

Influencia del voltaje sobre las características reológicas del sabajón

I. Capera U., J. Calderón P., O. Ramos U., O. Restrepo Y.

Escuela de Postgrados, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Calle 53 No. 14 – 39. Bogotá, Colombia. Teléfono: 3460088 Fax: 3472556. E-mail: omar.ramos@unad.edu.co

Resumen

Con el objetivo de estudiar el efecto de la diferencia de potencial en los parámetros reológicos, se realizó el estudio del comportamiento reológico del sabajón, sometido a una diferencia de potencial entre 11 voltios y 45 voltios en 11 aplicaciones con un rango de tiempo entre 120 segundos y 630 segundos. Para determinar la significación de los resultados y encontrar los modelos matemáticos adecuados que den respuesta a la correlación de las variables, se realizaron análisis de regresión múltiple para cada una de las variables dependientes con respecto a las independientes. El sabajón es un fluido ligeramente pseudoplástico, con índice de flujo promedio de 0,815 y al ser sometido a diferentes voltajes y tiempos de aplicación, dicho índice disminuyó hasta 0,754, haciéndose más pseudoplástico. El índice de flujo, n , disminuye con la aplicación de voltaje desde 0,815 hasta 0,754, lo que permite concluir que la pseudoplasticidad del sabajón aumenta ligeramente con el tratamiento eléctrico. El índice de consistencia, k , aumenta con la aplicación de voltaje desde 0,112 hasta 0,155, permitiendo inferir que la viscosidad del fluido (sabajón) aumenta debido a mejor ordenamiento molecular de la muestra tratada.

Palabras Claves: Reología, Propiedades Reológicas, Coloide, Sabajón.

Abstract

With the objective to study the effect of the difference of potential in the rheological parameters, the study of the rheology behaviour of a liquor “sabajón” was made, submissive a difference of potential between 11 volts and 45 volts in 11 applications with a rank of time between 120 second and 630 seconds. In order to determine the meaning of the results and of finding mathematical the models suitable that they give answer to the correlation of the variables, multiple regression analysis for each one of the dependent variables with respect to the independent ones was made. The drink “sabajón” is a slightly pseudoplastic fluid, with flow number average of 0.815 and to the being submissive different voltages and times from application, this index diminished up to 0.754, becoming more pseudoplastic the flow number, n , diminishes with the application of voltage from 0.815 to 0.754, which allows to conclude that the pseudoplasticity of liquor “sabajon” increases slightly with the electrical treatment. The index of consistency, k , increases with the application of voltage from 0.112 to 0.155, allowing to infer that the viscosity of the fluid (sabajon) increases due to better molecular ordering of the treated sample.

Key Words: Rheology, Rheological Properties, Colloid, Sabajon.

Introducción

La sedimentación presentada, en el sabajón tiene baja presentación en el mercado, poca aceptación organoléptica; en consecuencia la credibilidad de su calidad se pone en riesgo, bajando el nivel de demanda con afectación económica a las empresas productoras debido a las devoluciones del producto o disminución en la producción.

Se hace necesario implementar un plan de estabilización del coloide (sabajón) que incida en el mejoramiento del producto. Este incluye, el estudio de los compuestos sedimentables del coloide y plantear una alternativa de solución. El sabajón está compuesto por sustancias mayoritariamente polares, tales como: agua, etanol, proteínas, carbohidratos y compuestos alimenticios orgánicos, los cuales son materiales potencialmente electrorreológicos dentro del coloide. Para determinar el plan de estabilización del sabajón, se tiene en cuenta que este, es un fluido electrorreológico, debido a la polaridad de los componentes de las fases del coloide. El plan de estabilización del sabajón consiste en aplicar al coloide, diferentes voltajes para generar un campo eléctrico, de esta forma producir migración molecular hacia los dos polos, cambiando la estructura del coloide y conseguir un ordenamiento molecular que conlleva a un cambio físico del estado líquido a semisólido.

El ordenamiento molecular ocurre por atracción en el sentido paralelo y repulsión en el sentido perpendicular a la dirección del campo eléctrico, formando cadenas de partículas polarizables de microtamaño, que aumentan, en varios ordenes de magnitud, las propiedades reológicas del fluido, especialmente la viscosidad aparente; dándole al coloide, mayor estabilidad respecto a la muestra sin aplicación de voltaje. La variación de las propiedades reológicas del fluido ocasionadas por la aplicación del voltaje se determina clasificando al fluido, luego cuantificando la viscosidad aparente, esfuerzo de corte, índices de flujo y consistencia, a diferentes gradientes de velocidad de cizallamiento, voltajes y tiempos de aplicación de este.

El trabajo de investigación a nivel laboratorio, busca establecer las características reológicas del sabajón en función de un intervalo de voltaje y tiempo de aplicación, determinados de acuerdo con un diseño factorial multivariable. Donde se formulan dos objetivos:

- ◆ Determinar el comportamiento reológico del fluido sabajón, encontrando la relación que existe entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad bajo condiciones de aplicación de voltaje y tiempo de exposición constante, para cada ensayo.
- ◆ Establecer los modelos matemáticos que permitan determinar el índice de consistencia, el índice de fluidez, la viscosidad aparente y el esfuerzo cortante, para un voltaje aplicado durante un tiempo determinado.

Metodología

Muestra

La muestra que se tomó fue Sabajón, el cual, según el decreto 365 de 1994, emanado por el Ministerio de Salud Pública, en el artículo 6°, numeral 6.3, lo clasifica como un aperitivo no vínico adicionado de productos alimenticios orgánicos. El mismo decreto define también como el producto obtenido por mezcla de leche, huevos, azúcar, con adición de alcohol etílico neutro certificado, aguardiente u otros licores y aditivos permitidos por el Ministerio de Salud, con una graduación entre 14 y 20 grados alcoholimétricos.

VARIABLES

Independientes: voltaje aplicado, medido en voltios, y tiempo de aplicación del voltaje, medido en segundos.

Dependientes: esfuerzo de corte (τ), viscosidad aparente (η), índice de consistencia (k) e índice de flujo (n)

De control o de Restricción: Temperatura (20 °C), intensidad de corriente (3 A) y área de electrodos

Diseño Experimental

Se estableció el diseño experimental factorial multivariable de 2^n , con las variables independientes voltaje y tiempo y las variables dependientes esfuerzo de corte, viscosidad aparente, índice de consistencia e índice de flujo. Donde n corresponde al número de variables independientes y 2 al número de niveles considerados y que para este caso se codifican como +1 y -1.

$$\text{No. de ensayos} = 2^n = 2^2 = 4 \text{ ensayos.}$$

Además de estos 4 ensayos se realizaron 3 de nivel central (nivel 0) a fin de estimar el error, y cuatro ensayos de segundo orden, (niveles de $-\sqrt{2}$ y $+\sqrt{2}$) con el propósito de obtener una mayor confiabilidad en los resultados, para un total de 11 ensayos.

La asignación de los valores de tiempo y voltaje para los diferentes niveles, se realizó arbitrariamente, debido a que no se encuentran referentes bibliográficos para el sabajón. Se estableció el nivel cero como 25 voltios y 420 segundos y los demás valores se obtuvieron teniendo en cuenta una amplitud de 14 voltios y 210 segundos para cada unidad codificada, respectivamente. A continuación se relacionan los valores correspondientes en la tabla 1:

Tabla 1. Factores y Niveles del Diseño Experimental

Ensayo	Voltaje Codificado	Voltaje volts	Tiempo Codificado	Tiempo seg
1	-1	11	-1	210
2	+1	39	-1	210
3	-1	11	+1	630
4	+1	39	+1	630
5	0	25	0	420
6	0	25	0	420
7	0	25	0	420
8	-1,414	5	0	420
9	0	25	+1,414	720
10	+1,414	45	0	420
11	0	25	-1,414	120

Procedimiento

Descripción del Equipo. Para la determinación experimental se utilizó el viscosímetro Rotovisco RV 20, el cual mide el porcentaje de torque (τ) **A** y el porcentaje de gradiente de velocidad (γ) **M**. Se trata de un viscosímetro de cilindros concéntricos de radio finito. El sistema sensor NV consta de un cilindro interno y un rotor en forma de campana. Se clasifica como un sistema de sensor cilíndrico coaxial con dos espacios para cizallar las muestras sobre la parte interna y la parte externa del rotor.

Dependencia de las características reológicas con el tiempo (tixotropía). Con el objeto de determinar si las características reológicas del sabajón dependen del tiempo, se tomó una muestra y se determinó el porcentaje de esfuerzo de corte, a porcentajes de velocidad de cizallamiento consecutivos de: 1,0; 1,6; 2,8; 4,6; 7,7; 12,9 y 21,5. A la misma muestra se le determinó nuevamente el porcentaje de esfuerzo de corte, tomando los mismos porcentajes de velocidad de cizallamiento, pero en orden descendente.

Aplicación del voltaje. Se tomó para cada ensayo una muestra de sabajón en un vaso de precipitados, se les aplicó el voltaje definido, durante el tiempo correspondiente a cada ensayo, propuestos en el diseño experimental, manteniendo constantes la temperatura, la intensidad de corriente y el área de los electrodos; se determinaron los porcentajes de esfuerzo de corte a porcentajes de velocidad de cizallamiento consecutivos iguales a 1,0; 1,6; 2,8; 4,6; 7,7; 12,9 y 21,5.

Determinación del gradiente de velocidad, γ . El gradiente de velocidad se determinó con la siguiente ecuación:

$$\gamma(\text{s}^{-1}) = M \times \% \gamma \quad (\text{Ec. 1})$$

Para el equipo utilizado: $M = 27 \text{ s}^{-1}/\% \gamma$ (Ec. 2)

Determinación del esfuerzo de corte, τ . Para calcular el esfuerzo de corte se utilizó la siguiente ecuación:

$$\tau (\text{Pa}) = A \times \% \tau \quad (\text{Ec. 3})$$

Para el equipo utilizado: $A = 1,78 \text{ Pa}/\% \tau$ (Ec. 4)

Determinación del grado de tixotropía. Para conocer si el sabajón sin aplicación de voltaje presenta comportamiento tixotrópico o reopéctico, se compararon los resultados obtenidos para gradientes de velocidad ascendentes y descendentes.

Aplicando el modelo de Ley de Potencia, donde $\tau = k\gamma^n$ mediante el uso del software Curvexpert 1.3, se graficaron los valores de τ Vs. γ , tanto con gradiente de velocidad ascendente, como con gradiente de velocidad descendente; se calculó el área bajo cada una de las curvas, se estableció la diferencia de las áreas y se dividió por el área mayor para encontrar el % de tixotropía.

Determinación de los índices de flujo y de consistencia a los diferentes voltajes y tiempo de aplicación. Se graficó τ Vs. γ para cada voltaje y tiempo de aplicación tomándose el modelo de ley de potencia $\tau = k\gamma^n$, y estableciéndose la correlación con el software Curvexpert 1.3.

Determinación de la viscosidad aparente, η . Se calculó punto a punto, dividiendo el esfuerzo de corte τ , entre el gradiente de velocidad γ . Así, se tiene que para fluidos que cumplen la Ley de Potencia

$$\eta = k \gamma^{(n-1)} = k \gamma^n / \dot{\gamma} \quad (\text{Ec. 5})$$

Como $\tau = k \gamma^n$ Entonces: $\eta = \tau / \dot{\gamma}$

Resultados

De los datos primarios, se obtuvieron los valores de esfuerzo de corte, gradiente de velocidad, viscosidad aparente y el grado de tixotropía, según lo indicado en el procedimiento para cada caso.

Tabla 2. Esfuerzo de corte (τ) y viscosidad aparente (η) a diferentes voltajes (V) y tiempos de aplicación (t), para cada gradiente de velocidad ($\dot{\gamma}$).

$\dot{\gamma} = 43,2 \text{ 1/s}$

Voltaje, V	Tiempo, s	τ , Pa	η (mPa*s)
11	210	2,53	58,509
39	210	2,74	63,454
11	630	2,51	58,097
39	630	2,76	63,866
25	420	2,67	61,806
25	420	2,67	61,806
25	420	2,58	59,745
5	420	2,55	58,921
25	720	2,67	61,806
45	420	2,85	65,926
25	120	2,69	62,218

$\dot{\gamma} = 75,6 \text{ 1/s}$

Voltaje, V	Tiempo, s	τ , Pa	η (mPa*s)
11	210	3,83	50,622
39	210	4,20	55,566
11	630	3,83	50,622
39	630	4,20	55,566
25	420	4,01	52,976
25	420	3,99	52,741
25	420	3,99	52,741
5	420	3,90	51,563
25	720	4,08	53,918
45	420	4,18	55,331
25	120	4,11	54,389

$\dot{\gamma} = 124,2 \text{ 1/s}$

Voltaje, V	Tiempo, s	τ , Pa	η (mPa*s)
11	210	5,86	47,151
39	210	6,27	50,448
11	630	5,87	47,295
39	630	6,28	50,591

25	420	6,05	48,728
25	420	5,98	48,155
25	420	5,96	48,011
5	420	5,87	47,295
25	720	6,11	49,158
45	420	6,23	50,161
25	120	6,09	49,014

$\gamma = 207,9 \text{ 1/s}$

Voltaje, V	Tiempo, s	τ , Pa	η (mPa*s)
11	210	8,83	42,467
39	210	9,29	44,693
11	630	8,78	42,210
39	630	9,26	44,521
25	420	9,02	43,408
25	420	8,81	42,381
25	420	8,92	42,895
5	420	8,74	42,038
25	720	9,06	43,580
45	420	9,26	44,521
25	120	9,08	43,665

$\gamma = 348,3 \text{ 1/s}$

Voltaje, V	Tiempo, s	τ , Pa	η (mPa*s)
11	210	13,23	37,971
39	210	13,72	39,402
11	630	13,08	37,562
39	630	13,69	39,300
25	420	13,35	38,329
25	420	13,08	37,562
25	420	13,35	38,329
5	420	13,01	37,358
25	720	13,39	38,431
45	420	13,74	39,453
25	120	13,26	38,073

$\gamma = 580,5 \text{ 1/s}$

Voltaje, V	Tiempo, s	τ , Pa	η (mPa*s)
11	210	20,83	35,876
39	210	20,45	35,232
11	630	19,58	33,730
39	630	20,35	35,048
25	420	19,58	33,730
25	420	19,49	33,576
25	420	19,49	33,576

5	420	19,49	33,576
25	720	19,97	34,404
45	420	20,29	34,956
25	120	19,97	34,404

Tabla 3. Determinación del grado de tixotropía

Gradiente de velocidad	K Pas ⁿ	n	Área bajo la curva
Ascendente	0,121	0,803	7614,4
Descendente	0,103	0,828	7469,3

Grado de tixotropía = $(7614,6 - 7469,3) \times 100 / 7614,6 = 1,90 \%$

Tabla 4. Índices de consistencia y flujo a diferentes voltajes y tiempos de aplicación

Voltaje Voltios	Tiempo s	Ecuación Ley de Potencia	Coefficiente Correlación r	Índice de Flujo n	Índice de Consistencia k Pa s ⁿ
11	210	$\tau = 0,136 \gamma^{0,754}$	0,99999	0,754	0,136
39	210	$\tau = 0,151 \gamma^{0,771}$	0,99997	0,771	0,151
11	630	$\tau = 0,135 \gamma^{0,755}$	0,99999	0,755	0,135
39	630	$\tau = 0,153 \gamma^{0,768}$	0,99998	0,768	0,153
25	420	$\tau = 0,151 \gamma^{0,765}$	0,99993	0,765	0,151
25	420	$\tau = 0,144 \gamma^{0,771}$	0,99997	0,771	0,144
25	420	$\tau = 0,146 \gamma^{0,770}$	0,99990	0,770	0,146
5	420	$\tau = 0,133 \gamma^{0,783}$	0,99998	0,783	0,133
25	720	$\tau = 0,146 \gamma^{0,773}$	0,99998	0,773	0,146
45	420	$\tau = 0,155 \gamma^{0,766}$	0,99997	0,766	0,155
25	120	$\tau = 0,146 \gamma^{0,773}$	0,99991	0,773	0,146
0	0	$\tau = 0,121 \gamma^{0,803}$	0,99994	0,815	0,112

Análisis de Resultados.

Naturaleza del Fluido

El sabajón es un fluido que está conformado por materiales potencialmente electrorreológicos, tales como: proteínas, alcoholes y carbohidratos, moléculas polares que pueden ser orientadas por un campo eléctrico producido mediante la aplicación de un voltaje, lo cual puede observarse en los cambios reológicos presentados en el fluido durante las prácticas realizadas.

Características Reológicas y el Tiempo

De los resultados de la tabla 3, se observa que al variar el gradiente de velocidad tanto en forma ascendente como descendente, el índice de flujo n, no presenta variación significativa (0,803 – 0,828), es decir, las características pseudoplásticas permanecen durante el tiempo transcurrido entre las determinaciones con aumento y disminución de

velocidad. Ahora bien, al graficar esfuerzo de corte τ , contra gradiente de velocidad $\dot{\gamma}$, en forma ascendente y luego en forma descendente, se encontró que la diferencia entre las dos áreas es mínima, correspondiendo a un grado de tixotropía. de 1,90%. Estos dos antecedentes permiten afirmar que las propiedades reológicas del sabajón son independientes del tiempo, no clasificándose ni como reopéctico, ni como tixotrópico.

De acuerdo con los resultados obtenidos para el índice de flujo, n , el sabajón es un fluido ligeramente pseudoplástico, con índice de flujo promedio de 0,815 y al ser sometido a diferentes voltajes y tiempos de aplicación, dicho índice disminuyó hasta 0,754, haciéndose más pseudoplástico. De acuerdo con esta característica, su comportamiento se acomoda al modelo de ley de potencia.

Análisis de Varianza

Para determinar la significación de los resultados y encontrar los modelos matemáticos adecuados que den respuesta a la correlación de las variables, se realizaron análisis de regresión múltiple para cada una de las variables dependientes con respecto a las independientes, utilizando el software Statgraphics plus 5.0.

Ajuste del modelo de esfuerzo de corte contra tiempo y voltaje. Para este estudio se tomaron los datos de la tabla 2, realizándose un análisis de varianza para cada gradiente de velocidad y al considerar inicialmente para dichos análisis la variable dependiente **esfuerzo de corte** y las independientes **voltaje y tiempo**, se encontró que el tiempo no tiene una relación estadísticamente significativa con el esfuerzo de corte, ya que p para cada caso arrojó un valor > 0.1 mostrando que el nivel de confianza es $< 90\%$. Al eliminar la variable t y realizar nuevamente el análisis, se encontraron resultados significativos, los cuales se muestran en las tablas de ANOVA presentadas a continuación.

Tabla 5. Análisis de regresión múltiple para esfuerzo de corte en función de voltaje y tiempo, para cada gradiente de velocidad

$$\dot{\gamma} = 43,2 \text{ 1/s}$$

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Esfuerzo de corte

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	2.46003	0.0272408	90.3068	0.0000
Voltaje	0.00785354	0.000982327	7.99483	0.0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.097698	1	0.097698	63.92	0.0000
Residual	0.0137566	9	0.00152851		
Total (Corr.)	0.111455	10			

R-squared = 87.6572 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 86.2858 percent
 Standard Error of Est. = 0.0390961
 Mean absolute error = 0.0294215
 Durbin-Watson statistic = 2.01065
 $F_{1\%,1,9} = 10,56$

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 5, para $\gamma = 43,2 \text{ 1/s}$, se encuentra que existe relación estadísticamente significativa entre la variable independiente voltaje con la variable dependiente esfuerzo de corte, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y el Factor de ajuste $F_{calculada} > F_{99\text{tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación:

$$\tau = 2,46003 + 0,00785354 v \quad (\text{Ec. 6})$$

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 87.29% de la variabilidad en el esfuerzo de corte. El R cuadrado ajustado, el cual es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, reporta un 86,29% de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,0391. El error absoluto de la media, corresponde al valor promedio de los residuos y tiene un valor de 0,0294. En cuanto el valor de Durbin-Watson estadístico $> 1,4$, muestra que probablemente no existe autocorrelación seria entre los residuos.

$\gamma = 75,6 \text{ 1/s}$

Multiple Regression Analysis

 Dependent variable: Esfuerzo de corte

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	3.7772	0.0394709	95.6958	0.0000
Voltaje	0.0100758	0.00142336	7.07888	0.0001

 Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	60809	1	0.160809	50.11	0.0001
Residual	0.0288818	9	0.00320909		

 Total (Corr.) 0.189691 10
 R-squared = 84.7743 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 83.0825 percent
 Standard Error of Est. = 0.0566488

Mean absolute error = 0.047989
 Durbin-Watson statistic = 2.30121
 $F_{1\%,1,9} = 10,56$

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 5, para $\gamma = 75,6 \text{ 1/s}$, se encuentra que existe relación estadísticamente significativa entre la variable independiente voltaje con la variable dependiente esfuerzo de corte, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y el Factor de ajuste $F_{\text{calculada}} > F_{99\text{tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación:

$$\tau = 3,7772 + 0,0100758 v \quad (\text{Ec. 7})$$

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 87.77% de la variabilidad en el esfuerzo de corte. El R cuadrado ajustado, el cual es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, reporta un 83,08% de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,0566. El error absoluto de la media, corresponde al valor promedio de los residuos y tiene un valor de 0,0480. En cuanto el valor de Durbin-Watson estadístico $> 1,4$, muestra que probablemente no existe autocorrelación seria entre los residuos.

$\gamma = 124,2 \text{ 1/s}$

Multiple Regression Analysis

 Dependent variable: Esfuerzo de corte

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	5.75699	0.0418521	137.556	0.0000
Voltaje	0.0117929	0.00150922	7.8139	0.0000

 Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.220292	1	0.220292	61.06	0.0000
Residual	0.0324717	9	0.00360797		

 Total (Corr.) 0.252764 10
 R-squared = 87.1533 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 85.7259 percent
 Standard Error of Est. = 0.0600664
 Mean absolute error = 0.0484665
 Durbin-Watson statistic = 2.18723
 $F_{1\%,1,9} = 10,56$

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 5, para $\gamma = 124,2 \text{ 1/s}$, se encuentra que existe relación estadísticamente significativa entre la variable independiente voltaje con la variable dependiente esfuerzo de corte, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y el Factor de ajuste $F_{calculada} > F_{99\text{tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación: $\tau = 5,75699 + 0,0117929 v$ (Ec. 8)

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 87,15% de la variabilidad en el esfuerzo de corte. El R cuadrado ajustado, el cual es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, reporta un 85,73% de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,0601. El error absoluto de la media, corresponde al valor promedio de los residuos y tiene un valor de 0,0485. En cuanto el valor de Durbin-Watson estadístico $> 1,4$, muestra que probablemente no existe autocorrelación seria entre los residuos.

$\gamma = 207,9 \text{ 1/s}$

Multiple Regression Analysis

 Dependent variable: Esfuerzo de corte

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	8.6327	0.0598692	144.193	0.0000
Voltaje	0.0148737	0.00215894	6.88937	0.0001

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.350425	1	0.350425	47.46	0.0001
Residual	0.0664475	9	0.00738305		

 Total (Corr.) 0.416873 10

R-squared = 84.0605 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 82.2894 percent

Standard Error of Est. = 0.0859247

Mean absolute error = 0.0613499

Durbin-Watson statistic = 1.64791

$F_{1\%,1,9} = 10,56$

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 5, para $\gamma = 207,9 \text{ 1/s}$, se encuentra que existe relación estadísticamente significativa entre la variable independiente voltaje con la variable dependiente esfuerzo de corte, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y el Factor de ajuste $F_{calculada} > F_{99\text{tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación: $\tau = 8,6327 + 0,0148737 v$ (Ec. 9)

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 84,06% de la variabilidad en el esfuerzo de corte. El R cuadrado ajustado, el cual es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, reporta un 82,29% de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,0859. El error absoluto de la media, corresponde al valor promedio de los residuos y tiene un valor de 0,0613. En cuanto el valor de Durbin-Watson estadístico $> 1,4$, muestra que probablemente no existe autocorrelación seria entre los residuos.

$\gamma = 348,3 \text{ 1/s}$

Multiple Regression Analysis

 Dependent variable: Esfuerzo de corte

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	12.8811	0.0810202	158.986	0.0000
Voltaje	0.0189394	0.00292166	6.4824	0.0001

 Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.568182	1	0.568182	42.02	0.0001
Residual	0.121691	9	0.0135212		

 Total (Corr.) 0.689873 10

R-squared = 82.3604 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 80.4004 percent

Standard Error of Est. = 0.116281

Mean absolute error = 0.0704683

Durbin-Watson statistic = 1.51195

$F_{1\%,1,9} = 10,56$

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 5, para $\gamma = 348,3 \text{ 1/s}$, se encuentra que existe relación estadísticamente significativa entre la variable independiente voltaje con la variable dependiente esfuerzo de corte, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y el Factor de ajuste $F_{calculada} > F_{99\text{tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación: $\tau = 12,8811 + 0,0189394 v$ (Ec. 10)

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 82,36% de la variabilidad en el esfuerzo de corte. El R cuadrado ajustado, el cual es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, reporta un 80,40% de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,1163. El error absoluto de la media, corresponde al valor promedio de los residuos y tiene un valor de 0,0705. En cuanto el valor de Durbin-Watson estadístico $> 1,4$, muestra que probablemente no existe autocorrelación seria entre los residuos.

$$\gamma = 580,5 \text{ 1/s}$$

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Esfuerzo de corte

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	19.949	0.455504	43.7955	0.0000
Tiempo	-0.000795455	0.000770575	-1.03229	0.3321
Voltaje	0.013548	0.0115586	1.17211	0.2749

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.516251	2	0.258126	1.22	0.3449
Residual	1.693	8	0.211625		
Total (Corr.)	2.20925	10			

R-squared (adjusted for d.f.) = 4.20957 percent

Standard Error of Est. = 0.460028

Mean absolute error = 0.315051

Durbin-Watson statistic = 1.01177

$F_{1\%,1,9} = 10,56$

Como puede verse en esta tabla de ANOVA, los valores de P tanto para el modelo como para cada una de las variables independientes, muestran que este modelo no tiene ningún significado estadístico. De igual forma los valores de F, R cuadrado y Durbin Watson, corroboran lo inferido anteriormente.

Ajuste del modelo de viscosidad aparente contra voltaje y tiempo.

Para este estudio se tomaron los datos de la tabla 2, realizándose un análisis de varianza para cada gradiente de velocidad y al considerar inicialmente para dichos análisis la variable dependiente **viscosidad aparente** y las independientes **voltaje y tiempo**, se encontró que el tiempo no tiene una relación estadísticamente significativa con la viscosidad aparente, ya que p para cada caso arrojó un valor > 0.1 mostrando que el

nivel de confianza es $< 90\%$. Al eliminar la variable t y realizar nuevamente el análisis, se encontraron resultados significativos, los cuales se muestran en las tablas de ANOVA presentadas a continuación.

Tabla 6. Análisis de regresión múltiple para viscosidad aparente en función de voltaje y tiempo, para cada gradiente de velocidad

$\gamma = 43,2 \text{ 1/s}$

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Viscosidad Aparente

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	56.89	0.610978	93.113	0.0000
Voltaje	0.183141	0.0220324	8.31236	0.0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	53.1286	1	53.1286	69.10	0.0000
Residual	6.92026	9	0.768918		
Total (Corr.	60.0489	10			

R-squared = 88.4756 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 87.1951 percent

Standard Error of Est. = 0.87688

Mean absolute error = 0.667587

Durbin-Watson statistic = 2.00478

$F_{1\%,1,9} = 10,56$

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 6, para $\gamma = 43,2 \text{ 1/s}$, se encuentra que existe relación estadísticamente significativa entre la variable independiente voltaje con la variable dependiente viscosidad aparente, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y el Factor de ajuste $F_{calculada} > F_{99\text{tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación: $\eta = 56,89 + 0,183141 v$ (Ec. 11)

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 88,48% de la variabilidad de la viscosidad aparente. El R cuadrado ajustado, el cual es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, reporta un 87,20% de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,8769. El error absoluto de la media, corresponde al valor promedio de los residuos y tiene un valor de 0,6676. En cuanto el valor de Durbin-Watson

estadístico > 1,4, muestra que probablemente no existe autocorrelación seria entre los residuos.

$$\gamma = 75,6 \text{ 1/s}$$

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Viscosidad Aparente

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	49.9017	0.529162	94.3032	0.0000
Voltaje	0.13497	0.0190821	7.07312	0.0001

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	28.8554	1	28.8554	50.03	0.0001
Residual	5.19097	9	0.576774		
Total (Corr.)	34.0464	10			

R-squared = 84.7533 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 83.0592 percent

Standard Error of Est. = 0.759456

Mean absolute error = 0.644127

Durbin-Watson statistic = 2.27182

F_{1%,1,9} = 10,56

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 6, para $\gamma = 75,6 \text{ 1/s}$, se encuentra que existe relación estadísticamente significativa entre la variable independiente voltaje con la variable dependiente viscosidad aparente, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y el Factor de ajuste $F_{\text{calculada}} > F_{99\text{tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación: $\eta = 49,9017 + 0,13497 v$ (Ec. 12)

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 84,75% de la variabilidad de la viscosidad aparente. El R cuadrado ajustado, el cual es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, reporta un 83,06% de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,7595. El error absoluto de la media, corresponde al valor promedio de los residuos y tiene un valor de 0,6441. En cuanto el valor de Durbin-Watson estadístico > 1,4, muestra que probablemente no existe autocorrelación seria entre los residuos.

$\gamma = 124,2 \text{ 1/s}$

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Viscosidad Aparente

Parameter	Standard Estimate	Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	46.3665	0.332752	139.343	0.0000
Voltaje	0.0944583	0.0119993	7.87197	0.0000

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	14.133	1	14.133	61.97	0.0000
Residual	2.05263	9	0.22807		
Total (Corr.)	16.1857	10			

R-squared = 87.3182 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 85.9091 percent

Standard Error of Est. = 0.477567

Mean absolute error = 0.383796

Durbin-Watson statistic = 2.17378

$F_{1\%,1,9} = 10,56$

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 6, para $\gamma = 124,2 \text{ 1/s}$, se encuentra que existe relación estadísticamente significativa entre la variable independiente voltaje con la variable dependiente viscosidad aparente, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y el Factor de ajuste $F_{calculada} > F_{99\text{tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación: $\eta = 46,3665 + 0,0944583 v$ (Ec. 13)

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 87,32% de la variabilidad de la viscosidad aparente. El R cuadrado ajustado, el cual es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, reporta un 85,91% de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,4776. El error absoluto de la media, corresponde al valor promedio de los residuos y tiene un valor de 0,3838. En cuanto el valor de Durbin-Watson estadístico $> 1,4$, muestra que probablemente no existe autocorrelación seria entre los residuos.

$$\gamma = 207,9 \text{ 1/s}$$

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Viscosidad Aparente

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	41.5209	0.288353	143.993	0.0000
Voltaje	0.0714508	0.0103983	6.8714	0.0001

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	8.08665	1	8.08665	47.22	0.0001
Residual	1.54142	9	0.171269		
Total (Corr.)	9.62807	10			

R-squared = 83.9904 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 82.2115 percent

Standard Error of Est. = 0.413846

Mean absolute error = 0.300079

Durbin-Watson statistic = 1.69838

$F_{1\%,1,9} = 10,56$

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 6, para $\gamma = 207,9 \text{ 1/s}$, se encuentra que existe relación estadísticamente significativa entre la variable independiente voltaje con la variable dependiente viscosidad aparente, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y el Factor de ajuste $F_{\text{calculada}} > F_{99\text{tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación: $\eta = 41,5209 + 0,0714508 v$ (Ec. 14)

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 83,99% de la variabilidad de la viscosidad aparente. El R cuadrado ajustado, el cual es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, reporta un 82,21% de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,4138. El error absoluto de la media, corresponde al valor promedio de los residuos y tiene un valor de 0,3001. En cuanto el valor de Durbin-Watson estadístico $> 1,4$, muestra que probablemente no existe autocorrelación seria entre los residuos.

$\gamma = 348,3 \text{ 1/s}$

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Viscosidad Aparente

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
CONSTANT	36.9812	0.230023	160.772	0.0000
Voltaje	0.0544609	0.00829484	6.56563	0.0001

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	4.69812	1	4.69812	43.11	0.0001
Residual	0.980876	9	0.108986		
Total (Corr.)	5.679	10			

R-squared = 82.728 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 80.8089 percent

Standard Error of Est. = 0.330131

Mean absolute error = 0.199306

Durbin-Watson statistic = 1.50569

$F_{1\%,1,9} = 10,56$

De acuerdo con los resultados mostrados en la tabla 6, para $\gamma = 348,3 \text{ 1/s}$, se encuentra que existe relación estadísticamente significativa entre la variable independiente voltaje con la variable dependiente viscosidad aparente, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y el Factor de ajuste $F_{\text{calculada}} > F_{99\text{tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación: $\eta = 36,9812 + 0,0544609 v$ (Ec. 15)

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 82,73% de la variabilidad de la viscosidad aparente. El R cuadrado ajustado, el cual es más conveniente para comparar modelos con diferente número de variables independientes, reporta un 80,81% de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,3301. El error absoluto de la media, corresponde al valor promedio de los residuos y tiene un valor de 0,1993. En cuanto el valor de Durbin-Watson estadístico $> 1,4$, muestra que probablemente no existe autocorrelación seria entre los residuos.

$$\gamma = 580,5 \text{ 1/s}$$

Multiple Regression Analysis

 Dependent variable: Viscosidad Aparente

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	34.5474	0.816188	42.3277	0.0000
Voltaje	0.0233813	0.0207112	1.12892	0.2916
Tiempo	-0.0013729	0.00138074	-0.994315	0.3492

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	1.53771	2	0.768854	1.13	0.3692
Residual	5.43569	8	0.679461		
Total (Corr.)	6.97339	10			

R-squared = 22.0511 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 2.56384 percent

Standard Error of Est. = 0.824294

Mean absolute error = 0.573792

Durbin-Watson statistic = 2.05261

$F_{1\%,1,9} = 10,56$

Como puede verse en esta tabla de ANOVA, los valores de P tanto para el modelo como para cada una de las variables independientes, muestran que este modelo no tiene ningún significado estadístico. De igual forma los valores de F y R cuadrado corroboran lo inferido anteriormente.

Ajuste del modelo de índice de consistencia en función del voltaje y del tiempo.

Para este caso se encontró que el modelo más conveniente depende de las variables Ln voltaje y Ln tiempo. Los datos de este análisis se encuentran en la tabla 7.

Tabla 7. Análisis de regresión múltiple para Índice de Consistencia en función de voltaje y tiempo

Multiple Regression Analysis

 Dependent variable: Indice de Consistencia

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
-----------	----------	----------------	-------------	---------

Ln Voltaje	0.0697963	0.00591153	11.8068	0.0000
Voltaje	-0.00286415	0.000665577	-4.30325	0.0020

 Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0.22385	2	0.111925	449.61	0.0000
Residual	0.00224043	9	0.000248936		
Total (Corr.)	0.22609	11			

R-squared = 99.01 percent
 R-squared (adjusted for d.f.) = 98.90 percent
 Standard Error of Est. = 0.0157777
 Mean absolute error = 0.0100446
 Durbin-Watson statistic = 2.90022
 $F_{1\%,1,9} = 8,02$

De acuerdo con los datos de la tabla 7, se encuentra que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables independientes ln voltaje y voltaje, con la variable dependiente índice de consistencia, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y $F_{calculada} > F_{99 \text{ tabulada}}$).

En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación: $k = 0,0697963 \ln v - 0,00286415v$ (Ec. 16)

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 99,01 % de la variabilidad en el índice de consistencia. El R cuadrado ajustado, reporta un 98,90 % de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,01778. El error absoluto de la media, correspondiente al valor promedio de los residuos tiene un valor de 0,01004.

Ajuste del modelo de índice de flujo vs voltaje y tiempo. Para este caso se encontró que el modelo matemático más conveniente no depende del tiempo, sino de las variables voltaje y Ln voltaje. Los datos de este análisis se muestran en la table 8.

Tabla 8. Análisis de regresión múltiple para Índice de Flujo función de voltaje y tiempo

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: Indice de Flujo

Parameter	Standard Estimate	T Error	Statistic	P-Value
Ln Voltaje	0.398377	0.033772	11.796	0.0000
Voltaje	-0.0182839	0.00380239	-4.80853	0.0010

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	6.4417	2	3.22008	396.34	0.0000
Residual	0.0731218	9	0.00812465		
Total (Corr.)	6.51329	11			

R-squared = 98.8773 percent

R-squared (adjusted for d.f.) = 98.7526 percent

Standard Error of Est. = 0.0563523

Mean absolute error = 0.0666462

Durbin-Watson statistic = 2.67497

$F_{1\%,1,9} = 8,02$

De acuerdo con los datos de la tabla 8, se encuentra que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables independientes, voltaje y ln voltaje, con la variable dependiente índice de flujo, con un nivel de confianza mayor del 99% ($P < 0.01$ y $F_{calculada} > F_{99 \text{ tabulada}}$). En consecuencia el modelo matemático que representa esta relación se expresa en la siguiente ecuación: $\eta = 0,398377\text{Inv} - 0,0182839v$ (Ec. 17)

El R cuadrado estadístico en este modelo ajustado, indica el 98,88 % de la variabilidad en el índice de flujo. El R cuadrado ajustado, reporta un 98,75 % de variabilidad. El error estándar de los estimados muestra que la desviación estándar de los residuos es de 0,05635. El error absoluto de la media, correspondiente al valor promedio de los residuos tiene un valor de 0,002372

Conclusiones

Los modelos determinados mediante las prácticas realizadas, permiten obtener las siguientes conclusiones:

- Las características reológicas del sabajón (sin aplicación de voltaje) son independientes del tiempo, ya que el grado de tixotropía es de 1,90 %, valor relativamente bajo, como puede observarse en la figura 3, lo cual puede responder al error experimental y no al cambio de las características reológicas en función del tiempo.
- La muestra de sabajón estudiada, es un fluido ligeramente pseudoplástico, como lo indica el valor medio de índice de flujo de 0,816.
- El índice de flujo, n , disminuye con la aplicación de voltaje desde 0,815 hasta 0,754, lo que permite concluir que la pseudoplasticidad del sabajón aumenta ligeramente con el tratamiento eléctrico.
- El índice de consistencia, k , aumenta con la aplicación de voltaje desde 0,112 hasta 0,155, permitiendo inferir que la viscosidad del fluido (sabajón) aumenta debido a mejor ordenamiento molecular de la muestra tratada.
- El comportamiento reológico del sabajón, con y sin aplicación de voltaje, se ajusta al modelo de la ley de potencia, presentando un alto grado de correlación entre el

esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad, como lo muestran las curvas de flujo anexas.

- El esfuerzo de corte presenta una correlación estadísticamente significativa con el voltaje para valores de gradiente de velocidad entre 43,2 y 348,3 1/s, no mostrando el mismo comportamiento para el valor de 580,5 1/s, como se aprecia en la tabla 7.
- La viscosidad aparente presenta una correlación estadísticamente significativa con el voltaje, para valores de gradiente de velocidad entre 43,2 y 348,3 1/s, no mostrando el mismo comportamiento para el valor de 580,5 1/s, como se aprecia en la tabla 8.
- Hay una correlación estadísticamente significativa entre el índice de consistencia y las variables independientes Ln voltaje y voltaje, como se observa en la tabla 9.
- Hay una correlación estadísticamente significativa entre el índice de flujo y las variables independientes voltaje y Ln voltaje, lo cual puede observarse en la tabla 10.
- El tiempo no es una variable significativa que influya sobre las características reológicas del sabajón en el intervalo de voltaje aplicado.

Bibliografía

- 📖 Barros Neto, B. 2001. Como Fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciencia en la industria. Editora UNICAMP, Campinas, Brazil.
- 📖 Coulson, J. M. Y Richarson J. R. 1979. Ingeniería Química. Editorial.
- 📖 Reverté S.A. Barcelona.
- 📖 Daubert, C.R., Steffe, J.F. 1997. Electrorheological behavior of milk chocolate. Journal of textura Studies, 27 (1) 93-108.
- 📖 Daubert, C.R. 1997. Electhorheology of fluid foods. Dissertation Abstracts International, B: 57 (9) 5406 order no. DA9706474,191pp.
- 📖 Daubert, C.R., Steffe, J.F., Srivastava, A. 1998. Predicting the electrorheological behavior of milk chocolate. Journal of Food Process Engineering, 21 (3) 249-261.
- 📖 Horn, R. 2000. The effect of electric fields on thin liquid films. www.iwri.city.unisa.edu.au/projects.
- 📖 Kann, R.C. y Montgomery S. 1998. Enhanced Electrorheological fluids using anisotropic particles. Journal of Rheology, 42 (3).
- 📖 Larson, R. G. 1999. The structure and rheology of complex fluids. Oxford University Press. New York.
- 📖 Morrison F. A. 2001. Understanding rheology. Oxford University Press. New York.
- 📖 Muller H. G. 1973. Introducción a la reología de los alimentos. Editorial Acribia. Zaragoza (España).
- 📖 Perry J. H. 1950. Chemical Engineers's Handbook. 1950. McGraw- Hill Book Company. Inc USA.
- 📖 Sotelo I. 2001. Seminario de Investigación. UNAD. Bogotá, Colombia.
- 📖 Steffe, J.F. 1996. Rheological Methods in Food Process Engineering. Segunda Edición. Freeman Press. US.
- 📖 www.adepta.Com/Innovacionestecnológicas/PulsosEléctricos (activo en Septiembre 2002).
- 📖 Zumalacárregui. L. 2001. Notas de aula sobre reología. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba.