

EXPLORANDO EL POLICARBONATO: UN ANÁLISIS DE SUS PROPIEDADES Y APLICACIONES EN INGENIERÍA

Fecha de aceptación: 01/07/2024

S. Sanchez-Valdes

Centro de Investigación en Química
Aplicada Blvd, Enrique Reyna Herмосillo
140, Saltillo, Coahuila de Zaragoza –
México

J. Lara-Sanchez

Centro de Investigación en Química
Aplicada Blvd, Enrique Reyna Herмосillo
140, Saltillo, Coahuila de Zaragoza –
México

J. Torres-González

Centro de Investigación en Química
Aplicada Blvd, Enrique Reyna Herмосillo
140, Saltillo, Coahuila de Zaragoza –
México

A.B. Espinoza-Martínez

Centro de Investigación en Química
Aplicada Blvd, Enrique Reyna Herмосillo
140, Saltillo, Coahuila de Zaragoza –
México

J.A. Rodriguez-Gonzalez

Centro de Investigación en Química
Aplicada Blvd, Enrique Reyna Herмосillo
140, Saltillo, Coahuila de Zaragoza –
México

A. Herrera-Guerrero

Centro de Investigación en Química
Aplicada Blvd, Enrique Reyna Herмосillo
140, Saltillo, Coahuila de Zaragoza –
México

K.F. Rodriguez-Ramirez

Centro de Investigación en Química
Aplicada Blvd, Enrique Reyna Herмосillo
140, Saltillo, Coahuila de Zaragoza –
México

L. da Silva

Centro de Investigación en Química
Aplicada Blvd, Enrique Reyna Herмосillo
140, Saltillo, Coahuila de Zaragoza –
México

RESUMEN: Una forma de clasificar a los plásticos en cuanto a su volumen de producción y desempeño es en tres grandes rubros: Plásticos commodities, polímeros de ingeniería y polímeros de especialidad. Los plásticos commodities o de gran volumen se fabrican en cantidades muy grandes: como el polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y policloruro de vinilo (PVC). Estos son más baratos, pero no presentan buenas propiedades a temperaturas por encima de los 100 °C. Los polímeros de ingeniería se producen en menor volumen, por lo que son más caros, pero presentan muy buenas propiedades a temperaturas elevadas. Se utilizan en aplicaciones más ingenieriles: como en la industria automotriz

y aeroespacial. Entre los polímeros de ingeniería se encuentran los poliésteres (PET, PBT, PCT) policarbonatos (PC), terpolímeros de ABS y sus mezclas, poliacetales (POM), acrílicos (PMMA) y los polióxido de fenileno (PPO), como Noryl, entre otros. Por último, tenemos los polímeros de especialidad; los cuales tienen propiedades únicas y se usan en aplicaciones muy específicas, como en la industria aeroespacial, geotérmica y otras aplicaciones especiales, por lo que, son muy caros y se fabrican a muy bajos volúmenes de producción. Ejemplos de estos son las poliimidaz (PI), las polisulfonas (PSU), polietersulfonas (PES) y polietertercetonas (PEEK) [1].

EL POLICARBONATO

Dentro de los polímeros de ingeniería, el PC es un polímero muy versátil con buenas propiedades a elevadas temperaturas (arriba de 150 °C), es higroscópico y susceptible al ataque hidrolítico. Es un polímero que se obtiene tradicionalmente mediante la reacción de dos monómeros: el fosgeno y el bisfenol-A (Figura 1) [2]. Se puede apreciar en la Figura 1, la presencia de grupos muy voluminosos y anillos aromáticos que le impiden plegarse con facilidad. Esto le confiere alta transparencia, ya que es un polímero amorfo que no cristaliza fácilmente.

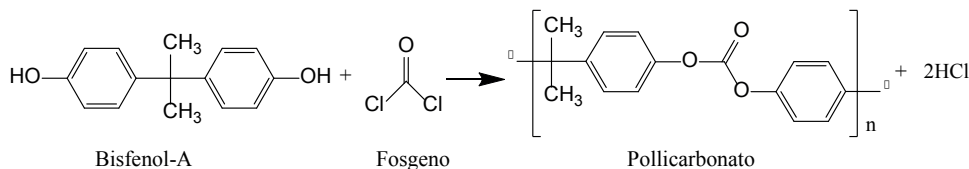


Figura 1. Síntesis del policarbonato.

RIESGOS DEL BISFENOL-A

Es difícil pasar por alto la atención que se presta al Bisfenol A (Figura 1), sabemos que es un fenol sintético que se filtra de botellas y latas a bebidas y alimentos. El BPA se utiliza también en la fabricación de resinas de polisulfona y poliacrilato, y además de encontrarse en botellas, se utiliza en latas, tuberías y empaques de alimentos.



Figura 2. Aplicación de plásticos libres de bisfenol A. Imagen Generada con IA.

Un estudio de la Escuela de Salud Pública de Harvard en donde examinaron la relación entre el uso de botellas de PC y las concentraciones de BPA en humanos logró establecer un vínculo directo entre los niveles de BPA en la orina y el consumo de estas botellas. El estudio no impuso restricciones sobre qué bebidas los estudiantes podían beber de la botella, sin embargo, se indicó a los participantes que solamente bebieran bebidas frías en las botellas de PC [3,4]. El bisfenol A es un disruptor endocrino, es decir, es capaz de alterar el sistema hormonal de los organismos; posee propiedades estrogénicas que pueden impedir la acción adecuada del estradiol.⁵ Además, diversos estudios reportan que el BPA induce carcinogénesis, toxicidad reproductiva, respuesta inflamatoria o inmune anormal y trastornos del desarrollo del cerebro o del sistema nervioso a través de diversas vías de señalización celular [4-7]. Por esto se ha limitado el uso del PC en envases y para contacto con alimentos como es el caso de envases rígidos para bebidas energéticas y en biberones, en donde se debe incluir la leyenda de estar libres de bisfenol A (BPA free).

HISTORIA DEL PC

El policarbonato se convirtió en un polímero de ingeniería debido a los descubrimientos técnicos que se desarrollaron en la década de 1950. En 1953, los estudios realizados por Schnell en Bayer (Alemania) llevaron al descubrimiento del policarbonato, material que fue registrado bajo el nombre comercial de Makrolon®, nombre comercial del PC que Bayer que mantiene hoy en día. A la vez, D. Fox en General Electric, buscaba esmaltes de alambre de poliéster mejorados y encontró el mismo compuesto. En los dos trabajos se utilizó el diol bisfenol-A como base para sus estudios sobre policarbonatos. Desde entonces, el polímero de policarbonato tuvo un gran crecimiento comercial debido a su amplia gama de propiedades como transparencia, resistencia frente a impactos y una alta temperatura de transición vítrea, lo que le confiere un rango de aplicaciones muy variado [8,9].

PROPIEDADES

La gran importancia del policarbonato radica en sus buenas propiedades de procesamiento, ópticas, mecánicas y térmicas. Una característica muy apreciada del PC es su alta transparencia ya que al ser amorfo y no cristalizar permite el paso de casi el 100% de la luz visible, pero esta propiedad solo la mantiene el PC virgen, ya que al reciclarse se forman fenoles que le imparten un cierto color amarillento reduciendo su transparencia, por lo que es necesario cuidar su reciclado o historia térmica [10].

El PC es muy resistente al impacto, es aislante eléctrico, auto extinguido e inerte. Una vez que reblandece, para hacerlo fluir en inyección o extrusión a elevadas temperaturas (mayor a 250 °C) presenta muy alta viscosidad y puede actuar como limpiador o purga dentro del barril de procesamiento. Además, presenta muy alta temperatura de transición vítrea (T_g de 150 °C) lo que lo hace muy rígido a temperatura ambiente [11]. Sin embargo, el PC también cuenta con desventajas, entre las que se encuentra una alta viscosidad en estado fundido, resistencia limitada a los disolventes, a la intemperie e hidrólisis. También el PC tiene la desventaja que se raya muy fácilmente a diferencia del PMMA y aunque ambos son altamente transparentes, el PC presenta mucho mayor resistencia al impacto (ver Tabla 1) comparado con el PMMA, es por esto por lo que se prefiere usar PMMA en micas o faros transparentes para autos en la parte trasera ya que se rayan poco, mientras que el PC se prefiere usar en la parte frontal del auto para evitar que se fracture si es impactado por una piedra emitida por el vehículo delantero.

		PC	Acrílico (de alta resistencia)	Acrílico estándar
Resistencia al impacto (KJ/m ²)	Muesca (ft lb/in ²)	16	1.2	0.4
	Dardo en caída	125	8	1

Tabla 1. Propiedades de resistencia al impacto para el PC y el PMMA

El PC es susceptible al ESCR (environmental stresscracking resistance) o resistencia al ataque de bases fuertes, hidrocarburos halogenados y cetonas. No es resistente a compuestos alcalinos por lo que hay que tener cuidado con limpiadores alcalinos como el maestro limpio (Mr. Clean ®).

Para su procesamiento, el policarbonato requiere temperaturas de fundido mayores a 250°C ya que es muy amorfo y requiere alta temperatura para hacerlo fluir, presenta muy alta T_g (150 °C) por lo que a temperatura ambiente es muy rígido y al tener muy alta difusividad térmica permite ciclos de inyección rápidos ya que se puede sacar el calor en el molde más rápido. Al ser un material higroscópico requiere secarse antes de procesarse para evitar su hidrólisis a 230 °C con aire seco con un punto de rocío (dew point) de al menos -20 °C. La hidrólisis del PC puede ocasionar defectos visibles en la pieza, así como reducción en su peso molecular, propiedades físico-mecánicas y defectos superficiales

como ráfagas brillantes (silver marks), huecos y otros defectos. Dadas las propiedades mencionadas anteriormente; el policarbonato es muy común, tanto en los hogares como en la industria.

APLICACIONES

Debido al amplio rango de propiedades que posee este polímero de ingeniería, cuenta con múltiples aplicaciones en diversas ramas, a continuación, se mencionan las principales:

Para el ramo alimenticio, como se mencionó anteriormente, existen garrafones, botellas, tupperware, biberones y empaques para alimentos de PC. En cuestiones Ópticas, las principales aplicaciones incluyen lentes oftálmicos y pantallas. Revestimientos protectores en automóviles, como faros y cristales. Biomédico, como microagujas y distintos equipos médicos como nebulizadores. En Arquitectura se encuentra en el material de construcción, condensador eléctrico y material dieléctrico. La industria automotriz hace uso del policarbonato en las pantallas, ventanas a prueba de balas y partes plásticas [10,12,13].

Además, el PC se puede formular con Aditivos UV si la aplicación se va a exponer para uso exterior. También, se puede reforzar con cargas y fibras para mejorar sus propiedades mecánicas y estabilidad dimensional. La resistencia térmica se puede aumentar con retardantes de flama para aplicaciones especiales [14].

CONCLUSIONES

El policarbonato se destaca por su excepcional resistencia al impacto, alta temperatura de transición vítrea, ductilidad y transparencia óptica. Su alta resistencia térmica lo hace ideal para condiciones climáticas adversas. Con una transparencia que alcanza hasta el 90%, proporciona un óptimo aislamiento sin comprometer la entrada de luz natural. En consecuencia, el Policarbonato ha sido ampliamente estudiado y utilizado, aunque la inversión inicial puede ser mayor que con otros materiales, la durabilidad a largo plazo del PC lo convierte en una opción económicamente más rentable que el plástico tradicional.

REFERENCIAS

1. Coreño-Alonso, J., Méndez-Bautista, M.T., Relación estructura-propiedades de polímeros. Educación Química, 21(4) (2010) 291–299. doi:10.1016/S0187-893X(18)30098-3
2. Tamura, M., Ito, K., Honda, M. *et al.*, Direct Copolymerization of CO₂ and Diols. *Sci Rep* 6, 24038 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep24038>

3. Carwile J.L., Luu H.T., Bassett L.S., Driscoll D.A., Yuan C., Chang J.Y., Ye X., Calafat A.M., Michels K.B., Polycarbonate bottle use and urinary bisphenol A concentrations. *Environ Health Perspect.* 2009 Sep;117(9):1368-72. doi: 10.1289/ehp.0900604.
4. Jalal, N., Surendranath, A. R., Pathak, J. L., Yu, S., Chung, C. Y. Bisphenol A (BPA) the mighty and the mutagenic. *Toxicology Reports* vol. 5 76–84 <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.12.013> (2018).
5. Klenke, U., Constantin, S., Wray, S., BPA directly decreases GnRH neuronal activity via noncanonical pathway. *Endocrinology* 157, 1980–1990 (2016). <http://doi.org/10.1210/en.2015-1924>
6. Murata, M., Kang, J. H., Bisphenol A (BPA) and cell signaling pathways. *Biotechnology Advances*, 36 (2018) 311–327. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.12.002>
7. Deba, S., Núñez, P., Efectos del Bisfenol A en la reproducción masculina: estudios en modelos animales. *Medicina Reproductiva y Embriología Clínica* 5, 55–60 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.medre.2018.03.003>.
8. Brunelle, D. J., Smigelski, P. M., Boden, E. P., Evolution of Polycarbonate Process Technologies. in 8–21 (2005). <https://doi.org/10.1021/bk-2005-0898.ch002>.
9. Clagett, D. C., Shafer, S. J., Polycarbonate Resins. *Polymer Engineering & Science*, 25(8), 458-461, 1985. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3456-3>
10. Kausar, A. A review of filled and pristine polycarbonate blends and their applications. *Journal of Plastic Film and Sheeting* vol. 34 60–97 Preprint at <https://doi.org/10.1177/8756087917691088> (2018).
11. Singh, A. Polycarbonate Synthesis. in *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials* (ed. Kobayashi Shiro and Müllen, K.) 1793–1796 (Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015). doi:10.1007/978-3-642-29648-2_419.
12. Trautmann, A., Heuck, F., Muelle, C., Ruther, P., Replication of microneedle arrays using vacuum casting and hot embossing. The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2005. Digest of Technical Papers. *Transducers 2* (2005) 1420 – 1423. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:37775188>
13. Schmauder, T., Nauenburg, K.-D., Kruse, K., Ickes, G., Hard coatings by plasma CVD on polycarbonate for automotive and optical applications, *Thin Solid Films*, 502, 1–2, (2006) 270-274. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.07.296>.
14. Mallakpour, S., Hussain, C. M., Handbook of Consumer Nanoproducts. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-6453-6>