

## Reología de derivados de la yema de huevo deshidratada

Por Juan Miranda<sup>1</sup>, Antonio F. Guerrero<sup>\*1</sup> y Pedro Partal<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dep. Ingeniería Química. Facultad de Química. Universidad de Sevilla. c/ Prof. García González s/n. 41012 Sevilla. Spain (E-mail: miranda@cica.es; aconejo@cica.es).

<sup>2</sup> Dep. Ingeniería Química, Química Física y Química Orgánica. Esc. Pol. Sup. La Rábida. Universidad de Huelva. Carr. Huelva-Palos. Palos de la Fra. Spain (E-mail: partal@uhu.es)

### RESUMEN

#### Reología de derivados de la yema de huevo deshidratada.

Tanto el proceso de emulsificación como las propiedades reológicas y la estabilidad de una emulsión alimentaria, tipo mayonesa, dependen en gran medida de la microestructura y la reología de la fase continua acuosa, cuyo ingrediente principal es la yema de huevo. Debido a la inestabilidad microbiológica de ésta se hacen necesarios procesos de deshidratación por atomización para conservarla con fines alimentarios. En este trabajo se trata de determinar la influencia que ejerce la deshidratación sobre la microestructura analizando las propiedades reológicas de la yema mediante ensayos reológicos de cizalla oscilatoria, de flujo en estado estacionario y de fluencia viscosa. Se llegó a la conclusión de que la deshidratación produce la desnaturalización de las proteínas provocando un cambio desde un comportamiento tipo fluido (yema nativa) a un comportamiento tipo gel (yema deshidratada reconstituida al 45% en sólidos). Por otro lado, se ha observado una escasa variación de las propiedades viscoelásticas lineales de la yema deshidratada con la temperatura.

**PALABRAS-CLAVE:** Reología - Viscoelasticidad - Viscosidad - Yema de huevo.

### SUMMARY

#### Rheology of spray-dried egg-yolk products.

The emulsification process, as well as and the emulsion rheology and stability, greatly depends on the rheological properties of the continuous phase, the most important ingredient of which is yolk. However, since native yolk is not microbiologically stable, processing of yolk, such as spray-drying, is necessary for food applications. The influence of processing by spray-drying on the microstructure and rheological properties of yolk was investigated using oscillatory, creep and steady state flow measurements. The spray-drying process produces denaturation of proteins giving rise to a dramatic change from a fluid-like behaviour, as corresponds to the native yolk, to a gel-like behaviour corresponding to the reconstituted dried yolk (45% solids). Temperature exerts a slight influence on the linear viscoelastic properties of processed yolk.

**KEY-WORDS:** Egg yolk - Rheology - Viscoelasticity - Viscosity.

## 1. INTRODUCCIÓN

La yema de huevo es utilizada en la industria alimentaria, principalmente, para fabricar y estabilizar

emulsiones aceite en agua, como mayonesas, aderezos de ensaladas y salsas. La alta estabilidad de las emulsiones y sus propiedades reológicas dependen de varios parámetros estructurales, referidos a la fase dispersa, a la interfase o a la fase continua. Además, el proceso de emulsificación y las propiedades finales de la emulsión dependen en gran medida de la microestructura y las propiedades reológicas de la fase continua acuosa sobre la cual se añade la fase oleosa.

La yema de huevo natural consiste en una dispersión de partículas en una fase acuosa o plasma. Está compuesta por una compleja asociación de lípidos, proteínas y agua. Los lípidos constituyen un 33% del peso total de la yema, mientras que las proteínas y el agua representan aproximadamente el 17 y el 48%, respectivamente. Los fosfolípidos constituyen el 25% de los lípidos de los cuales la lecitina y la cefalina representan el 75 y el 20% del total de los fosfolípidos, respectivamente (Shenstone, 1968). En la yema de huevo natural de gallinas domésticas, los lípidos y las proteínas están unidos por enlaces no covalentes en forma de grandes complejos lipoproteicos (Burley y Vadehra, 1989). Estos frágiles complejos proporcionan las máximas propiedades funcionales a la yema de huevo. Sin embargo, debido a la inestabilidad microbiológica de la yema natural, los procesos de congelación y secado son necesarios para conservar la yema con fines alimenticios. En general, los procesos de conservación perjudican la capacidad de emulsificación de la yema por rotura de los complejos lipoproteicos. Así, Schultz *et al.* (1968) observaron un aumento de lípidos libres debido a la deshidratación, el cual fue relacionado con la disminución del poder de emulsificación de la yema deshidratada. Según Burley y Vadehra (1989), es bastante probable que el secado produzca alteraciones de la estructura natural de la yema.

Basándose en estas consideraciones, un estudio de las propiedades reológicas de los productos del huevo natural y procesado (secado por atomización) puede considerarse de gran interés. El objetivo del presente trabajo es analizar el efecto del procesado de la yema de huevo y la temperatura sobre su estructura y su comportamiento reológico. Este estudio

permitirá relacionar estos resultados con la modificación de las propiedades funcionales de los derivados de la yema de huevo.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

Se han realizado distintos ensayos reológicos utilizando dos tipos de yemas: yema deshidratada por atomización (YD) y yema líquida técnica o nativa (YN). La yema deshidratada, suministrada por OVO-SEC S.A. (Valladolid), se reconstituyó con agua hasta el 45% de sólidos. La yema comercial líquida o yema nativa fue proporcionada por Hijos de Ybarra S.A. Se trata de una yema técnica, ya que contiene algo de clara (entre un 2 y un 5%) y, además, contiene un 10% de sal. Todas las muestras se prepararon a temperatura ambiente pesando los componentes en un recipiente y posteriormente agitando con una espátula hasta su completa homogeneización.

Los ensayos reológicos se han realizado en un reómetro de esfuerzo controlado Reostress, RS100 de la marca Haake (Alemania). Dependiendo de las características del producto se han utilizado dos tipos de sensores: un cono-placa (20 mm de diámetro y ángulo de 4°) y un placa-placa (60 mm de diámetro y distancia entre placas de 1 mm). Por otro lado, se realizaron ensayos de flujo en estado estacionario con sistemas sensores lisos y rugosos obteniéndose en ambos casos los mismos resultados. De esta forma se puede asegurar la no existencia de efectos de deslizamiento en las paredes del sistema sensor (Barnes, 1995) en los ensayos llevados a cabo en el presente trabajo.

Se han llevado a cabo ensayos de viscoelasticidad lineal en cizalla oscilatoria y de fluencia viscosa. Además, se han realizado ensayos de flujo estacionario.

En los ensayos de cizalla oscilatoria se han realizado barridos de frecuencia entre  $10^{-2}$  y  $10^2$  rad/s, aplicando un esfuerzo comprendido en el intervalo de viscoelasticidad lineal de la muestra. Para obtener dicho intervalo viscoelástico lineal, previamente, se realizaron barridos de esfuerzo a una frecuencia constante de 6,28 rad/s.

Los ensayos de flujo estacionario se llevaron a cabo aumentando el esfuerzo desde un valor mínimo hasta un valor máximo que dependieron ambos del tipo de muestra en cuestión. Para cada valor de esfuerzo aplicado, se esperó el tiempo necesario para alcanzar un valor estacionario de velocidad de cizalla o viscosidad.

Se efectuaron ensayos de fluencia viscosa para estudiar el comportamiento de la yema reconstituida al 45% de sólidos a una temperatura de 20°C.

Todas las muestras tuvieron la misma historia termo-mecánica. El intervalo de temperaturas estudiado ha sido de 5 a 50°C.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Ensayos de cizalla oscilatoria

Se realizaron ensayos de cizalla oscilatoria para estudiar la influencia de la deshidratación y de la temperatura sobre la reología de la yema de huevo.

Las determinaciones reológicas dentro del intervalo viscoelástico lineal exigen obtener la respuesta del material, en condiciones de medida en las cuales la estructura interna del mismo no se ve afectada. Por consiguiente, es necesario determinar los valores límite de esfuerzo ( $\sigma_c$ ) o deformación ( $\gamma_c$ ) para los que el material se encuentra dentro de dicho intervalo. En ensayos oscilatorios, esto se puede hacer manteniendo constante la frecuencia de cizalla oscilatoria y obteniendo la respuesta del material para distintos valores del esfuerzo. El resultado es que las funciones viscoelásticas del material no dependen del esfuerzo por debajo de un determinado valor crítico,  $\sigma_c$ . Una vez superado este esfuerzo crítico, dichas funciones pasan a depender del esfuerzo aplicado, lo cual revela la existencia de procesos de destrucción estructural en la muestra.

#### 3.1.1. Influencia de la deshidratación

En este caso la determinación del intervalo viscoelástico lineal se ha realizado estudiando la variación del módulo de cizalla complejo,  $G^*$ , con la deformación (Figura 1), fijándose la frecuencia de oscilación en 6,28 rad/s. Como puede observarse la yema deshidratada presenta valores del módulo complejo muy superiores a los de la yema nativa. Sin embargo el valor de la deformación crítica ( $\gamma_c$ ) es menor para la yema reconstituida.

Una vez determinado el intervalo viscoelástico lineal se realizaron barridos de frecuencia manteniendo constante el esfuerzo dentro de dicho intervalo. En la Figura 2 se representan los valores de los módulos de almacenamiento y pérdidas,  $G'$  y  $G''$ , frente a la frecuencia tanto para la yema nativa como para la yema reconstituida. De nuevo, se observa la gran influencia de la deshidratación, que hace que se pase de una yema nativa en la que predomina la componente viscosa ( $G''$ ) a una yema deshidratada reconstituida en la que predomina la componente elástica ( $G'$ ). Además, los valores de  $G'$  y  $G''$  son mucho mayores para la yema deshidratada. Por otro lado, el espectro mecánico de la yema reconstituida presenta, en el intervalo experimental estudiado, la denominada región «plateau», que se corresponde con una zona de pendiente casi nula en  $G'$ , acompañada por la aparición de un mínimo en  $G''$ , lo cual es indicativo de un alto grado de estructuración en las muestras (Franco *et al.*, 1995). Mientras que el espectro mecánico de la yema nativa presenta características próximas a las de un fluido de Maxwell

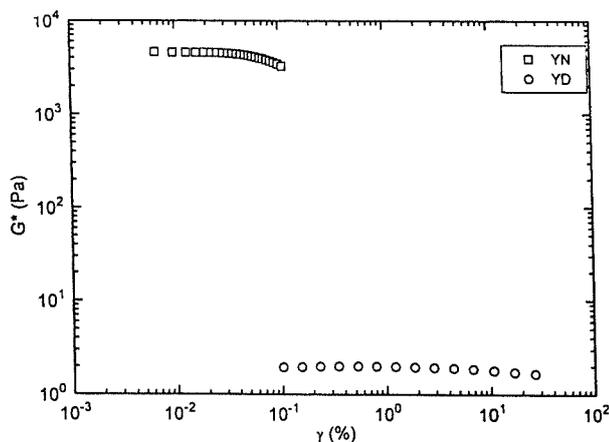


Figura 1  
Intervalo viscoelástico lineal para las yemas nativa y deshidratada reconstituida al 45% en sólidos (T=20°C)

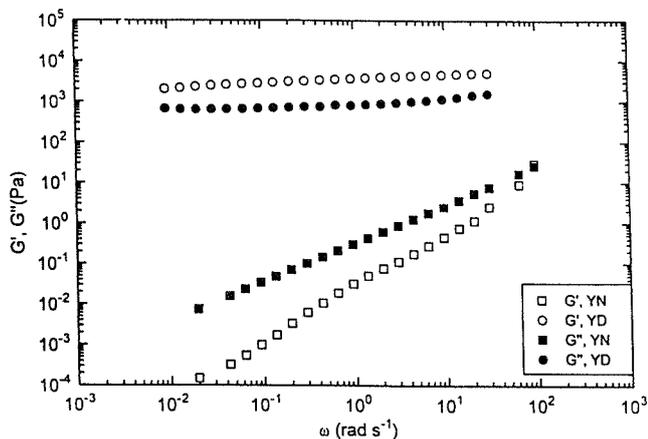


Figura 2

Evolución con la frecuencia de los módulos de almacenamiento y pérdidas para las yemas nativa y deshidratada reconstituida al 45% en sólidos (T=20°C)

(Ferry, 1980) en el que sólo aparece la zona terminal dentro del rango experimental de frecuencias.

### 3.1.2. Influencia de la Temperatura

Se estudió la influencia de la temperatura entre 5 y 50°C sobre las propiedades viscoelásticas de la yema reconstituida, mediante ensayos de cizalla oscilatoria. La determinación del intervalo viscoelástico lineal se llevó a cabo de la misma forma que en el apartado anterior, poniéndose de manifiesto la escasa influencia de la temperatura.

En la Figura 3 se representan los valores de  $G'$  y  $G''$  para cada temperatura. Como puede observarse, independientemente de la temperatura de estudio, el módulo de almacenamiento presenta valores superiores a los del módulo de pérdidas en el intervalo de frecuencias estudiado. Además, en todos los casos

se puede observar un mínimo de  $G''$  correspondiente a la región plateau y característico de un sistema altamente estructurado. Por otra parte, se ha encontrado que la influencia de la temperatura sobre los valores de  $G'$ , y  $G''$  es significativa. Así las curvas correspondientes a las temperaturas 15, 20, 25 y 30°C son prácticamente iguales. Mientras que las correspondientes a 5 y 10°C tienen valores superiores y las de 40 y 50°C valores inferiores.

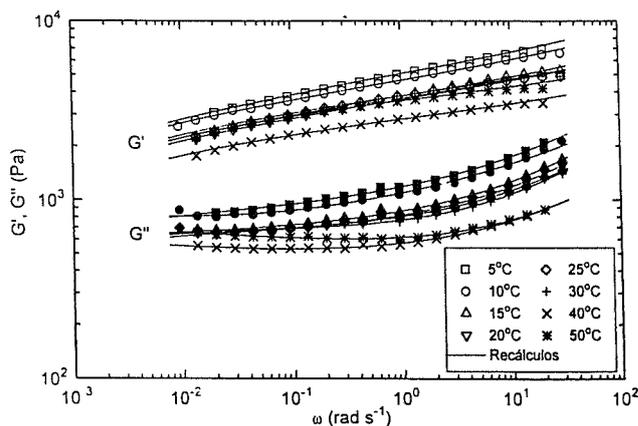


Figura 3

Valores experimentales y recalculados de los módulos de almacenamiento y pérdidas para la yema deshidratada reconstituida al 45% en sólidos en función de la temperatura y de la frecuencia.

Se observa que a medida que aumenta la temperatura disminuyen  $G'$  y  $G''$ . Sin embargo, las curvas correspondientes a 50°C son mayores que las de 40°C. Esto puede ser debido a que a 50°C se produce cierta desnaturalización de parte de las proteínas de la yema, aumentando el entrelazamiento entre moléculas, y por tanto una gelificación parcial de la misma, provocando un efecto inverso al de la temperatura.

A medida que aumenta la temperatura, la zona intermedia del espectro mecánico o zona «plateau» pasa, de estar caracterizada por la aparición de un mínimo en  $G''$ , a poseer una región de valores prácticamente constantes.

A partir de los valores experimentales del módulo de pérdidas,  $G''(\omega)$ , se ha obtenido el espectro de relajación,  $H(\lambda)$ , de cada una de las temperaturas estudiadas. La relación que guarda esta función viscoelástica lineal con el espectro viene dada por la Ecuación 1. Por tanto, resolviendo esta ecuación, podría obtenerse la función  $H(\lambda)$ , ya que  $G''$  se ha obtenido experimentalmente. Esta relación es una ecuación integral de Fredholm de primera especie (Groetsch, 1984). Para resolver esta ecuación y calcular así los espectros de relajación del material se han utilizado técnicas de regularización (Tikhonov y Arsein, 1979; Tikhonov e Ibinskij, 1980). Dichos

cálculos se han realizado con el programa Rheospec 2.0 (Madiedo, 1995), realizándose un ajuste al módulo de pérdidas de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$G''(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\lambda) \frac{\omega\lambda}{1 + \omega^2 \lambda^2} d(\ln \lambda) \quad (1)$$

Una vez obtenido el espectro de relajación se puede predecir el módulo de almacenamiento utilizando la siguiente ecuación:

$$G'(\omega) = G_e + \int_{-\infty}^{\infty} H(\lambda) \frac{\omega^2 \lambda^2}{1 + \omega^2 \lambda^2} d(\ln \lambda) \quad (2)$$

Como se puede observar en la Figura 3 el espectro de relajación describe satisfactoriamente la evolución de ambas funciones viscoelásticas con la frecuencia, independientemente de la temperatura de estudio.

En la Figura 4 se presentan los valores del espectro de relajación que corresponden al intervalo experimental de tiempos de relajación obtenidos para las distintas temperaturas. Los sistemas estudiados presentan dos de las regiones descritas en la bibliografía (Ferry, 1980), la región plateau y el comienzo de la zona de transición. El espectro de relajación ha sido ajustado al modelo empírico de Madiedo y Gallegos (1997) simplificado para las dos regiones mencionadas:

$$H(\lambda) = \alpha \lambda^m + \beta \lambda^n \quad (3)$$

donde m y n están relacionados con la pendiente de estas dos primeras zonas del espectro y las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  se definen como sigue:

$$\alpha = \frac{H_0 n}{(n - m) \lambda_0^m} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{H_0 m}{(m - n) \lambda_0^n} \quad (5)$$

donde el parámetro  $\lambda_0$  es el tiempo de relajación correspondiente al comienzo de la región plateau y  $H_0$  es el valor del espectro para  $\lambda_0$ . Otro parámetro característico de la región plateau es el módulo plateau,  $G_N^0$ , definido como la extrapolación a altas frecuencias de la contribución de los entrelazamientos a  $G'$  (Baumgaertel *et al.*, 1992). Dicho módulo puede obtenerse fácilmente, de forma aproximada, a través de la tangente de pérdidas (Wu, 1989). El valor de  $G_N^0$ , ha sido estimado a partir del módulo de almacenamiento,  $G'$ , para la frecuencia,  $\omega_{min}$ , en la que

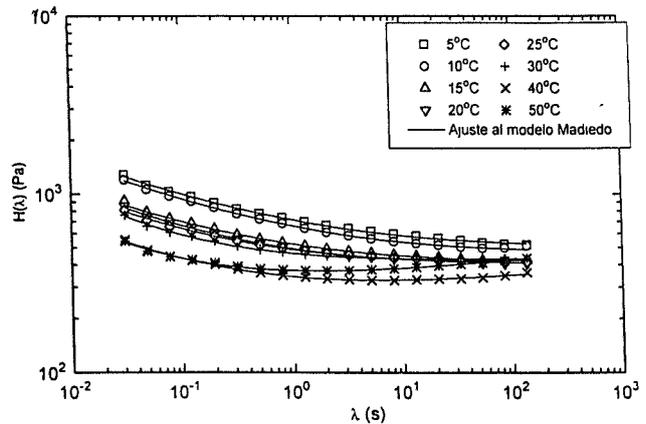


Figura 4  
Variación del espectro de relajación con el tiempo de relajación y la temperatura para la yema deshidratada reconstituida al 45% en sólidos

la tangente de pérdidas ( $\tan \delta$ ) presenta un valor mínimo. Es decir:

$$G_N^0 = [G']_{\tan \delta \rightarrow \min} \quad (6)$$

Como puede observarse en la Figura 5 el módulo plateau y el parámetro  $H_0$  siguen la misma evolución. De hecho se ha encontrado que la relación entre ambos parámetros se mantiene prácticamente constante ( $H_0/G_N^0 = 0,11$ ). Así, se observa una tendencia de ambos parámetros a disminuir con la temperatura, lo que pone de manifiesto un descenso del grado de estructuración del sistema. De nuevo se observa un cierto aumento de estos parámetros reológicos a la temperatura de 50°C.

Por otro lado,  $\lambda_0$  disminuye con la temperatura, es decir, se produce una reducción de la zona plateau debida a un debilitamiento por agitación térmica de las estructuras del sistema.

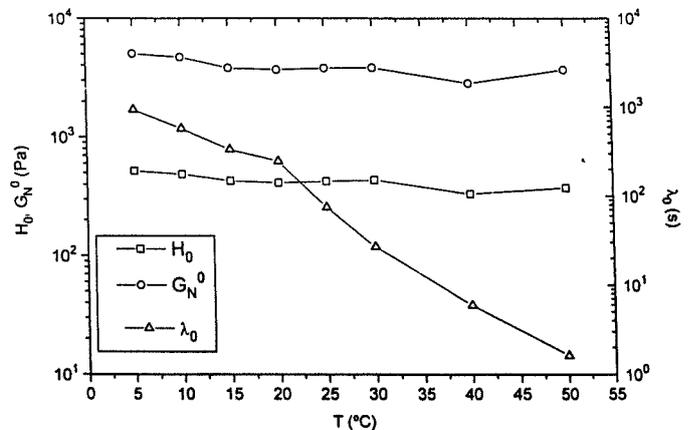


Figura 5  
Evolución con la temperatura del módulo plateau y de los parámetros  $H_0$  y  $\lambda_0$  para la yema deshidratada reconstituida al 45% en sólidos.

### 3.2. Ensayos de flujo en estado estacionario

En la Figura 6 se presenta el comportamiento en flujo estacionario de la yema nativa y la deshidratada reconstituida. En ambos casos la evolución de la viscosidad,  $\eta$ , frente a la velocidad de cizalla,  $\dot{\gamma}$ , se ajustó al modelo de Carreau (Barnes *et al.*, 1989) característico de fluidos estructurados:

$$\eta = \frac{\eta_0}{[1 + (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_c)^2]^s} \quad (7)$$

Sin embargo, como se observa en dicha figura la yema nativa es prácticamente un fluido newtoniano. Para el caso de la yema reconstituida la variación que presenta la viscosidad frente a la velocidad de cizalla corresponde al comportamiento clásico de un fluido estructurado, presentando una tendencia a alcanzar una viscosidad límite,  $\eta_0$ , a muy bajas velocidades, seguido, a partir de cierta velocidad de cizalla crítica,  $\dot{\gamma}_c$ , de un descenso prácticamente potencial de la viscosidad caracterizado por su pendiente que está directamente relacionada con el parámetro  $s$  del modelo de Carreau (región pseudoplástica). También, puede observarse el gran efecto que produce la deshidratación sobre el de la yema nativa tanto en el valor de la viscosidad límite newtoniana (YN: 0,465 Pa·s y YD:  $3,29 \cdot 10^6$  Pa·s) como en el valor de  $s$  relacionado con la pendiente de la zona pseudoplástica (YN: 0,032 y YD: 0,45), parámetro relacionado con la destrucción estructural debido a la cizalla.

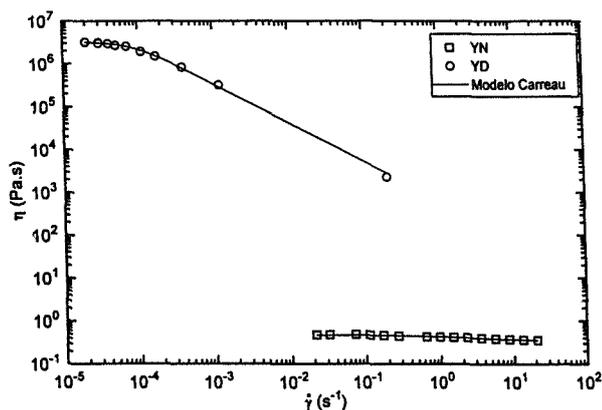


Figura 6

Evolución de la viscosidad con la velocidad de cizalla y su ajuste al modelo de Carreau para las yemas nativa y deshidratada reconstituida al 45% en sólidos ( $T=20^{\circ}\text{C}$ ).

### 3.3. Ensayos de fluencia viscosa

Para caracterizar la yema deshidratada reconstituida se realizaron ensayos de fluencia viscosa den-

tro del intervalo viscoelástico lineal. En la Figura 7 puede observarse la evolución de la capacitancia,  $J(t)$ , respecto al tiempo. Inicialmente se produce una respuesta prácticamente instantánea seguida de un crecimiento no lineal de la capacitancia conforme aumenta el tiempo de cizalla, con una progresiva disminución de la pendiente de la curva  $J(t)$ . Tras un determinado tiempo de cizalla la variación de la capacitancia con el tiempo es aproximadamente lineal. La evolución de la capacitancia con el tiempo se ha ajustado al modelo de Kelvin-Voigt generalizado:

$$J(t) = J_0^0 + \frac{t}{\eta_0} - \sum_{i=1}^n J_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \quad (8)$$

siendo  $J_0^0$  la capacitancia en estado estacionario,  $\eta_0$  la viscosidad newtoniana y  $\tau_i$  los tiempos de retardación característicos del material.

Han sido necesarios tan sólo dos términos exponenciales ( $n=2$ ) para conseguir un ajuste satisfactorio entre las curvas experimentales y el modelo, por lo que el sistema se ha caracterizado mediante dos tiempos de retardación. Los valores obtenidos para la capacitancia en estado estacionario y para la viscosidad límite a baja velocidad de cizalla son  $6,53 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}^{-1}$  y  $3,29 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , respectivamente. Como se puede observar, el valor de  $\eta_0$  obtenido mediante el ajuste al modelo de Carreau de la curva de flujo ( $\eta_0 = 3,29 \cdot 10^6$ ) coincide con el obtenido a partir de la modelización de la capacitancia con la ecuación de Kelvin-Voigt.

A continuación, se realizó una comparación entre la viscosidad compleja,  $\eta^*$  obtenida a partir de ensayos de oscilatorio y de fluencia, y la viscosidad aparente obtenida a partir de ensayos de flujo estacionario. A partir de los valores de los parámetros reológicos obtenidos en ensayos de fluencia ( $J_0^0$ ,

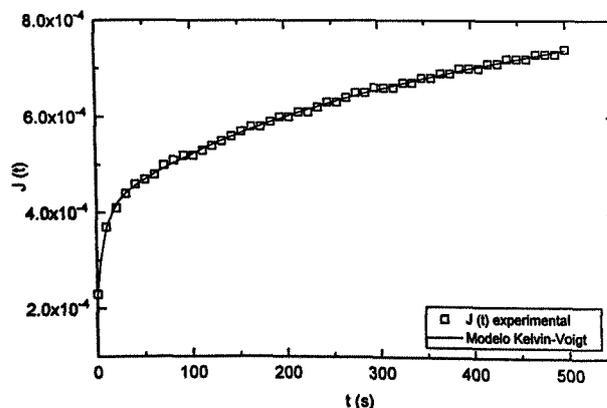


Figura 7

Evolución de la capacitancia en función del tiempo para la yema deshidratada reconstituida al 45% en sólidos y su ajuste al modelo de Kelvin-Voigt.

$\eta_0, J_1, J_2, \tau_1$  y  $\tau_2$ ) puede calcularse de forma aproximada la viscosidad compleja en función de la frecuencia. En primer lugar, se calculan las componentes viscosa y elástica de la capacitancia,  $J'(\omega)$  y  $J''(\omega)$  mediante las expresiones correspondientes al modelo de Kelvin-Voigt:

$$J'(\omega) = J_0^0 - \sum_{n=1}^2 J_n \frac{(\omega\tau_n)^2}{1 + (\omega\tau_n)^2} \quad (9)$$

$$J''(\omega) = \sum_{n=1}^2 J_n \frac{\omega\tau_n}{1 + (\omega\tau_n)^2} + \frac{1}{\omega\eta_0} \quad (10)$$

En segundo lugar, se obtienen los valores de  $G'$  y  $G''$  mediante las relaciones de éstas con  $J'(\omega)$  y  $J''(\omega)$  (Ecuaciones 11 y 12):

$$G'(\omega) = \frac{J'}{(J')^2 + (J'')^2} \quad (11)$$

$$G''(\omega) = \frac{J''}{(J')^2 + (J'')^2} \quad (12)$$

Y, finalmente, se calcula la viscosidad compleja mediante la ecuación que relaciona ésta con los módulos de almacenamiento y pérdidas (Ecuación 13):

$$\eta^* = \frac{\sqrt{(G')^2 + (G'')^2}}{\omega} \quad (13)$$

En la Figura 8 se observa que los valores de  $\eta^*$  obtenidos por el procedimiento descrito presentan una concordancia aceptable con los valores de los ensayos de oscilatorio.

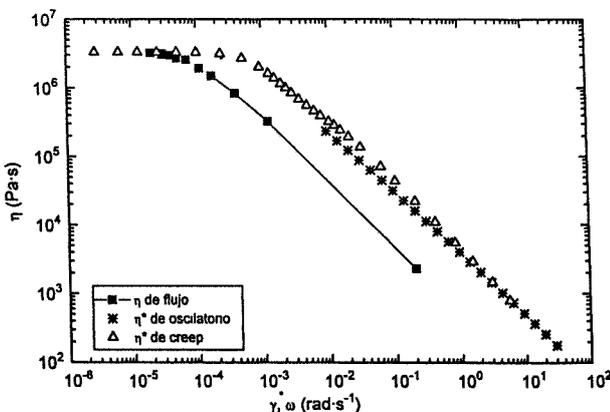


Figura 8

Comparación de viscosidades obtenidas a partir de ensayos de oscilatorio, flujo estacionario y fluencia para la yema deshidratada reconstituida al 45% en sólidos, ( $T=20^\circ\text{C}$ ).

Por consiguiente la utilización de distintos ensayos reológicos permite realizar una comparación entre la viscosidad compleja, que define el comportamiento viscoelástico lineal en un amplio intervalo de frecuencias, y la viscosidad correspondiente al estado estacionario. La primera zona de baja frecuencia se obtiene mediante ensayos de fluencia viscosa y como se observa predice el mismo valor de viscosidad límite que el obtenido en flujo estacionario. Por el contrario la zona de frecuencias altas queda descrita por los ensayos de cizalla oscilatoria (zona potencial). Como se puede observar, a frecuencias o velocidades de cizalla intermedias se obtienen valores más altos de la viscosidad compleja. Este hecho refleja la fuerte destrucción estructural que sufre el sistema como consecuencia del flujo en estado estacionario.

#### 4. CONCLUSIONES

La desnaturalización de las proteínas, que se produce durante el secado por atomización de la yema de huevo, da lugar a un cambio en las propiedades reológicas de los sistemas, pasando de un comportamiento tipo fluido, en las muestras de yema nativa, a un comportamiento tipo gel, en las muestras de yema deshidratada reconstituida. Así, el desdoblamiento de las proteínas promueve la formación de un entramado tipo gel.

La temperatura sólo ejerce una influencia moderada sobre el comportamiento viscoelástico lineal de las muestras de yema deshidratada reconstituida. Sin embargo, a la temperatura más alta ( $50^\circ\text{C}$ ) se observa un ligero aumento de estructuración que podría atribuirse a un incremento del grado de desdoblamiento o desnaturalización de las proteínas.

Mediante el uso de los ensayos viscoelásticos lineales (cizalla oscilatoria y fluencia viscosa) se puede describir el comportamiento viscoelástico lineal del sistema en un amplio intervalo de frecuencias. La comparación de la viscosidad compleja con la viscosidad obtenida en ensayos destructivos como el flujo estacionario pone de manifiesto la fuerte destrucción estructural que sufre el sistema debido a la cizalla en todos los casos en los que se ha utilizado yema procesada.

#### NOMENCLATURA

- $\gamma$  Componente  $\gamma_{12}$  del tensor deformación (o deformación por cizalla).
- $\gamma_c$  Deformación crítica.
- $\dot{\gamma}$  Componente  $\dot{\gamma}_{12}$  del tensor velocidad de deformación (o velocidad de cizalla).
- $\dot{\gamma}_c$  Velocidad de cizalla crítica.
- $\delta$  Desfase angular.

$\eta$	Viscosidad.
$\eta^*$	Viscosidad compleja.
$\eta_0$	Viscosidad límite a bajas velocidades de cizalla.
$\eta_\infty$	Viscosidad límite a altas velocidades de cizalla.
$\lambda$	Tiempo de relajación.
$\lambda_0$	Tiempo de relajación crítico que separa las zonas de transición y plateau.
$\sigma_c$	Esfuerzo crítico.
$\omega$	Frecuencia angular.
$G'$	Módulo de almacenamiento.
$G''$	Módulo de pérdidas.
$G^*$	Módulo de cizalla complejo.
$G_N^0$	Módulo plateau.
$\tan(\delta)$	Tangente de pérdidas.
H	Espectro de relajación.
$H_0$	Valor del espectro de relajación para $\lambda_0$ .
J	Capacitancia.
$J'$	Capacitancia de almacenamiento.
$J''$	Capacitancia de pérdidas.
$J_c^0$	Capacitancia en estado estacionario.
m	Parámetro relacionado con la pendiente de la zona de transición del espectro.
m	Parámetro relacionado con la pendiente de la zona plateau del espectro.
s	Factor del modelo de Carreau.
t	Tiempo.
T	Temperatura.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de un proyecto financiado por la CICYT (Proyecto ALI96-0892). Los autores desean hacer constar su agradecimiento por dicha financiación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Barnes, H.A. (1995).—«A review of the slip (wall depletion) of polymer solution, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character and cure».—*Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, **56**, 221-251.
- Barnes, H.A.; Hutton, J.F.; Walters, K. (1989).—«Rheology».—*Series 3, Elsevier, Amsterdam*.
- Baumgaertel, M.; De Rosa, M.E.; Machado, J.; Masse, M.; Winter, H.H. (1992). The Relaxation Time Spectrum of Nearly Monodisperse Polybutadiene Melts. *Rheol. Acta*, **31**, 75-82.
- Burley R.W., Vadhra DV (1989).—«The Avian Egg: Chemistry and Biology».— John Wiley & Sons, INC, Nueva York.
- Ferry, J.D. (1980).—«Viscoelastic Properties of Polymers». — John Wiley & Sons, INC, Nueva York.
- Franco, J.M., Muñoz, J., Gallegos, C. (1995).— «Transient and Steady Flow of a Lamellar Liquid Crystalline Surfactant/water System».—*Langmuir*, **11**, 669-673.
- Groetsch, C.W. (1984).—«The Theory of Tikhonov Regularization for Fredholm Equations of the First Kind».—Pitman, Londres.
- Madiedo, J.M. (1995).—«Rheospec 2.0 para Windows95».
- Madiedo, J. M., Gallegos, C. (1997).—«Applied Rheol».— **7**, 161-167.
- Schultz, J.R., Snyder, H.E., Forsythe, R.H. (1968).— «Co-dried Carbohydrates Effect on the Performance of Egg Yolk Solids».—*J. Food. Sci.*, **33**, 507-513.
- Shenstone, F.S. (1968).—«The Gross Composition, Chemistry and Physico-chemical Basis of Organization of the Yolk and White en Egg Quality. A Study of the Avian Egg».—T.C. Carter, (Ed), Oliver & Boyd, Edinburgh.
- Tikhonov, A.N.; Arsein, V.Ya. (1979).—«Methoden der Lösung Nichtkorrekter Aufgaben».—Vol. 2, Auflage, Verlag Nauska, Moscú.
- Tikhonov, A.N., Ibinskji, A.S. (1980).—«Probleme der Numerischen Mathematik».—Verlag der Moskauer Universität, Moscú.
- Wu, S. (1989).—«Chain Structure and Entanglement».— *J. Polym. Sci.*, **27**, 723-741.

Recibido: Marzo 1999  
Aceptado: Septiembre 1999

Barnes, H.A. (1995).—«A review of the slip (wall depletion) of polymer solution, emulsions and particle