

# Propiedades Reológicas de Melados de Caña de Azúcar

Magdalena Mechetti<sup>1</sup>, Azucena del R. Gómez López<sup>1</sup> y Alberto Balella<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

## Resumen

Se han estudiado las características reológicas de muestras de melados de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), a las temperaturas de 20, 30, 40 y 50°C. El comportamiento observado, con una leve tixotropía en una de las muestras, corresponde en todos los casos al de un fluido pseudoplástico descrito adecuadamente por el modelo de Ostwald-de Waele, a partir del cual se obtuvieron los valores del índice de flujo  $n$  ( $0,88 \leq n \leq 0,97$ ) y de consistencia,  $k$  ( $0,06 \text{ Pa s}^n \leq k \leq 0,73 \text{ Pa s}^n$ ). Los valores del índice de flujo menores que la unidad, confirman la pseudoplasticidad y disminuyen con el aumento de la temperatura. El índice de consistencia, aumenta con el contenido de sólidos y disminuye con el aumento de la temperatura. La viscosidad aparente, disminuye con el aumento de la temperatura y con la velocidad de deformación. A partir de la ecuación de Arrhenius se determinó la energía de activación con valores entre 32,6 y 49,1 kJ/mol. Se investigaron las propiedades viscoelásticas de estos melados para lo cual se realizaron estudios dinámicos oscilatorios en barrido de esfuerzo de corte y en barrido de frecuencia. Del comportamiento de los parámetros viscoelásticos  $G'$ ,  $G''$  y  $\tan \delta$  se determina la zona viscoelástica lineal y se concluye que las muestras presentan características viscoelásticas.

Palabras clave: melados de caña de azúcar, fluidos no newtonianos, pseudoplasticidad, viscoelasticidad, industria azucarera.

## *Rheological Properties of Syrups from Sugar Industry*

### **Abstract**

*Rheological characteristics of syrups were investigated at 20, 30, 40 and 50 °C. The syrups behaved as a shear thinning fluid and the Ostwald-de Waele model was found to be the appropriate to fit the flow curves of these materials. One of the samples studied showed a slight thixotropy. Flow behavior index of less than one  $n$  ( $0,88 \leq n \leq 0,97$ ) confirmed pseudoplasticity and it was found to decrease with the temperature rise. The consistency coefficient  $k$  ( $0,06 \text{ Pa s}^n \leq k \leq 0,73 \text{ Pa s}^n$ ) increased with the amount of total solids content and decreased with the increase in temperature. The apparent viscosity decreased with increasing temperature and shear rate which means that the studied syrups thinned as the shear rate increased. Activation energy was determined using the Arrhenius equation giving values between 32,6 and 49,1 kJ/mol. Dynamic oscillatory studies were conducted to analyze the syrups viscoelastic behavior. Viscoelastic parameters such as storage modulus,  $G'$ , loss modulus,  $G''$  and phase angle  $\tan \delta$  were measured. The lineal viscoelastic zone was determined. It is concluded that these syrups are viscoelastic.*

*Key words: viscoelasticity, sugar cane syrups, sugar industry, non-newtonian fluids, pseudoplasticity.*

## Introducción

Los melados, melazas y mieles finales de caña de azúcar son fluidos complejos cuya viscosidad depende de la velocidad de deformación, de la composición y de la temperatura y en algunos casos presentan comportamiento tixotrópico y viscoelástico. Están compuestos por agua, materia inorgánica, azúcares, ácidos orgánicos, lípidos, sales inorgánicas, azúcares invertidos, macromoléculas de alto peso molecular como almidón, celulosa, lignina, pectina, tanino entre otros, **Kaur et al.** (2002), **Kumar et al.** (1994).

Existen en la literatura algunos trabajos que indican que estos fluidos no son puramente viscosos sino que presentan características viscoelásticas, lo cual es esperable, debido a que el principal factor por el cual esos fluidos son no newtonianos y que los distingue de las soluciones de azúcares puras, newtonianas, es la presencia de polisacáridos, **Ness** (1984), **Geronimos and Greenfield** (1978), componentes que inducen tanto pseudoplasticidad como elasticidad, **Lapasin and Pricl** (1995).

Son diversas las áreas en el procesamiento de azúcar de caña, en las cuales el comportamiento reológico de estos fluidos es un factor importante que afecta la eficiencia de dicho procesamiento. Éstas incluyen el diseño y operación de cristalizadores, el diseño de sistemas de conductos para transferir masa cocida y melazas y la separación de los cristales de los melados en las centrifugas, **Leong and Yeow** (2002). Por otro lado, es importante conocer la reología de estos fluidos ya que provee información en sus propiedades físicas y contribuye al conocimiento de los mecanismos involucrados en la transferencia de momento y calor, **Kaur et al.** (2002).

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio reológico de melados provenientes de una industria azucarera de la provincia de Tucumán, Argentina. En la literatura abundan los estudios sobre comportamiento reológico de melazas, masas cocidas, mieles finales y vinazas, **Díaz García and Remedios Castañeda** (2002), **Broadfoot and Miller** (1990), **Cárdenas et al.** (1985). Sin embargo, no se han encontrado datos completos y sistemáticos para los melados de caña de azúcar, especialmente de la industria local.

El comportamiento del flujo de un material bajo la acción de un esfuerzo de corte o cizalla se representa generalmente en un reograma, o curva de flujo, del esfuerzo de corte o cizalla versus la velocidad de deformación. Para los valores de velocidad de deformación con los cuales se trabaja en la industria azucarera para el transporte del material por las tuberías, usualmente en el rango 0,1 y 20,0 s<sup>-1</sup>, los melados, las melazas y las masas cocidas

se comportan como fluidos pseudoplásticos, **Mechetti et al.** (2006), **Broadfoot and Miller** (1990). Para estos fluidos, la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de deformación. Existen diversos modelos para describir este comportamiento, entre los que se destaca el de Ostwald-de Waele, o modelo de "ley de potencias". La ecuación constitutiva de este modelo es la ecuación (1):

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

$$\text{y } \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

donde  $\tau$  (Pa) es el esfuerzo de corte en la interfase del fluido y el elemento que produce el esfuerzo;  $\eta$  (Pa s) es la viscosidad del material;  $\dot{\gamma}$  (s<sup>-1</sup>) es la velocidad de deformación en la interfase;  $k$  es la consistencia (Pa s<sup>n</sup>) y  $n$  es el índice de flujo (adimensional). Las cantidades  $k$  y  $n$  describen el comportamiento del fluido. La consistencia  $k$  es un indicador de la naturaleza viscosa del sistema, resultando que a mayor  $k$  más viscoso es el material. El índice de flujo  $n$  es una medida del grado de comportamiento no Newtoniano. En el caso de fluidos pseudoplásticos,  $0 < n < 1$ . Los valores de  $n$  y  $k$  pueden obtenerse de la ecuación (1), a partir de los datos de las curvas de flujo. La ecuación (2) corresponde a una ley de potencias de dos parámetros que permite calcular la viscosidad aparente, **Brito De La Fuente et al.** (1997).

La descripción reológica de fluidos industriales no newtonianos requieren que el rango de velocidades de deformación y los parámetros  $k$  y  $n$  del modelo estén especificados. También es necesario que las determinaciones de viscosidad se lleven a cabo en el rango de velocidades de deformación y a las temperaturas de interés para los procesos.

## Materiales y Métodos

### Materiales

Se han estudiado cuatro muestras de melados de caña de azúcar del tipo 413 de la misma zona de la provincia de Tucumán, Argentina, que denominamos M1, M2, M3 y M4. Las muestras de grado de pureza medio (81%  $\pm$  1%), fueron provistas por una industria azucarera local que solicitó el estudio y se analizaron tal como fueron recibidas, con las especificaciones de los valores de Brix y Pol, determinados por procedimientos estándares, que se indican en la tabla I. El valor Brix da el peso porcentual del contenido de sólidos totales de las muestras; la pureza, mide la relación entre azúcares totales y sólidos totales y el valor Pol da el peso porcentual de azúcares totales.

**Métodos**

**Mediciones reológicas**

Los experimentos reológicos se han realizado utilizando un reómetro Anton - Paar MCR 301, y una celda P-PTD 200 para cilindros concéntricos (con sistema Peltier de control de temperatura) con cilindro interior rotante B-CC27/148/E de diámetro 26,66 mm y taza C-CC27/ SS de diámetro 28,92 mm.

Para el estudio del comportamiento reológico de estos fluidos en diferentes condiciones, se registraron el esfuerzo de corte  $\tau$ , la velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$  y la viscosidad aparente  $\eta$  a las temperaturas de 20, 30, 40 y 50 °C. Los valores de estas características reológicas fueron obtenidos directamente del instrumento. El rango de temperatura seleccionado corresponde en cierta medida, a valores normales de transporte de estas sustancias en distintas etapas de la producción. Las mediciones se realizaron en el rango de velocidades de deformación de 0 a 650 s<sup>-1</sup> para la máxima temperatura.

A fin de estudiar la respuesta viscoelástica de estos melados, también se efectuaron mediciones en condiciones de flujo oscilatorio. Se obtuvieron los módulos dinámicos viscoso, G'' y elástico, G' en función de la frecuencia f de oscilación a constante y en función de  $\tau$  a f constante, a las temperaturas antes indicadas.

**Resultados y discusión**

Se obtuvieron las curvas de flujo, log  $\tau$  vs log  $\dot{\gamma}$  para todas las muestras a las diferentes temperaturas. En este trabajo se muestran sólo algunas de las curvas obtenidas, que son representativas. En la figura 1 se visualiza el comportamiento del esfuerzo de corte en función de la velocidad de deformación para el sistema M1, verificándose una regresión lineal apropiada, todas con un coeficiente de correlación muy cercano a 1 (0,999 ± 0,001). Se observa, para las muestras restantes, un comportamiento similar para iguales condiciones de trabajo. La figura 2 indica la tendencia de la viscosidad en función de la velocidad de deformación, a las temperaturas consideradas en este trabajo, para la misma muestra M1. Las curvas son las típicas de un fluido pseudoplástico, ya que se tiene una disminución de la viscosidad aparente  $\eta$  con el aumento de la velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ . A bajas frecuencias, de 0 a 5 1/s, la viscosidad aparente disminuye marcadamente mientras que a valores mayores de  $\dot{\gamma}$  esta disminución se hace más leve hasta alcanzar el plateau newtoniano de altas velocidades de deformación.

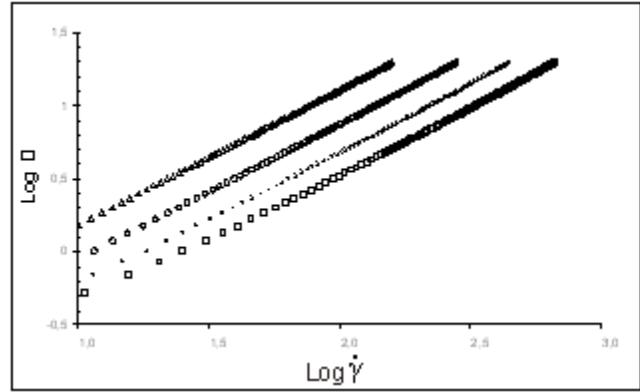


Fig. 1 Log  $\tau$  vs log  $\dot{\gamma}$  para la muestra M1. (Δ) 293 K; (○) 303 K; (×) 313 K; (◻) 323 K.

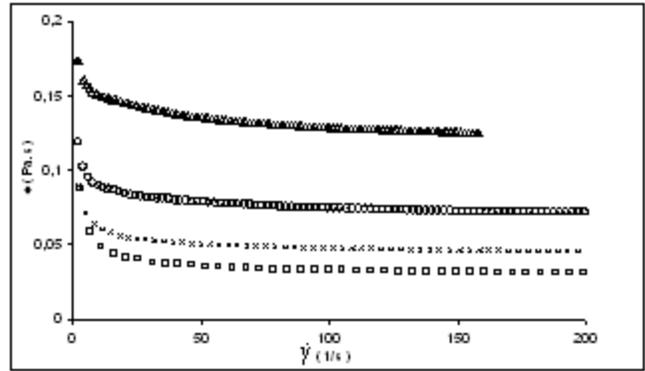


Fig. 2 Viscosidad aparente  $\eta$  (Pa s), vs velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$  (s<sup>-1</sup>) para la muestra M1. (Δ) 293 K; (○) 303 K; (×) 313 K; (◻) 323 K.

Tabla I: Coeficiente de consistencia, índice de flujo y energía de activación para las distintas muestras.

Muestra	Temp. (°C)	Consist. (Pa. s <sup>n</sup> )	Índice de flujo	E <sub>a</sub> (kJ/mol)
M1 Brix: 59,54 % Pol: 48,26 %	20	0,177	0,933	32,654
	30	0,108	0,921	
	40	0,075	0,905	
	50	0,056	0,891	
M2 Brix: 64,04 % Pol: 52,80 %	20	0,226	0,929	33,456
	30	0,145	0,915	
	40	0,099	0,899	
	50	0,069	0,885	
M3 Brix: 67,44 % Pol: 55,60 %	20	0,341	0,950	46,509
	30	0,150	0,942	
	40	0,098	0,932	
	50	0,074	0,919	
M4 Brix: 71,44 % Pol: 59,60 %	20	0,732	0,974	49,025
	30	0,360	0,969	
	40	0,201	0,959	
	50	0,123	0,942	

La figura 3 muestra los cambios en la viscosidad aparente con el aumento de la velocidad de deformación para los sistemas M2 y M4 a 20 °C. Se evidencia una discontinuidad en la viscosidad del melado M4 ( $\dot{\gamma} \cong 8,5 - 10 \text{ s}^{-1}$ ), anomalía que podría ser atribuida a un efecto de deslizamiento del material en las paredes del rotor o a un valor de velocidad de deformación crítica más allá del cual hay una reorganización de la estructura dando un comportamiento pseudoplástico. Fenómenos similares también fueron observados por otros autores en dispersiones de productos alimenticios, **Grikshtas and Rao (1993)**, **De Kee et al. (1983)**.

La figura 4 representa la dependencia del esfuerzo de corte con la velocidad de deformación, también para las muestras M2 y M4 a 20°C.

A partir de las curvas de flujo como las de la figura 1, se obtuvieron por regresión lineal de los datos ( $R^2 = 0,999 \pm 0,001$ ), el índice de flujo  $n$  y la consistencia  $k$  en cada caso. Estos valores vienen dados en la tabla I. De esta forma se comprueba que las muestras en estudio responden a la ley de potencias de la ecuación (1).

En el análisis de los reogramas de  $\tau$  vs  $\dot{\gamma}$  y  $\eta$  vs  $\dot{\gamma}$  para la miel M3, representados respectivamente en las figuras 5 y 6 para la temperatura de 20 °C, se evidencia un leve comportamiento tixotrópico indicado por el lazo de histéresis, que se dio sólo para esta muestra a todas las temperaturas. La curva de flujo de la figura 5, se obtuvo con la velocidad de deformación aumentada continua y linealmente en el tiempo desde cero al valor máximo de 80 1/s y luego decreciendo a cero de la misma manera. Este comportamiento estaría indicando que se ha producido un aglomerado de partículas asimétricas de macromoléculas constituyentes de este melado la cual se destruye a medida que aumenta la velocidad de deformación, para luego recuperarse.

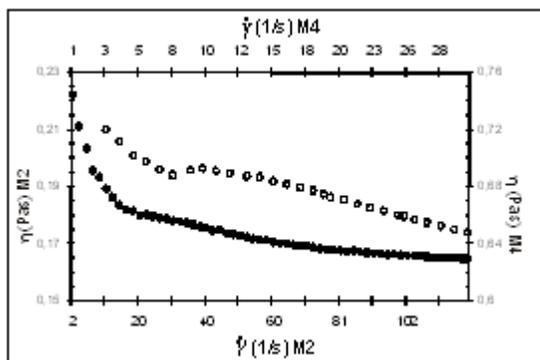


Fig. 3 Viscosidad aparente  $\eta$  vs velocidad de deformación  $\dot{\gamma}$ , a 293 K, para las muestras M2 (o) y M4 (▪)

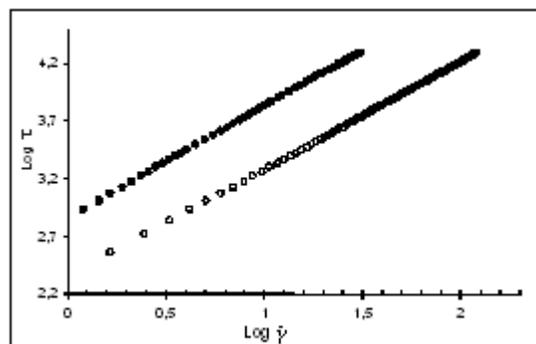


Fig. 4  $\text{Log } \tau$  vs  $\text{Log } \dot{\gamma}$ , a 293 K, para las muestras M2 (o) y M4 (▪).

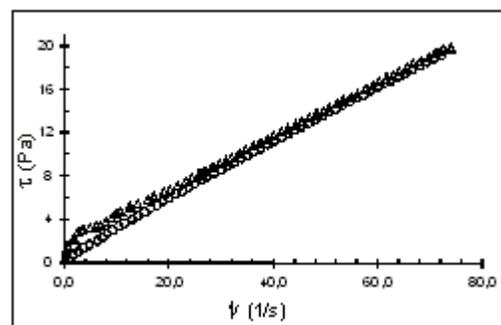


Fig. 5 Curva de flujo  $\tau$  (Pa) vs  $\dot{\gamma}$  ( $\text{s}^{-1}$ ), para la muestra M3 a 293 K, mostrando tixotropía. ( $\Delta$ ) Rampa Creciente; (o) Rampa Decreciente.

El área encerrada por el lazo de la figura 5, es proporcional a la energía, por unidad de volumen y de tiempo ( $\text{J/m}^3\text{s}$ ), necesaria para romper la estructura. En la rampa de bajada se observa que el sistema se ha recuperado totalmente y dado que el área encerrada por la curva es despreciable, eso estaría indicando un comportamiento tixotrópico muy leve. Sin embargo, es importante tener en cuenta la ocurrencia de tixotropía en los melados ya que el flujo de estos en conductos relativamente largos es complicado por el hecho que la viscosidad puede cambiar a lo largo de los mismos.

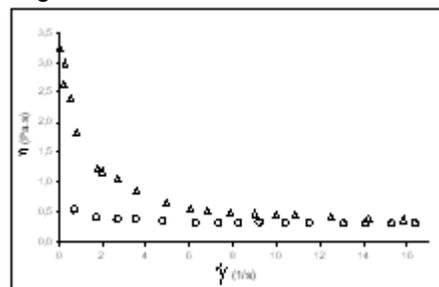


Fig. 6  $\eta$  (Pa s) vs  $\dot{\gamma}$  ( $\text{s}^{-1}$ ) para la muestra M3 a 293 K, mostrando tixotropía. ( $\Delta$ ) Rampa Creciente; (o) Rampa Decreciente.

La influencia de la temperatura sobre la viscosidad aparente es descrita a partir de la ecuación de Arrhenius:

$$\eta = \eta_0 e^{E_a/RT} \tag{3}$$

donde  $\eta$  es la viscosidad aparente (Pa s),  $\eta_0$  es un parámetro considerado como la viscosidad a temperatura infinita (Pa s),  $E_a$  es la energía de activación (J/mol K) y  $T$  es la temperatura absoluta (K). Los valores de  $E_a$  obtenidos a partir de la ecuación (3) para todas las muestras, a  $\dot{\gamma} = (21,0 \pm 0,5) \text{ 1/s}$ , se presentan en la tabla 1 ( $R^2 = 0,992 \pm 0,008$ ).

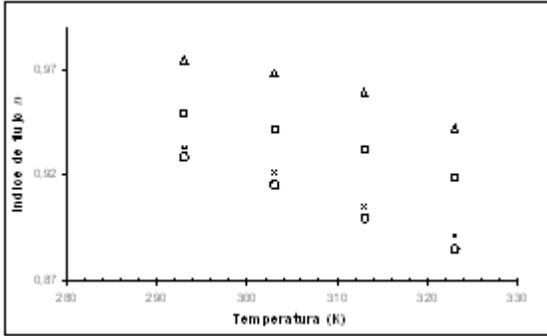


Fig. 7 Índice de flujo  $n$  vs  $T$  (K). (x) M1; (o) M2; (□) M3; (Δ) M4.

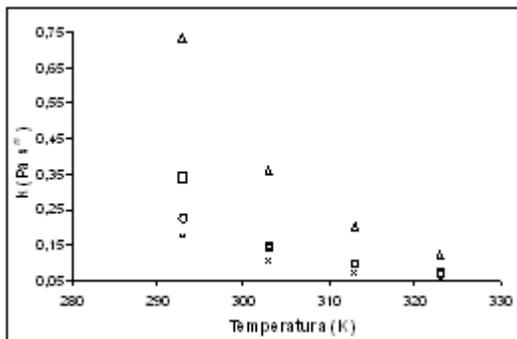


Fig. 8  $k$  (Pa sn) vs  $T$  (K). (x) M1; (o) M2; (□) M3; (Δ) M4.

En las figuras 7 y 8 se observa el comportamiento del índice de flujo  $n$  y de la consistencia  $k$  con la temperatura para las distintas muestras. Tanto  $n$  como  $k$ , decrecen con el aumento de la temperatura en todos los casos.

La figura 8 permite analizar la influencia de la temperatura, el Brix refractométrico y la pureza sobre la consistencia. Se evidencia que a mayores valores de Brix, y de pureza (ver tabla 1),  $k$  es mayor. Ello indica que, para estas muestras, la sensibilidad de la viscosidad a un cambio de temperatura es más marcada para los melados con mayor peso porcentual de sólidos y mayor pureza.

La figura 9 muestra la influencia del contenido de sólidos totales que concuerda con lo comentado sobre la figura 8.

Para investigar las posibles características viscoelásticas de los melados, se realizó un estudio dinámico oscilatorio efectuado en condiciones de esfuerzo controlado a las mismas temperaturas de los estudios viscosimétricos. Se determinaron las funciones  $G'$  (módulo elástico o de almacenamiento),  $G''$  (módulo viscoso o de pérdida) y la  $\text{tg } \delta = G''/G'$  en función de la frecuencia (a esfuerzo constante) y en función del esfuerzo de corte (a frecuencia constante).

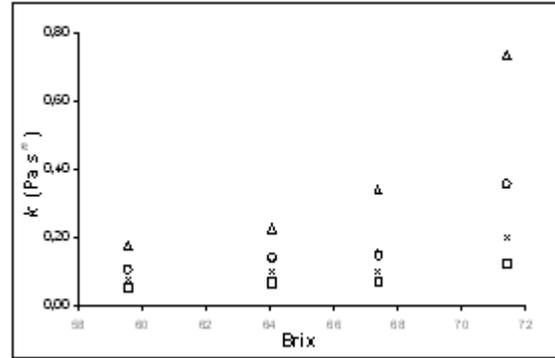


Fig. 9 Consistencia  $k$  (Pa sn) vs contenido de sólidos (%). (Δ) 293 K; (o) 303 K; (x) 313 K; (□) 323 K.

Un ejemplo del comportamiento dinámico de estos melados cuando el sistema se somete a oscilaciones, se muestra en la figura 10 para el sistema M3 a 20 °C, al valor constante del esfuerzo de corte de 0,5 Pa y en el rango de frecuencia de 0 a 100 Hz. En esta figura se representan los valores de  $G'$  y  $G''$  en función de la frecuencia. Similares curvas se obtuvieron para las muestras restantes y en el rango de temperaturas considerado en el trabajo.

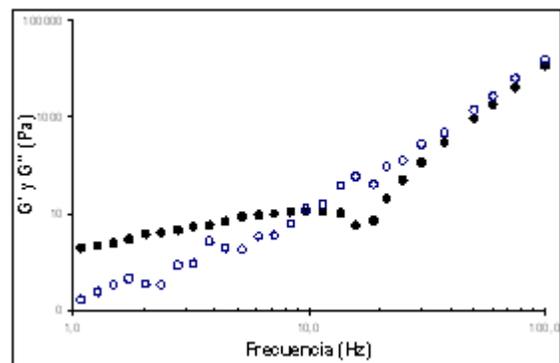


Fig. 10 Módulo viscoso  $G''$  (•) y Módulo elástico  $G'$  (o) vs frecuencia  $f$  para la muestra M3 a 20 °C ( $\tau = 0,5 \text{ Pa}$ ).

Se observa que la respuesta es fundamentalmente viscosa ( $G'' > G'$ ) a bajas frecuencias hasta aproximadamente los 10 Hz, donde se produce el cruce de ambas curvas ( $G' = G''$ ;  $\tan \delta = 1$ ) a partir del cual comienza a ser más importante la contribución elástica. A frecuencias mayores las curvas de  $G'$  y  $G''$  continúan casi juntas, pero siempre con la componente  $G'$  por encima de  $G''$ . Estas observaciones indican que los melados tienen características de fluidos viscoelásticos.

El comportamiento de los módulos viscoso y elástico en función del esfuerzo de corte está representado en la figura 11 para la muestra M2, que ha sido tomada como ejemplo, a 20 °C, y a una frecuencia de oscilación  $f = 1$  Hz. Este tipo de gráfico da información sobre la región viscoelástica lineal, donde las funciones del material  $G'$ ,  $G''$  y  $\tan(\delta)$  son independientes del esfuerzo o de la deformación, de allí la importancia de poder determinarla. En este caso el módulo elástico se mantiene aproximadamente constante con el aumento de  $\tau$  (con un valor promedio de 0,2 Pa) hasta el valor  $\tau = 1$  Pa que marca el límite de la zona viscoelástica lineal. A partir de allí la curva comienza a decrecer con el aumento de  $\tau$  lo cual indicaría que la muestra es deformada hasta el punto que los enlaces internos temporarios de moléculas o agregados se destruyen y la mayor parte de la energía introducida se pierde irreversiblemente como calor.

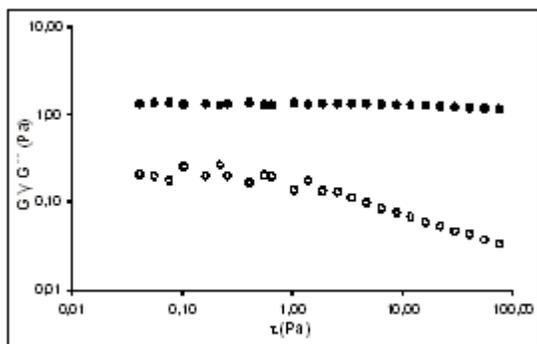


Fig. 11  $G''$  (•) y  $G'$  (o) vs  $\tau$  (Pa) para la muestra M2 a 20 °C ( $f = 1$  Hz).

### Conclusiones

A partir del análisis de los valores de  $k$  y  $n$  obtenidos de las curvas de flujo (tabla I), podemos afirmar que las muestras de melados estudiadas se comportan como fluidos pseudoplásticos.  $k$  y  $n$  disminuyen con la temperatura y  $k$  aumenta destacadamente con el Brix refractométrico. El principal factor que hace que estos fluidos sean no newtonianos y se distinguen de las soluciones de azúcar, newtonianas, es la presencia de

polisacáridos los cuales inducen tanto pseudoplasticidad como viscoelasticidad lo que ha quedado evidenciado en estos estudios.

Una de las muestras analizadas, la M3, presentó un leve comportamiento tixotrópico para todas las temperaturas del rango considerado. En el estudio del sistema M4 se observó una discontinuidad en la viscosidad, anomalía causada probablemente por efecto de deslizamiento en las paredes.

De la figura 10 podemos concluir que a bajas frecuencias de oscilación, la curva del módulo de almacenamiento  $G'$  crece más rápidamente (pendiente 1,5) que la curva correspondiente al módulo de pérdida  $G''$  (pendiente 1,3). Para valores bajos de  $f$  la curva  $G''$  está por encima de la curva  $G'$ . Ambas curvas se cruzan en un valor particular de frecuencias que, para la muestra considerada, es  $f = 10$  Hz. Para frecuencias mayores la respuesta elástica indicada por  $G'$  excede a la viscosa dada por  $G''$ . Esta situación es similar para todas las muestras y temperaturas, habiéndose observado que el punto de cruce se desplaza levemente hacia frecuencias menores para temperaturas mayores.

Se constata que estos melados son viscoelásticos. De la figura 11 se determina el rango de viscoelasticidad lineal que para el caso analizado se extiende hasta el valor  $\tau = 1$  Pa.

Esta investigación continúa para profundizar en el estudio de la tixotropía observada, la discontinuidad en la viscosidad para la miel M4 y la influencia de otros componentes constituyentes de los melados.

En este trabajo se ha presentado, por razones de confidencialidad, parte del estudio completo encomendado por la firma solicitante del mismo.

### Referencias

- Brito De La Fuente, E., Choplin, L. and Tanguy, P. A.** (1997) "Mixing with helical Gibbon impellers: effect of highly shear thinning behaviour and impeller geometry", *Transactions of the Institution of Chemical Engineers A*, 75, pp. 45-52.
- Broadfoot, R. and Miller, K. F.** (1990) "Rheological studies of masecutes and molasses", *Int. Sugar, JNL*, Vol. 92, N° 1098, pp. 107-116.
- Cárdenas, G. J., Yocca, E. y Ruiz, R.M.** (1985) "Influencia de las variaciones de concentración y temperatura en la viscosidad de vinazas de melazas de caña de azúcar", *Revista Ind. y Agric. de Tucumán*, (62) 2, pp. 21-37.
- De Kee, D., Code, R.K. and Turcotte, G.** (1983) "Flow properties of time -dependent Foodstuffs", *Journal of Rheology*, 27, pp. 581-604.
- Devillers, P. and Phélisot, R.** (1971) "Pseudoplasticité

et visco-elasticité des mélasses”, *Sucrierie Francaise*, 112, pp. 37-44.

**Díaz García, A. A., Remedios Castañeda, P.D.** (2002) “Análisis de las viscosidades de mieles y masas cocidas de las provincias de Santiago de Cuba y Las Tunas con vistas a establecer las variaciones más esperadas con la temperatura”, *Tecnología Química*, Vol. XXII, Nº 2, pp. 49-58.

**Geronimos, G.L., and Greenfield, P.F.** (1978) “Viscosity increases in concentrated sugar solutions and molasses due to dextrans”, *Proc. Qd. Sugar Cane Technol*, 45, pp. 119-126.

**Grikshtas, R. and Rao, M. A.** (1993) “Determination of slip velocities in a concentric cylinder viscometer with Mooney and Kiljansky methods”, *Journal of Texture Studies*, 24, pp. 173-184.

**Kaur, S., Kaler, R. S. S. and Aamarпали, A.** (2002) “Effect of starch on the rheology of molasses”, *Journal of Food Engineering*, 55, pp. 319-322.

**Kumar, R., Jain, Sayed, V. K., Sajid, V. K. A. S. and Sanyal, P.** (1994) “Rheological behavior of Indian cane molasses”, *International Sugar Journal*, 96, pp. 124-127.

**Lapasin, R., and Prici, S.** (1995) “Rheology of Industrial Polysaccharides”, Blackie Academic and Professional, London.

**Leong, Y. K. and Yeow, Y. L.** (2002) “Processing the Couette viscometry data of molasses by Tikhonov regularisation”, *International Sugar Journal*, 104, pp. 463-467.

**Mechetti, M., Gómez López, A. y Balella A.** (2006) Propiedades reológicas de melados: efectos de la temperatura, velocidad de deformación y composición, En: *91 Reunión Nacional de Física*, Asociación Física Argentina, Merlo, San Luis, Argentina.

**Ness, J. N.** (1984) In discussions of “Viscometry in cane sugar processing”, *Disc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol*, 6, pp. 1100-1010.

### **Magdalena Mechetti**

Es Licenciada y Doctora en Física de la UNT, con una especialización en Química Cuántica y Teoría del Estado Sólido de la National University of Florida. Es Profesora Titular con Dedicación Exclusiva de las asignaturas Mecánica Cuántica I, Mecánica Cuántica II, Mecánica Cuántica Avanzada y Optativas del Departamento de Física. Es docente de carreras de posgrado. Es fundadora y responsable del Laboratorio de Física de Fluidos y Electrorreología de la FACET (1996) en el cual se llevan a cabo tareas de investigación en fluidos y de desarrollo de equipos y celdas de medición no convencionales, así como de servicios a la industria. Es Directora de Proyectos del CIUNT desde el año 1992, Directora de Nodo Proyecto PME 2006, ha publicado trabajos científicos en la especialidad y de enseñanza de la física en revistas internacionales y nacionales. Actualmente es Directora de las Carreras de Física y Directora del proyecto CIUNT 26/E432 “Fluidos simples y complejos de interés industrial, biológico, farmacéutico y alimenticio. Nuevos materiales. Caracterización reológica, electrorreológica y dieléctrica”.

E-mail: mmechetti@herrera.unt.edu.ar

### **Azucena del R. Gómez López**

Se graduó como Licenciada en Física Orientación Aplicada en la Universidad Nacional de Tucumán. Desde 1997 está vinculada al Laboratorio de Física de Fluidos y Electrorreología de la FACET, donde desarrolla tareas de investigación, habiendo participado en varios proyectos del CIUNT. Fue becaria de dicho organismo y actualmente es investigadora integrante del proyecto 26/E432. Asimismo se encuentra realizando sus estudios de doctorado. Es Auxiliar Docente Graduado en las Cátedras de “Mecánica Cuántica” y de “Física Experimental I” de la FACET.

E-mail: agomezlopez@herrera.unt.edu.ar

### **Florencio A. Balella**

Es Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de Tucumán. Se desempeña como Profesor Asociado de la cátedra y Laboratorio de Química Analítica I del Departamento de Ingeniería de Procesos y Gestión Industrial de la FACET. También realiza tareas de servicios y transferencia en temas de su especialidad. Ha sido Director e integrante de Proyectos CIUNT. Actualmente es investigador integrante del Proyecto CIUNT 26/E432.

E-mail: abalella@herrera.unt.edu.ar

---

Este trabajo se llevó a cabo en el Laboratorio de Física de Fluidos y Electrorreología del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Se escribió en el mes de Diciembre de 2010.

---