína es muy diferente en diversos tipos de harina. El tipo de trigo, época de cosecha y grado de extracción tiene especial influencia sobre el contenido de proteínas y con ello sobre la cantidad de gluten. A las harinas que contienen menos proteína – gluten se las llama pobres en gluten, en cambio, ricas en gluten son aquellas cuyo contenido de gluten húmedo es superior al 30 %. En Colombia este producto es reglamentado por el decreto número 1944 de 1996, estableciendo las condiciones de comercialización, rotulado, vigilancia y control.

2.2. CONCEPTOS REOLOGICOS

La reología de fluidos estudia la relación que existe entre la fuerza motriz que provoca el movimiento (esfuerzo cortante, σ) y la velocidad de deformación que se origina (el gradiente del perfil de velocidades, $\dot{\gamma}$). El comportamiento reológico de los alimentos es muy complejo y a la vez desempeña un papel muy importante en muchos sistemas de proceso [10].

2.2.1. Esfuerzo cortante, σ . Es definido como la fuerza por unidad de área ejercida en forma tangencial y es conocida también como esfuerzo cortante. Desde el punto de vista matemático está definida como:

$$\tau_{yx} = \lim_{\delta A_y \rightarrow 0} \frac{\delta v_x}{\delta A_y} \quad (\text{Ecuación 1.})$$

Los esfuerzos tiene unidades [Nm^{-2}] y se diferencian de la presión termodinámica en que no son isotrópicos lo que les da un carácter de tensor. Para el caso de un fluido Newtoniano e incompresible, la relación constitutiva para el tensor de esfuerzos es:

$$\tau = \mu[\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^t] = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{Ecuación 2.})$$

Donde μ es la viscosidad dinámica [$\text{Pa}\cdot\text{s}$] y $\dot{\gamma}$ es el tensor de razón de deformación y tiene unidades de [$1/\text{s}$]. La viscosidad puede ser interpretada desde un punto de vista molecular como un coeficiente fenomenológico que cuantifica el transporte de momento lineal de zonas de alta velocidad a zonas de baja velocidad en un fluido.

Sin embargo, la Ley de viscosidad de Newton no describe el comportamiento reológico de la mayoría de los fluidos, en especial cuando el peso molecular del fluido es alto, como en líquidos poliméricos.

2.2.2 Modelos generalizados para la descripción reológica de fluidos viscosos no Newtonianos. Como se mencionó anteriormente, los fluidos poliméricos al igual que muchos otros de la industria de alimentos no pueden ser descritos por la relación entre esfuerzos y razón de deformación plantada por la ley de viscosidad de Newton. Estos básicamente los podemos dividir en dos grandes categorías: 1) fluidos para los cuales no hay una relación lineal entre la razón de deformación y esfuerzos y que se caracterizan por un comportamiento exclusivamente viscoso. 2) fluidos con comportamiento viscoso y de sólido, conocidos como viscoelásticos y que presentan efectos de memoria. El comportamiento reológico de los primeros (Viscosos no lineales) típicamente son representados por un modelo generalizado de Newton dado por la expresión:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (\text{Ecuación 3.})$$

donde η es la viscosidad aparente y depende de la magnitud del tensor de razón de deformación. Existe una gran cantidad de modelos empíricos para la viscosidad aparente, sin embargo los más conocidos son:

2.2.2.1 Modelos de Ostwald de Waele o Ley de la Potencia: Este simple empirismo expresado por la Ecuación 4, permite describir el comportamiento reológico de fluidos con comportamiento pseudoplástico, dilatantes y newtonianos dependiendo del valor de n según se especifica en la Tabla 1, y es dado por la expresión:

$$\eta = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (\text{Ecuación 4.})$$

En esta expresión m es el “índice de consistencia” mientras que n es el “índice de ley de potencia”. Ambos parámetros son empíricos y no tienen significado físico. La principal desventaja de este modelo es que no se ajusta bien a los datos experimentales en las zonas de muy bajas y altas razones de deformación.

2.2.2.2 Modelo de Plástico de Bingham: Los fluidos descritos por este modelo se caracterizan por no fluir hasta que el esfuerzo aplicado no iguale o supere un valor de esfuerzo crítico conocido con el nombre de “yield stress” τ_0 . Superado este valor el fluido fluye pero con una zona del flujo en forma de tapón (“Plug Flow”). En este caso el modelo para la viscosidad aparente es:

$$\begin{cases} \eta = \infty & \text{when } \tau \leq \tau_0 \\ \eta = \mu_0 + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} & \text{when } \tau \geq \tau_0 \end{cases} \quad (\text{Ecuación 5})$$

En la anterior ecuación μ_0 es un parámetro con unidades de viscosidad.

2.2.2.3 Modelo de Herschel-Bulkley: Los plásticos generales o de Herschel-Bulkley representan un comportamiento más general que engloba al de los dos anteriores modelos y tiene una

$$\tau = \tau_0 + m \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{Ecuación 6})$$

A continuación en la tabla 1 muestran algunos fluidos de la industria de alimentos con valores de m y n que caracterizan su comportamiento reológico según los modelos generalizados.

Tabla 1. Alimentos con los diferentes tipos de flujo.

Fluido	τ_0	m	n	Ejemplos
Herschel-Bulkley	> 0	> 0	$0 < n < \infty$	Pasta de pescado, pasta de uvas.
Newtoniano	> 0	0	1	Agua, jugo de fruta, leche, miel, aceite vegetal.
Seudoplastico	> 0	0	$0 < n < 1$	Puré de manzanas, puré de banano.
Dilatantes	> 0	0	$1 < n < \infty$	Algunos tipos de miel, solución de almidón de maíz crudo al 40%
Plástico de Bingham	> 0	> 0	1	Crema dental, pasta de tomate.

Sin embargo los anteriores modelos propuestos no son suficientes para describir la amplia gama de comportamiento reológicos por lo que se han propuesto otros modelos más generales que reproducen el comportamiento de muchos alimentos concretos. Algunos de estos modelos son presentados en la Tabla 2 [21].

Tabla 2. Modelos reológicos para fluidos independientes del tiempo.

Model (Source)	Equation*
Casson (Casson, 1959)	$\sigma^{0.5} = (\sigma_o)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{0.5}$
Modified Casson (Mizrahi and Berk, 1972)	$\sigma^{0.5} = (\sigma_o)^{0.5} + K_1(\dot{\gamma})^{n_1}$
Ellis (Ellis, 1927)	$\dot{\gamma} = K_1\sigma + K_2(\sigma)^{n_1}$
Generalized Herschel-Bulkley (Ofoli et al., 1987)	$\sigma^{n_1} = (\sigma_o)^{n_1} + K_1(\dot{\gamma})^{n_2}$
Vocadlo (Parzonka and Vocadlo, 1968)	$\sigma = \left((\sigma_o)^{1/n_1} + K_1\dot{\gamma} \right)^{n_1}$
Power Series (Whorlow, 1992)	$\dot{\gamma} = K_1\sigma + K_2(\sigma)^3 + K_3(\sigma)^5 \dots$ $\sigma = K_1\dot{\gamma} + K_2(\dot{\gamma})^3 + K_3(\dot{\gamma})^5 \dots$
Carreau (Carreau, 1968)	$\eta = \eta_\infty + (\eta_o - \eta_\infty) \left[1 + (K_1\dot{\gamma})^2 \right]^{(a-1)/2}$
Cross (Cross, 1965)	$\eta = \eta_\infty + \frac{\eta_o - \eta_\infty}{1 + K_1(\dot{\gamma})^n}$
Van Wazer (Van Wazer, 1963)	$\eta = \frac{\eta_o - \eta_\infty}{1 + K_1\dot{\gamma} + K_2(\dot{\gamma})^{n_1}} + \eta_\infty$
Powell-Eyring (Powell and Eyring, 1944)	$\sigma = K_1\dot{\gamma} + \left(\frac{1}{K_2} \right) \sinh^{-1}(K_3\dot{\gamma})$
Reiner-Philippoff (Philippoff, 1935)	$\sigma = \left(\eta_\infty + \frac{\eta_o - \eta_\infty}{1 + ((\sigma)^2/K_1)} \right) \dot{\gamma}$

* K_1, K_2, K_3 and n_1, n_2 are arbitrary constants and power indices, respectively, determined from experimental data.

Fuente: Rheological methods in food process engineering, 2 ed., Ed freeman press, USA, 1992, p. 24.

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

Las diferentes etapas metodológicas utilizadas para el desarrollo del proyecto son descritas en la figura 3.

Figura 3. Etapas metodológicas del proyecto

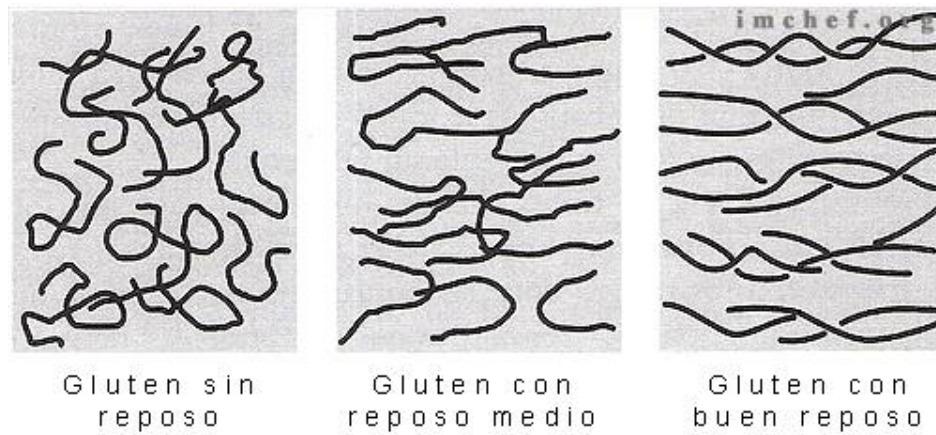


3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El esfuerzo cortante es el parámetro utilizado en este proyecto para determinar el comportamiento reológico de las pastas de harina de trigo, y así evaluar la influencia que tiene la velocidad de deformación en las características del material producido. También se hizo énfasis en la determinación del esfuerzo de fluencia puesto que dicho valor es de gran relevancia al momento de diseñar equipos como extrusoras, mezcladoras y laminadoras. Por otro lado, se conoce que el tiempo de reposo tiene influencia sobre la disposición de las moléculas de gluten lo cual tiene un gran impacto sobre el comportamiento reológico de la masa (ver

figura 4). En este caso, el tiempo de reposo debe entenderse como el lapso de tiempo en la cual no se manipula la masa siendo esto importante pues el gluten se desarrolla. En este sentido Aban Zaidel *et al.*, [26] mencionan que la masa está conformada por largas moléculas lineales de gluten interconectadas entre sí a través de enlaces de bisulfuro y mezclada con fibrillas de gluten hidratado y gránulos de almidón. Estas largas moléculas de gluten se encuentran dobladas y en forma aleatoria. Una vez la masa se empieza a mezclar más proteínas se hidratan y las cadenas se empiezan a desdoblar debido a los esfuerzos que es sometida durante el proceso de mezclado. Por tanto, un adecuado tiempo de mezclado genera masa con una resistencia adecuada y una máxima resistencia a la extensión y una máxima fuerza de restauración después de la deformación. Por otro lado el agua, es la responsable por la hidratación del gluten y la formación de cadenas largas por promoción de enlaces con bisulfuro. Por tal razón mucha agua genera masas en forma de slurry; mientras que poca agua genera masa muy polvorienta con poca cohesión lo que genera problemas durante su procesamiento. Debido a lo anterior, en este trabajo se adoptaron como variables de entrada, el contenido de humedad, el tiempo de reposo y la velocidad de deformación y como variable de respuesta el esfuerzo cortante. De las variables anteriormente mencionadas se manipularán la humedad y el tiempo de reposo siendo parámetros que usualmente se manipulan en la industria y que pueden influir con mayor relevancia sobre la variable de interés en nuestro estudio, el esfuerzo cortante, y con especial atención el esfuerzo cortante máximo necesario para deformar la mezcla.

Figura 44. Esquema de la influencia del tiempo de reposo en el gluten



Para tal fin se toman niveles comúnmente utilizados en la industria dedicada a este tipo de producto bajo los siguientes criterios. Se estudió una serie de pastas alimenticias frescas, esto es pastas con un contenido de humedad en el rango del 13 al 35% en peso [11], teniendo en cuenta que las pastas alimenticias con contenidos de humedad inferiores a este rango no son factibles de medición, y que aquellas con contenido de humedad superiores a este rango se comportaran como suspensiones de harina de trigo y agua, las cuales no cumple con las características necesaria para el mercado, tales como elasticidad, resistencia, entre otras.

Tabla 3. Factores y niveles de variables manipuladas.

FACTOR	NIVELES			UNIDAD
Humedad (A)	20	25	30	% p/p
Tiempo de reposo(B)	0	45	90	minutos

Ya que se desean estudiar dos factores con tres niveles cada uno (véase tabla 3), se tomó un diseño experimental factorial 3^k , y aunque al aplicar el diseño factorial 3^k requiere mayor cantidad de tratamientos que otros tipos de diseños, es ideal

cuando se tiene pocos factores, tres en este caso, y el diseño experimental 3^k es la alternativa más viable, de manera específica por dos razones [12]:

- Los factores son discretos.
- Permite de ser necesario evaluar los efectos no solo lineales sino también cuadráticos de los factores sobre la variable estudiada.

Este diseño consiste en 3^2 tratamientos diferentes, que corresponden a todas las posibles maneras en que se pueden combinar dos factores en tres niveles cada uno (véase tabla 4) y con $n=3$ réplicas.

Tabla 4. Diseño factorial 3^2 .

TRATAMIENTO	HUMEDAD(%p/ p)	TIEMPO DE REPOSO (minutos)
1	20	0
2	25	0
3	30	0
4	20	45
5	25	45
6	30	45
7	20	90
8	25	90
9	30	90

Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) [12], para ello se consideró el efecto individual que puede tener cada factor y la interacción entre ellos (ver anexo 1). Como criterio de rechazo o aprobación de hipótesis se utilizó la comparación del estadístico de prueba F_0 contra un número crítico de la tablas de distribución F (valores-P), con $\alpha=0.05$, por lo cual si $F_0 > F$ se rechaza la hipótesis, con lo cual se concluiría que si hay efecto de este factor en el proceso. Por lo contrario si $F_0 < F$

se aprueba la hipótesis, con lo cual se concluiría que no hay efecto de este factor en el proceso.

Una vez efectuados los cálculos para corroborar las hipótesis éstos fueron comprobados en el software *Statgraphics centurión XVI* [13], en cual también se analizaron otros aspectos adicionales como el efecto cuadrático A^2 , además de trazar los gráficos de los efectos principales y los efectos de las interacciones, para lo cual se realizó un análisis de regresiones con el objetivo de modelar en forma matemática el comportamiento de la variable de respuesta en función de las variables independientes.

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1. Humedad. Ya que un factor a evaluar en este trabajo es la humedad presente en la mezcla, se hace imprescindible garantizar el contenido real de humedad, por lo cual se debe establecer el valor de la humedad presente inicialmente en la harina de trigo. Para ello se hace uso de la norma técnica colombiana aplicable a esta área, NTC 282 (segunda edición) [14], la cual concierne a los métodos de ensayo para valorar las características de la harina de trigo y cita de la siguiente manera.

3.3.1.1 Procedimiento. Se pesan 5 g de la muestra en una cápsula metálica o de porcelana provista de tapa previamente tarada. Se introduce la cápsula con la muestra junto con la tapa en la estufa y se calienta entre 100 °C y 110 °C durante 5 h. Terminado este período, se ajusta la tapa a la cápsula se deja enfriar en el desecador y se pesa a la temperatura ambiente. Se repite la operación hasta que en 2 pesadas consecutivas no se obtenga una diferencia mayor de 0,001 g. La pérdida de masa se considera como humedad. La humedad expresada en porcentaje en masa se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Humedad} = \frac{(A - B)}{M} \times 100$$

(Ecuacion 7)

Donde:

A = Masa de la cápsula más la muestra húmeda, en gramos.

B = Masa de la cápsula más la muestra seca, en gramos.

M = Masa inicial de la muestra, en gramos.

adicionalmente se desea garantizar que la muestras preparadas cumplan con las condiciones de humedad propuestas para los ensayos, para ello se llevó a cabo un estudio de humedad en pasta alimenticia según lo determina la norma técnica colombiana 529 (NTC 529 tercera edición) [15].

3.3.2 Reología. Ya que no existe una norma técnica colombiana (NTC) que se ajuste precisamente a este estudio, el método utilizado es una variación de la norma AOAC 935.35 [16] para un viscosímetro Brookfield DV-III (*Brookfield Engineering Laboratories*, Stoughton, USA) con las agujas No. 25.

3.3.2.1. Equipos, materiales y reactivos.

- Viscosímetro Brookfield dv-III.
- Balanza analítica.
- Pipetas volumétricas.
- Tamiz con malla 100 µm.
- Recipientes herméticos.
- Ácido láctico 1N.
- Agua destilada.
- Harina de trigo comercial.

- Sal común.
- materia grasa (preferentemente mantequilla industrial).

3.3.2.2. Preparación de la muestra. Aunque el examen no sea destructivo, no es práctico examinar todo un lote de fabricación; por tanto, se definió una muestra la cual cumplió con una característica de representatividad, es decir, en la muestra estuvieron representadas todas las características presentes en el producto objeto de nuestro estudio, además cumplió con la cantidad óptima de muestra para que su representatividad estuviese garantizada [17].

Para el caso de este estudio, se debe seguir el procedimiento marcado en el cual se realizan 3 muestras diferentes y a su vez cada una se divide en tres partes las cuales se debe dejar en reposo durante periodos de 30, 60 y 90 minutos. La harina se debe pasar por una malla de 100 μm para normalizar el tamaño de la muestra [18].

El procedimiento general se lleva a cabo para las tres muestras como se presenta a continuación:

- Inicialmente se miden las cantidades necesarias de harina (200 g), materia grasa (30 g) que sea preferentemente mantequilla industrial, sal (4 g) y agua destilada. Para las tres muestras sólo varía el contenido de agua: 58,5 g, 78 g y 100,3 g generando humedades del 20, 25 y 30 % p/p respectivamente.
- Mezclar manualmente las cantidades antes descritas, hasta obtener una mezcla homogénea.
- La cantidad total de la mezcla se divide en tres partes iguales, y se conservan por separado en recipientes limpios, secos, con un cierre asegurando su hermeticidad. Se etiqueta cada recipiente con todos los detalles sobre su composición, cantidad, fecha, y condiciones de conservación.

Al ser un alimento húmedo la muestra se debe guardar en frascos limpios y secos, que deben quedar herméticos para prevenir pérdidas de humedad. Después, se almacena en condiciones necesarias para evitar su deterioro o cualquier cambio de composición, ya sea de naturaleza enzimática, oxidativa o por contaminación. Todo esto con el fin de evitar la pérdida de componentes volátiles y la absorción de humedad o de sustancias que puedan alterar su composición.

Para dar cumplimiento a la norma AOAC 935.35, se debe adicionar 1 mL de ácido láctico 1N [16] justo en el momento de realizar cada prueba y una vez pasados sus respectivos tiempos de reposo, se debe mezclar nuevamente hasta conseguir una mezcla homogénea, esto con el fin de producir un descenso en el pH de la muestra y reducir cualquier posible actividad enzimática al momento de la prueba que pueda alterar los resultados.

3.3.3 Montaje. Para el montaje de la prueba se llevó a cabo el procedimiento de operación descrito por Alejandro Regalado Méndez y Octavio Antonio Noriega Ramos [19] (véase figura 5) para el viscosímetro Brookfield DV-III, como se describe a continuación: inicialmente se realiza el montaje del viscosímetro Brookfield dv-III, se procede al encendido e inserción de aguja y luego a la inmersión de la misma a la muestra respectiva. El paso a seguir es programar la prueba ingresando los parámetros establecidos para la muestra en estudio y finalmente se registran los datos generados para la recolección y almacenamiento final de los datos a través de una interfaz, para su posterior análisis (anexo B).

Figura 5. Procedimiento de operación viscosímetro Brookfield dv-III



4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. HUMEDAD

La tabla 5 presenta los pesos obtenidos para tres muestras de la harina de trigo utilizada para este estudio a fin de evaluar la humedad inicial presente en ella según lo estipulado en la norma NTC 282 en una estufa a 100 °C.

Tabla 5. Pesos registrados prueba de humedad en harina de trigo a diferentes intervalos de tiempo

	inicial	t= 5 horas	t= 10 horas	t= 15 horas
Muestra 1	5,02	4,91	4,59	4,57
Muestra 2	5,06	4,93	4,69	4,68
Muestra 3	5,00	4,79	4,62	4,62

Con lo cual dada la ecuación 7 se procede determinar el contenido humedad presente en la harina de trigo (véase tabla 6).

Tabla 6. Porcentaje de humedad presente en la harina.

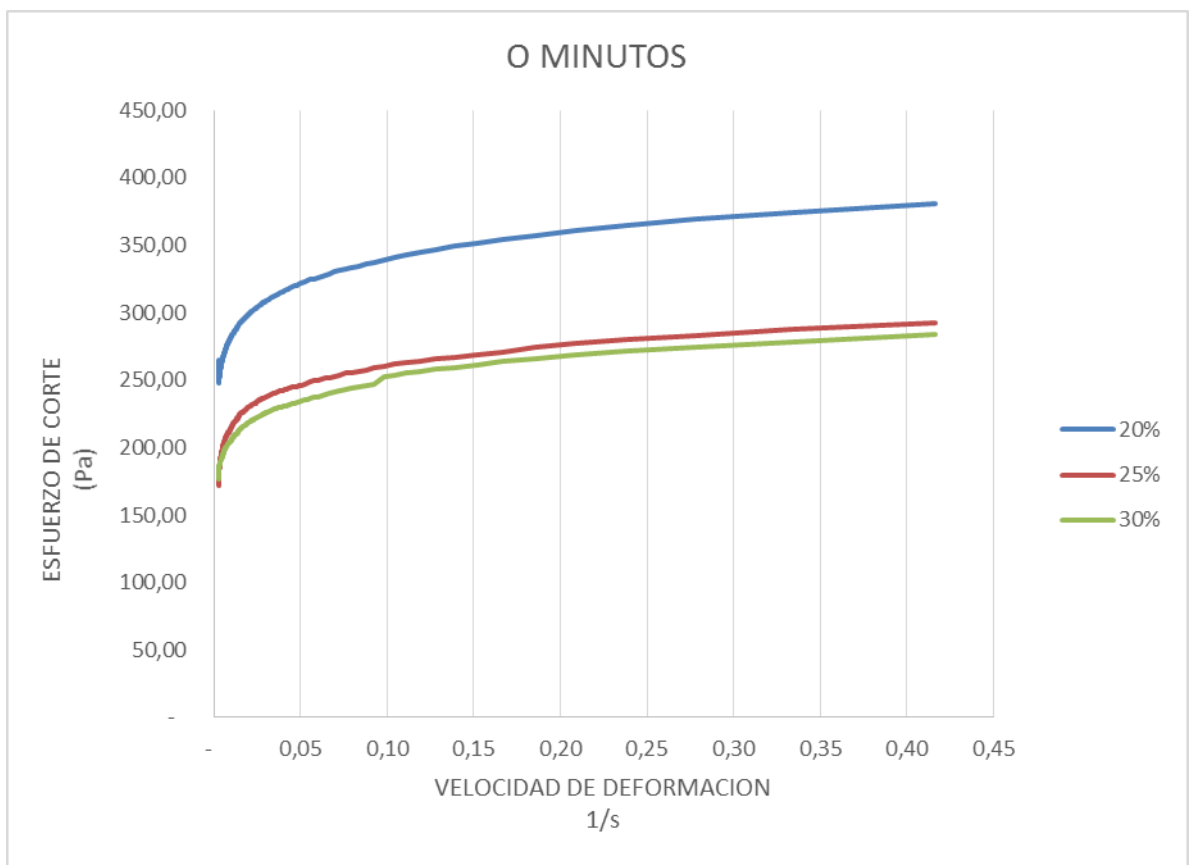
	Humedad (%)	Humedad promedio (%)
Muestra 1	8,96	8,02
Muestra 2	7,51	
Muestra 3	7,6	

Este valor deberá ser tomado en cuenta para determinar el contenido total de humedad presente en la pasta alimenticia.

4.2 PRUEBA REOLÓGICA

La figura 6 muestra los promedios de los resultados obtenidos (tres repeticiones) para tres mediciones de la muestra sin tiempo de reposo y una humedad de 20%, 25% y 30% respectivamente.

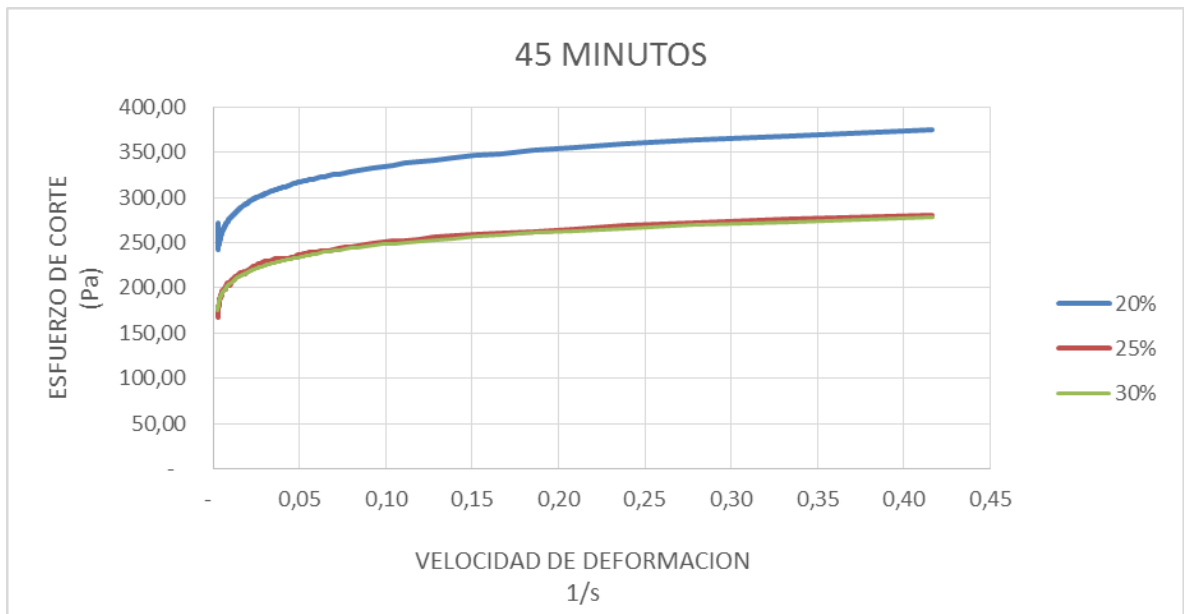
Figura 6. Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación – pasta alimenticia tiempo de reposo de 0 minutos y humedad de 20, 25y 30% p/p.



Fuente: Microsoft Excel - Enrique Hernandez Rueda.

La figura 7 muestra los promedios de los resultados obtenidos (tres repeticiones) para tres mediciones de la muestra a 45 minutos de tiempo de reposo y una humedad de 20%, 25% y 30% respectivamente.

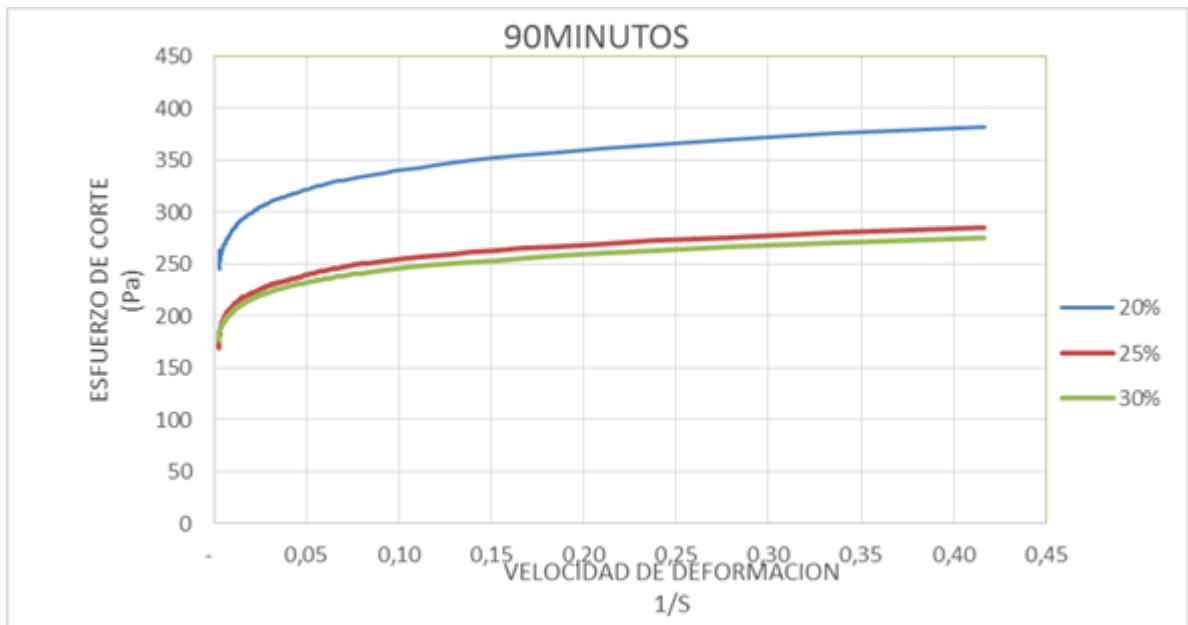
Figura 7. Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación – pasta alimenticia tiempo de reposo de 45 minutos y humedad de 20, 25y 30% p/p.



Fuente: Microsoft Excel - Enrique Hernandez Rueda.

La figura 8 muestra los promedios de los resultados obtenidos (tres repeticiones) para tres mediciones de la muestra a 90 minutos de tiempo de reposo y una humedad de 20%, 25% y 30% respectivamente.

Figura 8. Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación – pasta alimenticia tiempo de reposo de 90 minutos y humedad de 20, 25y 30% p/p



Fuente: Microsoft Excel - Enrique Hernandez Rueda.

Al analizar el comportamiento representado en las figuras 6, 7, y 8 se puede observar una tendencia en el comportamiento de cada medición independientemente de las condiciones de humedad y tiempo de reposo, en la cual se evidencia la presencia de un esfuerzo inicial de fluencia seguido por un incremento del esfuerzo de corte para velocidades de deformación bajas, seguido por un estado más estable para los velocidades de deformación más altas y rondando valores casi constantes con pequeñas variaciones, siendo esto un aspecto de gran relevancia para el estudio, puesto que una vez se alcanzan velocidades de deformación suficientemente altas, el esfuerzo necesario para deformar el fluido es en promedio constante facilitando grandemente el futuro diseño de equipos como extrusoras y laminadoras.

Está claro que dicho comportamiento es característico para el fluido de estudio en las condiciones contempladas en las pruebas, y tal comportamiento es

característico de los fluidos no newtonianos que se ajustan al modelo Herschel-Bulkley, siendo este el modelo que proporciona un mayor ajuste a la mayoría de los alimentos, y que se caracteriza por la presencia del umbral de fluencia que representa el esfuerzo finito requerido para impulsar el flujo y bajo el cual el fluido presenta características de sólido, siendo esta una característica muy importante para el diseño de los procesos.

Adicionalmente al observar la variabilidad del esfuerzo cortante (ver figura 9) podemos ver pequeños incrementos y descensos en el esfuerzo de corte para pequeños cambios en la velocidad de deformación los cual hace a pensar que este fluido tiende a presentar el fenómeno conocido como efecto stick-slip (pegado-deslizado), el cual cobra gran importancia en algunos procesos como la extrusión [20].

Figura 9. Esfuerzo cortante vs velocidad de deformación – pasta alimenticia tiempo de reposo de 45 minutos y humedad de 25% p/p



Fuente: Microsoft Excel - Enrique Hernandez Rueda.

Los valores registrados para los valores de esfuerzos máximos se muestran en la tabla 7, valores con los cuales se realizó los respectivos análisis de variable (ANOVA) y con los que se evaluó las hipótesis de la influencia de la humedad y el tiempo de reposo y la significancia de las interacciones de ambos parámetros sobre el comportamiento de la muestra. Las pruebas-F en la tabla ANOVA permiten identificar los factores significativos.

Tabla 7. Esfuerzo máximo [Pa] para tres repeticiones a diferentes condiciones de humedad y tiempo de reposo.

		TIEMPO DE REPOSO (minutos)		
		0	45	90
HUMEDAD (%p/p)	20	381,69	374,04	380,84
		377,82	376,90	384,00
		384,39	374,20	381,55
	25	304,62	275,43	282,48
		290,84	287,29	287,80
		286,07	281,36	284,81
	30	291,59	277,45	274,32
		277,92	278,91	284,70
		284,76	278,18	268,67

La tabla 8 (ANOVA) descompone la variabilidad del esfuerzo cortante en contribuciones debidas a los factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores.

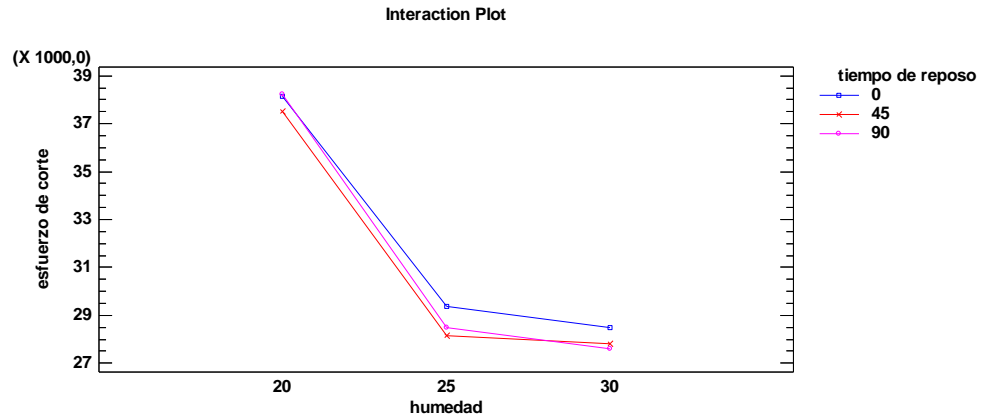
Tabla 8. Análisis de Varianza para esfuerzo cortante - Suma de Cuadrados Tipo III. Statgraphics centurión XVI.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:humedad	5,58888E5	2	2,79444E5	950,31	0,0000
B:tiempo de reposo	3,32093E3	2	1,66047E3	5,65	0,0125
INTERACCIONES					
AB	1,31814E3	4	329,535	1,12	0,3777
RESIDUOS	5,29299E3	18	294,055		
TOTAL (CORREGIDO)	5,68821E5	26			

Puesto que los valores-P para humedad y tiempo de reposo son menores que 0,05, estos factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el esfuerzo de corte con un 95,0% de nivel de confianza, teniendo la humedad un efecto mucho más determinante. Puesto que el valor-P para la interacción de la humedad y el tiempo de reposo no es inferior a 0,05 se determinó que estadísticamente no hay influencia por la interacción de los parámetros mencionados sobre las muestras.

La figura 10 muestra la gráfica de las interacciones en la que se despliegan las medias por mínimos cuadrados de todas las combinaciones de dos factores. Si los factores no interactúan, las líneas en la gráfica deben ser aproximadamente paralelas. Si no, entonces el efecto de un factor depende del nivel de otro, que es la definición de interacción. Demostrando nuevamente que el parámetro del tiempo de reposo tiene una influencia determinante sobre el esfuerzo de corte

Figura 10. Interacciones esfuerzo de corte, humedad y tiempo de reposo. Statgraphics centurión XVI.



4.3 REGRESION Y ANALISIS DE AJUSTE

Dadas las consideraciones anteriormente mencionadas en los cuales se evalúan los diferentes aspectos que intervienen en este estudio, es importante determinar cuál de los niveles son más ventajosos para cada factor involucrado. De tal modo y teniendo en cuenta que el parámetro más influyente sobre el esfuerzo cortante es la humedad, se determinó que el fluido tiene el comportamiento más ventajoso es el que presenta los niveles de humedad del 25% y tiempo de reposo de 45 minutos, el cual posee un esfuerzo de fluencia menor y un valor de esfuerzo de corte menor con una humedad óptima.

Tabla 9. Parámetros del modelo de Herschel-Bulkley para describir la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de deformación.

	σ_0	K	n
valor	9249.678	3280.80	0.28365

La tabla 9 muestra los resultados al ajustar el modelo de Herschel-Bulkley (ver ecuación 6) para describir la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de deformación. La ecuación del modelo ajustado es

Tabla 10. Análisis de varianza del modelo de Herschel-Bulkley para describir la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de deformación.

$$\sigma = 9249.678 + 3280.80 * \gamma^{0.28365} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	2,15512E6	1	2,15512E6	20648,06	0,0000
Residuo	6,21026E4	595	10,4374		
Total (Corr.)	2,21723E6	596			

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, el modelo expresa la relación entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 11. Estadísticos del modelo de Herschel-Bulkley para describir la relación entre esfuerzo de corte y velocidad de deformación.

R-cuadrada = 97,1991 por ciento
R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97,2 por ciento
Error estándar del est. = 323,07
Error absoluto medio = 248,9
Estadístico Durbin-Watson = 0,00843373 (P=0,0000)
Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,99

El estadístico R-Cuadrada (ver tabla 11) indica que el modelo ajustado representa 97,2% de la variabilidad en el esfuerzo de corte. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 97,2%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 323,07. El error absoluto medio (MAE) de 248,94 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan los datos. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, hay una indicación de posible correlación serial con un nivel de confianza del 95%.

5. CONCLUSIONES

- Las pastas alimenticias generadas a partir de harina de trigo y agua son fluidos que siguen un comportamiento característico de los fluidos del modelo Herschel-Bulkley.
- El fluido con el comportamiento más ventajoso presenta niveles de humedad del 25% y tiempo de reposo de 45 minutos, el cual posee un esfuerzo de fluencia menor y un valor de esfuerzo de corte menor con una humedad óptima.
- El fluido de estudio sigue un modelo dado por la ecuación

$$\sigma = 9249.678 + 3280.80 * \gamma^{0.28365}$$

La cual describe el comportamiento con un 97% de confianza dentro de los parámetros del estudio.

- La humedad y el tiempo de reposo tienen un efecto estadísticamente significativo sobre el esfuerzo de corte con un 95 de nivel de confianza, teniendo la humedad un efecto mucho más determinante, y estadísticamente no hay influencia de la interacción de los ambos parámetros

REFERENCIAS

- (1) KOERTEN, Jared. US RESEARCH ANALYST. The state of the pasta industry: global trends and prospects. EUROMONITOR INTERNATIONAL [en línea]. <<http://www.internationalpasta.org/resources/extra/file/WPD2014/presentations/koertenwpd2012.pdf>>. [Consulta: 24 de enero de 2015].
- (2) PASTAS ALIMENTICIAS, UN MERCADO DE 200 MILLONES DE DÓLARES [en línea]. Junio 21 de 2014. <<http://www.portafolio.co/economia/pastas-alimenticias-un-mercado-200-millones-dolar>>. [Consulta: 20 de enero de 2015].
- (3) RAO, V. G. Y RAO, H. P., Methods for determining rheological characteristics of doughs: A critical evaluation, en Journal of Food Science and Technology (Mysore), Vol. 30, No. 2, pp. 77-87, 1993.
- (4) MASI, P.; CAVELLA, S.; SEPE, M., Characterization of dynamic viscoelastic behavior of wheat flour doughs at different moisture contents, en Cereal Chemistry, Vol. 75, No. 5, pp. 432, 1998.
- (5) BERLAND, S. y LAUNAY, B., .Rheological properties of wheat flour dough in steady and dynamic shear: Effect of water content and some additives, En: Cereal Chemistry, Vol. 72, No. 1, 1995.
- (6) WIKSTROM, K., "Rheology of wheat flour dough at large deformations and the relation to baking quality and physical structure", tesis doctoral presentada a la Universidad de Lund, Lund, Suecia, 1997.

- (7) LETANG, C.; PIAU, M. y VERDIER, C., "Characterization of wheat flour-water dough. Part I. Rheometry and microstructure", en Journal of Food Engineering, Vol. 41, 1999.
- (8) INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Harina de trigo. Bogotá: ICONTEC, 2007. (NTC 267).
- (9) ALIMENTACION-SANA.ORG. SOBRE LA HARINA [en línea]. <
<http://www.alimentacion-sana.org/informaciones/Chef/harina.htm> >.
[consulta: 10 de abril de 2015].
- (10) FERNANDEZ, José María. Tema 4: Propiedades físicas y reología. En su: Tecnología de los Alimentos. Almería. Editorial Académica Española.
- (11) INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Productos de molinería. Pastas alimenticias. Bogotá: ICONTEC, 2007. (NTC 1055).
- (12) GUITIÉRREZ, Humberto. y DE LA VARA, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2ª ed. México D.F. Mc Graw-Hill Interamericana. 2008.
- (13) StatPoint Technologies, Inc Statgraphics centurion. 16ª ed. <
<http://www.statgraphics.com/> >.
- (14) INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Industrias alimentarias. Harina de trigo. Métodos de ensayo. Bogotá: ICONTEC, 2002. (NTC 282).

- (15) INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Cereales y productos cereales. Determinación del contenido de humedad. Bogotá: ICONTEC, 2009. (NTC 529).
- (16) ASSOCIATION OF ANALYTICAL COMMUNITIES INTERNATIONAL. Viscosity Apparent of Acidulated Flour–Water Suspension. Gaithersburg: 2000. (AOAC935.35).
- (17) TÉCNICAS DE ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DE ALIMENTOS [en línea]. <<http://www.analizacalidad.com/docftp/fi1441ene2007.pdf>>. [Consulta: 24 de enero de 2015].
- (18) HEVIA H. Felicitas, COMPONENTES QUIMICOS Y ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS DEL GRANO DE TRIGO Y SU RELACION CON LA FUNCIONALIDAD DE LAS HARINAS. En: SEMINARIO INTERNACIONAL DE TRIGO (2002: Carillanca). Memorias seminario internacional de trigo. Carillanca: Universidad de Concepción.
- (19) REGALADO M. Alejandro y NORIEGA R. Octavio A. Comportamiento reológico de un fluido. Oaxaca. 2009. Universidad del Mar. Instituto de Industria.
- (20) FONTELOS M. A., FRIEDMAN A., Analysis of the stick-slip problem for nonNewtonian flows, Comm. Partial Differential Equations 26 (2001).
- (21) RODRIGUEZ, Eduardo; FERNÁNDEZ, Alejandro y AYALA, Alfredo. Modelos reológicos aplicados a masas de trigo y maíz, En: Revista ingeniería e investigación. Vol. 25, No 2, 2005.

- (22) RODRIGUEZ, Eduardo; FERNÁNDEZ, Alejandro y AYALA, Alfredo. Reología y textura de masas: aplicaciones en trigo y maíz, En: Revista ingeniería e investigación. Vol. 57, 2005.
- (23) Limanond, B., Castell-Pérez; E. y Moreira, R. G., Effect of time and storage conditions on the rheological properties of masa for corn tortillas en Lebensmittel Wissenschaft und Technologie, Vol. 32, 1999.
- (24) Rodríguez E., Fernández A., Alcalá L. y Ospina B., Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. 2006. Universidad del valle.
- (25) LE PÉTRISSAGE ET LA FERMENTATION SE PARTAGE L'OXYDATION DE LA PÂTE. [en línea]. Enero 19 de 2008. <<http://www.boulangerie.net/petrissage-t22793.html>>. [Consulta: 3 de marzo de 2015].
- (26) ABANG ZAIDEL D.N., CHIN N.L. Y YUSOF Y.A., A review on rheological properties and measurements of dough and gluten, En: Journal of applied sciences. P. 2478 – 2490, 2010.

BIBLIOGRAFIA

ABANG ZAIDEL D.N., CHIN N.L. Y YUSOF Y.A., A review on rheological properties and measurements of dough and gluten, En: Journal of applied sciences. P. 2478 – 2490, 2010.

ALIMENTACION-SANA.ORG. SOBRE LA HARINA [en línea]. < <http://www.alimentacion-sana.org/informaciones/Chef/harina.htm> >. [consulta: 10 de abril de 2015].

ASSOCIATION OF ANALYTICAL COMMUNITIES INTERNATIONAL. Viscosity Apparent of Acidulated Flour–Water Suspension. Gaithersburg: 2000. (AOAC935.35).

BERLAND, S. y LAUNAY, B., .Rheological properties of wheat flour dough in steady and dynamic shear: Effect of water content and some additives, En: Cereal Chemistry, Vol. 72, No. 1, 1995.

FERNANDEZ, José María. Tema 4: Propiedades físicas y reología. En su: Tecnología de los Alimentos. Almeria. Editorial Académica Española.

FONTELOS M. A., FRIEDMAN A., Analysis of the stick-slip problem for nonNewtonian flows, Comm. Partial Differential Equations 26 (2001).

GUITIÉRREZ, Humberto. y DE LA VARA, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2ª ed. Mexico D.F. Mc Graw-Hill Interamericana. 2008.

HEVIA H. Felicitas, COMPONENTES QUIMICOS Y ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS DEL GRANO DE TRIGO Y SU RELACION CON LA FUNCIONALIDAD DE LAS HARINAS. En: SEMINARIO INTERNACIONAL DE TRIGO (2002: Carillanca). Memorias seminario internacional de trigo. Carillanca: Universidad de Concepción.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Cereales y productos cereales. Determinación del contenido de humedad. Bogotá: ICONTEC, 2009. (NTC 529).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Harina de trigo. Bogotá: ICONTEC, 2007. (NTC 267).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Industrias alimentarias. Harina de trigo. Métodos de ensayo. Bogotá: ICONTEC, 2002. (NTC 282).

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACION. Productos de molinería. Pastas alimenticias. Bogotá: ICONTEC, 2007. (NTC 1055).

KOERTEN, Jared. US RESEARCH ANALYST. The state of the pasta industry: global trends and prospects. EUROMONITOR INTERNATIONAL [en línea]. <<http://www.internationalpasta.org/resources/extra/file/WPD2014/presentations/koertenwpd2012.pdf>>. [Consulta: 24 de enero de 2015].

LE PÉTRISSAGE ET LA FERMENTATION SE PARTAGE L'OXYDATION DE LA PÂTE. [en línea]. Enero 19 de 2008. <<http://www.boulangerie.net/petrissage-t22793.html>>. [Consulta: 3 de marzo de 2015].

LETANG, C.; PIAU, M. y VERDIER, C., "Characterization of wheat flour-water dough. Part I. Rheometry and microstructure", en Journal of Food Engineering, Vol. 41, 1999.

Limanond, B., Castell-Pérez; E. y Moreira, R. G., Effect of time and storage conditions on the rheological properties of masa for corn tortillas en Lebensmittel Wissenschaft und Technologie, Vol. 32, 1999.

MASI, P.; CAVELLA, S.; SEPE, M., Characterization of dynamic viscoelastic behavior of wheat flour doughs at different moisture contents, en Cereal Chemistry, Vol. 75, No. 5, pp. 432, 1998.

PASTAS ALIMENTICIAS, UN MERCADO DE 200 MILLONES DE DÓLARES [en línea]. Junio 21 de 2014. <<http://www.portafolio.co/economia/pastas-alimenticias-un-mercado-200-millones-dolar>>. [Consulta: 20 de enero de 2015].

RAO, V. G. Y RAO, H. P., Methods for determining rheological characteristics of doughs: A critical evaluation, en Journal of Food Science and Technology (Mysore), Vol. 30, No. 2, pp. 77-87, 1993.

REGALADO M. Alejandro y NORIEGA R. Octavio A. Comportamiento reológico de un fluido. Oaxaca. 2009. Universidad del Mar. Instituto de Industria.

Rodríguez E., Fernández A., Alcalá L. y Ospina B., Reología de suspensiones preparadas con harina precocida de yuca. 2006. Universidad del valle.

RODRIGUEZ, Eduardo; FERNÁNDEZ, Alejandro y AYALA, Alfredo. Modelos reológicos aplicados a masas de trigo y maíz, En: Revista ingeniería e investigación. Vol. 25, No 2, 2005.

RODRIGUEZ, Eduardo; FERNÁNDEZ, Alejandro y AYALA, Alfredo. Reología y textura de masas: aplicaciones en trigo y maíz, En: Revista ingeniería e investigación. Vol. 57, 2005.

StatPoint Technologies, Inc Statgraphics centurion. 16^a ed.
<<http://www.statgraphics.com/>>.

TÉCNICAS DE ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DE ALIMENTOS [en línea].
<<http://www.analizacalidad.com/docftp/fi1441ene2007.pdf>>. [Consulta: 24 de enero de 2015].

WIKSTROM, K., "Rheology of wheat flour dough at large deformations and the relation to baking quality and physical structure", tesis doctoral presentada a la Universidad de Lund, Lund, Suecia, 1997.

ANEXOS

ANEXO A. ANOVA

El análisis de varianza (ANOVA) está dado de la siguiente manera:

$$Y_{ijk} = \mu + \gamma_i + \delta_j + (\gamma\delta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

Con $i=1,2,3$; $j=1,2,3$; $k=1,2,3$ y donde γ_i es el efecto de la humedad en el nivel i , δ_j representa el efecto del tiempo de reposo en su nivel j , $(\gamma\delta)_{ij}$ es efecto de la interacción de ambos en los niveles ij , En consecuencia, la hipótesis que se desean probar son: $\gamma_i = 0$ (no hay efecto significativo de la humedad sobre la viscosidad máxima), $\delta_j = 0$ (no hay efecto significativo del tiempo de reposo sobre la viscosidad máxima), y $(\gamma\delta)_{ij} = 0$ (no hay efecto de la interacción de la humedad y el tiempo de reposo sobre la viscosidad máxima). Estas hipótesis se probaran con el ANOVA; para ello la suma de los cuadrados para los efectos incluidos en la ecuación (4) están dadas por:

$$SC_A = \sum_{i=1}^3 \frac{Y_i^2}{9} - \frac{Y^2}{27}$$

$$SC_B = \sum_{j=1}^3 \frac{Y_{.j}^2}{9} - \frac{Y^2}{27}$$

$$SC_{AB} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{Y_{ij}^2}{3} - \frac{Y^2}{27} - SC_A - SC_B$$

La suma de los cuadrados totales se obtienen con:

$$SC_T = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 Y_{ijk}^2 - \frac{Y_m^2}{27}$$

Y el error aleatorio se calcula con la diferencia,

$$SC_E = SC_T - SC_{AB} - SC_A - SC_B$$

FV	SC	GL	CM	valores-P
Humedad (A)	SC_A	2	$\frac{SC_A}{2}$	$\frac{CM_A}{CM_E}$
Tiempo de reposo(B)	SC_B	2	$\frac{SC_B}{2}$	$\frac{CM_B}{CM_E}$
AB	SC_{AB}	4	$\frac{SC_{AB}}{4}$	$\frac{CM_{AB}}{CM_E}$
Error	SC_E	18	$\frac{SC_E}{18}$	
Total	SC_T	26		

ANOVA.

FV: fuente de variabilidad; SC: suma de cuadrados; GL: grados de libertad; CM: cuadrado medio;

F₀: estadístico de prueba.

ANEXO B. MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA VISCOSIMETRO BROOKFIELD DV-III

Como primer paso se debe de registrar las condiciones climáticas donde se realizará la prueba. Una vez contando con el viscosímetro de Brookfield, seguir el procedimiento general indicado.

1. MONTAJE Y CALIBRACIÓN

- 1.1. Armar el viscosímetro Brookfield con sus correspondientes accesorios
- 1.2. Se estabiliza el equipo auxiliándose de los soportes hasta lograr que la burbuja de nivel se sitúe en el centro del visor superior.

2. INSERCIÓN DE LA “AGUJA”

- 2.1. Se instala la “aguja” con número de identificación SC4-25 registrado en su eje y se recomienda una gradual utilización.

Nota: Al colocar y retirar alguna “aguja” es conveniente posicionarse a una altura adecuada que permita sostenerlo firmemente con una mano y enroscarlo con la otra; evitando así ejercer presión y daños sobre el eje rotatorio.

- 2.2. Al encender el viscosímetro mostrará la siguiente leyenda “Remove any spindle/Press any key”. Obedecer la leyenda.
- 2.3. Una vez realizado lo señalado en B2, el equipo realiza el procedimiento “Autozeroing”. Es conveniente llevarlo a cabo cada vez que se encienda el equipo o se cambie de “aguja”.
- 2.4. Finalmente se solicitará la reinsertión del “aguja” al viscosímetro.

3. INMERSIÓN A LA MUESTRA

- 3.1. Se introduce la “aguja” hasta cubrir la ranura que el eje del mismo posee como indicador de nivel auxiliándonos de la perilla que ajusta la altura del viscosímetro de Brookfield. Se recomienda realizarlo lentamente con el fin de evitar la formación de una capa de aire alrededor de la “aguja”, la cual puede interferir con las mediciones.
- 3.2. Verificar que la ubicación del “aguja” y el protector sean al centro de la muestra. Esta consideración evita ejercer presión con el contenedor, salvaguardando así la integridad del viscosímetro.
- 3.3. Se confirma que la burbuja de nivel se mantenga al centro del visor.

4. PROGRAMACIÓN DE PRUEBA

La información registrada por el viscosímetro de Brookfield será como en la siguiente tabla.

Variabl e	Descripción
T	Temperatura (°C)
t	Tiempo (s)
H	Viscosidad (mPa s)
Q	Velocidad angular (RPM)
SS	Esfuerzo cortante t (N/m ²)
SR	Velocidad de deformación (s ⁻¹)
%	Torque (Adimensional)

Información registrada en viscosímetro de Brookfield.

- 4.1. Registrar la temperatura de la muestra y verificar que coincida con la del laboratorio. En este instante, el resto de las variables en pantalla debe ser cero, indicando que el motor no está aún en marcha.
- 4.2. Ubicamos la opción tiempo de parada y Asignamos el tiempo de duración de la prueba que será de 10 minutos.
- 4.3. Realizado 4.2., seleccionamos la velocidad angular, La cual será un valor constante de 12 rpm.
- 4.4. Seleccionamos el intervalo de tiempo, que será el indicativo de cada cuanto el viscosímetro tomara un medición.

5. REGISTRO DE DATOS

- 5.1. Realizar el primer registro de los datos después de transcurrido un tiempo que permita descartar influencias sobre el equilibrio térmico y la homogeneidad en la agitación de la muestra.
- 5.2. Los valores de la información disponible de p , T , SS , SR , $\%$, O , t , serán almacenados por un software a través de una interface entre el viscosímetro y una computadora.
- 5.3. El registro de los datos posteriores debe realizarse a intervalos iguales de tiempo, obteniendo así, un comportamiento promedio reológico de la muestra.
- 5.4. Al finalizar con el compendio de pruebas seleccionadas procedemos a apagar el equipo para retirar la "aguja" hasta ahora utilizada.

ANEXO C. NORMAS

32.1.37

AOAC Official Method 935.35
Viscosity (Apparent) of Acidulated
Flour–Water Suspension
MacMichael Viscosimeter Method
First Action 1935
Final Action

A. Adjustment of Machine

- (a) Use No. 30 MacMichael viscosimeter wire.
- (b) Have diameter of disk plunger 2.375 ± 0.01 in (60.3 ± 2.5 mm).
- (c) Adjust clearance between bottom of disk and inner surface of bottom of bowl to 0.25 ± 0.005 in. (6.4 ± 0.1 mm). Carefully check clearance with depth gage reading in 0.001 in. (0.25 mm).
- (d) Use viscosimeter bowl with ca 7 cm diameter (depth of bowl will vary according to age of machine).
- (e) Adjust regulating device to permit speed of exactly 12 rpm and check carefully and frequently with stopwatch because as motor warms up, machine tends to increase its speed.
- (f) Adjust machine and keep it level, and when bob is placed see that it is riding freely and not touching sides of guide.
- (g) Adjust dial so that when it comes to rest, pointer is on 0 mark.

B. Preparation of Lactic Acid

To concentrated lactic acid add ca proportion of H₂O to give slightly >1M solution. Reflux 3 h, cool, and adjust to 1M by adding H₂O. Or proceed as follows: Use enough concentrated lactic acid to prepare solution ca 0.85M when standardized with 0.1M NaOH. Transfer to Erlenmeyer fitted with air condenser to prevent undue

evaporation of H₂O, and heat 24 h at 80°C (solution will have increased in strength to ca 1.18M). Adjust to exactly 1M with H₂O.

C. Preparation of Flour–Water Suspension

In clean, dry, 500 mL Erlenmeyer, place 200 g flour (15% moisture basis) and add 100 mL H₂O at 25°C. Close with rubber stopper and shake vigorously 1 min.

D. Determination

After pouring suspension into viscosimeter bowl, make sure bowl is flush on its supports. Start machine, but before placing bob or disk in place, stir solution with bob 25 times to ensure uniform suspension. Place wire of bob in holder and take reading after damping swing of dial by placing a finger on indicator pointer and then gradually touching swinging dial. Make second reading after adding 1 mL 1M lactic acid, and likewise third and following readings after adding 2 mL increments 1M lactic acid. Do not stop motor between readings. After or during addition of lactic acid, stir suspension 25 times by up-and-down motion of bob. Suspend bob by the wire and take reading. Determine maximum apparent viscosity of the acidulated flour–H₂O suspension by plotting apparent viscosity readings against volume acid added.

References: *JAOAC* **18**, 76(1935); **20**, 69, 380(1937);
22, 76(1939).
Cereal Chem. **11**, 121, 299(1934).
Nebr. Agric. Exp. Stn. Bull. **8** (1916).