



RESINAS POLIÉSTER INSATURADAS A PARTIR DE PET DE DESECHO GLICOLIZADO: SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN

UNSATURATED POLYESTER RESINS FROM GLYCOLIZED WASTE PET: SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION

G. Ramírez-Palma¹, L.F. Alcocer-Márquez¹, F.S. Alcántar-González¹, P. Turati-Ramírez de Arellano², M.J. Cruz-Gómez^{1*}

¹Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, México, CDMX, 04510.

²Resinas y Materiales S.A. de C.V. Blvd. Manuel Ávila Camacho. No. Exterior 1994-1101. Col. Lucas Tepetlaco, Tlalnepantla, Estado de México, 54055.

Recibido 9 de Mayo de 2017; Aceptado 28 de Julio de 2017

Resumen

El poli (tereftalato de etileno), PET, es un plástico que después de su consumo puede ser aprovechado para hacer diferentes materiales. El objetivo de este trabajo es valorar el uso del PET de desecho, como materia prima para elaborar resinas poliéster insaturadas (RPI), las cuales fueron formuladas con la intención de obtener propiedades de tensión, viscosidad y curado, comparables a las de RPI comerciales. Se utilizaron diferentes glicoles para depolimerizar al PET, y posteriormente, el producto de la glicólisis fue utilizado para elaborar las RPI. Además, se hicieron pruebas de compatibilidad entre el estireno y las distintas resinas. Se encontró que la mezcla de glicoles proporciona mejor resistencia a la tensión en las resinas curadas, y que las resinas con propilenglicol son más compatibles con estireno. Por último, las propiedades de curado de las resinas fueron comparables con resinas comerciales.

Palabras clave: resinas poliéster insaturadas, reciclaje de PET, glicólisis, compatibilidad con estireno, propilenglicol.

Abstract

Poly (ethylene terephthalate), PET, is a plastic which can be used after consumption to produce different kind of materials. The aim of this work is to evaluate the production of unsaturated polyester resins, UPR's, using post-consumption PET. These UPR's were formulated in order to obtain mechanical properties, like tensile strength, viscosity and cured properties, similar to those of commercial resins. Different glycols were used for PET depolymerization, the glycolized product was used to manufacture the UPR's. Additionally, compatibility tests were carried out between styrene and the resins. It was found that a glycols mixture enhances tensile strength in the UPR castings, and that propylene glycol resins show better compatibility with styrene. Finally, curing properties of the new UPR's were comparable to commercial resins.

Keywords: unsaturated polyester resins, PET recycling, glycolysis, styrene compatibility and propylene glycol.

1 Introducción

En México se hace la mayor cantidad de recuperación de botellas de plástico de PET permitiendo que nuestro país sea líder en América en esta actividad, así como en el reciclaje de este mismo plástico. De acuerdo con el director general de la ECOCE (Ecología y Compromiso Empresarial), en México se recupera 57 % del consumo nacional del PET, del cual 46.2 % se queda en México y se utiliza en las plantas de reciclado, Notimex (2015).

Entre los métodos para reciclar el PET, únicamente

el reciclaje químico se ajusta con los principios de desarrollo sustentable ya que transforma el plástico en la materia prima de lo que originalmente estaba hecho. Para llevar a cabo el reciclaje químico del PET se han propuesto varios procesos de los cuáles, la glicólisis del PET es la que más se ha desarrollado.

La glicólisis involucra la reacción del PET de desecho en hojuelas con exceso de glicol a temperaturas de 180 a 240 °C. El glicol más típico para esta reacción es el etilenglicol debido a que se ha observado un mayor grado de depolimerización del PET comparado contra el propilenglicol y el dietilenglicol, Khoonkari *et al.* (2015); Ekart (2003)

* Autor para la correspondencia. E-mail: mjcg@unam.mx
Tel (55) 56225359

y Aguado (1999). En esta reacción el producto es el tereftalato de bis 2-hidroxietileno (TBHE), siendo este el monómero del PET. Además, se considera que para llevar a cabo esta reacción se requiere del uso de un catalizador, generalmente, el acetato de zinc o el acetato de litio.

De acuerdo a diferentes autores como Karayannidis y col. (2005); Tahvildari y col. (2010); Vaidya (1987) y (1988) el grado de depolimerización y la rapidez de reacción aumentan al incrementar la relación glicol/PET a temperaturas mayores de 200 °C.

El TBHE obtenido de la glicólisis tiene diferentes usos en la industria. Entre ellos la nueva preparación del mismo PET, las resinas poliéster insaturadas y diferentes polioles.

Las RPI son soluciones de poliésteres insaturados en un monómero vinílico, generalmente estireno, Brydson (1999). Estas resinas son los compuestos más usados en la producción de materiales reforzados con fibra de vidrio, que se usan en las áreas de construcción, marina, transporte y electrónicos, Stevens (1999).

El poliéster insaturado que conforma a la resina, se sintetiza a partir de una reacción de esterificación entre glicoles y ácidos carboxílicos, saturados e insaturados. Una vez sintetizado el poliéster, éste se mezcla con un monómero vinílico. Una vez formada la solución se le adicionan aditivos y un catalizador que produce un entrecruzamiento dando lugar a un polímero termofijo, Brydson (1999).

A finales de los 80's se sintetizaron RPI a partir de la glicólisis del PET, Vaidya (1987). Desde entonces y hasta la fecha, se han encontrado propiedades de interés para diferentes aplicaciones de RPI con base de PET reciclado, por ejemplo; mayor temperatura de distorsión al calor, menor costo de materia prima y sistemas aplicables a concreto polimérico, Duque-Ingunza y col. (2013); Aslan y col. (1997); Abdel-Azim A. (1996); Lu (2001); Potiyara (2007) y Puangsansuk y col. (2009).

Una de las dificultades de la síntesis de resinas poliéster, es la compatibilidad del poliéster con el monómero estireno, de acuerdo a autores como; Sidney (1998), Brydson (1999) y Kandelbauer (2014), el propilenglicol es el glicol con mayor compatibilidad con estireno; además de impartir mejores propiedades mecánicas, térmicas y mayor flexibilidad a la resina curada.

Boenig (1964) recopiló información sobre la influencia que tienen algunos glicoles en las propiedades mecánicas de las resinas curadas. De

acuerdo a este autor, existe un efecto sinérgico en las propiedades de tensión y flexión cuando se combinan glicoles, comparado con las propiedades que se obtienen con un solo tipo de glicol en la formulación.

2 Metodología

El proceso para la producción de las RPI con base de PET reciclado consta de tres etapas: la primera es la depolimerización del PET post-consumo para producir el TBHE. La segunda es la síntesis de un copoliéster, en donde se hace la esterificación del TBHE y los glicoles con anhídrido maleico y anhídrido ftálico. La tercera consiste en la disolución de los ésteres de la etapa dos en estireno.

2.1 Depolimerización

Los experimentos de depolimerización del PET se hicieron en un reactor por lotes PARR de 2 L, (Bench Top Reactor 4524) acoplado con un controlador de reactor (PARR Reactor Controller 4848). Los experimentos consistieron en la reacción entre el glicol, o mezcla de glicoles, con PET de post-consumo (limpio, seco y triturado) a altas temperaturas, haciendo uso de acetato de zinc como catalizador. Los glicoles utilizados en estos experimentos fueron, etilenglicol (EG), propilenglicol (PG) y una mezcla de EG-PG al 50 % en peso; a los productos se les identificó con las siguientes claves: TBHE-1, TBHE-2 y TBHE-3, para las reacciones de glicólisis con EG, PG y mezcla de EG, PG respectivamente.

Se agregó el PET y el glicol, o mezcla de glicoles, en el reactor con una relación en peso de 30 g_{PET} : 70 g_{glicol} con una carga total en el reactor de 160 g. El producto de la reacción forma una pasta principalmente de TBHE y glicol, por ello se eligió esta relación PET-glicol ya que por cuestiones mecánicas es más fácil transportar la mezcla, López (1995). Posteriormente, se adicionó el catalizador considerando 0.1 % en peso respecto al PET cargado inicialmente.

El sistema se calentó hasta 240 °C y se dejó reaccionar a esta temperatura durante 90 min, generando una presión en el sistema entre 2 y 3 bar. De acuerdo a la ecuación cinética de Arrhenius, solo la temperatura tiene efecto sobre la rapidez de reacción. El aumento en la presión del sistema es provocado por la vaporización del glicol, dicha presión no afecta a la reacción ya que ésta sucede en fase líquida. Una vez

terminada la reacción, el sistema se enfrió hasta llegar a 160 °C para verterlo sobre el reactor de vidrio y hacer la reacción de esterificación para producir la RPI.

Para caracterizar el TBHE se utilizaron 10 mL del producto glicolizado. La muestra se filtró en caliente a 160 °C, se lavó con 30 mL de agua caliente (90 °C), para remover el EG, y se enfrió en hielo para propiciar la cristalización del producto. El producto cristalizado se filtró y secó durante 3 horas a 110 °C.

El TBHE-1, lavado y seco, se analizó por IR, mediante un espectrómetro de infrarrojo marca Thermo Scientific, modelo Nicolet IR 200 FT-IR, por CG/MS con un cromatógrafo de gases (7890 GC System) acoplado a un detector de masas (5977 A MSD) de la marca Agilent, por HPLC con un cromatógrafo de líquidos Waters 2695. Además, se determinó el punto de fusión. Para llevar a cabo la caracterización del TBHE-1 sintetizado se tomó de referencia las características y propiedades obtenidas con un estándar de TBHE de Sigma Aldrich.

2.2 Síntesis del copoliéster

La síntesis del copoliéster se llevó a cabo en un reactor de vidrio de tres bocas, con un flujo constante de nitrógeno para tener una atmósfera inerte y un sistema de condensación acoplado al reactor para remover el subproducto de la reacción. Todas las reacciones tuvieron una rampa de temperatura entre 160 °C-180 °C de una hora y después se calentó hasta 198 °C-205 °C durante 6 horas.

Se agregaron 150 g de TBHE-1 al reactor y después se añadió anhídrido maleico (AM) y anhídrido ftálico (AF), con una relación molar de anhídridos-TBHE-1 de 1:1.22 y una relación de 2 moles de AM por cada mol de AF.

La reacción se monitoreó con la determinación del número de ácido, mediante titulación convencional con NaOH al 0.1 N y fenolftaleína como indicador, en una solución de acetona-etanol al 50 % en volumen. (ASTM D-4662-98) Cuando el valor del número de ácido disminuyó a valores entre 43-46 mg KOH/g muestra, se dio por terminada la reacción, inmediatamente después se agregaron 0.0052 g de hidroquinona (HQN).

2.3 Disolución del copoliéster en estireno

Una vez que la mezcla de reactor alcanzó una temperatura de 130 °C, se mezcló lentamente con estireno frío, que contenía 0.0468 g de HQN, durante una hora con agitación vigorosa, de tal forma que la

resina tuviera 30 % en peso de estireno, respecto a los sólidos no volátiles (SNV).

Se siguió el mismo procedimiento para la síntesis de las otras resinas con los productos TBHE-2 y TBHE-3. A las resinas se les asignó las claves RPI-1, RPI-2 y RPI-3, de acuerdo al tipo de TBHE que se empleó para su formulación.

A las RPI se le realizaron pruebas de compatibilidad con estireno, de viscosidad y tiempo de curado y de tensión al producto curado:

Prueba de compatibilidad. Se determinó el porcentaje máximo de estireno que puede integrarse a cada una de las resinas, RPI-1, RPI-2 y RPI-3. Para cada prueba, se hicieron cuatro mezclas del copoliéster respectivo con estireno, procurando que las mezclas tuvieran: 35, 40, 45 y 60 % en peso de estireno. La mezcla se agitó vigorosamente durante un minuto y se dejó reposar por tres días.

Pruebas de curado y viscosidad. Se pesaron 100 g de resina en un recipiente y se procedió a la medición de viscosidad en un viscosímetro Brookfield RVDVII+ utilizando la geometría No. 3 a 60 RPM y 25 °C. Una vez determinada la viscosidad se procedió a curar la resina en un vaso de plástico, pesando 100 g de resina con 0.25 % en peso OCo y 1 % en peso de P MEC, monitoreando la temperatura y tiempo de reacción hasta que alcanzará una temperatura máxima.

Prueba de tensión. Las pruebas de resistencia a la tensión se realizaron bajo la norma ASTM-638, en un equipo INSTRON 3345. Para poder realizar la prueba de resistencia a la tensión, primero se entrecruzó cada resina en moldes de silicón con las dimensiones de la probeta de acuerdo a la norma mencionada anteriormente.

Para el entrecruzamiento, o curado, de la resina RPI-1 se pesó 50 g de resina y se le agregó 0.25 % en peso de solución de octoato de cobalto, OCo, y se adicionó también 1 % en peso de catalizador tipo peróxido de metiletilcetona, P MEC. Las probetas entrecruzadas se dejaron reposar por nueve días antes de realizar el ensayo. Este mismo procedimiento se siguió para las resinas RPI-2 y RPI-3.

3 Resultados y discusión

3.1 Depolimerización del PET y caracterización de TBHE

Para el análisis del TBHE en el cromatógrafo de gases se disolvieron 0.1 g de muestra en 10 mL de

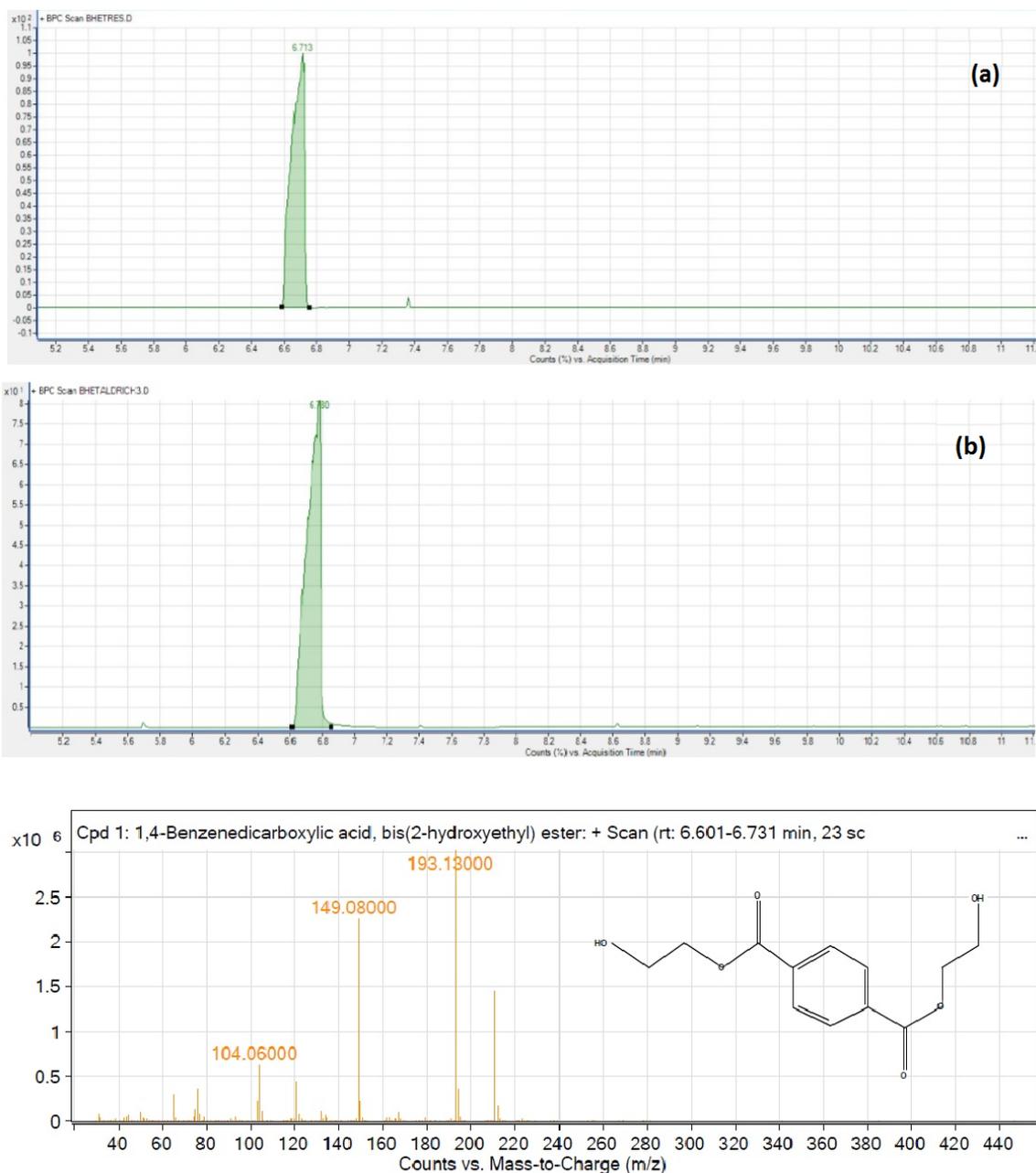


Fig. 1. Comparación de cromatogramas, TBHE resina (a), TBHE-Aldrich (b), y estructura propuesta por el GC/MS para el compuesto.

tetrahidrofurano (THF). La rampa de calentamiento para el análisis comenzó en 50 °C, durante 2 min y aumentando hasta 300 °C en 5 min, manteniéndose esta temperatura durante 5 min. La columna utilizada fue la Agilent 19091S-433UI, figura 1.

En el cromatograma de la figura 1 se observa el pico principal en ambos cromatogramas en un tiempo

de retención de 6.7 min aproximadamente, el cual es identificado por la librería NIST del GC/MS como TBHE, la estructura también se muestra en la figura 1.

El punto de fusión del TBHE obtenido fue de 106 °C, el cual está dentro del intervalo reportado por Aldrich 106 °C-109 °C.

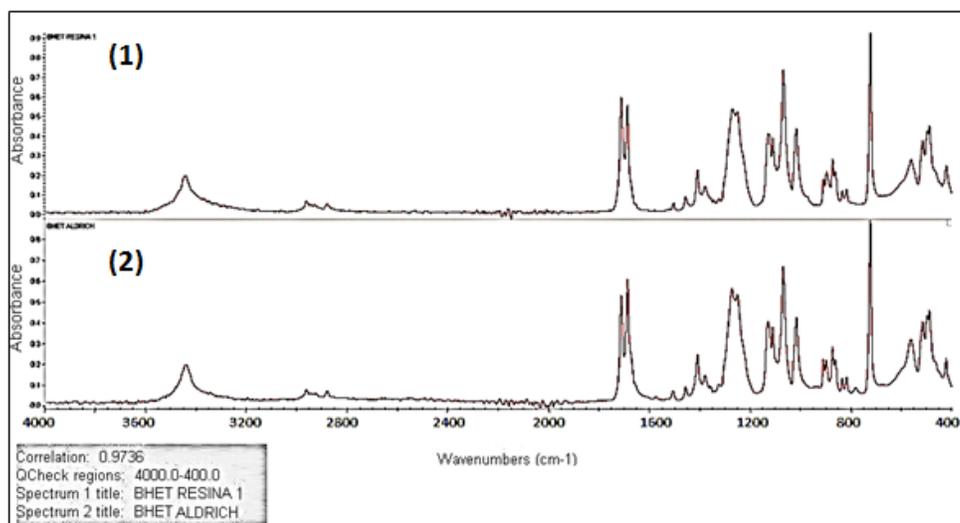


Fig. 2. Comparación de infrarrojo de TBHE resina (1), TBHE-Aldrich (2).

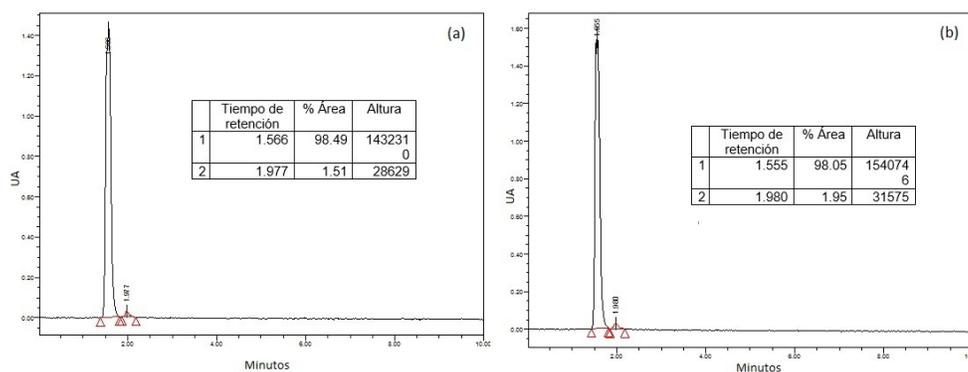


Fig. 3. Comparación de espectros de HPLC, TBHE resina (a), TBHE-Aldrich (b).

La muestra de TBHE seco fue lavada previamente con acetona y después analizada con el infrarrojo. El espectro infrarrojo del TBHE muestra una correlación de 97.4 % comparado al BHET de Aldrich, ver figura 2.

Para el análisis de HPLC, se disolvieron 0.1 g de muestra en 10 mL de acetona y se hizo una inyección de la muestra de 50 μ L con un flujo de 1 mL/min. En el cromatograma se pueden observar dos picos con tiempos de retención de 1.566 min para el pico principal, y un tiempo de retención de 1.977 min para el segundo pico en una longitud de onda de 212.2 nm. Estos dos picos se muestran para ambas muestras (TBHE-1 y Aldrich), donde podemos suponer que el primer pico se trata del TBHE mientras que el segundo pico se trate de algún oligómero del mismo, figura 3.

3.2 Síntesis de resinas poliéster insaturadas y caracterización

Se obtuvieron tres resinas poliéster líquidas vírgenes, es decir sin acelerador (OCO), de color amarillo verdoso.

Para la prueba de compatibilidad con estireno se obtuvieron los siguientes datos, tabla 1.

El límite de compatibilidad se estableció de acuerdo a la metodología descrita anteriormente. Se observó una separación de fases entre la resina y el monómero de estireno, como se aprecia en la figura 4, la resina RPI-3 presentó separación de fases a partir del 40 % en peso de estireno, en cambio la resina RPI-2 no presentó separación de fases en ninguna de las soluciones.

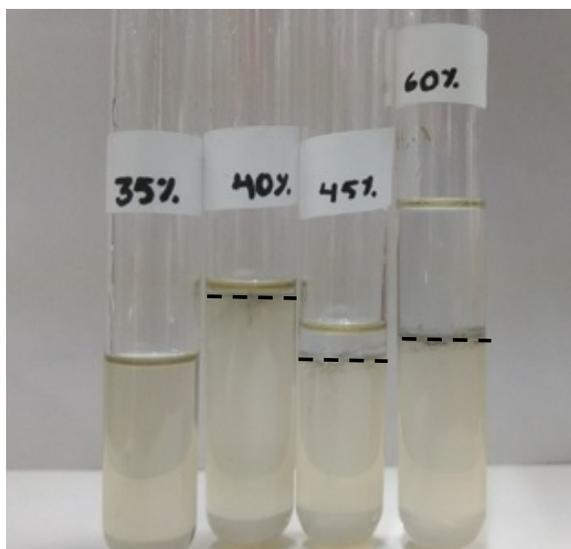


Fig. 4. Prueba de compatibilidad con estireno para resina RPI-3.

Tabla 1. Compatibilidad de las resinas con estireno.

Resina	Compatibilidad máxima con estireno
% en peso de estireno respecto S.N.V.	
RPI-1	24.2
RPI-2	% > 60
RPI-3	35 < % < 40

S.N.V.: sólidos no volátiles

Como se puede apreciar en esta tabla 1, las resinas que contenían propilenglicol en su formulación, tuvieron mayor compatibilidad que la resina que solo contenía etilenglicol, siendo la resina con puro propilenglicol la más compatible con estireno, este comportamiento comprueba lo

consultado en la bibliografía. Esta característica se atribuye a las ramificaciones que tiene la molécula del propilenglicol.

En cuanto a las propiedades de curado y de tensión, se decidió que para comprobar que las propiedades analizadas fueran comparables, con resinas comerciales, se adquirió una resina orto-ftálica del proveedor Poliformas Plásticas S.A. de C.V., con calve PP-70x60.

Los resultados de las propiedades de curado y viscosidad se reportan en la tabla 2.

De estos resultados podemos observar que la resina RPI-1, que es la que contiene menor cantidad de estireno, es la resina con mayor viscosidad.

También, se puede observar que las temperaturas de exotermia son bastante parecidas por lo que las aplicaciones con fibra de vidrio son posibles para todas las resinas.

En cuanto a los tiempos de gel y curado es importante señalar que estas propiedades dependen mucho de la cantidad de inhibidor, acelerador y catalizador que se agreguen para curar las resinas, y aunque para las resinas RPI-1, RPI-2 y RPI-3 se mantuvieron valores constantes de estos aditivos, se desconoce la cantidad de inhibidor y acelerador de la resina PP-70x60; sin embargo, es posible ajustar estas propiedades gelado y curado de acuerdo a la aplicación final de la resina.

De las pruebas de tensión se obtuvieron los resultados de la tabla 3.

Como se puede observar, las formulaciones que se emplearon con un solo tipo de glicol, RPI-1 y RPI-2, tienen valores de tensión muy parecidos entre sí, pero por debajo del valor comercial, en cambio, la resina que contenía dos tipos de glicoles, RPI-3, tuvo mejores propiedades de las resinas con un solo tipo de glicol, con valores cercanos al valor comercial.

Tabla 2. Propiedades de curado y viscosidad de resinas.

Resina	Propiedades de curado			
	Viscosidad	Tiempo gel	Tiempo de total curado	Temperatura de exotermia
	cp	min	min	°C
PP-70X60*	420	12	20	165
RPI-1**	1583	48.7	56	165
RPI-2**	680	37.9	47	169
RPI-3**	780	18.1	24.8	171

*Dato reportado por proveedor, **Dato experimental: Viscosidad Brookfield a 25°C, con aguja #3 a 60 RPM. Tiempo total de curado, desde que se agrega el catalizador hasta que alcanza la temperatura de exotermia.

Tabla 3. Resultados de pruebas de tensión.

Resina	Resistencia a la tensión (MPa)	Módulo de tensión (MPa)	Carga máxima (N)	Deformación a la ruptura (mm)
PP-70x60	53.11	1195.74	1340.76	3.57
RPI-1	42.83	1064.72	1161.74	4.26
RPI-2	46.39	1052.19	1215	3.43
RPI-3	50.19	1120.56	1244.76	2.77

Conclusiones

Se establece la posibilidad de depolimerizar el PET vía glicólisis con diferentes glicoles y con mezcla de glicoles. Para llevar a cabo la glicólisis del PET se consideraron como condiciones de reacción una temperatura de 240 °C, una concentración inicial de 30 % en peso de PET y el uso de acetato de zinc como catalizador. El producto de la glicólisis del PET con EG es el TBHE.

Se obtiene la viabilidad del proceso para sintetizar RPI con productos de la depolimerización de PET. Se establece que las resinas que contienen PG en su estructura, son más compatibles con estireno que las resinas que solo contienen EG, este comportamiento puede deberse a la ramificación del PG.

Se establece que la RPI sintetizada a partir de TBHE de mezcla de glicoles demostró mejores resultados de resistencia a la tensión, en comparación con fórmulas que contienen TBHE de solo un tipo de glicol. Por lo tanto, las propiedades de las resinas sintetizadas a partir de la glicólisis del PET tienen propiedades similares a las resinas orto-ftálicas comerciales.

Se determina con base en las formulaciones de este trabajo que por cada kilogramo de RPI se puede reciclar alrededor de 117 gramos de PET post-consumo.

Se considera que el uso del producto depolimerizado sin separar el glicol del TBHE puede bajar el costo de la RPI, debido a que el PET de desecho es una materia prima de bajo costo y éste al ser glicolizado sustituye cierta cantidad de glicol virgen utilizado en formulaciones convencionales.

Nomenclatura

AF	anhídrido ftálico
AM	anhídrido maleico
EG	etilenglicol
HQN	hidroquinona
OCo	octoato de cobalto
PET	poli-(tereftalato de etileno)
PG	propilenglicol
PMEC	peróxido de metiletilcetona
RPI	resina poliéster insaturada
SNV	sólidos no volátiles
TBHE	tereftalato de bis-2-hidroxietileno
THF	tetrahidrofurano
UPR	unsaturated polyester resin

Agradecimientos

Agradecemos a CONACYT por el apoyo económico brindado a los estudios de maestría de los primeros dos autores. También se agradece el apoyo brindado para este trabajo a la empresa Resinas y Materiales, S.A de C.V.

Referencias

- Abdel-Azim, A. (1996). Unsaturated Polyester Resins From Poly(Ethylene Terephthalate) Waste for Polymer Concrete. *Polymer Engineering and Science* 36, 2973-2977. doi:10.1002@pen.10699
- Aguado, J. y Serrano, D. (1999). *Feedstock. Recycling of Plastic Wastes*. Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Aslan, S., Immiriz, B., Laurienzo, P., Malinconico, M., Martuscelli, E., Volpe, M. G., . . . Savini, L. (1997). Unsaturated polyester resins from glycolysed waste polyethyleneterephthalate:

- synthesis and comparison of properties and performance with virgin resin. *Journal of Materials Science* 32, 2329-2336. doi:10.1023@a-1018584519173
- Boenig, V. H. (1964). *Unsaturated Polyesters: Structure and Properties*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company.
- Brydson, J. A. (1999). *Plastics Materials* (Séptima Edición ed.). Gran Bretaña: Butterworth Heinemann.
- Duque-Ingunza, I., López-Fonseca, R., de Rivas, B. y Gutiérrez-Ortiz, J. I. (2013). Synthesis of unsaturated polyester resin from glycolised. *Mater Cycles Waste Management* 15, 256-263. doi:10.1007/s10163-013-0117-x
- Ekart, M. P. (2003). *España Patente No. 2 179 021*.
- Kandelbauer, A., Tondi, G., Zaske, O. C. y Goodman, S. H. (2014). Unsaturated Polyesters and Vinyl Esters. En S. Goodman. *Handbook of Thermoset Plastics* (págs. 111-172). California: Elsevier Inc.
- Karayannidis, G. P., Achilias, D. S., Sideridou, I. D. y Bikiaris, D. N. (2005). Alkyd resins derived from glycolized waste. *European Polymer Journal* 41, 201-210. doi:10.1016/j.eurpolymj.2004.10.001
- Khoonkari, M., Haghighi, A. H., Sefidbakht, Y., Shekoohi, K. y Ghaderian, A. (2015). Chemical recycling of PET wastes with different catalysts. *International Journal of Polymer Science* 2015, 11. doi:10.1155/2015/124524
- López Castillo, N. N. (1995). Reciclaje terciario de poli-(tereftalato de etileno). Técnicas de depolimerización. Ciudad de México: UNAM.
- Lu, M. y Kim, S. (2001). Unsaturated Polyester resins based on recycled PET: Preparation and curing behavior. *Journal of Applied Polymer Science* 80, 1052-1057. doi:10.1002@app.1189
- Notimex. (6 de julio de 2015). Dinero en imagen. Recuperado el 12 de marzo de 2017, de www.dineroenimagen.com: www.dineroenimagen.com/2015-07-06/58105
- Potiyara, P., Klubdee, K. y Limpiti, T. (2007). Physical properties of unsaturated polyester resin from glycolized PET fabrics. *Journal of Applied Polymer Science* 104, 2536-2541. doi:DOI 10.1002/app.25923
- Puangansuk, K., Opaprakasit, M., Udomkichdecha, W. y Potiyaraj, P. (2009). Effects of saturated acids on physical properties of UPE resins. *Polymers and Environment* 17, 67-70. doi:10.1007/s10924-009-0122-2
- Sidney, H. G. (1998). *Handbook of Thermoset Plastics*. Westwood, New Jersey : Noyes publications.
- Stevens, M. P. (1999). *Polymer Chemistry* (Third edition. ed.). New York: Oxford University Press.
- Tahvildari, K., Mozafari, S. y Tarinsun, N. (2010). Chemical recycling of poly ethylene terephthalate to obtain unsaturated polyester resins. *Applied Chemistry Research* 12, 59-68. doi:2008-3815 / 59
- Vaidya, U. R. y Nadkarni, V. M. (1987). Unsaturated polyesters from PET waste: Kinetics of polycondensation. *Journal of Applied Polymer Science* 34, 235-245. doi:10.1002@app.1987.070340120
- Vaidya, U. R. y Nadkarni, V. M. (1988). Unsaturated Polyester Resins from Poly(ethylene terephthalate) Waste. Mechanical and Dynamic Mechanical Properties *Industrial and Engineering Chemistry Research* 27, 2056-2060. doi:0888-5885/88/2627-2056\$01.50/0