



POLÍMEROS : PROCESOS DE MANUFACTURA Y DISEÑO PARTE 1 : TERMOPLÁSTICOS

Fernando G. Torres García

*University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST)
Department of Mechanical Engineering, Polymer Engineering Division.
George Begg Building, PO Box 88, Sackville Street
Manchester M60 1QD , United Kingdom*

Resumen

El presente artículo presenta una revisión de los polímeros termoplásticos, sus procesos de fabricación y las principales consideraciones para su diseño. Sus propiedades son presentadas y discutidas en función de su importancia en el procesamiento de estos materiales. Se describen los principales métodos de manufactura para materiales termoplásticos. Se presentan y discuten algunas posibilidades para la mejora de las propiedades mecánicas a un bajo peso específico, como son a) el uso de fibras de refuerzo, dando lugar a los materiales compuestos de matriz termoplástica, y b) los polímeros celulares.

Revisión

1. INTRODUCCIÓN

El aumento en la producción de artículos hechos de materiales poliméricos en los últimos años ha sido grande. Actualmente el volumen de polímeros y plásticos producidos supera el de los metales. En muchas aplicaciones los polímeros ya han remplazado a los materiales convencionales tales como metales, madera, y fibras naturales como el algodón y la lana.

Los polímeros son un grupo de materiales compuestos de largas moléculas con uniones covalentes, que incluyen los plásticos y los cauchos. Los polímeros han existido en forma natural desde los orígenes de la vida, en formas tales como el ADN, ARN, proteínas, entre otros. El uso de materiales poliméricos está asociado en sus inicios a nombres como: Thomas Hancock (1820), quien invento el proceso de “masticación” del caucho para fluidizarlo, y Charles Goodyear (1839), quien descubrió que las propiedades del caucho mejoraban al calentarlo con azufre, dando lugar a lo que se conoce como vulcanización. El primer polímero sintético comercializado fue la baquelita, resina fenol-formaldehído, en 1910.

Muchos inventos y avances en la ciencia y tecnología de los polímeros han ocurrido desde aquellos tiempos. Actualmente, existen programas de investigación en el área de los polímeros en casi todas las universidades de los países industrializados, así como en las grandes empresas multinacionales. El presente artículo pretende ofrecer una visión general de una clase de materiales poliméricos, los termoplásticos, sus características, y principalmente sus procesos de fabricación, y algunas variaciones de los mismos que han dado lugar a materiales compuestos, espumas y otros.

2. MATERIALES POLIMÉRICOS

Como se ha mencionado anteriormente, un polímero es un material compuesto de moléculas, que poseen largas secuencias de una o más clases de átomos o grupos de átomos, unidos entre sí por enlaces primarios, generalmente covalentes. Los polímeros son producidos mediante la polimerización de los monómeros o unidades simples de las cuales están formados. Diferentes procesos de polimerización han sido desarrollados[1]. Plásticos es el nombre convencional con el que se conoce a los materiales poliméricos (pueden incluir algún tipo de aditivo) debido a su comportamiento en el estado de fluidez, particularmente en el caso de los termoplásticos.

De manera muy general, los polímeros se pueden clasificar en tres grupos :

- Termoplásticos
- Termoendurecibles o termofijos
- Elastómeros

Los termoplásticos están compuestos de cadenas lineales o ramificadas y poseen la característica de ablandarse con la adición de calor, y son procesables en el estado de fluidez. Pueden ser reprocesados. Ejemplos de materiales termoplásticos son: Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Policloruro de vinilo (PVC), etc.

En los termoendurecibles las cadenas forman parte de una red tridimensional, y están unidas por entrecruzamientos o "crosslinks". Dicha estructura les confiere las propiedades de dureza y resistencia al calor que poseen. Son fabricados en base a resinas monoméricas que son líquidos de baja viscosidad. Las resinas más usadas son las de poliéster no saturado (UP), las epóxicas y las fenólicas.

Los elastómeros, que incluyen cauchos, jebes, y gomas, también poseen una estructura tridimensional, pero las uniones son más débiles que en el caso de los termoendurecibles, dando lugar a las conocidas propiedades de elasticidad y de tolerar grandes deformaciones. El comportamiento mecánico de los elastómeros ha sido modelado con bastante precisión por la teoría de la elasticidad del caucho (rubber elasticity theory). En esta teoría se modela la estructura de los elastómeros como una red tridimensional y se hace uso de consideraciones termodinámicas y de la

incompresibilidad de estos materiales al ser sometidos a deformaciones mecánicas, para proponer relaciones de esfuerzo y deformación (Treloar).

3. MANUFACTURA DE TERMOPLÁSTICOS

Los termoplásticos, presentados en la sección anterior, ocupan el primer lugar en cuanto a volumen entre los materiales poliméricos. Los más usados son: polietileno (PE), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS) y polipropileno (PP). En el presente artículo, sólo se tratará los procesos de manufactura concernientes a los termoplásticos. En otra oportunidad se describirá la tecnología empleada para procesar termoendurecibles y elastómeros.

3.1. Etapas en la manufactura de termoplásticos

Todo proceso de manufactura de termoplásticos incluye las siguientes etapas: plastificación, conformado o moldeado, y enfriamiento¹. En la Fig. 1 se puede apreciar el diagrama que envuelve estas operaciones básicas en el procesado de termoplásticos. El proceso de plastificación se produce cuando el material es calentado. El calentamiento puede ser por fuentes externas (conducción, convección, radiación) o internas (disipación por trabajo mecánico o dieléctrico). En esta etapa el polímero pasa del estado sólido al estado de fluidez. El conformado o moldeado requiere el uso de moldes o matrices para producir objetos de diferentes formas. La última etapa, el enfriamiento del objeto moldeado o conformado, es la que usualmente toma más tiempo debido a la baja conductividad térmica que poseen los termoplásticos.

3.2. Propiedades de los termoplásticos

Los termoplásticos tienen propiedades específicas que deben ser tomadas en cuenta al diseñar e implementar un proceso de manufactura para estos, como por ejemplo:

1. Baja conductividad térmica
2. Alta viscosidad (1000-10000 Pa.s)²
3. Viscoelasticidad

1. En algunos casos el moldeo y el enfriamiento ocurren en el mismo lugar, por ejemplo en el moldeo por inyección.

2. Pa.s significa Pascuales x segundos y es la unidad en el SI para caracterizar la viscosidad de un fluido

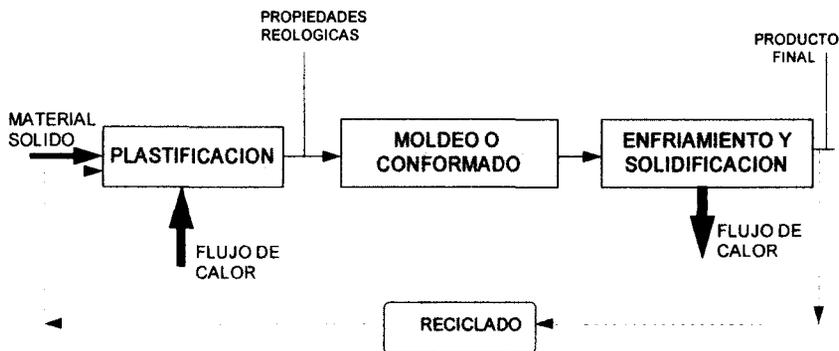


Fig. 1. Etapas en el procesamiento de polímeros termoplásticos.

La primera es una propiedad muy conocida en materiales plásticos, pues éstos presentan una conductividad térmica bastante menor que la de los metales. Por ejemplo el polipropileno (PP) tiene una conductividad térmica $k = 0.17 \text{ W/mK}$ a temperatura ambiente. Esta propiedad es, en el caso del procesamiento de termoplásticos, la que determina largos tiempos de enfriamiento en su procesamiento, y por consiguiente largos tiempos de ciclo³. Obviamente, esto es una desventaja cuando se necesitan altas productividades.

La alta viscosidad en los materiales plásticos en estado de fluidez, origina altos esfuerzos cortantes en el procesado, los que dan lugar a una gran disipación térmica. Esto puede ser usado ventajosamente al reducir la cantidad de calor que hay que añadir al polímero para la plastificación, sin embargo presenta el inconveniente de generar grandes presiones, y así la necesidad de emplear maquinaria robusta para el procesado. Dado que los termoplásticos, en el estado de fluidez, se comportan como fluidos no Newtonianos (es decir no siguen la ley de Newton de los fluidos) la viscosidad de éstos disminuye al aumentar la velocidad de deformación. Una de las expresiones más simples para representar el comportamiento de los fluidos poliméricos es la ley de potencia o exponencial (power law)[2], que puede expresarse de la siguiente forma:

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

3. La baja conductividad térmica de los polímeros es lo que ha determinado su uso como materiales aislantes por excelencia, como es el caso de las espumas de poliuretano.

donde τ es el esfuerzo de corte en el fluido, k es una constante o factor de consistencia, $\dot{\gamma}$ es la velocidad de deformación por corte, y n es el exponente de la ley de potencia y puede tomar un valor de 0 a 1. Para $n=1$ el fluido se comporta como un fluido Newtoniano, es decir:

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}$$

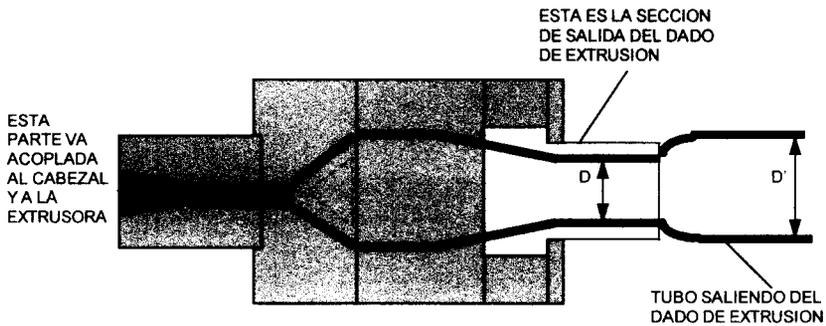
Luego, para el caso de un fluido que sigue la ley de potencia, la viscosidad del fluido se puede expresar como:

$$\mu = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2)$$

donde μ es la viscosidad aparente del fluido, es decir el valor que toma la viscosidad para un valor específico de velocidad de deformación por corte. Existen otros modelos más complejos para modelar la viscosidad de los fluidos poliméricos, en los que se incluye la dependencia de la temperatura, y de propiedades moleculares [3-5].

La viscoelasticidad es un fenómeno típico de los materiales poliméricos (aunque también ocurre en otros materiales, por ejemplo, metales, pastas, etc.). El término viscoelasticidad se refiere al comportamiento de un material, cuando éste tiene propiedades de un líquido viscoso y de un sólido elástico a la vez. También implica la dependencia de las propiedades mecánicas en función del tiempo. La viscoelasticidad es una propiedad favorable en procesos que requieren una alta resistencia mecánica en el estado líquido o semilíquido, tales como: estirado de fibras, soplado de film, soplado de botellas, etc. Este exceso de resistencia del fluido con respecto a un líquido newtoniano, como el agua por ejemplo (el agua no se puede estirar), se debe a la componente elástica del material. Aunque la viscoelasticidad es explicada por complicadas teorías [6-8], ésta sirve para explicar asuntos sumamente prácticos y cotidianos en el procesamiento de plásticos. Por ejemplo, cualquier persona que haya trabajado en extrusión de plásticos, de seguro ha apreciado que la sección del producto al salir del dado, es de mayores dimensiones que la sección del agujero en el dado de extrusión. Este fenómeno conocido como "hinchamiento en el dado" (die swell) es muy conocido por los investigadores y por los procesadores de plásticos, y ha sido reportado ampliamente en la literatura [3-5]. Lo que ocurre es que las moléculas del polímero se orientan en la dirección del flujo al pasar por el dado y debido al compor-

tamiento viscoelástico, regresan a su posición original al salir del dado, produciéndose así un hinchamiento. La Fig. 2 muestra un esquema del fenómeno de hinchamiento en el caso de la extrusión de tuberías plásticas.



HINCHAMIENTO EN EL DADO DE EXTRUSION (DIE SWELL)

Fig. 2. Die Swell o hinchamiento en la extrusión de tubos termoplásticos (las líneas gruesas representan el flujo de plástico que va de izquierda a derecha en la figura).

Este tipo de fenómenos relacionados con el flujo de plásticos en el estado de fluidez es estudiado por la "reología", que es la ciencia que trata el flujo (*reos* significa fluir en griego) de los materiales. En el procesamiento de plásticos, el determinar cómo fluye el material al ser procesado es de gran importancia para predecir las propiedades finales del producto. El uso de métodos numéricos, tales como elementos finitos (FEM) y volúmenes de control (control volume: CV ó finite volume: FV), son una práctica estándar a la hora de simular el flujo de fluidos no newtonianos como lo son los plásticos en el estado de fluidez [9]. La Fig. 3 (parte de un trabajo realizado en la división de Ingeniería de Polímeros de UMIST, UK[9]) presenta el gráfico de los vectores de velocidad de un flujo plástico en un canal de geometría compleja. Con este tipo de análisis es posible mejorar el diseño de los moldes y matrices, y optimizar las propiedades del proceso así como del producto final.

Otras propiedades como resistencia a la degradación térmica, miscibilidad, propiedades de tensión superficial, etc., son también importantes, en mayor o menor escala dependiendo del proceso.

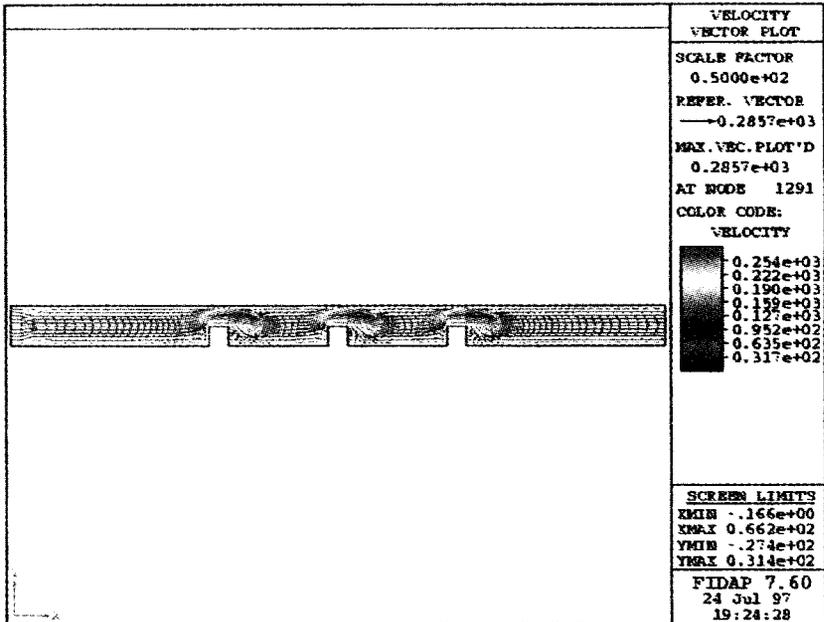


Fig. 3. Flujo de material plástico en un canal con obstáculos (tomado de ref. 9).

3.3 Principales procesos de manufactura con termoplásticos

Presentadas las bases para el entendimiento de la manufactura con termoplásticos, es necesario mencionar los principales procesos, así como algunos detalles de su tecnología.

A) EXTRUSIÓN

Este es un proceso continuo para la fabricación de materiales de sección constante tales como: tubos, perfiles, films, planchas, etc. El material es forzado mediante un tornillo giratorio a través de una apertura de forma específica (dado o cabezal) que guarda alguna relación con la forma del producto que se desea obtener. En la extrusión convencional (con plastificación del material) el material ingresa a la extrusora en el estado sólido (gránulos, polvo o reciclado), luego es plastificado, y finalmente es dosificado de manera constante hacia el dado de extrusión. Dependiendo del producto, diferentes operaciones son realizadas luego que el preformado sale del dado.

B) MOLDEO POR INYECCIÓN

El moldeo por inyección es uno de los procesos más comunes para la manufactura de artículos plásticos. El material es alimentado a una máquina llamada inyectora, la cual lo plastifica y luego lo inyecta mediante el desplazamiento positivo de un tornillo reciprocante, en una cavidad cerrada llamada molde. El molde presenta la forma del artículo que se desea obtener⁴. El artículo plástico se solidifica en el molde y luego es retirado. Este es un proceso de fabricación para producción en masa debido al alto costo de los moldes.

C) MOLDEO POR SOPLADO

El moldeo por soplado es un medio de producir objetos huecos con una sola apertura de menor tamaño que el diámetro mayor del objeto, como por ejemplo botellas. Este proceso se desarrolló a partir del soplado de botellas de vidrio, y en la mayoría de los casos se fabrica primero un tubo sellado por un lado, que es luego soplado dentro de un molde con la forma del objeto que se desea obtener. Si el tubo, llamado también "parison", es fabricado por extrusión el proceso se denomina soplado por extrusión o extrusión-soplado. Si en vez de extruir un tubo se inyecta un preformado en forma de un tubo de ensayo, y luego se calienta, estira, y sopla, este proceso se denomina soplado por inyección o inyección-soplado. Este último proceso se desarrolló para aprovechar las propiedades de estiramiento del poliéster termoplástico (PET o polethylene terephthalate) y es el método convencional para fabricar las botellas de bebidas gaseosas y aguas carbonatadas.

D) CALANDRADO

Este proceso es empleado cuando se desea fabricar films y láminas de plástico⁵. Se hace pasar la materia prima a través de una combinación de rodillos calientes. Usualmente se emplean combinaciones de cuatro rodillos con tres pasos de material. La mayor aplicación del calandrado se encuentra en la producción de films y láminas de PVC, ya que el riesgo de degradación térmica se reduce considerablemente, frente al encontrado en la extrusión de láminas de PVC.

4. Se debe considerar efectos de contracción durante el enfriamiento, y efectos viscoelásticos, cuando se diseña el molde (o el dado en el caso de extrusión). Las dimensiones de éste, generalmente, no coinciden con las dimensiones del producto final.

5. El calandrado se usa también para la fabricación de láminas de elastómeros.

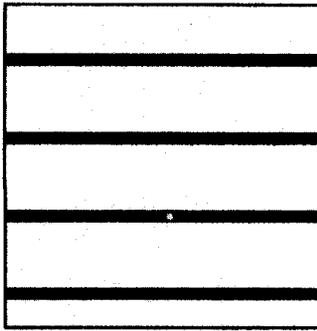
E) TERMOFORMADO

En el termoformado una lámina de plástico es calentada hasta ablandarse. Por medio de presión externa o vacío, la lámina es estirada y conformada adhiriéndola a un molde para que tome la forma de éste. La lámina deformada luego es enfriada en el molde. Mediante este proceso es posible fabricar una gran cantidad de formas huecas, como paneles para automóviles y aviones, embalajes, entre otros. Los moldes pueden ser positivos o negativos. Los materiales más usados en el termoformado son polímeros amorfos ya que poseen un rango de ablandamiento más amplio que los polímeros semicristalinos, aunque últimamente se ha estado usando cada vez más polímeros semicristalinos, especialmente PP.

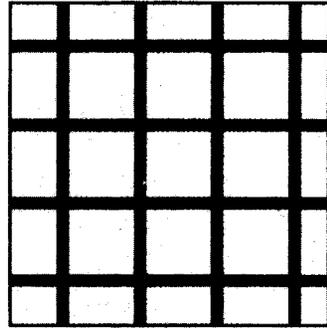
4. MATERIALES COMPUESTOS: TERMOPLÁSTICOS REFORZADOS

En general, los polímeros presentan baja resistencia mecánica y baja rigidez en comparación con los metales. El módulo de elasticidad de los termoplásticos es, en la mayoría de los casos, aprox. 2 GPa (100 veces menos que el acero) y los valores de resistencia mecánica son aprox. 5 veces menores que en los metales. Para aumentar la rigidez y resistencia de un artículo plástico, se suele emplear ingeniosos detalles constructivos, tales como costillas, secciones huecas, paredes huecas multicavidades, etc.

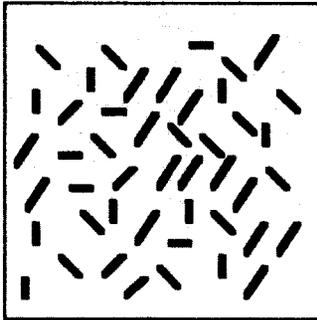
Otro método de aumentar la rigidez y resistencia de los termoplásticos es mediante el refuerzo del polímero con partículas o fibras formando un material compuesto o composite. La mayoría de termoplásticos son reforzados con fibras. Dicho refuerzo puede ser de tipo continuo o discontinuo. Los termoplásticos reforzados con fibras continuas, forman laminados con diferentes orientaciones de manera que el artículo pueda soportar cargas en varias direcciones. Los de refuerzo con fibras discontinuas pueden presentar las fibras alineadas o presentan una distribución aleatoria en las orientaciones de las fibras. Estos últimos pueden ser procesados por métodos convencionales como moldeo por inyección, extrusión, moldeo por soplado, y termoformado. El material más empleado como fibra de refuerzo (95% del total) es la fibra de vidrio, aunque las fibras de carbón también son usadas en requerimientos de alta rigidez, alta resistencia a la fatiga y poco peso específico, como por ejemplo: equipo de deportes (raquetas, esquís), industria aeroespacial e industria automotriz de competencia. Sin embargo, las fibras de carbón son mucho más caras que las fibras de vidrio.



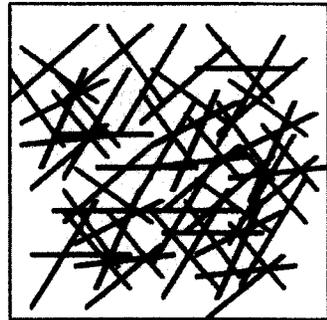
REFUERZO CONTINUO UNIDIRECCIONAL



REFUERZO CONTINUO BIDIRECCIONAL



REFUERZO DISCRETO POR FIBRAS CORTAS



REFUERZO DISCRETO POR FIBRAS LARGAS

Fig. 4. Algunos ejemplos de termoplásticos reforzados con fibras.

Otro tipo de termoplásticos reforzados, que ha causado gran impacto en la industria automotriz, son los termoplásticos reforzados con matas o GMT (glass mat reinforced thermoplastics). Estos son producidos a partir de una mata compuesta por fibras, en diferentes orientaciones (orientación aleatoria o unidireccional), la cual es estampada en caliente en una matriz de material termoplástico. Un ejemplo de GMT en la industria automotriz se encuentra en los parachoques de algunos vehículos Peugeot, y están compuestos de un GMT de matriz de polipropileno (PP), con un refuerzo al 20% de fibras de vidrio unidireccionales y 20% con orientaciones aleatorias [9].

Entre las matrices termoplásticas⁶ más empleadas se encuentran: el Nylon 6.6, el polipropileno, el PEEK o poly-ether ether ketone fabricado por ICI, que es un polímero relativamente nuevo de muy buenas propiedades mecánicas y que puede ser usado a altas temperaturas, pero de alto costo relativo. Es empleado en aplicaciones de altos requerimientos, en las que el alto costo está justificado. En cuanto a las fibras, las más empleadas son la fibra de vidrio seguidas por las de carbón y Kevlar o fibras aramidas, siendo las de Kevlar 49 las más usadas entre estas últimas.

El refuerzo con partículas en termoplásticos se usa en casos en los que, por ejemplo, se desea mejorar la resistencia al impacto, como ocurre en los termoplásticos reforzados con partículas de caucho.

5. RIGIDEZ Y POCO PESO ESPECIFICO: POLÍMEROS CELULARES - ESPUMAS

En la búsqueda de soluciones óptimas en el diseño con termoplásticos, como se ha mencionado antes, se puede adoptar los siguientes criterios: a) mejorar formas constructivas y b) el empleo de fibras de refuerzo. Otra solución es el uso de materiales celulares o espumas. En general éstos se crearon a partir del soplado de las resinas fenólicas y de poliuretano (termoendurecibles) con algún gas, de modo que se obtenga una estructura hueca y llena de cavidades huecas o celdas en el interior. Bajo el microscopio, su estructura se asemeja a la de un panal de abejas.

Este proceso también se aplica a materiales termoplásticos, aunque la densidad de una espuma termoplástica es mayor que la de una espuma termoendurecible. La densidad de una espuma fenólica o de poliuretano esta en el rango de 20-100 kg/m³, mientras que la de una espuma termoplástica es de aprox. 700 kg/m³.

Los gases empleados en el soplado de espumas termoplásticas son: N₂ y CO₂, y pueden ser generados *in situ* con la descomposición de un agente de soplado. El gas se mantiene en solución en el plástico en estado líquido, mientras es procesado en una extrusora o en una inyectora.

6. En este artículo solo se menciona las matrices termoplásticas empleadas, sin embargo debe tenerse en cuenta que la mayor cantidad en volumen de materiales compuestos está hecha con matrices termoendurecibles como las epóxicas y las de poliéster.

Cuando el flujo plástico (conteniendo el gas) entra al molde o dado, se pierde presión y el gas se expande, haciendo que la solución llene la cavidad [10,11].

Las espumas termoplásticas se conocen como espumas estructurales y encuentran aplicación en las siguientes áreas: industria automotriz (grandes áreas requeridas), cuando se requiere reducción de peso y cuando se requiere alta rigidez sin la inclusión de costillas (esto reduce los costos de matricería y moldes). Por otro lado las espumas termoendurecibles son más bien usadas como aislantes térmicos y materiales para embalajes.

BIBLIOGRAFÍA

1. Young, R.J., Lovell, P.A. 1991. **Introduction to Polymers**. 2a Edición, Ed. Chapman & Hall, London.
2. Ferry, J.D. 1980. **Viscoelastic Properties of Polymers**. 3a Edición, John Wiley, New York.
3. Cogswell, F.N. 1981. **Polymer Melt Rheology**. George Godwin Limited, London.
4. Brydson, J.A. 1981. **Flow Properties of Polymer Melts**. 2a Edición, George Godwin Limited, London.
5. White, J.L. 1990. **Principles of Polymer Engineering Rheology**. John Wiley, New York.
6. Ward, I.M., Hadley, D.W. 1996. **An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers**. John Wiley, Chichester.
7. Mc Crum, N.G., Buckley, C.P., Bucknall, C.B. 1982. **Principles of Polymer Engineering**. Oxford University Press, Oxford.
8. Torres García, F.G. 1995. **Impermeabilización de un sistema de pilas para lixiviación de cobre de 40,000 m² con un revestimiento construido con láminas de HDPE**. Tesis de Ingeniero Mecánico, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
9. Torres García, F.G. 1997. **Polymer and Polymer Composite Flows: Modelling of Molecular Chain Conformations and Reinforcing Fibre Orientations**. Tesis de Maestría, Dept. of Mechanical Engineering, Univ. of Manchester, Inst. of Science and Technology UMIST.
10. Methven, J.M. 1996. **Mechanics of Polymer and Composites 2**. Notas del curso, UMIST, Manchester.
11. Methven, J.M. 1990. **Foams, Foams and Blowing Agents**. RAPRA Review Reports, Pergamon Press, Oxford.

