

Artículo de Revisión

CINÉTICA DE CURADO EN LOS ELASTÓMEROS. UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CURING KINETICS IN ELASTOMERS. A LITERATURE REVIEW

Blanca Rosa Cruz Cal^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-6013-4500>
Belkis F. Guerra Valdés² <https://orcid.org/0000-0002-9929-7064>
Ricardo Alfonso Blanco³ <https://orcid.org/0000-0001-9452-4531>

¹ Centro de Estudios de Química Aplicada. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

³ Departamento de Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba.

Recibido: Diciembre 10, 2024; Revisado: Diciembre 21, 2024; Aceptado: Febrero 3, 2025

RESUMEN

Introducción:

El desarrollo de elastómeros a partir del caucho ha permitido ampliar sus aplicaciones. Por lo que se hace necesario estudiar la cinética de curado a través de diferentes técnicas que permite el estudio. La selección de la técnica depende del equipamiento disponible, de la naturaleza de los datos, que pueden ser isotérmico o no. El objetivo común es obtener la energía de activación (E_a) la velocidad de reacción (n) y la constante de velocidad (k) a través de los modelos matemáticos.

Objetivo:

Resumir los principales aspectos en la temática publicados hasta la actualidad.

Materiales y Métodos:

Se realizaron varias consultas bibliográficas de diferentes referencias científicas sin jerarquía de idioma, ni límite de fecha referentes a los contenidos elegidos a través de las palabras clave.

Resultados y Discusión:

Los elastómeros son vulcanizados para mejorar sus propiedades siendo un proceso muy complejo desde el punto de vista químico que ocurre en tres fases: inducción, curado y



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Blanca R. Cruz, Email: blancacc@uclv.edu.cu



sobrecurado. Las técnicas aplicadas se basan en la medida de una propiedad que varía con el avance del entrecruzamiento. Los modelos más estudiados son los basados en enfoque fenomenológico.

Conclusiones:

Para describir la cinética de curado se han desarrollado varios modelos agrupados en dos categorías: los cinéticos mecánicos y los empíricos o fenomenológicos. Considerando al modelo empírico como el más práctico, debido a la complejidad del mecánico. El modelo propuesto por Kamal-Sourour está como uno de lo más aplicados para describir la evolución del proceso de curado.

Palabras clave: cinética; curado; elastómeros; modelos.

ABSTRACT

Introduction:

The development of elastomers from rubber has allowed to expand their applications. Therefore, it is necessary to study the curing kinetics through different techniques that allow the study. The selection of the technique depends on the available equipment, the nature of the data, which may be isothermal or not. The common objective is to obtain the activation energy (E_a), the reaction rate (n) and the rate constant (k) through mathematical models.

Objective:

To summarize the main aspects on the subject published to date.

Materials and Methods:

Several bibliographical queries of different scientific references were made without language hierarchy, nor date limit referring to the contents chosen through keywords.

Results and Discussion:

Elastomers are vulcanized to improve their properties. This is a very complex process from a chemical point of view, which occurs in three phases: induction, curing and over-curing. The techniques applied are based on the measurement of a property that varies with the progress of cross-linking. The most studied models are those based on a phenomenological approach.

Conclusions:

To describe curing kinetics, several models have been developed, grouped into two categories: mechanical kinetics and empirical or phenomenological models. The empirical model is considered the most practical, due to the complexity of the mechanical one. The model proposed by Kamal-Sourour is one of the most applied to describe the evolution of the curing process.

Keywords: kinetics; curing; elastomers; models..

1. INTRODUCCIÓN

El surgimiento de múltiples elastómeros a partir del caucho natural hasta la actualidad ha permitido un amplio campo de aplicaciones. Por lo que se hace necesario conocer o estudiar la cinética de curado para estos materiales específicamente.

Según Samaniego (2021), la cinética química es el estudio de la velocidad con que se producen las reacciones químicas además la cinética determina el mecanismo de reacción.

Con el estudio de la cinética de curado se logra: predecir la estabilidad en el tiempo del material desarrollado, conocer la velocidad en que ocurre la reacción en determinadas condiciones de trabajo como presión, temperatura, forma de mezclado etc. Además, determinar y estudiar el mecanismo de reacción para futuras aplicaciones del material desarrollado. Proporcionando la información para conformar protocolo para la optimización de la producción y el costo final del material desarrollado a partir del diseño experimental.

Existen diferentes técnicas comúnmente aplicadas que permite el estudio de la evolución del entrecruzamiento durante la vulcanización según (Arrillaga et al., 2007) citado por Bellas (2012) y Navas (2012) como: reometría de disco oscilante (RDO), reometría de cámara móvil (RCM), calorimetría diferencial de barrido (DSC), espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR), análisis termo dinamomecánico (DMTA), equilibrio de hinchamiento.

La selección de las técnicas depende del equipamiento disponible, de la naturaleza de los datos, que pueden ser isotérmico o no. El objetivo común es obtener la energía de activación (E_a), la velocidad de reacción (n) y la constante de velocidad (k).

A través de los modelos matemáticos se puede obtener los parámetros cinéticos que indican el comportamiento del material. Los que se encuentran agrupados en dos categorías: los modelos cinéticos mecánicos y los modelos empíricos o fenomenológicos.

El objetivo de este trabajo es resumir los principales aspectos en la temática publicados hasta la actualidad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una búsqueda y consulta bibliográfica de diferentes referencias científicas teniendo en cuenta la metodología para una revisión sistemática cualitativa por etapas definida por Uman (2011) y citado por (Mendoza-Intriago et al., 2023). Permitiendo elegir los siguientes contenidos a tratar: Proceso de vulcanización, curva de vulcanización, técnicas analíticas aplicadas para el estudio de la cinética de vulcanizado, modelos para describir el comportamiento de la cinética de curado y cálculo de la energía de activación.

A través de las palabras clave mencionadas en el resumen del artículo se trazó la búsqueda de las publicaciones tanto en formato electrónico como impreso sin jerarquía de idioma, ni límite de fecha referentes a los contenidos elegidos. Ejemplo: artículos científicos de revistas indexadas, tesis, patentes, libros y páginas web.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Proceso de vulcanización

Billmeyer (2004), define la vulcanización como un proceso por el cual se introduce una red de enlaces cruzados en un elastómero. Suponen que a pesar de que Goodyear en 1839 descubrió la química de la vulcanización en la actualidad no es bien comprendida

por su complejidad no obstante consideran que el efecto es de transformar el elastómero desde una masa termoplástica débil sin propiedades mecánicas útiles en un caucho fuerte, elástico y tenaz.

Los elastómeros son vulcanizados para mejorar sus propiedades, se efectúa añadiéndole azufre u otro agente reticulante y sometiendo la mezcla a temperatura, normalmente superior a 150 °C, obteniéndose, una gran resistencia a la tracción y a la abrasión, manteniendo su elasticidad con independencia de la temperatura, Ferré (2000).

El caucho vulcanizado tiene mayor grado de elasticidad y mayor resistencia a los cambios de temperatura que el no vulcanizado; además es impermeable a los gases y resistente a la abrasión, acción química, calor y electricidad. También posee un alto coeficiente de rozamiento en superficies secas y un bajo coeficiente de rozamiento en superficies mojadas por agua (Sampietro & Rescia, 1997).

Según Castaño (2010), el proceso de vulcanización es un proceso químico que requiere de un incremento de la temperatura y de un aumento de la presión en la mayoría de los casos. Los medios de transmisión del calor serían la conducción, convección y radiación. La cantidad de calor transmitida depende de la superficie, la conductividad térmica, del gradiente de temperatura, del coeficiente de transferencia de calor y del tiempo de permanencia.

González et al. (2009), plantea que durante el proceso de vulcanización es donde se consume aproximadamente el 80 % de la energía necesaria para elaborar una pieza, por lo que los sistemas de vulcanización tienen un efecto importante en los costos de las formulaciones.

La optimización de un sistema de vulcanización implica según Castaño (2010): la seguridad en el proceso, el tiempo de cura, temperatura, el tipo de vulcanización y el logro de unas propiedades tecnológicas necesarias. Debido a la variedad de elementos presentes en la formulación de un compuesto de caucho, la reacción de vulcanización se convierte en un proceso complejo que aún no es completamente entendido.

El tema de discusión está centrado en el mecanismo predominante durante la reacción, una hipótesis propone que la reacción ocurre por vía iónica, otra es que ocurre mediante reacción radicalaria o finalmente podría ser por una combinación de ambos mecanismos Coran (1994) y (Akiba & Hashim, 1997) citados por Yepes (2014).

La reacción de vulcanización propuesta mediante mecanismos iónicos ocurre en varias etapas, comenzando en la primera etapa con reacciones de iniciación, seguidas por reacciones de propagación y en la última etapa se presentan reacciones de finalización; a diferencia del mecanismo de reacción propuesto mediante radicales libres que puede llegar a depender de hasta diez etapas (Akiba & Hashim, 1997) y (Vergnaud & Rosca, 2009) citados por Yepes (2014).

En general se ha llegado a la conclusión que la vulcanización del caucho con azufre en presencia de un acelerante de naturaleza orgánica es un proceso extremadamente complicado desde el punto de vista químico. El mecanismo de vulcanización y su aceleración dependen de la estructura del caucho, tipo, concentración de acelerante y activadores (óxido de zinc y ácido graso) así como de la termodinámica de cada reacción. La química de la vulcanización es compleja y los entrecruzamientos resultantes pueden ser mono-, di-, tri- o poli-sulfídicos, con una proporción que está determinada, entre otros factores, por el sistema de vulcanización, el tiempo de curado y

la temperatura (González et al., 2006).

Durante la vulcanización los compuestos sufren variaciones en sus propiedades y se demuestra por lo anterior planteado en cuanto a la complejidad del proceso. Por tanto, es posible a partir de la técnica de reometría monitorear la reacción de vulcanización.

3.2 Curva de vulcanización

La curva de vulcanización es la representación del par de torsión que se le opone a la oscilación en función del tiempo. El par de torsión depende de la rigidez de la mezcla de caucho. Según Suárez (1983), los moldes utilizados en la vulcanización presentan un comportamiento similar al de los reactores a templa, siendo el parámetro determinante la duración del ciclo, la temperatura de la superficie de intercambio, lo que es importante controlar.

Durante el proceso de vulcanización existen parámetros críticos según plantea (Mansilla, 2012), el tiempo que demora en comenzar la vulcanización, la velocidad a la cual ésta se lleva a cabo y en cuanto tiempo lo hace. Dentro de los parámetros obtenidos existen dos muy característicos del ensayo: torque mínimo y torque máximo, con el cálculo de la variación de ambos parámetros se puede obtener una idea indirecta del grado de reticulación logrado.

Torque mínimo (par mínimo): El mismo se alcanza luego de un tiempo $\tau_{\min}$ de iniciado el ensayo e indica el momento a partir del cual comienzan a generarse los puentes. La disminución del torque a tiempos menores se debe a la variación de la viscosidad de la muestra al someterla a temperatura.

Torque máximo (par máximo): Es proporcional a la rigidez del material vulcanizado, y es alcanzado a un tiempo $\tau_{\max}$. En dicho tiempo la estructura de reticulación es la óptima a efectos de elasticidad del material.

En la Figura 1 se indican las tres fases principales del proceso de vulcanización: inducción, curado y sobrecurado.

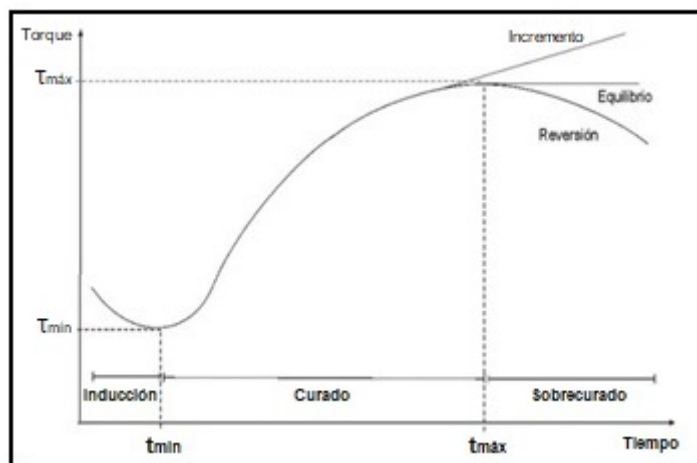


Figura 1. Fases principales del proceso de vulcanización. Tomada de Mansilla (2012)

Inducción, en donde básicamente se producen las reacciones químicas que involucran al acelerante, y durante el cual se le da la forma deseada a la muestra.

El **período de curado**, en la cual se produce la estructura de reticulación de las macromoléculas del elastómero y se consumen el acelerador y el azufre (en el caso de

vulcanización por azufre).

El **sobrecurado**, en donde se pueden encontrar los siguientes comportamientos según el compuesto: una reversión en donde la red madura y luego hay un progresivo deterioro, un incremento o se puede generar un equilibrio, Mansilla (2012).

De existir reversión (degradación del elastómero), no se puede comprobar la estabilidad térmica del sistema, por lo tanto, hay rotura de enlace o reacciones secundarias a la hora de crear la red entrecruzada entre las cadenas adyacentes del polímero en el compuesto.

3.3 Técnicas analíticas aplicadas para el estudio de la cinética de vulcanizado

Existe mucha información empírica sobre la naturaleza de la vulcanización con azufre, Figura 2, sin embargo, hoy la naturaleza del proceso no es completamente comprendida.

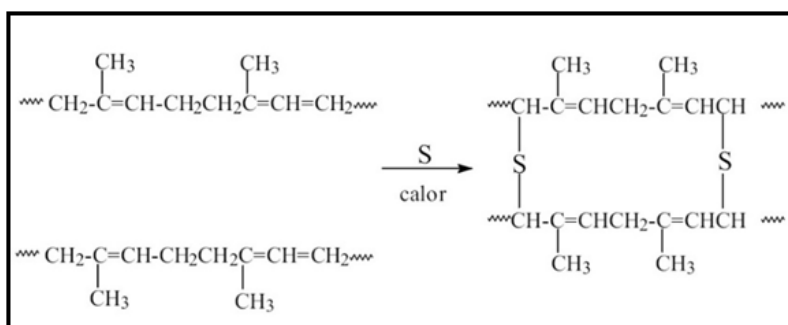


Figura 2. Proceso de vulcanización. Tomado de Maier (2012)

Las técnicas aplicadas se basan en la medida de una propiedad que varía con el avance del entrecruzamiento, y que permite definir la extensión del entrecruzamiento o grado de curado (α). Las más utilizadas para estudiar la cinética de vulcanización del caucho incluyen calorimetría diferencial de barrido y reómetro de disco oscilante (Deanin & Manion, 1999) citado en Cápiro (2012) y Bellas (2012). Según Bellas (2012), es debido a la sencillez y a la rapidez de las medidas.

Yepes et al. (2017) coinciden con lo planteado por (Deanin & Manion, 1999) agregando que estas técnicas no permiten identificar el tipo de enlaces sulfídicos formados ni la densidad de enlaces entrecruzados. El DSC permite además realizar seguimiento de la reacción de vulcanización de forma isotérmica o no isotérmica, una versatilidad que es muy útil para establecer la cinética de vulcanización bajo diferentes ciclos térmicos, lo cual se aproxima mejor a la manera como ocurre la reacción en los procesos industriales (Yepes et al., 2017).

La técnica conocida como reometría de vulcanización monitorea el cambio en el torque que se aplica a la muestra para generarle una deformación constante, en condiciones isotérmicas (Yepes et al., 2017).

Una ventaja de monitorear la reacción de vulcanización mediante reometría de vulcanización es que permite medir el torque incluso después de finalizar la vulcanización, de tal manera que se evidencien fenómenos como reversión, que consiste en la disminución en la rigidez del compuesto vulcanizado como resultado de la desulfurización en los enlaces formados en el caucho natural (Akiba & Hashim, 1997; Coran (1994), citado por (Yepes et al., 2017).

Finalmente Yepes et al. (2017) llegaron a la conclusión que tanto la reometría de

vulcanización como la DSC permiten establecer los tiempos de inducción de la reacción de vulcanización, es decir, el tiempo necesario para que se formen los primeros enlaces elásticamente activos entre el caucho y el azufre en el caso de la reometría de vulcanización, y el momento en que se comienza a liberar calor como efecto de la vulcanización en el caso de la DSC.

3.4 Modelos para describir el comportamiento de la cinética de curado

Para describir el comportamiento de la cinética de curado se han desarrollado varios modelos agrupados en dos categorías. Están los modelos cinéticos mecánicos y los modelos empíricos o fenomenológicos. El modelo mecánico es la descripción de las reacciones químicas que ocurren durante el proceso de curado, cuantificando el balance de las especies químicas involucradas que pueden ser muy amplias, llegando a relaciones matemáticas que conectan la velocidad de la reacción con el tiempo y temperatura de curado Mansilla (2012). Razón por la que se considera al modelo empírico como el método más práctico.

Según Mansilla (2012), el modelo Kamal-Sourour fue propuesto en 1973 para cura isotérmica utilizado con éxito para describir el comportamiento de las curvas torque (M) vs tiempo (t) en numerosos compuestos elastoméricos donde el estado de cura o avance de la reacción es (θ). La expresión (1) se utiliza para normalizar las curvas reométricas y muchos autores comparten el mismo criterio ejemplo: Marzoccaa (2003), (Nampitch & Buakaew, 2006), (Mansilla et al., 2007), (Khang & Ariff, 2012), (Albano et al., 2011), (Marzocca et al., 2012), Bellas (2012), Malmierca (2013), Yepes (2014), (Cal et al., 2016), Cal (2019).

$$\theta = \frac{M_t - M_L}{M_H - M_L} \quad (1)$$

M_t : es el torque a tiempo t (N.m), M_L : torque mínimo (N.m) y M_H : torque máximo (N.m).

De las curvas registradas se puede obtener los parámetros: (M_L) par mínimo, (t_{sx}) tiempo de prevulcanización, ($t_c(y)$) tiempo para alcanzar un tanto por ciento predeterminado de la vulcanización completa, (M_H) par de meseta (“plateau”), (MHR) par máximo (curva de reversión), o (MH) valor más alto del par, alcanzado en una curva donde no se aprecia valor máximo o plateau después del período de tiempo especificado (NC-ISO 3417, 2002).

Con esta curva se interpola al modelo para curva isotérmica de Kamal y Sourour, en el cual el estado de cura (θ) se expresa como:

$$\theta = \frac{\{k(t - t_0)\}^n}{1 + \{k(t - t_0)\}^n} \quad (2)$$

Donde (k) es la velocidad de la reacción, (n) es el orden de la ecuación cinética, (t_0) es el tiempo de inducción y (t) es el tiempo. A partir de la curva de reómetro el avance de la cura se puede expresar como la ecuación (2).

Según Gómez (2019), los modelos más generalizados y con mejor ajuste se encuentran el de Kamal-Sourour, Sestak-Berggren e Isayev – Deng, a partir de los cuales se puede modelar la velocidad determinando los parámetros cinéticos que intervienen como

orden de reacción y constante de velocidad. El modelo diferencial de Isayev-Deng permite describir la velocidad de curado mientras que el modelo de Kamal-Sourour describe la evolución de la fracción de curado, ambos desde un enfoque fenomenológico.

El modelo empírico propuesto por Isayev – Deng para determinar la cinética de curado se puede expresar mediante las siguientes ecuaciones: Gómez (2019)

$$\frac{d\alpha}{dt_r} = nk^{1/n}\alpha^{(n-1)}(1-\alpha)^{((n+1)/n)} \quad (3)$$

El modelo reducido de Isayev – Deng según propone Gómez (2019):

$$\frac{d\alpha}{dt_r} = \frac{nk t_r^{n-1}}{(1+kt_r^n)^2} \quad (4)$$

El modelo de Sestak-Berggren presenta una sola constante de velocidad.

$$\frac{d\alpha}{dt_r} = k(T)\alpha^m(1-\alpha)^p \quad (5)$$

Donde:

(α) es la fracción adimensional de curado, (k) la constante de velocidad dependiente de la temperatura, (m) y (p) son los parámetros para el orden de la reacción.

Para la caracterización reológica del polímero EPDM Gómez (2019), utilizó los modelos de Kamal-Sourour e Isayev-Deng que a través de los ajustes de los parámetros que intervienen en los modelos es que se describe la cinética de curado del material.

Hert & Alex, (2001), plantean que la cinética medida con la ayuda de un reómetro oscilante sería tal que el tiempo característico de vulcanización a 90%, t_{90} , no sobrepase de 15 minutos y ventajosamente estará comprendido entre 5 y 10 minutos. Por otra parte, se ha encontrado que el tiempo de inicio de vulcanización (o tiempo de fraguado), correspondiente a un aumento del par de 0,2 N.m es un factor importante para obtener un material que presente buenas características. Así, es ventajoso que el aumento de par citado se alcance en un tiempo superior o igual a 4 minutos a la temperatura de moldeo y preferentemente entre 4 y 6 minutos.

3.5 Cálculo de la energía de activación

La complementación del estudio cinético es el cálculo de la energía de activación, muchos son los autores que lo refieren según se plantea a continuación, ejemplo de ellos: Gómez (2019), (Gómez et al., 2020), (De Falco et al., 2007), (Marzocca et al., 2012), (Khang & Ariff, 2012), (Albano et al., 2011), Torres (2010), (Mansilla et al., 2007), Marzoccaa (2003) entre otros.

La constante de velocidad con la temperatura para una determinada reacción química se relaciona a través de la ecuación de Arrhenius (6):

$$k = A \cdot e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (6)$$

Donde (k) es la constante de velocidad, (A) es una constante vinculada con la frecuencia de las colisiones también llamado como factor de frecuencia, (E_a) es la energía de activación, (T) es la temperatura absoluta y (R) es la constante de los gases. En forma logarítmica la ecuación (6) puede expresarse en:

$$\ln k = \ln A - \frac{E_a}{R} \frac{1}{T} \quad (7)$$

La ecuación (7) es una recta, con ordenada $\ln A$ y pendiente $-\frac{E_a}{RT}$

Aplicando el logaritmo natural a (k) y graficando en función de la inversa de la temperatura, se obtiene la energía de activación, se considera una sola energía de activación porque el modelo implica suponer que la vulcanización fue gobernada por un único proceso dominante.

4. CONCLUSIONES

1. La química de la vulcanización es compleja debido a su mecanismo por depender de la estructura, tipo de caucho, concentración de los aceleradores y activadores de la reacción, los cuales determinan el sistema de vulcanización, el tiempo de cura y la temperatura del proceso.
2. Se han desarrollado varios modelos para describir la cinética de curado agrupados en dos categorías: los modelos cinéticos mecánicos y los modelos empíricos o fenomenológicos, considerado al modelo empírico como el método más práctico.
3. El modelo propuesto por Kamal-Sourour según los resultados encontrados en la revisión bibliográfica es el más utilizado el cual permite describir la evolución del proceso de curado. Sin embargo muy pocos estudios lo vinculan con los sistemas de vulcanización.

REFERENCIAS

- Akiba, M., & Hasshim, A. S. (1997). Vulcanization and crosslinking in elastomers. *Progress in Polymer Science*, 22(3), 475–521. <http://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079670096000159>
- Albano, C., Hernández, M., Ichazo, M. N., González, J., & Desousa, W. (2011). Characterization of NBR/bentonite composites: Vulcanization kinetics and rheometric and mechanical properties. *Polymer Bulletin*, 67(3), 653–667. <https://doi.org/10.1007/s00289-010-0432-5>
- Arrillaga, A., Zaldua, A. M., Atxurra, R. M., & Farid, A. S. (2007). Techniques used for determining cure kinetics of rubber compounds. *European Polymer Journal*, 43(11), 4783–4799. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.08.024>
- Bellas, R. M. (2012). *Formulación y caracterización de materiales compuestos integrados por una matriz de caucho estireno-butadieno (SBR) reforzada con nanoarcilla* [Tesis doctoral, Universidad de A Coruña]. Repositorio institucional. <http://hdl.handle.net/2183/10091>
- Billmeyer, F. W. (2004). *Ciencia de los polímeros*. Editorial Reverté.
- Cal, B. R. C. (2019). *Desarrollo de materiales elastoméricos con propiedades físico-químicas y mecánicas adecuadas para la fabricación de piezas de helicópteros* [Tesis doctoral, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas].
- Cal, B. R. C., Blanco, R. A., Valdés, B. F. G., Pérez, Y. C., & Garcia, E. A. (2016). Simulation of a part by assigning a new elastomeric formulation. *Afinidad*, 73(576), 310–314. <https://core.ac.uk/download/pdf/83007504.pdf>
- Cápiro, O. G. (2012). *Propuesta de una tecnología para la producción de diafragmas y protectores de caucho vulcanizado para helicópteros* [Tesis de grado, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas]. <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/2418>
-

- Castañón, N. (2010). *Historia del caucho*. http://www.calzawebperu.com/PDF/historia_caucho.pdf
- Coran, A. (1994). Vulcanization. In J. E. Mark (Ed.), *Science and technology of rubber* (pp. 339–384). Academic Press.
- De Falco, A., Marzocca, A., Rubiolo, G., & Goyanes, S. (2007). Relación entre la formación de entrecruzamientos y las propiedades mecánicas de elastómeros vulcanizados reforzados con nanotubos de carbono. *Memorias del Congreso SAM/CONAMET 2007*, 1263–1268. <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/CONAMETSAM2007/sam%20conamet%2007/pdf/T%C3%B3pico%2012%20-%20Materiales%20compuestos/12-24%20DeFalcoA.pdf>
- Deanin, R. D., & Manion, M. A. (1999). Compatibilization of polymer blends. In *Polymer blends and alloys* (pp. 83–106). Hanser Publishers.
- Ferré, M. (2000). *Manual básico del caucho para el diseño o selección técnica de artículos de caucho*. Editorial Cercle Humanista Multinivell. <http://cerclesbd.spaces.live.com/blog/cns!CFBCC068F40F540D!2764.entry>
- Gómez, S. (2019). *Simulación del proceso de inyección del elastómero EPDM, mediante modelado fenomenológico* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Zacatecas]. <http://ricaxcan.uaz.edu.mx/jspui/handle/20.500.11845/1393>
- Gómez, S., Becerra-Ferreiro, A. M., Jareño-Betancourt, E., Castañeda-Miranda, R., & Vázquez-Penagos, J. (2020). Modelado fenomenológico de la cinética de vulcanizado de un polímero EPDM. *Memoria Universitaria*, 2(2), 1–15. <https://revistas.uaz.edu.mx/index.php/MemUni/article/view/794>
- González, L., Rodríguez, A., Valentín, J. L., Marcos-Fernández, A., & Posadas, P. (2006). Entrecruzamiento convencional y eficiente del caucho natural. *Revista del Caucho*, 501, 20–27. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/34233/1/501.pdf>
- González, R. A., Abreu, K., Álvarez, E., & Moya, J. L. (2009). Elastómeros de uso general en la industria azucarera: Estudio del sistema de vulcanización. *Revista Centro Azúcar*, 36(2), 80–84. http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/459
- Hert, M., & Alex, P. (2001). *Procedimiento de preparación de material compuesto constituido por un elastómero vulcanizado asociado a un elastómero termoplástico con secuencias poliamidas y material compuesto así constituido* (Patente ES 2158845 T3). Oficina Española de Patentes y Marcas. <http://www.oepm.es>
- Khang, T. H., & Ariff, Z. M. (2012). Vulcanization kinetics study of natural rubber compounds having different formulation variables. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(3), 1545–1553. <https://doi.org/10.1007/s10973-011-1937-3>
- Maier, M. S. (2012). *Polímeros: Aspectos teóricos elementales* (pp. 1–23). <http://www.detextiles.com/files/ESTRUCTURA%20DE%20LOS%20POLIMEROS.pdf>
- Malmierca, M. A. (2013). *Elastómeros iónicos con memoria de forma: Estructura, dinámica y propiedades* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de

- Madrid]. <https://docta.ucm.es/rest/api/core/bitstreams/b14c6886-0971-4c3a-97eb-a6bb39a35897/content>
- Mansilla, M. A. (2012). *Influencia de la microestructura en las propiedades mecánicas y térmicas de mezclas de caucho natural y caucho estireno butadieno* [Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires]. Biblioteca Digital UBA. https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n5117_Mansilla.pdf
- Mansilla, M. A., Quasso, F., & Marzocca, A. J. (2007). Caracterización de mezclas vulcanizadas de caucho estireno butadieno y caucho natural. *Memorias del Congreso SAM/CONAMET 2007*, 1111–1116. <https://bicyt.conicet.gov.ar/fichas/produccion/1106457>
- Marzocca, A. J. (2003). Relación entre la cinética de formación de entrecruzamientos y las propiedades mecánicas de elastómeros vulcanizados. *Memorias Jornadas SAM/CONAMET*, 886–889. <https://www.redalyc.org/pdf/1492/149255960007.pdf>
- Marzocca, A. J., Garraza, A. L. R., Sorichetti, P. A., Matteo, C. L., & Mosca, H. O. (2012). About the cure kinetics and dielectric relaxation spectroscopy in compounds of polybutadiene (BR) with dicumyl peroxide. *Anales AFA*, 23(2), 75–79. <https://anales.fisica.org.ar/index.php/analesafa/article/view/1043>
- Mendoza-Intriago, M., Zavala-Murillo, R., Toala-Franco, D., Dueñas-Rivadeneira, J. P., Matute-Zeas, M. E., & Dueñas-Rivadeneira, A. A. (2023). Extracto etanólico de propóleo como recubrimiento antioxidante en aguacates: una revisión. *Centro Azúcar*, 50(1), e1001. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/733/831
- Nampitch, T., & Buakaew, P. (2006). The effect of curing parameters on the mechanical properties of styrene-NR elastomers containing natural rubber-graft-polystyrene. *Natural Science Supplement*, 40, 7–16. <https://www.thaiscience.info/journals/Article/TKJN/10471410.pdf>
- Navas, F. A. (2012). *Estudio de ciclos de vulcanización para tres tipos de formulaciones de caucho* [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Uniandes. <http://hdl.handle.net/1992/24865>
- NC-ISO 3417. (2002). *Elastómero, vulcanizado o termoplástico. Determinación de las características de vulcanización con el Reómetro* (pp. 1–10).
- Samaniego, A. L. (2021). *Estudio cinético de la descomposición térmica de plásticos de poliestireno (PS) reciclado* [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio ESPOCH. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/14979>
- Sampietro, G., & Rescia, L. (1997). *El caucho*. Monografías. <https://www.monografias.com/trabajos4/elcaucho/elcaucho.shtml>
- Suárez, E. G. (1983). Determinación del efecto del incremento de la temperatura en la disminución de los tiempos de cura durante el recape. *Revista Tecnología Química*, IV(1), 75–79.
- Torres, A. F. (2010). *Vulcanización de elastómeros con peróxidos orgánicos* [Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid].
-

VirtualPro. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/vulcanizacion-de-elastomeros-con-peroxidos-organicos>

- Uman, L. S. (2011). Systematic reviews and meta-analyses. *Journal of the Canadian Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 20(1), 57–59. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3024725/>
- Vergnaud, J. M., & Rosca, I. D. (2009). *Rubber curing and properties*. CRC Press. <https://www.crcnetbase.com/ISBN/978-1-4200-8522-8>
- Yepes, W. U. (2014). *Efecto del sistema de vulcanización en la cinética de reacción y en las propiedades físico-químicas de un caucho colombiano* [Tesis, Universidad EAFIT]. Repositorio EAFIT. <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/4c8099e8-f89a-479d-a9be-d4360b64b4a4/content>
- Yepes, W. U., Restrepo, S. M. V., Vásquez, D. H. G., & Correa, J. C. P. (2017). Review: Effect of the vulcanization system in the crosslinked and in the chemical vulcanization reaction of natural rubber. *Revista EIA*, 14(28), 99–115. <https://www.redalyc.org/pdf/1492/149255960007.pdf>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dra.C. Blanca Rosa Cruz Cal. Redacción - revisión y edición.
- Dra.C. Belkis F. Guerra Valdés. Redacción - revisión y edición.
- Dr.C. Ricardo Alfonso Blanco. Redacción - revisión y edición.