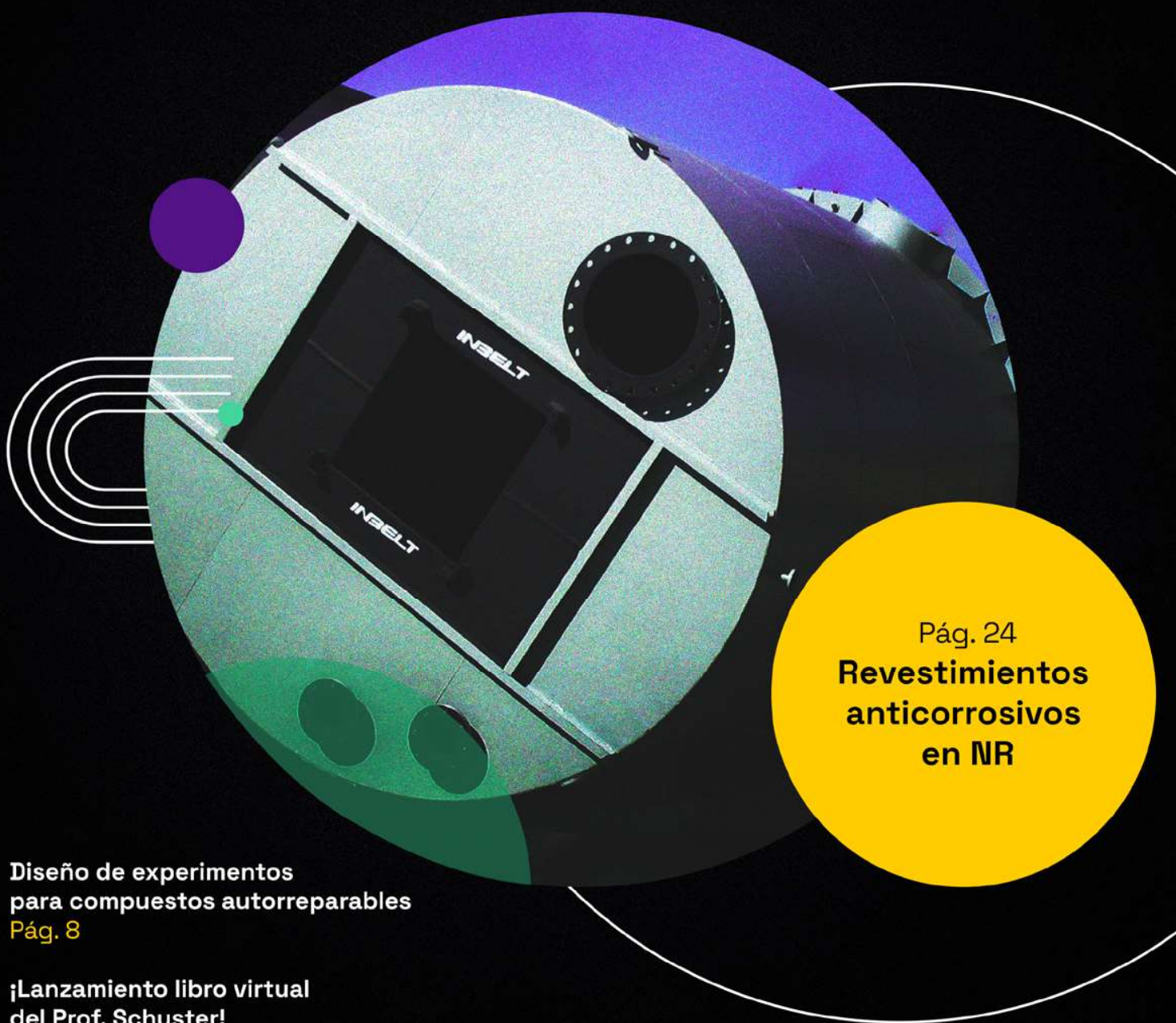


SLTC

Sociedad Latinoamericana
de Tecnología del Caucho

SLTCAUCHO

CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN AMÉRICA LATINA



Pág. 24
**Revestimientos
anticorrosivos
en NR**

**Diseño de experimentos
para compuestos autorreparables**
Pág. 8

**¡Lanzamiento libro virtual
del Prof. Schuster!**
Pág. 65

**Inscripción con fuerte
descuento para las Jornadas**
Pág. 70

Índice

04. Seguridad laboral

Tres muertos en un accidente en una mina

08. RITC

El diseño de experimentos como herramienta para la fabricación optimizada de compuestos elastoméricos autorreparables

14. Artículo técnico Quimipol

Proceso de vulcanización del hule (caucho) - Parte 2

18. Reciclaje de neumáticos

Aplicación de negro de humo recuperado como sustituto de negro de humo virgen en formulaciones con cauchos NBR - Parte 2

32. Un cafecito con Esteban

Ayudas que ayudan... ¡y mucho!

36. Revista España

- Caucho, neumáticos y deforestación
- Ensayando aceites para TPE

42. Ciencia y tecnología

Optimización de la formulación de compuestos de caucho natural mediante inteligencia artificial - Parte 3

54. Ficha técnica coleccionable

Revestimientos de rodillos de caucho natural

56. Fórmula

Recubrimientos de rodillos de impresión (25 Shore A)

60. Noticias generales

64. Noticias institucionales

70. Noticias JornadasCaucho 2023

24

REGISTROS FÓSILES (PERO VIGENTES)

Revestimientos anticorrosivos en NR

Esta nueva sección rescata trabajos muy importantes publicados hace más de 25 años pero, por su naturaleza, con total vigencia en la actualidad.

En esta ocasión, hablaremos de los revestimientos de caucho, los cuales contribuyen a mejorar la economía de muchos procesos de la industria química.

Conoce esta adaptación del capítulo 3 de la tesis de grado "Sistemas de recubrimiento de protección para una planta transformadora de yuca" del Ing. Juan Carlos Correa Daraviña de la Universidad Autónoma del Occidente, Colombia (1994).

Optimización de la formulación de compuestos de caucho natural mediante inteligencia artificial - Parte 3



COLUMNISTAS INVITADOS

Allen Jonathan Román (USA)
ajroman@wisc.edu

Julio C. Rodríguez (COL)
jcero@soanlaboratorios.com

Tim A. Osswald (USA/COL)
tosswald@wisc.edu

Shiyi Qin (CHI)
sqin34@wisc.edu

Leonardo D. González
gonzlezchvez@wisc.edu

Victor M. Zavala (MEX)
victor.zavala@wisc.edu

Este artículo forma parte de una serie de 5 partes que explica cómo métodos computacionales como el aprendizaje de máquina, pueden utilizarse para optimizar el proceso de formulación de compuestos para obtener propiedades específicas.

En la primera parte del artículo, desarrollamos la introducción y los métodos experimentales utilizados en el estudio. En la parte 2 del mismo, se explicó los métodos computacionales utilizados. La 3 describe los resultados experimentales, la 4 repasa los resultados computacionales y la 5 informa sobre cómo se pueden aplicar estos métodos para la ingeniería inversa de materiales.

En esta ocasión, se explican los resultados experimentales extraídos del estudio de caracterización, los cuales se utilizan como entradas a los métodos

computacionales para la predicción de las propiedades de los materiales.

1. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.1. Caracterización del material.

1.1.1. Influencia de los vacíos en las propiedades viscoelásticas y estáticas.

La reacción de **degradación del bicarbonato de sodio** dentro de la mezcla tiene la capacidad de crear una pieza espumada con niveles variables de cantidad de vacíos dependiendo de la carga de aditivos y la carga dentro del molde de moldeo por compresión. Las micrografías que se ven en la **figura 1** muestran los tres ejemplos de cantidades de vacíos capturados por el escáner ZEISS μ , donde la cantidad de bicarbonato de sodio se mantuvo constante y se modificó el peso de la carga dentro del molde.

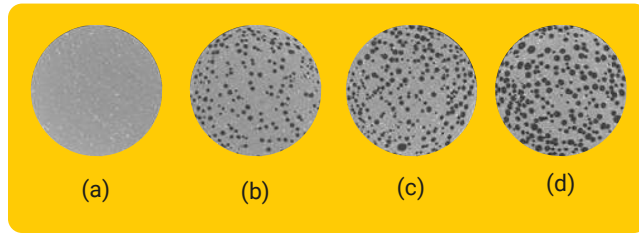


Figura 1. (a) μ TC de una muestra con 0 % de vacíos. (b) μ TC de una muestra con 11,8 % de huecos. (c) μ TC de una muestra con un 19 % de huecos. (d) μ TC de una muestra con un 32,2 % de huecos.

Es evidente que el aumento de la cantidad de huecos da lugar a una disminución de la carga que soporta el material sólido durante el ensayo. Por esta razón, se espera ver que **una estructura espumada compuesta por la misma formulación dará como resultado un material menos rígido**, comparado con uno de menor cantidad de vacíos.

La figura 2 muestra la superposición de las pruebas de relajación para la misma formulación, pero con diferentes contenidos de vacíos. Se puede observar que el aumento de los vacíos da lugar a un desplazamiento vertical de la curva general. Además, en la figura 3 se observa una clara **relación lineal entre la rigidez del material y la cantidad de huecos**, si se agrupa la tensión máxima alcanzada durante el ensayo con su respectiva cantidad de huecos.

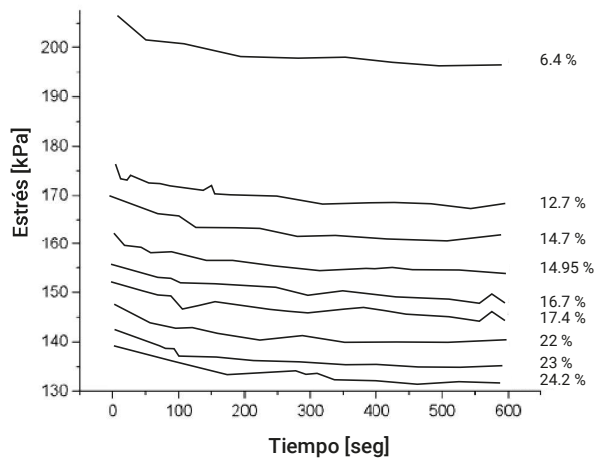


Figura 2. Superposición de los ensayos de relajación de la mezcla 1 con los distintos niveles de contenido de huecos mencionados en el texto a la derecha de cada curva.

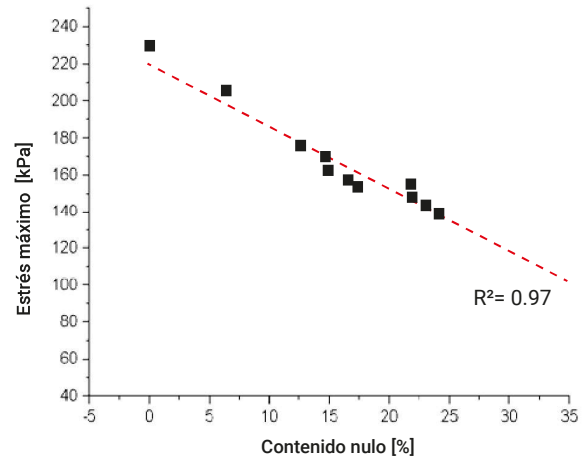
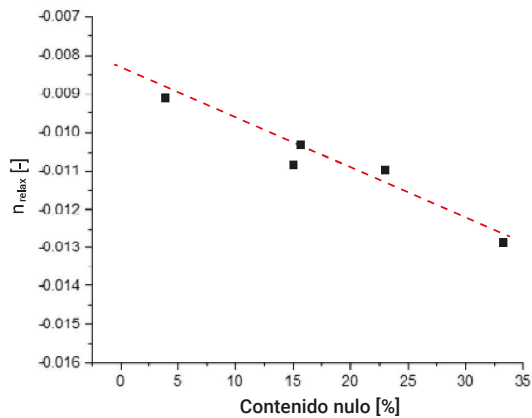


Figura 3. Representación de la relación lineal entre la tensión máxima experimentada en el ensayo de relajación y el contenido de huecos para la mezcla 1.

Los vacíos influyen actualmente en la **rigidez** del material durante la relajación, y también puede observarse que la velocidad a la que decae la **tensión** también está influida por la cantidad de vacíos presentes en la muestra. La evaluación n_{relax} de las curvas individuales permite analizar cómo influyen los huecos en la velocidad de decaimiento de la tensión, mientras que en la figura 4 se puede observar cómo los huecos y n_{relax} tienen una relación lineal decreciente. Esta relación establece que, **a medida que aumenta la cantidad de huecos, la velocidad a la que decae la tensión será mayor**, por lo tanto, si se busca un material con una compresión mínima, será necesario minimizar la cantidad de huecos.



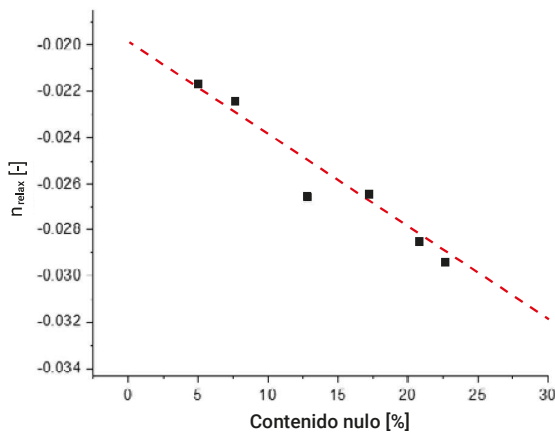


Figura 4. La relación entre los vacíos y la velocidad a la que decae la tensión para la mezcla 9 y 10, caracterizada por n_{relax} .

Para comprender mejor a nivel cuantitativo la cantidad de influencia que los parámetros imponen a una determinada propiedad del material, se utiliza el **coeficiente de correlación de Pearson** para determinar el nivel de significación entre dos variables especificadas. La matriz de correlación se construye utilizando la ecuación que figura a continuación, mientras que x puede representar el contenido de azufre y y podría ser los vacíos.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Valores:

r = coeficiente de correlación.

x_i = valores de la variable x en una muestra.

\bar{x} = media de los valores de la variable x .

y_i = valores de la variable y en una muestra.

\bar{y} = media de los valores de la variable y .

La **figura 5** muestra el mapa de calor normalizado, en el que un coeficiente de correlación de Pearson cercano a -1 se traduce en un efecto de disminución altamente significativo en la propiedad específica. Por otro lado, un valor de +1 se traduce en un efecto de aumento altamente significativo en la propiedad específica.

Por último, un valor cercano a cero se interpreta como un parámetro insignificante para la propiedad de interés.

Hay tres áreas presentes dentro de este mapa de calor: los coeficientes de **formulación de la mezcla de entrada** que explican cómo las mezclas no están correlacionadas entre sí, los coeficientes de propiedad del material de salida que dictan cómo cada propiedad de salida está interrelacionada entre sí, y los coeficientes de **correlación de entrada y salida** que dan una idea de cómo los aditivos influyen en las propiedades viscoelásticas de salida.

Por mencionar algunos, se puede ver que n_{relax} está correlacionado negativamente con $\tan \delta$ y que σ_{relax} se correlaciona positivamente con la dureza del material, captada por el durómetro. Se puede ver dentro del mapa de calor que los vacíos tienen un valor positivo del coeficiente de correlación de Pearson con $\tan \delta$, por lo que se espera ver el aumento de $\tan \delta$ con una mayor cantidad de huecos.

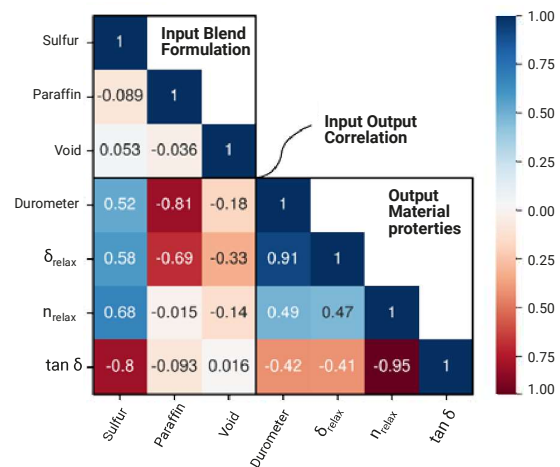


Figura 5. Los coeficientes de correlación de Pearson para cada parámetro.

La correlación positiva del contenido de huecos en $\tan \delta$ especificada por el coeficiente de correlación de Pearson se confirma en la **figura 6**, donde las mezclas 8 y 9 muestran claramente una tendencia al aumento de $\tan \delta$ a medida que aumenta el contenido de huecos.



La tendencia mencionada está presente en todas las mezclas, lo que permite predecir el comportamiento de $\tan \delta$ para las muestras con un contenido de vacíos del 0 % al 40 % mediante la extrapolación de los datos a través de técnicas de regresión lineal.

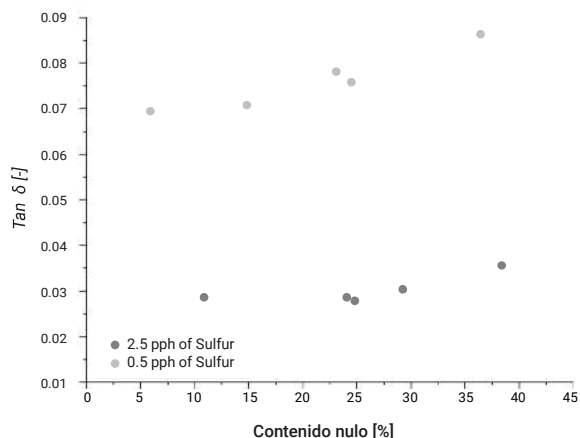


Figura 6. La relación creciente del contenido de huecos en $\tan \delta$.

Como se ve en la **figura 3**, la cantidad de huecos en la muestra influye en las tensiones alcanzadas durante las pruebas de relajación, una indicación de la rigidez. Esta influencia en la rigidez también se capta en las mediciones de dureza, un método estático en el que se puede observar que **el aumento del contenido de huecos da lugar a una disminución de la dureza**. La **figura 7** muestra cómo la dureza de la mezcla 5 disminuye de forma lineal al aumentar el contenido de huecos.

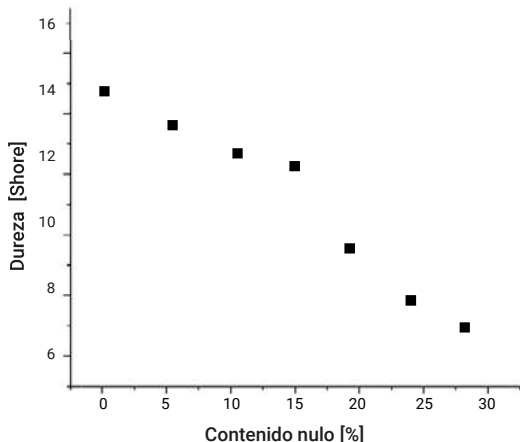


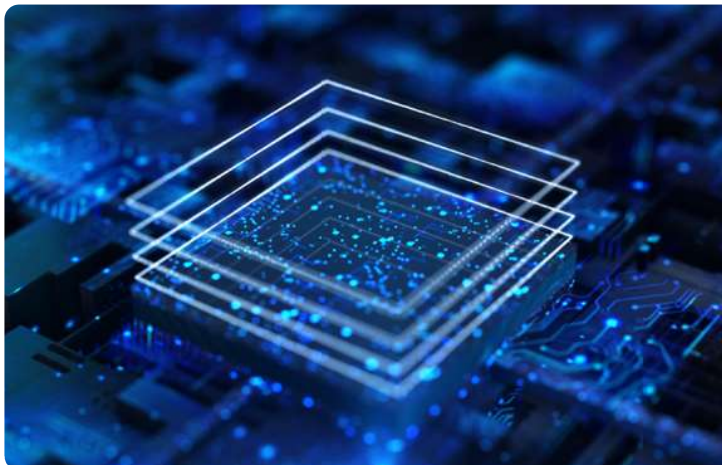
Figura 7. La influencia del contenido de huecos en la dureza.

1.1.2. Influencia del azufre en las propiedades viscoelásticas y estáticas

Una mayor cantidad de **azufre** dentro de las formulaciones da lugar a un mayor número de enlaces cruzados. A su vez, el aumento de la densidad de los enlaces cruzados da lugar a una menor capacidad de las cadenas moleculares para moverse entre sí. Si la movilidad es limitada, las fuerzas intermoleculares estarán presentes, restringiendo la relajación completa. Así, el desfase entre la tensión y la respuesta al estrés se minimizará.

Las tres curvas de relajación de la **figura 8** representan mezclas que sólo difieren en la cantidad de azufre dentro de la formulación. Sin la presencia de plastificante en la formulación, se puede apreciar cómo **el aumento de la cantidad de azufre aumenta de hecho la rigidez**, como se ve en **(a)** donde la mezcla con 4,0 pph de azufre alcanza una tensión máxima 1,6 veces mayor que la mezcla con 0,5 pph de azufre.

Además, al observar las curvas de relajación normalizadas en **(b)** se comprueba cómo la disminución de la movilidad molecular crea un material que experimenta un menor comportamiento de decaimiento de la relajación. Esta disminución, consecuencia del aumento de la densidad de reticulación, indica que dicho material tardará mucho más en alcanzar el 1 % de tensión máxima que un material con menor cantidad de azufre.



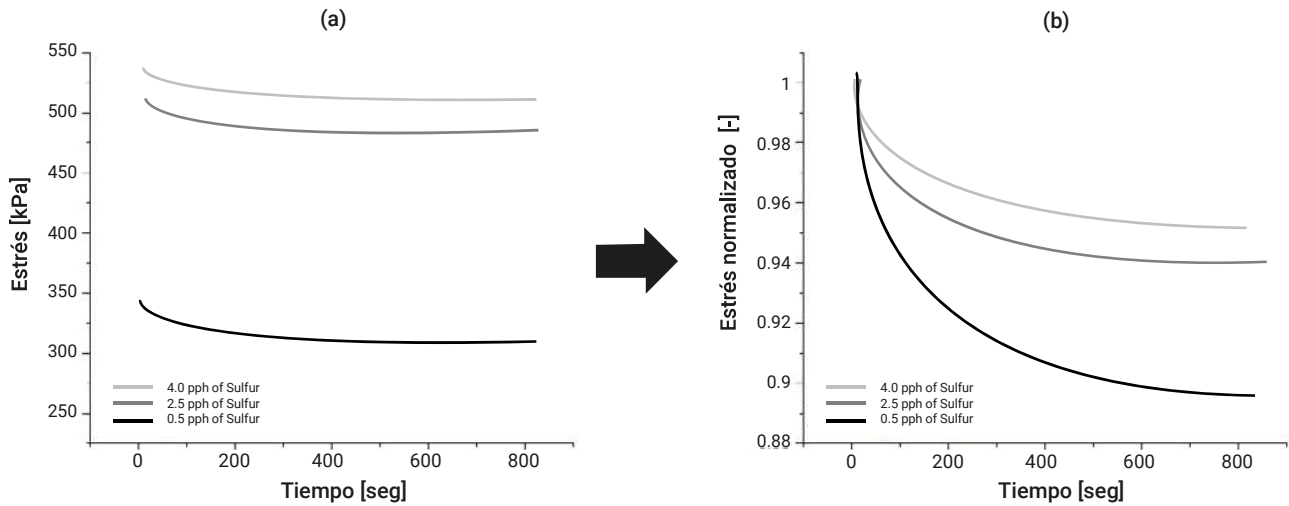


Figura 8. (a) Representa las curvas de relajación para las mezclas 7, 8 y 9 mientras que (b) representa las curvas normalizadas.

Las mezclas mencionadas en la **figura 8** no contenían plastificante dentro de la formulación y la comparación de las mezclas con una cantidad igual de **plastificante** con cantidades variables de azufre tiene la capacidad de crear un material más complejo.

Se puede ver en la **figura 9** que el aumento de la carga de azufre, para una mezcla con 80 pph de plastificante, resulta en una mayor tensión máxima alcanzada durante la prueba.

Pero, al contrario de lo observado en la **figura 8**, las curvas de relajación normalizadas no siguen la misma tendencia. Es visible que el aumento de la cantidad de azufre de 1,5 pph a 2,5 pph, todo ello con 80 pph de plastificante, tiene una influencia mínima en la velocidad a la que se produce la relajación y un efecto sustancial en la rigidez del material.

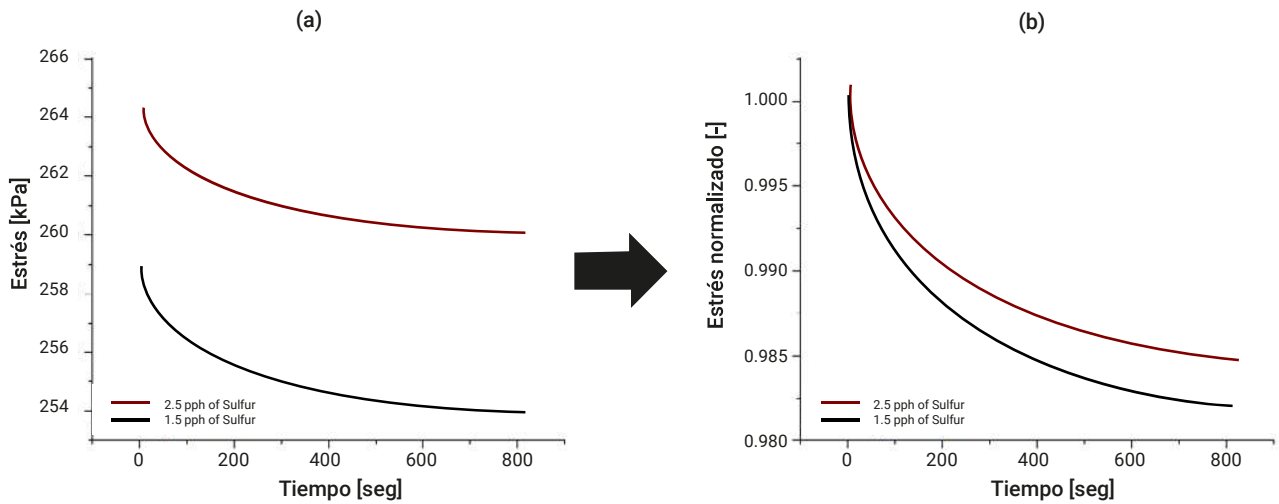


Figura 9. (a) Representa las curvas de relajación de las mezclas 1 y 4, mientras que (b) representa la curva normalizada, mostrando una gran similitud en cuanto al comportamiento de decaimiento de la tensión.



El coeficiente de correlación de Pearson para el azufre en $\tan \delta$ es de -0,8. Por ello, se espera ver una tendencia decreciente en $\tan \delta$ con el aumento del contenido de azufre. Esto puede verse en la **figura 10**, donde cada mezcla tiene la misma cantidad de contenido de aceite de parafina, pero con diferente contenido de azufre. Se puede apreciar un desplazamiento vertical positivo en la curva a medida que disminuye el contenido de azufre, ya que se sabe que los polímeros fuertemente reticulados presentan una disminución de la movilidad molecular.

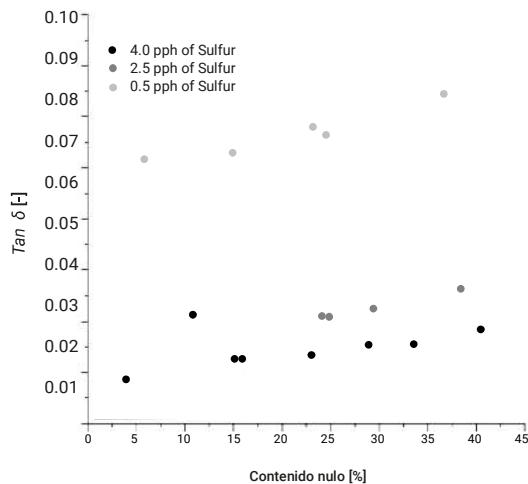


Figura 10. La influencia del contenido de azufre y del contenido de huecos en el $\tan \delta$ para las mezclas 7, 8 y 9.

Además, se puede observar en la **figura 11** que el **contenido de azufre también tiene una influencia creciente en la dureza**, ya que ambas mezclas muestran una tendencia lineal con pendientes similares. Es de esperar que la combinación de aditivos pueda crear un material polimérico del que sea muy difícil predecir sus propiedades mecánicas. Un aditivo puede encargarse de influir en el comportamiento de relajación de una manera, mientras que el segundo aditivo puede contrarrestar esa influencia y mejorar otra propiedad del material.

Por esta razón, **la formulación es un equilibrio sensible entre muchos aditivos**, una tarea que necesita considerar los efectos de cada uno de ellos en particular.

De ahí la razón de implementar herramientas de predicción como la regresión lineal, el método de superficie de respuesta, las redes neuronales artificiales y la regresión de proceso gaussiano para las predicciones de propiedades viscoelásticas.

Aunque la regresión lineal carece de complejidad, es capaz de servir como justificación de por qué una aplicación específica requiere un método más complejo para aumentar la precisión. En este estudio, la regresión lineal sirvió como referencia para demostrar que el proceso de formulación es altamente no lineal y requiere de un sistema complejo para la predicción.

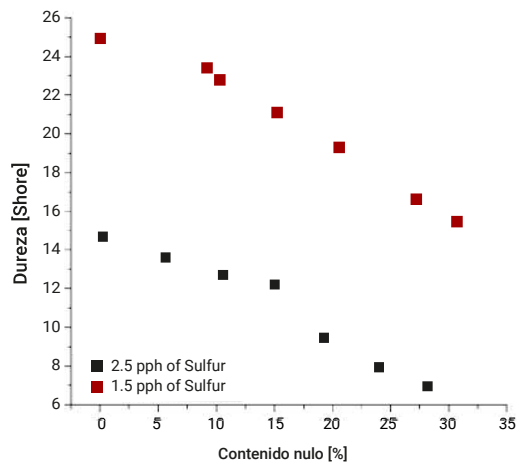


Figura 11. Influencia del contenido de azufre y del contenido de huecos en la dureza.

1.1.3. Influencia del aceite de parafina en las propiedades viscoelásticas y estáticas

El **aceite de parafina** se utiliza comúnmente en la industria del caucho para **disminuir la viscosidad de la mezcla y facilitar su procesamiento**, ya que el ultra alto peso molecular del caucho natural es extremadamente viscoso. La introducción de aceite de parafina en la mezcla reduce evidentemente la resistencia del material, lo que puede verse en la **figura 12**, donde un aumento de la carga de dicho plastificante disminuye las tensiones experimentadas durante las pruebas de relajación a una tensión del 30 %.

Con 1,5 pph de azufre, es visible cómo la adición de aceite de parafina crea un **efecto de equilibrio** en las tensiones alcanzadas durante el ensayo. Desgraciadamente, esta observación no es visible cuando se aumenta el valor a 2,5 pph. La cantidad de azufre alcanza un punto en el que enmascara los efectos del aceite y limita la influencia sobre la rigidez.

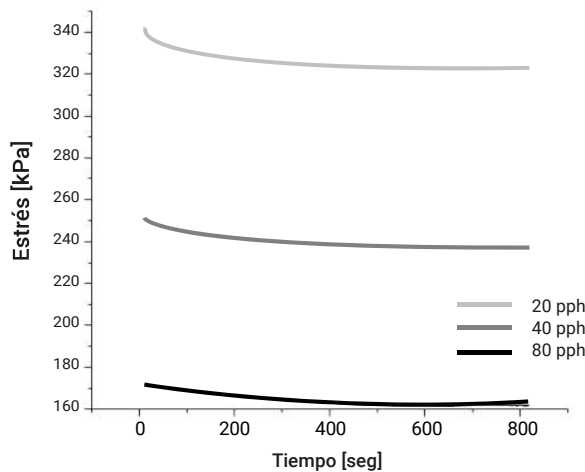


Figura 12. Influencia del contenido de aceite de parafina en el comportamiento de relajación de la mezcla de NR con 1,5 pph de azufre.

Como se ha mencionado anteriormente, cada aditivo tiene un efecto limitante en el comportamiento mecánico. Por ello, la saturación del mismo dentro de una mezcla puede causar una influencia mínima en el sistema después de alcanzar un determinado umbral.

Esta relación puede verse en la **figura 13**, donde los ensayos de relajación que difieren únicamente en el contenido de aceite de parafina muestran que una mezcla con 40 pph del aceite da lugar a un material con un comportamiento de relajación similar al de una mezcla con 80 pph del mismo.

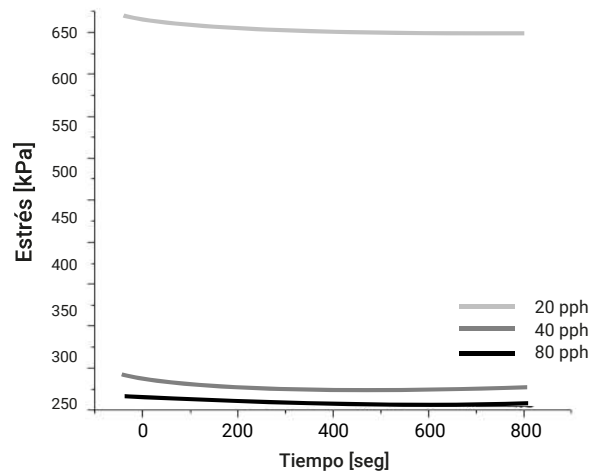


Figura 13. Influencia del contenido de aceite de parafina en el comportamiento de relajación de la mezcla de NR con 2,5 pph de azufre.

Al igual que en la **figura 11**, la tensión máxima alcanzada durante las pruebas de relajación puede representarse gráficamente con respecto al contenido de huecos y al contenido de aceite de parafina.

La **figura 14** muestra las **tensiones máximas** experimentadas durante las pruebas de relajación para las mezclas con 2,5 pph de azufre, mientras que la **figura 15** las muestra para una mezcla con 1,5 pph de azufre.

El azufre y el aceite de parafina tienen efectos contrapuestos en la rigidez del material. Esto puede observarse al tabular las pendientes de la disminución de la tensión para cada conjunto de puntos de datos que las pendientes difieren en la tendencia, dependiendo de la cantidad de contenido de azufre.

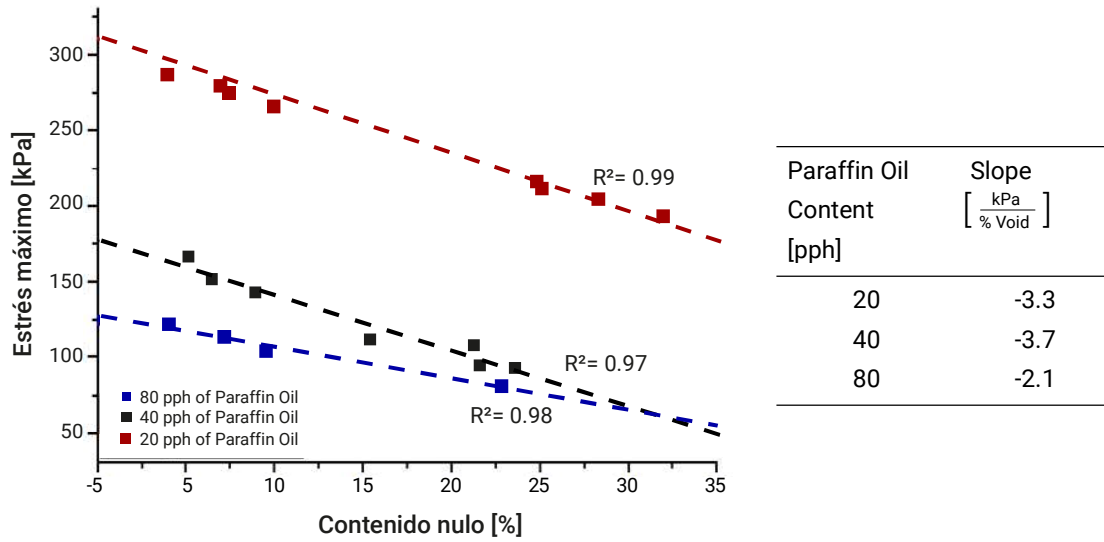


Figura 14. Influencia del contenido de aceite de parafina en σ_{relax} de la mezcla de NR con 1,5 pph de azufre.

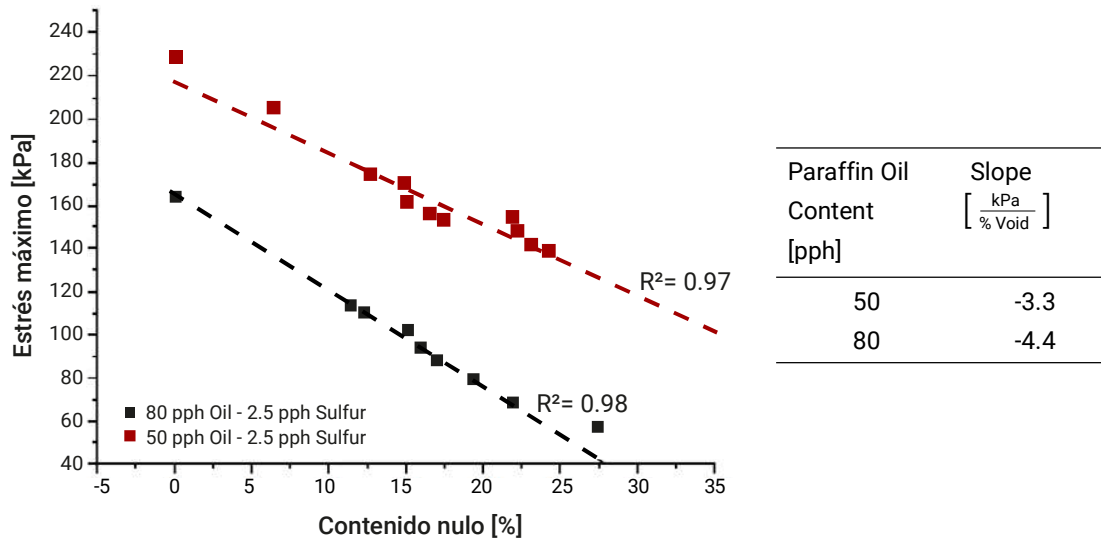


Figura 15. Influencia del contenido de aceite de parafina en σ_{relax} de la mezcla de NR con 2,5 pph de azufre.

Al evaluar las pendientes tabuladas de las **figuras 14 y 15**, es evidente que la influencia de los vacíos en una mezcla de 2,5 pph es más agresiva y se hace más pronunciada a medida que aumenta el contenido de aceite de parafina. Para el mismo contenido de aceite de parafina de 80 pph, un sistema con 1,5 pph de azufre experimenta una pérdida de tensión de 2,1 kPa por cada porcentaje de vacío presente en la muestra.

Por otro lado, una mezcla con 2,5 pph de azufre experimenta una disminución de 4,4 kPa en la tensión máxima durante la relajación por cada porcentaje de vacío presente en la muestra.

Como se ha mencionado, el proceso de formulación es un equilibrio sensible entre muchos aditivos que compiten entre sí. Por lo tanto, un formulador puede llegar a un material similar con varias mezclas.

La **figura 16** muestra cómo, con un contenido de huecos de aproximadamente el 16 %, un material con 2,5 pph o 1,5 pph de azufre, junto con 80 pph de contenido de aceite de parafina, tendrá una rigidez similar en un ensayo de relajación a una tensión de compresión del 30 %.

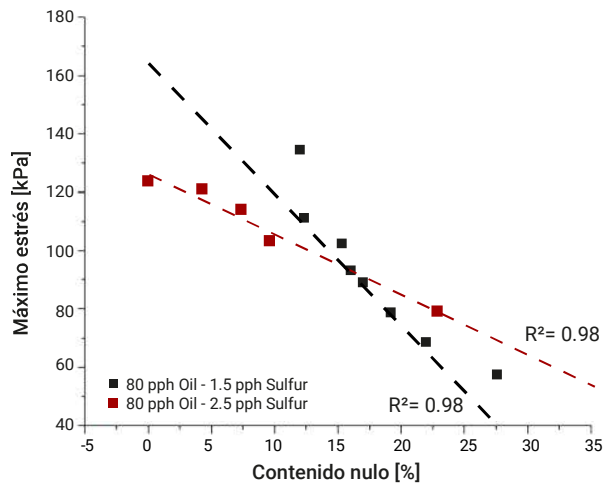
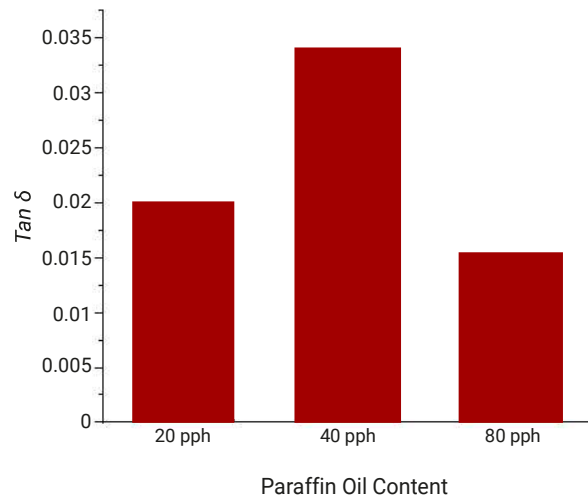


Figura 16. Gráfico que describe la similitud de las mezclas únicas al variar el contenido de vacíos.

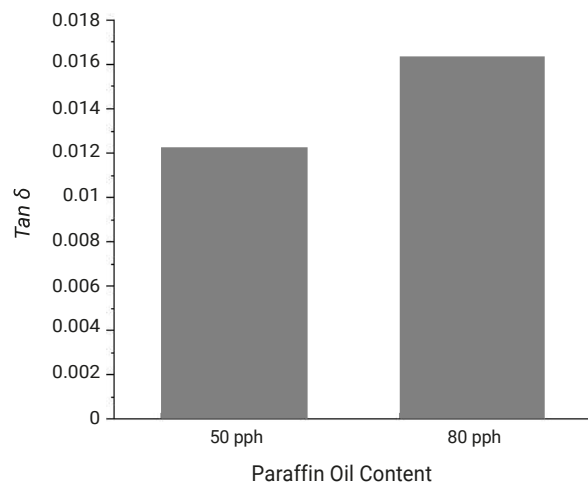
El DMA permitió caracterizar el $\tan \delta$ donde se puede ver para la mezcla 3 - 5, en la **figura 17 (a)**, cómo el aceite de parafina tiene una influencia creciente mínimamente significativa en $\tan \delta$ hasta que se alcanza un umbral. Al alcanzar un umbral establecido de contenido del aceite, la tendencia se convierte en una relación decreciente.

Una vez que se aumenta la cantidad de azufre de 1,5 pph a 2,5 pph, se puede ver en la **figura 17 (b)** que el aumento de esta cantidad supera la influencia del aceite de parafina, y la influencia impartida por el plastificante tiene un efecto creciente sobre el bronceado δ .



(a)

Figura 17 (a). Influencia del contenido de aceite de parafina en $\tan \delta$ para una mezcla con 1,5 pph.



(b)

Figura 17 (b). Influencia del contenido de aceite de parafina en $\tan \delta$ para una mezcla con 2,5 pph de azufre.

Aunque la tendencia creciente y decreciente del aceite de parafina sobre el bronceado δ son visibles, es importante señalar que este material, en comparación con los demás aditivos, tiene una influencia mínima en el $\tan \delta$.



SU SUPLIDOR GLOBAL DE MATERIAS PRIMAS Y ESPECIALIDADES QUÍMICAS

OFICINA COMERCIAL

Obarrio, calle 54 y Av. Samuel Lewis.
Atrium Tower, piso 27, oficina 28, Panamá.

contact@eagercentury.com
marketing.int@eagercentury.com
www.eagercentury.com



RUBBERSIL®

Sílicas precipitadas

Cargas blancas reforzantes que proporcionan excelente desempeño y procesamiento para artículos técnicos y mecánicos de caucho, neumáticos, caucho EVA, suelas de calzado traslúcidas y coloreadas, entre otros.

OFICINAS DE MERCADEO Y VENTAS

Glassven, C.A.

Calle Las Rosas, No. 24,
Zona Industrial Soco, La Victoria,
Aragua (2121), Venezuela.

Tel: (+58-244) 3223747 / 3212353
Fax: (+58-244) 3223607
E-mail: mercadeo.int@glassven.com
LATAM: mercadeo.reg@glassven.com
APAC: contactus@glassven.com
www.glassven.com

Glassven Yangzhong Additives J.V. Ltd.

Xing Wang Xi Road No. 30, Youfang
Town, Yangzhong City, Jiangsu Province,
China (212216).

Tel: +86-511-88527006
Fax: +86-511-88525966



Como se observa en la **figura 5**, el mapa de calor muestra claramente que el contenido de aceite de parafina tiene un valor de -0,093 en cuanto al nivel de significación, en comparación con el azufre, que tiene un valor de -0,8. Como ya se ha mencionado, a medida que los valores alcanzan el -1 o el 1, el nivel de significación es mayor que un valor cercano a cero.

Además, el aceite de parafina tuvo un efecto decreciente en la dureza del material, como se observa en la **figura 18**, donde cada tono de gris especifica una cantidad diferente de este aceite dentro de la mezcla. ■

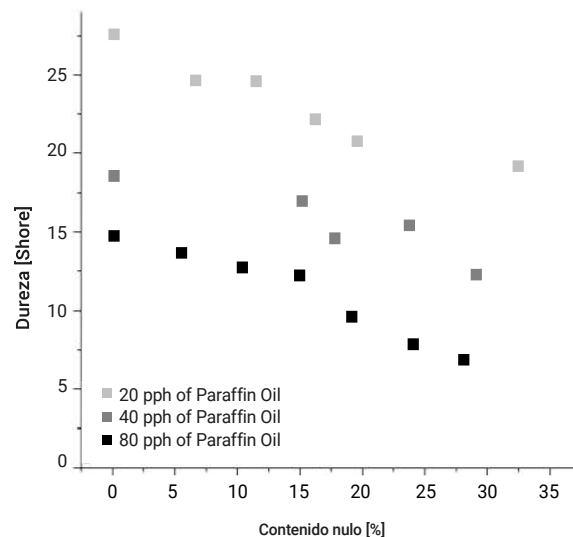


Figura 18. Influencia del contenido de aceite de parafina en la dureza.

Engine Corporation

Hilado poliéster

Telas corp

Látex

Caucho

Nylon

Telas ep

Hilado poliéster (alta tenacidad)

www.hmls.com.ar
 +54 911 5035 | +598 99 614 994
sergio@hmls.com.ar | [diegogiucchi@gmail.com](mailto:diegogiucchi@hmls.com)
 Montevideo, Uruguay.

