

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL MOLDE EN LA MORFOLOGÍA Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE ESPUMAS ESTRUCTURALES DE PEAD VÍA INYECCIÓN

Carlos Tovar-Cisneros¹, Rubén González-Núñez^{1*} y Denis Rodrigue²

¹Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guadalajara, Blvd. Gral. Marcelino García Barragán # 1451. Guadalajara, Jalisco, C.P.44430, MEXICO; ²Department of Chemical Engineering, Laval University, Quebec City, Quebec, G1K 7P4 Canada *rubenglz@cencar.udg.mx

Abstract.- En este estudio, espumas estructurales de PEAD fueron producidas mediante el proceso de inyección. La variable estudiada fue la temperatura del molde. Se cuantificó el tamaño de burbuja promedio, la densidad de burbuja, los espesores y simetría de pieles. Además se aplicaron las pruebas de impacto y flexión. Se encontró que al mantener homogénea la temperatura del molde, se obtienen espesores de piel simétricos, que aumentan si disminuimos la temperatura del mismo. Por otro lado, si variamos la temperatura de una parte del molde, se presentan espesores de piel asimétricos; el grado de asimetría se incrementa conforme la diferencia de temperaturas entre ambas partes del molde es mayor. Al disminuir la temperatura del molde o de la parte móvil, hay un ligero aumento en el tamaño de burbuja promedio y disminuye la densidad de burbujas. La resistencia al impacto y el módulo de flexión de los espumados aumentan conforme se tienen mayores espesores de piel. En el caso de espumas asimétricas, estas medidas dependen de la superficie en que se aplique la prueba; se obtuvo una mayor resistencia al impacto cuando se aplica en la cara con el espesor de piel menor, mientras que el módulo de flexión fue al contrario.

1.- Introducción

En la actualidad existe la necesidad de obtener materiales con propiedades específicas, de bajo costo y cuyo proceso de producción sea rápido. Es por esto, que el proceso de moldeo por inyección se ha consolidado en la producción de partes con aplicaciones en ingeniería. Por su parte, los materiales poliméricos espumados han adquirido gran importancia debido a las propiedades que poseen: baja densidad, buenos aislantes térmicos y acústicos, alta resistencia al impacto, etc. Estos materiales fueron obtenidos alrededor de 1920 con la aparición de espumas de látex [1]. Desde entonces muchas investigaciones han girado en torno a proveer las propiedades mecánicas requeridas e incrementar sus aplicaciones. Recientemente, espumas estructurales han sido desarrolladas. Estos materiales poseen una estructura de tres capas, dos de las cuales son paredes poliméricas sin espumar a las que se denomina “pieles” envolviendo una zona de burbujas a la que se denomina “núcleo”. Dicha apariencia también es conocida como estructura sándwich [1], la cual puede lograrse fácilmente mediante el proceso de inyección, ajustando los diversos parámetros: temperatura, presión y tiempo [2].

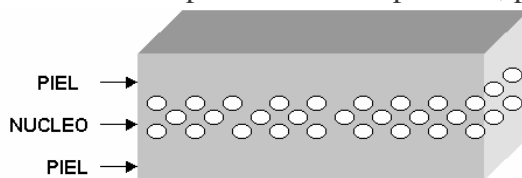


Figura 1- Representación de una espuma estructural.

A diferencia de las espumas poliméricas convencionales, las estructurales con capas de piel integradas al espumado ofrecen muchas ventajas. Por ejemplo, pueden ser pintadas y decoradas como se desee. Además, requerimientos específicos como la resistencia máxima o la rigidez de una espuma pueden ser conseguidos con un diseño integral con pieles incorporadas de un espesor apropiado [3].

En el presente estudio, espumas estructurales de Polietileno de Alta Densidad (PEAD) fueron obtenidas utilizando azodicarbonamida como agente espumante químico

mediante el proceso de inyección. La variable de estudiada fue la temperatura del molde con el objetivo de determinar su influencia en la morfología y las propiedades mecánicas de estos materiales.

2.- Sección Experimental

2.1 Materiales. El polímero utilizado fue PEAD PADMEX-60120 (PEMEX), se usó azodicarbonamida (Electroquímica Mexicana S.A. de C.V.) como agente espumante químico a una concentración de 1%.

2.2 Proceso de inyección. Las muestras fueron procesadas en una máquina eléctrica de inyección marca NISSEI modelo ES-1000. Se realizó un mezclado previo del material mediante agitación. Las temperaturas de las diferentes zonas del cañón de inyección (inicial, media, frontal y boquilla) se establecieron en 175, 190, 210 y 230°C respectivamente, para permitir la descomposición del agente espumante. Se ha reportado que la temperatura de descomposición de la azodicarbonamida es 200°C [4]. Las piezas espumadas moldeadas tienen geometría rectangular.

2.3 Temperatura del molde. El molde está constituido por dos partes: una fija y una móvil; esta conformación permitió experimentar bajo dos condiciones generales:

1.- Se mantuvieron ambas partes del molde a la misma temperatura en el intervalo entre 30 y 80°C; es decir, con temperatura del molde homogénea.

2.- Se varió la temperatura de la parte móvil del molde en el intervalo 30-80°C manteniendo constante en 80°C la parte fija.

Para el proceso de calentamiento del molde se utilizó un controlador térmico de recirculación marca MATSUI modelo GMC-L-25U.

2.4 Caracterización morfológica. Se procedió primeramente a la fractura de los espumados en condiciones criogénicas (N₂ líquido). En el análisis se consideró la parte del centro de las piezas en su sección transversal al flujo. Se obtuvieron micrografías por medio del microscopio óptico OLYMPUS MIC-D. El análisis de las imágenes fue realizado con el software Image-Pro Plus versión 4.5 de Media Cybernetics. En los resultados morfológicos se analizaron al menos seis micrografías para cada muestra. Las principales mediciones cuantificadas fueron: espesores de piel superior, piel inferior y de la zona de burbujas (e_s , e_i , e_n), donde el espesor superior es el que se forma en la superficie de la pieza en contacto con la parte móvil del molde, los resultados se presentan como porcentaje (en razón del espesor total de la pieza), relación de simetría entre pieles (e_s/e_i), diámetro de burbuja promedio (D), calculado como el promedio de al menos 100 burbujas y densidad de burbuja (N_b) de acuerdo a la siguiente fórmula [5]:

$$N_b = \left(\frac{n}{A} \right)^{3/2}$$

donde N_b es la densidad de burbuja (No. Burb. /cm³), n es el número de burbujas y A es el área de la micrografía en cm².

2.5 Propiedades mecánicas. Se aplicaron las siguientes pruebas: *Prueba de impacto* de acuerdo a la norma ASTM D 5420-96 utilizando un impactador Gardner. Un mínimo de 20 probetas fueron sometidas a la prueba para cada condición y se determinó la resistencia al impacto mediante la cuantificación de la Energía Media de Falla (E.M.F.). *Prueba de flexión* de acuerdo a la norma ASTM D 790-03. El módulo de flexión de las espumas fue medido en una máquina de pruebas universales marca UNITED modelo SFM-10, utilizando el método de flexión con tres puntos de contacto.

3.- Resultados y Discusión

3.1 Morfología. La Tabla 1 reporta estos resultados en función de la temperatura del molde (T_M) cuando ésta se mantiene homogénea. Bajo esta condición de experimentación, se obtienen espumas estructurales con espesores de piel simétricos (ver Figura 2a). Conforme se disminuye la temperatura del molde, el espesor de piel total ($e_s + e_i$) aumenta, esto se puede explicar en términos de la transferencia de calor entre la superficie del molde y el polímero fundido. Las burbujas de gas se expanden en el fundido al llenar el molde creando la estructura interna celular [6]. Al mismo tiempo conforme el fundido viene a estar en contacto con la superficie fría del molde, hay un congelamiento local y se forman las pieles exteriores [2]. Es por ello que si se disminuye la temperatura del molde, el gradiente de temperatura entre éste y el polímero fundido aumenta, lo que resulta en un flujo de calor mayor, provocando que aumente el espesor de material que solidificará rápidamente. Con esto se impide que en esta región crezcan las burbujas de gas. Además, hay un ligero, pero no despreciable, aumento en el diámetro promedio de burbuja. La explicación de este comportamiento es debido a la importancia que tiene la formación de las capas de piel. Existe la misma cantidad de gas presente en el polímero fundido, pero en las capas de piel no proliferan las burbujas. Al disminuir la temperatura del molde se forman rápidamente pieles más gruesas, debido a esto las burbujas se desarrollan en un espesor menor de zona de burbujas (e_n) en el cual se concentra todo el gas provocando la unión de burbujas pequeñas para resultar en tamaños más grandes (Figura 2b). Además la formación de pieles gruesas no favorece la transferencia de calor (actuarían como capas aislantes) ocasionando una región central de mayor temperatura a suficientes tiempos que permitan un crecimiento de burbuja más elevado. Por su parte la densidad de burbuja disminuye debido al propio aumento de los tamaños de las burbujas, es decir, se tienen menos burbujas pero más grandes.

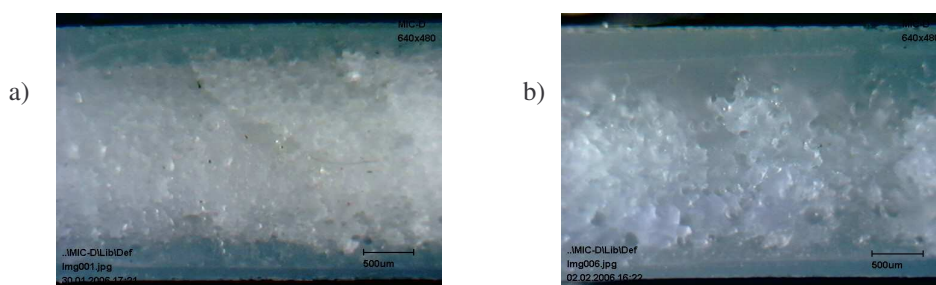
Tabla 1- Efecto de la temperatura del molde en la morfología de las espumas.

T_M °C	e_s %	e_i %	e_n %	e_s/e_i -	D μm	N_b 10 ⁴ Burb./cm ³
80	14.0	13.8	72.2	1.01	30 ±7	85.4
70	21.4	21.0	57.6	1.02	45 ±9	58.2
60	27.0	26.7	46.3	1.01	61 ±9	21.7
50	30.6	31.3	38.1	0.98	88 ±15	14.4
40	32.7	32.7	34.7	1.00	94 ±16	8.79
30	34.8	33.8	31.5	1.03	101 ±20	8.67

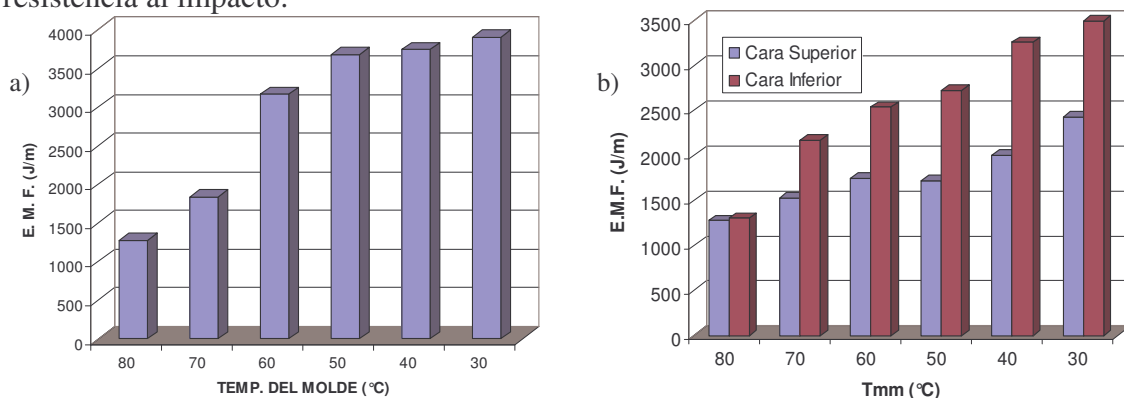
La Tabla 2 presenta los resultados morfológicos cuando se varía la temperatura de la parte móvil del molde manteniendo en 80°C la parte fija. Bajo este tipo de experimentación se obtuvieron espumas con espesores de piel asimétricos, es decir, $e_s/e_i \neq 1$. En todos los casos el espesor de piel superior fue más grande que el espesor de piel inferior. Esto es debido a que el espesor superior es la parte que está en contacto con la parte móvil del molde, la cual está a menor temperatura en comparación con la parte fija. En la zona en contacto con el molde móvil la transferencia de calor es mayor, formándose espesores de piel más grandes. El grado de asimetría entre espesores se incrementa conforme la diferencia de temperaturas entre ambas partes del molde (ΔT_M) es mayor. La zona de burbujas disminuye debido principalmente al gran aumento en el espesor de piel superior. El diámetro de burbuja promedio y la densidad de burbuja cambian en el mismo sentido que el caso anterior y se puede explicar en términos semejantes.

Tabla 2- Efecto de la variación de la temperatura de la parte móvil del molde.

T _m °C	ΔT _m °C	e _s %	e _i %	e _n %	e _s /e _i -	D μm	N _b 10 ⁴ Burb./cm ³
80	0	14.0	13.8	72.2	1.01	29 ±7	85.4
70	10	18.0	14.9	67.2	1.21	30 ±7	80.1
60	20	20.4	16.4	63.2	1.24	32 ±6	67.9
50	30	26.0	19.7	54.3	1.32	78 ±19	12.0
40	40	29.5	17.7	52.8	1.67	84 ±18	9.56
30	50	34.2	17.5	48.3	1.98	98 ±18	9.02

**Figura 2-** Comparación de espumas estructurales: a) Simétricas (T_M=80°C) y b) Asimétricas (ΔT_m=40°C).

3.2 Resistencia al Impacto. Se tomó como falla cualquier fractura en la pieza que permitiera el paso de la luz a través de ella. La Figura 3-a muestra la Energía Media de Falla (E.M.F.) por unidad de espesor de las espumas producidas con temperatura del molde homogénea (simétricas). Se puede observar que la resistencia al impacto es mayor en las espumas producidas a temperaturas del molde más bajas. La E.M.F. aumenta a mayores espesores de piel. La Figura 3-b presenta los resultados de los espumados asimétricos. En éstos, la resistencia al impacto depende de la superficie en que se aplique la prueba; se obtuvo una mayor resistencia cuando el impacto ocurre en la superficie con el espesor de piel menor. En la fractura de la pieza completa ambos espesores de piel toman un efecto importante. Si analizamos cada caso como un arreglo de tres capas (piel mayor, zona de burbujas y piel pequeña) con diferente resistencia al impacto, cuando el impacto se lleva a cabo de forma directa sobre la cara de espesor de piel mayor, al sobrepasar esta resistencia se transmite la energía por las otras dos capas siendo la última un espesor de piel pequeño, posible de presentar algún sitio de falla. En el caso de impacto sobre la superficie de espesor de piel menor se necesita mayor energía, ya que la capa delgada de piel funcionaría como una primera zona de amortiguamiento del impacto directo, la zona de burbujas sería la segunda zona de amortiguamiento para que finalmente la energía transmitida llegue a la piel de espesor mayor, que es más difícil de vencer; razón por la cual este arreglo presenta mayor resistencia al impacto.

**Figura 3-** Resistencia al Impacto de espumas estructurales de PEAD: a) Simétricas, b) Asimétricas.

3.3 Módulo de Flexión. Las espumas estructurales sometidas a la prueba de flexión en ningún caso fracturaron. En la Figura 4-a se reportan los módulos de flexión obtenidos para espumas simétricas. Como era de esperarse el módulo de flexión aumenta conforme los espesores de piel son mayores. En el caso de espumados asimétricos, Figura 4-b, esta medida de rigidez depende de la superficie donde se aplique la fuerza, los resultados muestran que es mayor cuando la carga se aplica sobre la cara de espesor de piel mayor.

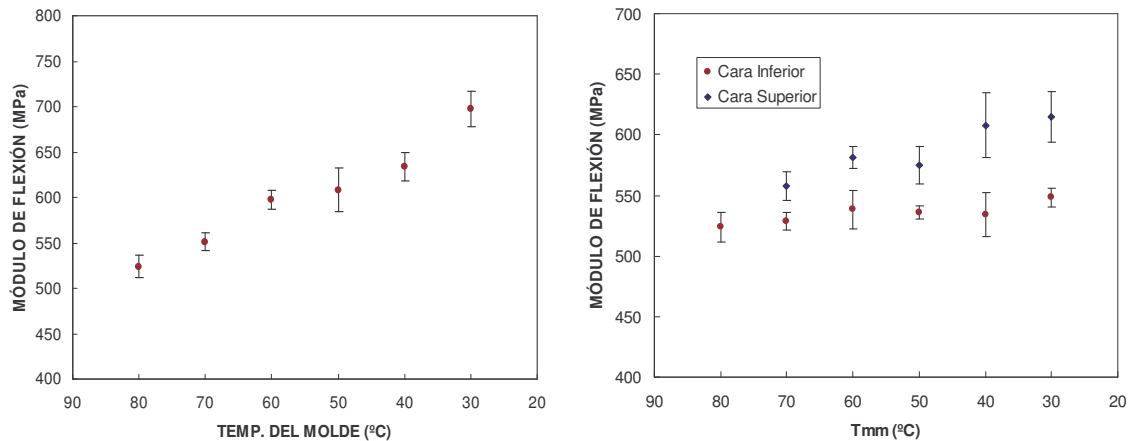


Figura 4- Módulo de Flexión de espumas estructurales de PEAD: a) Simétricas, b) Asimétricas

4.- Conclusiones

En este trabajo, se estudió la influencia de la temperatura del molde en la morfología y propiedades mecánicas de espumas de PEAD procesadas en inyección. Se encontró que al mantener homogénea la temperatura del molde, se obtienen espumas estructurales simétricas, cuyos espesores de piel se incrementan al disminuir la temperatura del mismo. Si variamos la temperatura de una parte del molde, se presentan espesores de piel asimétricos. Además se presentó un ligero aumento en el diámetro de burbuja promedio y una disminución en la densidad de burbuja al disminuir la temperatura del molde. Estos resultados pueden ser explicados en términos de transferencia de calor y crecimiento de célula en el molde. La resistencia al impacto y el módulo de flexión de los espumados aumenta conforme se tienen mayores espesores de piel. En el caso de espumas estructurales asimétricas, estas medidas dependen de la superficie en que se aplique la prueba mecánica; se obtuvo una mayor resistencia al impacto cuando se aplica en la cara con el espesor de piel menor, debido a que ésta funcionaría como una capa de amortiguamiento del impacto directo, mientras que el módulo de flexión es mayor cuando la fuerza se aplica en la cara de la pieza con el espesor de piel mayor.

Agradecimientos

A CONACyT por la beca otorgada en el desarrollo del presente trabajo.

Referencias

1. J. F. Blanchet; D. Rodrigue, *Cellular Polymers* 2004, 23, 193.
2. D. Rodrigue; S. Leduc in PPS 19 Proceedings, Melbourne, 2003, CD.
3. V. Kumar; J. E. Weller, *Polymer Engineering and Science* 1994, 34, 169.
4. L. R. Heck, *Journal of Vinyl and Additive Technology* 1998, 4, 113.
5. R. Gosselin; D. Rodrigue, *Polymer Testing* 2005, 24, 1027.
6. X. Chen; M. C. Heuzey; P. J. Carreau, *Polymer Engineering and Science* 2004, 44, 2158.