

# Valoración de acetinas como reemplazo parcial de aceite nafténico en compuestos de caucho SBR1502<sup>1</sup>

## Assessment of acetines as a partial replacement of naftenic oil in SBR1502 composites

Arnoldo Emilio Delgado Tobón<sup>2</sup>  
Esperanza Rodríguez Carmona<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.28.6082>

### RESUMEN

En esta investigación se esterificó glicerina grado técnico proveniente de la industria del biodiesel para obtener mono, di y triacetil gliceroles. Se empleó ácido acético glacial y resina de intercambio iónico Amberlyst®15 como catalizador heterogéneo para llevar a cabo la reacción. Se probaron acetil gliceroles con el fin de reemplazar parcialmente hasta diez partes en peso de aceite nafténico en formulaciones de caucho SBR1502 reforzado con sílica precipitada. Se usó peróxido de dicumilo para curar los compuestos, así como se realizaron ensayos de reometría a los compuestos antes de ser curados. La resistencia a la tracción, elongación a rotura y resistencia al desgarre fueron evaluados para los compuestos curados. Se determinó que la adición de 10 phr de acetil gliceroles afectó levemente el torque mínimo y la resistencia a la tracción.

**Palabras clave:** Acetinas; Compuestos; Entrecruzamiento; Esterificación; Glicerina, SBR.

### ABSTRACT

In this investigation, technical grade glycerin as a byproduct of the biodiesel industry was esterified to obtain mono, di, tri acetyl glycerols. Glacial acetic acid and ion exchange resin Amberlyst®15 was used as a heterogeneous catalyst to perform the reaction. Acetyl glycerols were tested to partially replace up to 10 parts by weight naphthenic oil in SBR 1502 composites reinforced with precipitated silica. Dicumyl peroxide was used as a crosslinker agent. The rheometer testing was done at rubber blends before prior to curing. Tensile strength, elongation at break and tear strength were evaluated for cured composites. It was determined that the addition of 10 phr of acetyl glycerols slightly affected the minimum torque and tensile strength.

**Keywords:** Acetines; Composites; Crosslinking; Esterification; Glycerol; SBR.



**Como citar este artículo:** A. Delgado Tobón y E. Rodríguez Carmona, Valoración de acetinas como reemplazo parcial de aceite nafténico en compuestos de caucho SBR1502, *ingeniare*, vol. 2, n.º 28, jun. 2020.

1. Proyecto de Investigación INV-ING-2993, vigencia 2019-2020, financiado por La Vicerrectoría de Investigaciones de La Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, Grupo de Investigación Energía Alternativa. Investigador líder: Arnoldo Emilio Delgado Tobón.
2. Ing. Mecánico, Magíster en Ing. Mecánica, profesor asociado del Programa Ingeniería Mecatrónica de La Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, ORCID: 0000-0002-8743-8958. Correo: [arnoldo.delgado@unimilitar.edu.co](mailto:arnoldo.delgado@unimilitar.edu.co)
3. Ing. Mecánica, Magíster en Docencia Universitaria, profesora asociada del Programa de Ingeniería Industrial de La Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, ORCID: 0000-0003-2915-6829. Correo: [esperanza.rodriguez@unimilitar.edu.co](mailto:esperanza.rodriguez@unimilitar.edu.co)

Fecha de recepción: 26 de noviembre de 2019 • Fecha de aceptación: 09 de febrero de 2020

**INGENIARE, Universidad Libre-Barranquilla, Año 16, No. 28, pp. 23-33 • ISSN: 1909-2458**

## 1. INTRODUCCIÓN

El incremento en la producción de biodiesel a escala mundial ha traído como consecuencia un aumento considerable de las existencias de glicerina, la cual se genera como subproducto de la síntesis de este biocombustible [1] [2]. Sin embargo, este tipo de glicerina no puede reemplazar la del grado farmacéutico USP (99,5 %) debido a los altos costos que implica la purificación [3] [4]. La glicerina que se extrae de la corriente del biodiesel es tóxica por la presencia de metanol, jabones y sales orgánicas e inorgánicas [5]. A nivel industrial la purificación se realiza para llevar la glicerina hasta grado técnico (GT) con pureza mínima del 97,5 % [6] [7] [8].

La GT se valoriza por medio de la modificación química para producir biopolímeros, resinas alquílicas, fertilizantes y precursores químicos de alta importancia como 1,3-propanodiol, ácido succínico [1] [9], glicerol carbonatado [10] y acetil gliceroles [11] [12].

En esta investigación se pretende generar una alternativa de aprovechamiento de GT por medio de la síntesis de mono, di y tri acetil gliceroles; esta mezcla de productos se ensayará como potencial plastificante para reemplazar parcialmente el aceite nafténico en formulaciones de compuestos elaborados con caucho sintético SBR y sílice precipitada. Los aceites nafténicos son derivados del petróleo, altamente contaminantes y no sustentables con el medio ambiente.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La purificación de la glicerina cruda, por lo general, se realiza mediante su tratamiento con ácidos inorgánicos (sulfúrico o fosfórico), seguido de un lavado con agua, destilación a vacío y filtrado con carbón activado [8]. También se estudian métodos de purificación combinados, los cuales incluyen destilación a alto vacío, separación de trazas de impurezas con resinas de intercambio iónico y membranas con el fin de obtener glicerina con pureza > 98,9 %; sin embargo, estos procesos aún no son factibles desde el punto de vista económico [5].

La modificación química de GT para producir mono, di y tri acetil gliceroles se verifica por medio de la esterificación con ácido acético, utilizando resina de intercambio iónico como catalizador heterogéneo [13] [14] [15]. En el pasado se usaba ácido sulfúrico concentrado para catalizar la reacción, sin embargo, por consideraciones de seguridad industrial este ácido ha quedado prácticamente abolido [16]. La esterificación con ácido acético también se conoce con el nombre de "acetilación". Resinas de intercambio iónico comerciales tipo Amberlyst®15 y 35 son catalizadores eficientes en la producción de acetil gliceroles.

En general, la acetilación de glicerina produce una mezcla de mono, di y tri acetil gliceroles en distinta proporción de cada uno de ellos. Esta relación de productos depende del mecanismo de reacción, el cual se afecta, principalmente, por la relación molar de reactivos y el tipo de catalizador. El tiempo y

la temperatura son parámetros que influyen, sobre todo, el grado de conversión de la glicerina. Una relación molar ácido acético/glicerina equivalente a 4/1 o menor producirá mono y di acetil gliceroles en mayor cantidad, mientras que la relación molar 9/1 permitirá obtener, principalmente, tri-acetil glicerol.

Los mono, di y tri-acetil gliceroles tienen varias denominaciones en la literatura. A nivel comercial se conocen con el nombre de “acetinas”. Estos ésteres tienen alto punto de ebullición (258-280 °C) y densidad (1,16-1,21 g/cm<sup>3</sup>) [17].

El alto punto de ebullición de las acetinas y su carácter oleoso permiten considerarlas a fin de evaluarlas como plastificantes para elastómeros. En general, los compuestos de caucho requieren de plastificantes (aceites nafténicos y aromáticos) para mejorar la dispersión de cargas, aumentar la fluidez del compuesto (en crudo, antes de ser vulcanizado) y disminuir costos [18] [19]. La adición de plastificantes puede ocasionar pérdida de propiedades mecánicas al compuesto de caucho, en especial las relacionadas con la resistencia a la tracción y al desgarre. El caucho estireno butadieno SBR 1502 es el caucho sintético de mayor uso a nivel general, pues se emplea, por ejemplo, en las industrias llanteras, de calzado, de pisos y de bandas transportadoras [19] [20].

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Materiales

Se compraron reactivos para síntesis de acetinas GT (97,6 %), tolueno (99,6 %) y ácido acético glacial (99 %) en la tienda El Alquimista® (Colombia), y resina de intercambio iónico Amberlyst15® fue adquirida a Sigma Aldrich® (USA). Asimismo, ingredientes para la elaboración de compuestos SBR: Buna SE 1502H (Arlanxeo®-Brasil), Rubbersil® RS200 (Glassven®-China), *ácido esteárico doble prensado* (Dersa®-Colombia), antioxidante Vulkanox® DSF (Lanxess®-Brasil), Perkadox® BC-FF (Akzo Nobel®-USA) y Delta Oil® 325 (Delta Oil-Colombia) fueron comprados al proveedor Gomafina® Ltda. (Colombia).

#### 3.2 Síntesis de acetinas

La acetilación se llevó a cabo en un reactor de vidrio de 500 cm<sup>3</sup> con tres bocas, equipado con manta de calentamiento y agitación magnética, baño térmico de aceite, termómetro, torre de fraccionamiento tipo vigreux, accesorio *dean stark* para retirar el agua producida en la reacción y condensador (véase la figura 1a). Inicialmente, se colocó en el balón: 23,0 g de GT + 135,1 g de ácido acético + 138 g de tolueno; cuando el sistema alcanzó la temperatura de 95 °C se adicionaron 2,55 gramos de Amberlyst®15, lo que dio inicio a la reacción. La máxima temperatura alcanzada fue 110 °C. La reacción se llevó a cabo a una presión 560 mm Hg y el tiempo de acetilación fue 4,5 horas. Se usó tolueno como agente de arrastre para eliminar el agua generada en la reacción y remover el exceso de *ácido acético* al final. Las acetinas fueron lavadas con agua y luego sometidas a roto-evaporación durante dos horas con el fin de eliminar la humedad y las trazas de ácido acético (véase la figura 1b).

### 3.3. Diseño de compuestos (fórmulas)

Se realizaron tres formulaciones según se observa en la Tabla 1. La sigla phr significa “partes en peso de cualquier ingrediente por cada 100 partes de SBR”. Todos los compuestos fueron formulados con 20 phr de plastificante + 50 phr de sílica + aditivo + agente de curado. El compuesto control tiene 20 phr de aceite nafténico (BR/20N/0A). El segundo compuesto fue formulado reemplazando el 33,3 % del aceite nafténico por acetinas, equivalente a adicionar 15 phr de nafténico y 5 phr de acetinas (SBR/15N/5A). En la tercera fórmula se reemplazó un 50 % del aceite nafténico por acetinas, lo cual implica que se adicionaron 10 phr de ambos aceites (SBR/10N/10A).

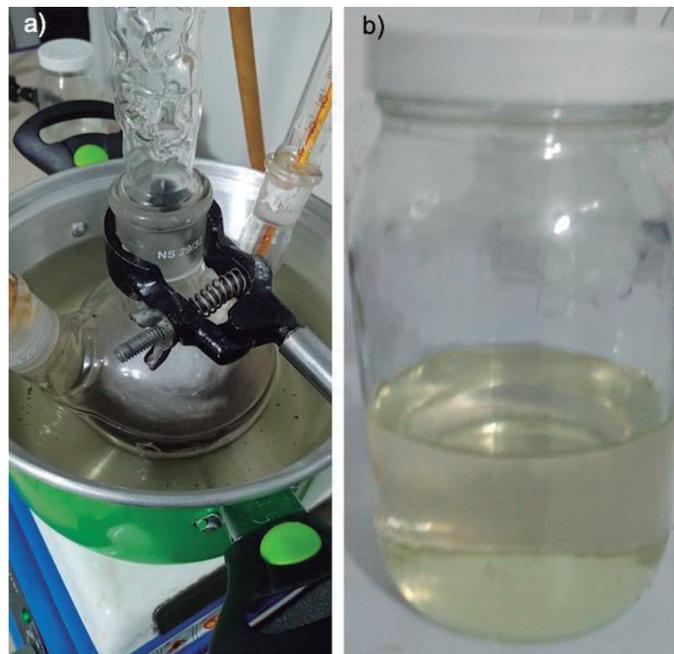


Figura 1. a) acetilación; b) acetinas

Fuente: elaboración propia.

Las formulaciones corresponden a un diseño experimental de un factor con tres niveles, en los que el factor es la presencia de acetinas en el compuesto y los niveles corresponden a las concentraciones de acetinas en phr. Las variables de respuesta fueron: a) parámetros de reometría: torque mínimo ( $M_L$ ), torque máximo ( $M_H$ ), tiempo de *scorch* ( $t_{S2}$ ) y tiempo de curado ( $t_{90}$ ); b) propiedades mecánicas: resistencia a la tracción, elongación a rotura y resistencia al desgarre.

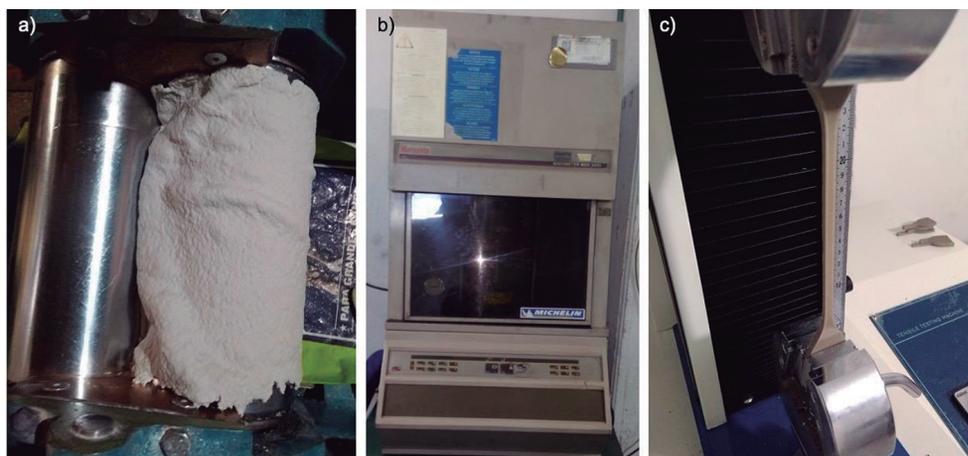
**Tabla 1. Formulaciones de compuestos SBR/acetinas**

Ingredientes (phr)	Control	SBR/15N/5A	SBR/10N/10A
SBR 1502	100	100	100
Silica precipitada	50	50	50
Aceite nafténico	20	15	10
Acetinas	0	5	10
Acido esteático	1	1	1
Antioxidante DSF	1	1	1
Peróxido de dicumilo	0.9	0.0	0.9

Fuente: elaboración propia.

### 3.4 Elaboración de compuestos

Cada uno de los compuestos fueron elaborados en un molino de laboratorio con capacidad de mezcla igual a 1000 cm<sup>3</sup>, equipado con dos rodillos de 14 cm de diámetro y 32 cm de longitud; la relación de fricción entre ambos rodillos fue 1.42. Inicialmente, se masticó SBR1502 en los rodillos hasta formar banda (véase la figura 2a), enseguida se agregaron lentamente la sílica y los plastificantes, posteriormente se añadió el *ácido esteárico* y antioxidante; la mezcla, entonces, se homogenizó y, faltando dos minutos para finalizar el mezclado, se adicionó el peróxido de dicumilo; el tiempo total de proceso fue de diez minutos.

**Figura 2. a) molino de rodillos; b) reómetro; c) máquina universal de tensión**

Fuente: elaboración propia.

El curado de los compuestos se realizó empleando la técnica de moldeo por compresión en una prensa vulcanizadora a escala de laboratorio. Las láminas para determinar la resistencia al rasgado, la tracción, la elongación y la resistencia al desgarre fueron curadas en un molde de área 15 x 15 cm, con espesor de 3 mm a 160 °C; el tiempo de curado fue de ocho minutos.

### 3.5 Ensayo de reometría

Los parámetros de reometría para los compuestos previo al proceso de curado en el molde fueron determinados siguiendo la norma ASTM D2084-17. Se usó un reómetro de disco oscilante Monsanto® MDR 2000TM (USA), las curvas de reometría se corrieron a 160 °C y el tiempo de prueba fue de diez minutos (véase la figura 2b).

### 3.6 Determinación de propiedades de tensión y rasgado

Los ensayos de tracción/elongación y resistencia al desgarre fueron medidos para los compuestos curados aplicando las normas ASTM D412-06A y ASTM D624-00, respectivamente. Las probetas con geometría tipo I para la prueba de tensión y tipo B para el ensayo de desgarre se obtuvieron troquelando las láminas curadas. Se utilizó una máquina universal de tensión KJ 1065B Kejian Instruments®-China (véase la figura 2c). Los parámetros de los ensayos fueron desplazamiento del cabezal 80 mm/minuto, temperatura de 23 °C y humedad relativa del 50%. Tres probetas fueron ensayadas para cada compuesto.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Estado de curado de compuestos

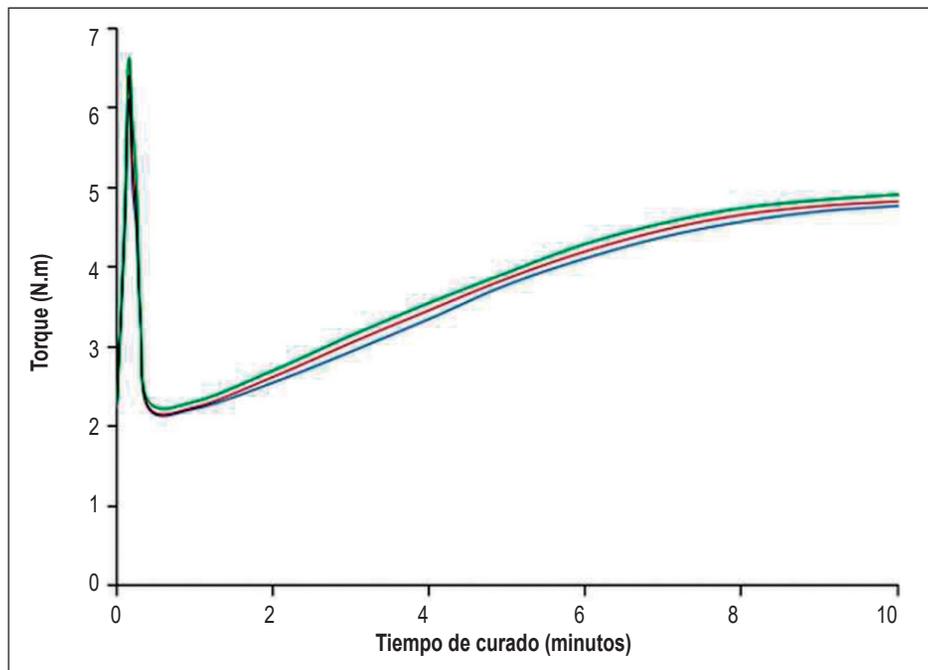


Figura 3. Reometrías de los compuestos tomadas a 160 °C:

\_\_\_ Control \_\_\_ SBR/15N/5A \_\_\_ SBR/10N/10A

Fuente: elaboración propia.

El caucho SBR1502 tiene la habilidad de ser reticulado con azufre (vulcanización) y/o con peróxidos (curado). Las curvas de reometría y los parámetros de curado se muestran en la figura 3 y la tabla 2. Estos valores cambian según la temperatura, por tanto, se deben reportar junto con la temperatura del ensayo de reometría. Las curvas obtenidas experimentalmente presentan una pendiente ligeramente creciente, sin cambios fuertes, lo cual significa que el reticulado del compuesto es progresivo; la forma geométrica de las curvas son características de compuestos de caucho curados con peróxido [21].

Ahora bien,  $t_{s2}$  indica el tiempo que tiene el material para soportar la temperatura antes de que empiece a reticular [21] [22];  $t_{s2}$ , por tanto, permite establecer el periodo en el que un compuesto de caucho puede fluir y llenar las cavidades dentro del molde (a una determinada temperatura) sin que se comience una reticulación prematura, lo cual limita la fluidez.

**Tabla 2. Parámetros de reometría de los compuestos SBR/acetinas tomados a 160 °C**

Compuesto	Torque mínimo $M_L$ (Nm)	Torque máximo $M_H$ (Nm)	Tiempo de scorch $t_{s2}$ (min)	Tiempo de cura $t_{90}$ (min)
SBR/0 acetinas	2,22	4,77	0,92	9,36
SBR/5 acetinas	2,24	4,83	0,88	9,21
SBR/10 acetinas	2,31	4,92	0,9	9,43

Fuente: elaboración propia.

No se observó variaciones significativas en tiempo de *scorch* al adicionar acetinas (hasta 10 phr) en reemplazo parcial de aceite nafténico con respecto al valor de  $t_{s2}$  arrojado por el compuesto patrón.

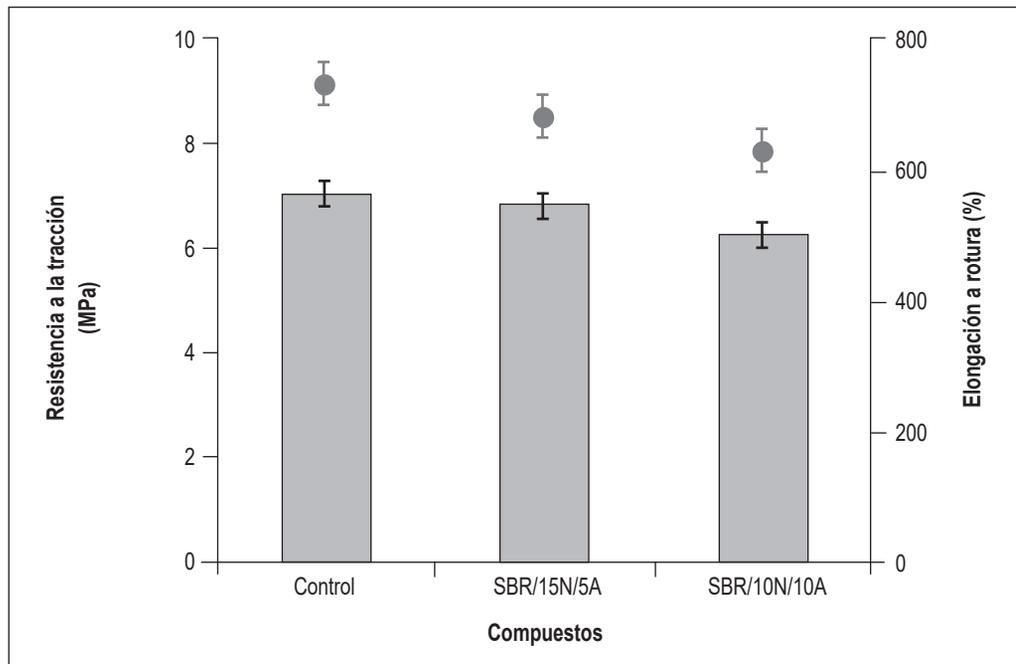
El tiempo de curado  $t_{90}$  indica que el periodo necesario para completar un 90 % de curado, en términos prácticos, sirve para establecer el tiempo de moldeo de un compuesto; el 10 % adicional de reticulación para completar el curado se logra con el calor residual que posee el compuesto al salir del molde [21] [22]. En este estudio no se observó un cambio significativo del  $t_{90}$  de los compuestos. La adición de acetinas no afectó este parámetro comparativamente frente al Control.

El torque mínimo ( $M_L$ ) está relacionado con la viscosidad del compuesto sin reticular, por tanto, es un parámetro que permite establecer de manera indirecta la fluidez de la mezcla. A mayor  $M_L$  menor será la capacidad que tiene el compuesto de llenar un molde; el valor de  $M_L$  es un criterio para controlar la calidad de procesos de mezcla y de formulación [21]. Se observó un leve aumento del  $M_L$  en un 4 % para el compuesto formulado con 10 phr de acetinas SBR/10N/10A con respecto al Control. El incremento del torque mínimo indica un aumento en la viscosidad de los compuestos sin curar, lo cual significa que las acetinas no tuvieron un desempeño como plastificante con respecto al aceite nafténico, probablemente debido a que no existe una compatibilidad entre el SBR y las acetinas.

El torque máximo ( $M_H$ ) es proporcional al nivel de entrecruzamiento de las cadenas poliméricas del caucho [21]. La adición de acetinas no influyó significativamente en el valor de  $M_H$  con respecto al Control (véase la tabla 2).

#### 4.2. Resistencia a la tracción de compuestos curados

La Figura 4 muestra las propiedades de resistencia a la tracción y elongación a rotura de los compuestos curados. La resistencia a la tracción mide la máxima capacidad que tiene un material de soportar esfuerzos. En general, se encontraron valores relativamente altos para la resistencia a la tracción (tensión máxima) en cada uno de los compuestos, debido a la presencia de sílica precipitada RS200 (50 phr). Esta es la carga inorgánica blanca de alto poder reforzante para cauchos, dado que posee un tamaño de partícula pequeño, equivalente a un área superficial BET(170-200 m<sup>2</sup>/g) [21]. El más alto valor encontrado de resistencia a la tracción fue para el compuesto Control (7,07 MPa).



**Figura 4. Propiedades de tracción y elongación a rotura**

Fuente: elaboración propia.

La adición de acetinas hasta 5 phr no afectó significativamente el valor de la resistencia a la tracción. Al aumentar la cantidad de acetinas hasta 10 phr se observó una disminución significativa del 11 % del valor de la propiedad con respecto al compuesto Control. Posiblemente, el descenso del valor de tracción del compuesto SBR/10N/10A se debió a la incompatibilidad entre el SBR y las acetinas, lo cual es más evidente si se incrementa la cantidad de acetinas en la formulación.

### 4.3. Elongación a rotura de compuestos curados

La elongación mide la habilidad que tienen los compuestos de caucho para estirarse varias veces con respecto a su longitud original; es una propiedad importante de los elastómeros. La elongación a rotura es el máximo estiramiento que soporta el compuesto antes de romperse [21] [22]. Se obtuvo el valor mas alto de elongación para el compuesto Control. Se observó en la figura 2 que la adición de acetinas, a fin de reemplazar 5 phr de aceite nafténico, no afectó significativamente el valor de la propiedad. Sin embargo, al reemplazar 10 phr de aceite nafténico por acetinas se produjo una disminución de la propiedad en un 13 % contra el compuesto Control. La causa puede estar asociada a la no existencia de compatibilidad entre SBR y las acetinas.

### 4.4. Resistencia al desgarre de compuestos curados

El desgarre mide la capacidad de un caucho de resistir la propagación de una incisión (los resultados de esta propiedad se muestran en la Figura 5). En general, los compuestos de caucho formulados con sílica precipitada con área superficial mayor a 170 m<sup>2</sup>/g ofrecen buen desempeño frente a la resistencia al desgarre. No se observó efecto significativo alguno al reemplazar hasta 10 phr de aceite nafténico por acetinas.

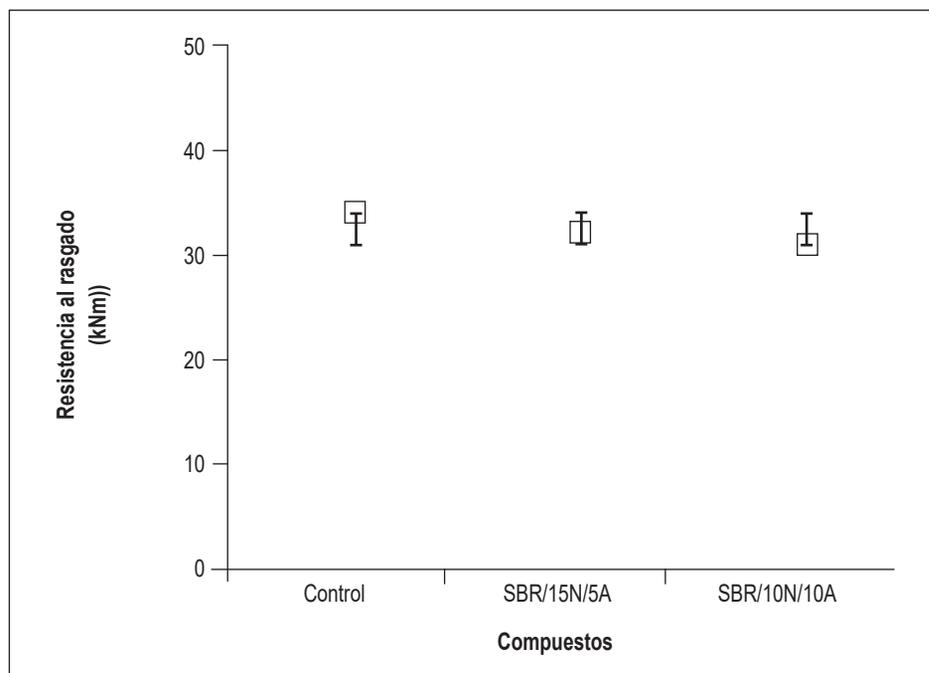


Figura 5. Resistencia al desgarre de los compuestos curados

Fuente: elaboración propia.

## 5. CONCLUSIONES

Se pueden usar acetil gliceroles obtenidos a partir de glicerina grado técnico en pequeñas cantidades (<10 phr) para elaborar compuestos de caucho SBR con sílica precipitada, con el objetivo de reemplazar parcialmente el aceite nafténico. Con esta cantidad de acetinas en los compuestos no se alteró significativamente los valores de las propiedades de elongación a rotura y resistencia al desgarre. Sin embargo, al formular las acetinas a nivel de 10 phr de acetinas disminuyó de forma significativa la resistencia a la tracción y se aumentó la viscosidad del compuesto, de modo que fue un claro indicio de que las acetinas no se comportaron como plastificante en compuestos de caucho sintético SBR.

## REFERENCIAS

- [1] E. Kaya y N. Oktar, "Production of value-added chemicals from esterification of waste glycerol over MCM-41 supported catalysts", *Gr. Proc. Synth*, vol. 8, n.º 1, pp. 128-134, 2019, doi: <https://doi.org/10.1515/gps-2018-0034>
- [2] H.W. Tan, A.R. Aziz y M. Aroua, "Glycerol production and its applications as a raw material : a review", *Ren. Sus. En. Rev.*, vol. 27, pp. 118-127, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.035>
- [3] A. Rodrigues, J. C. Bordado y R. G. Dos Santos, "Upgrading the glycerol from biodiesel production as a source of energy carriers and chemicals-a technological review for three chemical pathways", *Energies*, vol. 10, n.º 11, pp. 1-36, doi: <https://doi.org/10.3390/en10111817>
- [4] M. Sinaga, G. Rico, A. Nababan y T. Manullang, "Effect of solvent volume ratio and time extraction of glycerol purification", *Mater. Sci. Eng.*, vol. 309, n.º 1, pp. 1-6, 2018. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012123>
- [5] C.G. Chol, R. Dhabhai, A. Dalai y M. Reaney, "Purification of crude glycerol derived from biodiesel production process: experimental studies and techno-economic analyses", *Fuel Process. Technol*, vol. 178, pp. 78-87, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.05.023>
- [6] Contreras, E. Avella, J. Sierra, C. Guerrero y J. Sodr , "Purification of glycerol from biodiesel production by sequential extraction monitored by 1H NMR", *Fuel Process. Technol*, vol. 132, pp. 78-87, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.12.016>
- [7] M. Nanda, Z. Yuan, W. Qin, M. Poirier y X. Chunbao, "Purification of crude glycerol using acidification: effects of acid types and product characterization", *Aus. Ch. Eng.*, vol. 1, n.º 1, pp. 1-7, 2014, doi: [www.austinpublishinggroup.com](http://www.austinpublishinggroup.com)
- [8] F. Cardeño, L. J. Gallego y L. A. Ríos, "Refinación de la fase glicerina del biodiesel de aceite de palma empleando ácidos minerales", *Inf. Tec.* vol. 22, n.º 6, pp. 15-24, doi: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000600003>
- [9] J. Hernández, J. Acevedo, C. Valdés y F. Posso, "Evaluation of using alternative routes of glycerin obtained in the biodiesel production: a review", *Ing. Des.*, vol. 33, n.º 1, pp. 126-148, 2015, doi: <https://doi.org/10.14482/inde.33.1.5573>

- [10] Z. Ishak, N. Sairi, Y. Alias, M. Aroua y R. Yusoff, "Production of glycerol carbonate from glycerol with aid of ionic liquid as catalyst", *Chem. Eng. J.*, n.º 297, pp. 128-138, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.03.104>
- [11] P. Okoye, A. Abdullah y B. Hameed, "Synthesis of oxygenated fuel additives via glycerol esterification with acetic acid over bio-derived carbon catalyst", *Fuel.*, 209, pp. 538-544, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.024>
- [12] S. Kale, S. Umbarkar, M. Dongare, R. Eckelt, U. Armbruster y A. Martin, "Selective formation of triacetin by glycerol acetylation using acidic ion-exchange resins as catalyst and toluene as an entrainer", *Appl. Catal. A Gen.*, 490, pp. 10-16, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2014.10.059>
- [13] M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, H. Jazini y H. Ghaziaskar, "Exergoeconomic and exergoenvironmental co-optimization of continuous fuel additives (acetins) synthesis from glycerol esterification with acetic acid using Amberlyst 36 catalyst", *En. Conv. Manag.*, vol. 165, pp. 183-194, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.054>
- [14] A. Cornejo, I. Barrio, M. Campoy, J. Lázaro y B. Navarrete, "Oxygenated fuel additives from glycerol valorization. Main production pathways and effects on fuel properties and engine performance: a critical review", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, pp. 1400-1413, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.005>
- [15] I. Banu, G. Bumbac, D. Bombos, S. Velea, A. Gălan y G. Bozga, "Glycerol acetylation with acetic acid over Purolite CT-275. Product yields and process kinetics", *Renew. Energy.*, vol. 148, pp. 548-557, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.060>
- [16] B. Dalla, H. Decolatti, M. Legnoverde y C. Querini, "Influence of acidic properties of different solid acid catalysts for glycerol acetylation", *Catal. Today*, vol. 289, pp. 222-230, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.09.015>
- [17] D. M. Reinoso y G. M. Tonetto, "Bioadditives synthesis from selective glycerol esterification over acidic ion exchange resin as catalyst", *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, n.º 2, pp. 3399-3407, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.027>
- [18] I. Franta, *Elastomers and rubber compounding materials*. Praga: Elseiver, 1989.
- [19] J. R. White y K. de Sadahn, *Rubber Technologist's Handbook*. Shawbury, RU: Rapra Publishers, 2001.
- [20] A. Pușcă, Ș. Bobancu y A. Duță, "Mechanical properties of rubber-an overview", *Bull. Trans. U. Brașov*, vol. 3, n.º 52, pp. 107-114, 2001.
- [21] J. S. Dick, *Rubber Technology. Compounding and Testing for Performance*. 2ª ed., Múnich: Hanser Publishers, 2004.
- [22] J. S. Dick. *Basic rubber testing: selecting methods for a rubber test program*. Nueva York: ASTM, 2004.