

Caracterización de un material hiperelástico sometido a pruebas de compresión utilizando Abaqus



Colaboración

Ulises Augusto Jaen Rendon; Dariusz Szwedowicz; Miguel Alberto Domínguez Gurría, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Fecha de recepción: 14 de agosto de 2021

Fecha de aceptación: 05 de diciembre de 2021

RESUMEN: En el siguiente trabajo se presenta, la caracterización de un material hiperelástico sometido a compresión, con respecto a la norma internacional. Los modelos constitutivos son de gran importancia cuando se trabaja con elastómeros, debido a que estos ofrecen resultados que se adaptan mejor a las características que presentan los elastómeros. El neopreno cuenta con propiedades mecánicas que lo hacen un material apto para su uso en estructuras, mecanismos y demás usos tiene una densidad relativa de 1,068 (absoluta de 1,068 mg/ml), por lo que mediante modelos numéricos y experimentación con probetas estandarizadas conforme a la norma ASTM D395-03, se confirmó que para el neopreno en modelos a compresión es recomendable usar el modelo Polinomial y Polinomial Reducido de 2do. orden para un rango de deformación a compresión de 0 al 30%. El modelado por FEM permite la verificación de las estructuras y materiales, por lo que, en la etapa del diseño de modificaciones en geometría permite el ahorro de tiempos así como costos asociados a los cambios en procesos de producción.

PALABRAS CLAVE: Análisis Numérico, Elemento Finito, Elastómeros, Neopreno.

ABSTRACT: In this work, the characterization of a hyperelastic material subjected to compression tests is presented, using international standardization as reference. Constitutive models are essential when working with elastomers, due to its reliability on predicting the mechanical behavior of these materials. Neoprene has a mechanical performance that make it appropriate for its use in structures, mechanisms and some others potential applications. Based on numerical models and tests standardized according to ASTM D395-03 standard, as well as considering that the relative density of neoprene is 1,068 (absolute density of 1,068 mg/ml), it was demonstrated that the polynomial and second order reduced polynomial models fit on modeling the compressive behavior of neoprene, within a strain range between 0 and 30%. FEM analysis is employed for verification of the structures and materials, thus, when designing geometrical modifications, FEM reduces time and costs linked to changes during production processes.

KEYWORDS: Numerical analysis, Finite Element, Elastomer, Neoprene.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el uso de materiales alternos a los metales como el caso de los elastómeros está en incremento, puesto que, para algunas aplicaciones tienen mejores características que el acero, como es el caso particular en el control de vibraciones mecánicas e impacto.

La principal característica de un elastómero es la capacidad de presentar grandes deformaciones y al ser descargado regresar a su estado inicial, fenómeno al cual se le denomina hiperelasticidad [1].

El aumento del uso de los elementos elastoméricos hace indispensable el conocimiento de su comportamiento mecánico para el aprovechamiento de sus características.

El desarrollo del procedimiento presentado advierte las consideraciones que deben ser tomadas en cuenta en la simulación numérica de materiales hiperelásticos, con el objetivo de obtener resultados cercanos y congruentes a la realidad. El presente estudio se limitó a los modelos constitutivos disponibles dentro de la paquetería de elementos finitos (Abaqus) [2].

Glosario

$W(E)$	Energía de deformación
S	Medida de esfuerzo (Piola-Kirchoff)
E	Medida de deformación (Green)
I_1, I_2, I_3	Invariantes del tensor de deformación
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	Alargamientos principales
N	Orden de la función de energía
C_{ijk}	Constantes del material (Experimental)
J^{el}	Es la razón de cambio de volumen
D_i	Constantes del material (Experimental)
W_{dev}	Componente deviatorica de la función de energía
W_{vol}	Componente volumétrica de la función de energía
α_i, μ_i	Constantes del material

Modelos constitutivos

A diferencia de otros materiales cuyo comportamiento mecánico puede ser descrito a partir de las constantes elásticas, las gomas presentan otras características no lineales como viscoelasticidad y ablandamiento del material.

Los modelos constitutivos permiten describir el comportamiento elástico no lineal de los elastómeros. En el desarrollo de tales modelos se supone un comportamiento elástico, isotrópico además de incompresibilidad del material. La hiperelasticidad se puede expresar en términos de la energía potencial de deformación $W(E)$, la cual describe la cantidad de energía de deformación almacenada por unidad de volumen bajo un estado de deformación dado como se muestra en la ecuación (1) [3].

$$W = W(E) \text{ tal que } S = \frac{\partial W(E)}{\partial E} \quad \text{Ec (1)}$$

De acuerdo a la teoría de Rivlin [4], la función de densidad de energía de deformación se puede expresar en términos de las invariantes de deformación (ver ecuación 2):

$$W = f(I_1, I_2, I_3) \quad \text{Ec (2)}$$

En las ecuaciones (3), (4) y (5) presentan las invariantes de deformación se expresan en función de los alargamientos principales [5].

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad \text{Ec (3)}$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \quad \text{Ec (4)}$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad \text{Ec (5)}$$

De esta forma la ecuación (6) se expresa de la siguiente forma:

$$W = \sum_{i+j+k=1}^N C_{ijk} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j (I_3 - 3)^k \quad \text{Ec (6)}$$

Considerando que la goma es cercana a la incompresibilidad, se obtiene la ecuación (7), siendo esta la forma general del modelo de Rivlin para el caso de incompresibilidad [4].

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad \text{Ec (7)}$$

Las constantes se obtuvieron mediante ensayos experimentales. A partir de la ecuación 6 se han desarrollado diversos modelos constitutivos basados en la primera y segunda invariante de deformación. A continuación, se describen de forma general algunos modelos básicos.

Forma Polinomial

La forma polinomial es un modelo basado en la primera y segunda invariante del tensor deviatorico de Cauchy-Green, y ha servido de base para el desarrollo de nuevos modelos constitutivos. Se define a partir de la ecuación (8) [6]:

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ijk} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i+j=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 3)^{2i} \quad \text{Ec (8)}$$

La ecuación (8) es aplicable para pequeñas deformaciones y deformaciones nominales menores al 300%.

Modelo de Marlow

El modelo de Marlow es dependiente de la primera invariante de deformación, se emplea cuando los datos experimentales disponibles son limitados. Este modelo (ver ecuación 9) reproduce exactamente los datos experimentales para un modo de deformación específico [7].

$$W = W_{dev}(\bar{I}_1) + W_{vol}(J^{el}) \quad \text{Ec (9)}$$

Modelo de Odgen

El modelo de Odgen utiliza los alargamientos principales en lugar de las invariantes de deformación [8], mediante la ecuación (10):

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad \text{Ec (10)}$$

Este modelo presenta una correcta respuesta en casos de grandes deformaciones. Una de sus restricciones es que no se debe utilizar cuando existen datos experimentales limitados [6].

Ensayos Experimentales

Las constantes del material presentes en las ecuaciones de los modelos hiperelásticos son obtenidas a partir de ensayos experimentales. En la Figura 1 se muestran ejemplos de las curvas de comportamiento de la tensión uniaxial, tensión biaxial y esfuerzos cortantes [9].

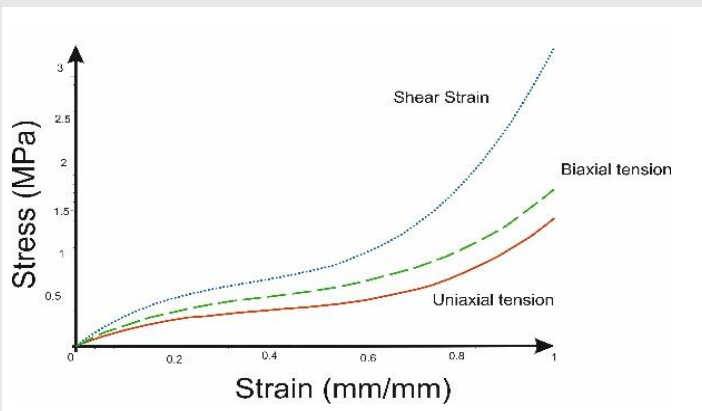


Figura 1. Ejemplo de la respuesta de las gomas frente a diversos ensayos [9].

Para la obtención de las propiedades mecánicas del material a utilizar (neopreno) se realiza una prueba a carga cíclica utilizando una máquina de ensayos universales Shimadzu AG-X plus 100kN. La Figura 2 (a) muestra las dimensiones de la probeta estandarizada con base en la especificación de la norma ASTM D395-03 [10], la cual requiere un cilindro de 29.0 ± 0.5 mm de diámetro y una altura de 12.5 ± 0.5 mm a una velocidad de 0.05 kN/s hasta una deformación del 30%. La Figura 2 (b) presenta el montaje de la probeta estandarizada entre los platos de compresión (accesorios de la máquina universal). La prueba consistió en colocar una probeta cilíndrica entre dos placas, teniendo un desplazamiento a una velocidad constante de 50 N/s hasta una deformación del 30% [11].

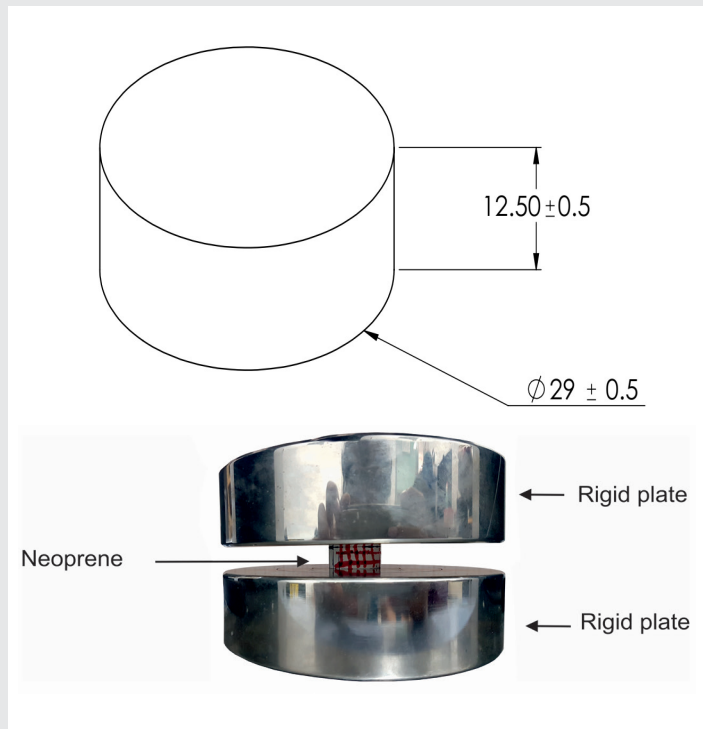


Figura 2. Prueba experimental a compresión, donde: a) Dimensiones de la probeta estandarizada y b) Montaje de la probeta entre los platos de compresión [11]

La Figura 3 muestra la curva esfuerzo-deformación obtenida de la prueba cíclica a compresión, bajo las especificaciones de la norma ASTM D395-03 [10]. Se observa el comportamiento del elastómero a la prueba de 10 ciclos, donde a partir del segundo ciclo se presenta el efecto Mullins, lo cual muestra una reducción el área bajo la curva del ciclo [12].

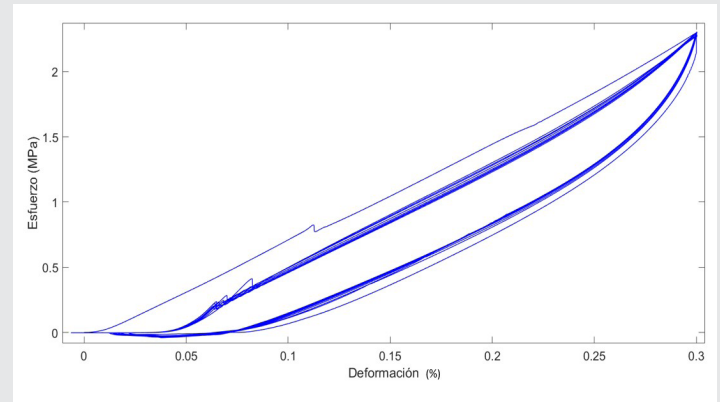


Figura 3. Gráfica Esfuerzo-Deformación de prueba cíclica a compresión

Coefficientes reológicos

La Figura 4 muestra la gráfica de la mitad del primer ciclo, la cual representa la fase de compresión del elemento, esto debido a que todas las pruebas que se hacen son solo a compresión y no de forma cíclica, por lo que no es necesario tomar los datos cuando la fuerza es estable debido al efecto Mullins [12].

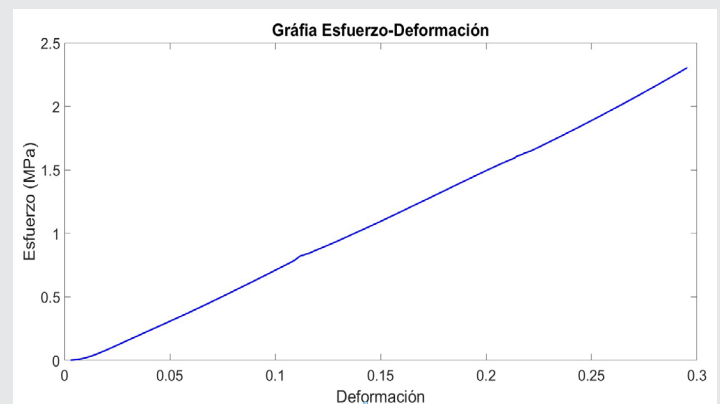


Figura 4. Fase de compresión del elemento de neopreno

Los datos de la gráfica de esfuerzo-deformación se importaron al software Abaqus/Explicit para la evaluación del material con los diferentes modelos constitutivos.

En la Figura 5 se muestran las gráficas comparativas con los modelos constitutivos y los valores experimentales. En los detalles a, b y c se puede observar cómo se comportan los modelos a lo largo de la gráfica.

como se asemejan los dos modelos constitutivos con los datos experimentales.

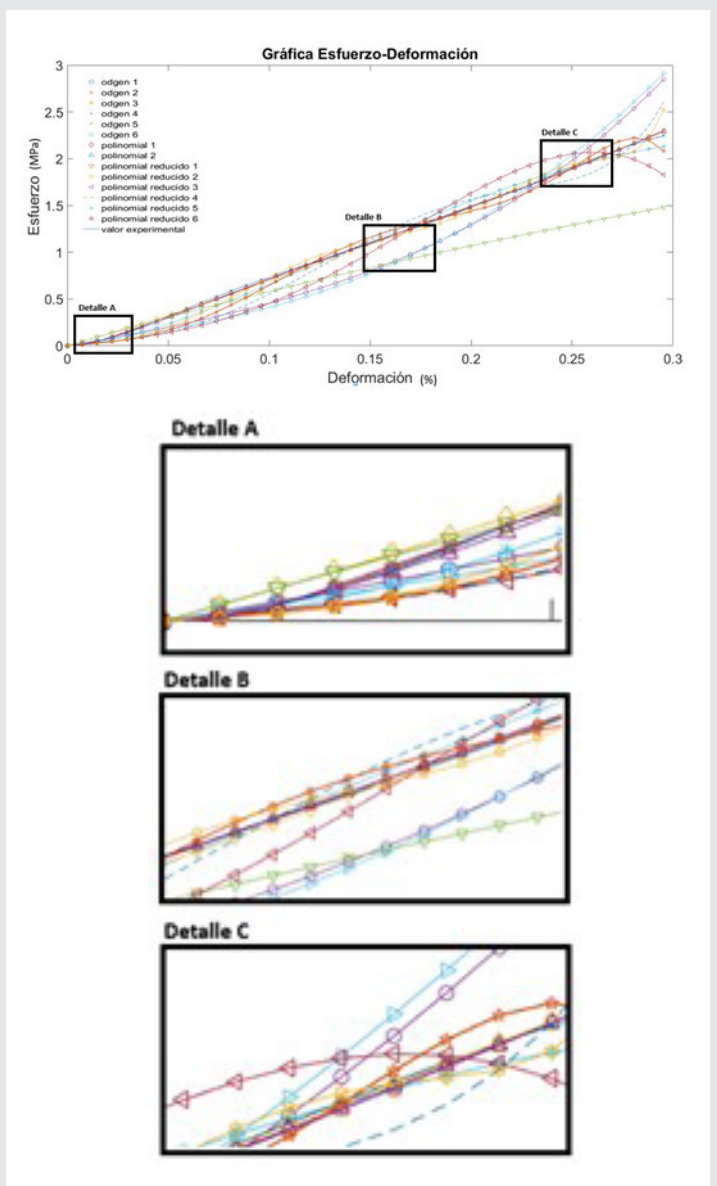


Figura 5. Comparación de modelos constitutivos y prueba experimental

Tras la evaluación de la Figura 5 se evaluaron las gráficas comparando su aproximación con los datos experimentales. En el detalle "A" se observa los modelos tienen un comportamiento inicial similar, en el detalle "B" situado en medio de la prueba a una deformación del 15% aquí se observa como los diversos modelos se dispersan y se hace más notoria la diferencia entre cada uno, por otro lado, en el detalle "C" se dispersan más a partir del 25% de deformación. Debido a que no todos los modelos constitutivos se adecuan al comportamiento de los materiales elastómericos, se seleccionó para el neopreno si hay una aproximación de los comportamientos comportamiento, dejando el modelo de Ogden de 6to. orden y el polinomial de 2do grado como se muestra en la Figura 6 en este caso se escogió el modelo polinomial para modelar la probeta Cuando es hasta el 30% se aproxima mejor con Ogden y polinomial. En los detalles de la figura 6 se muestra

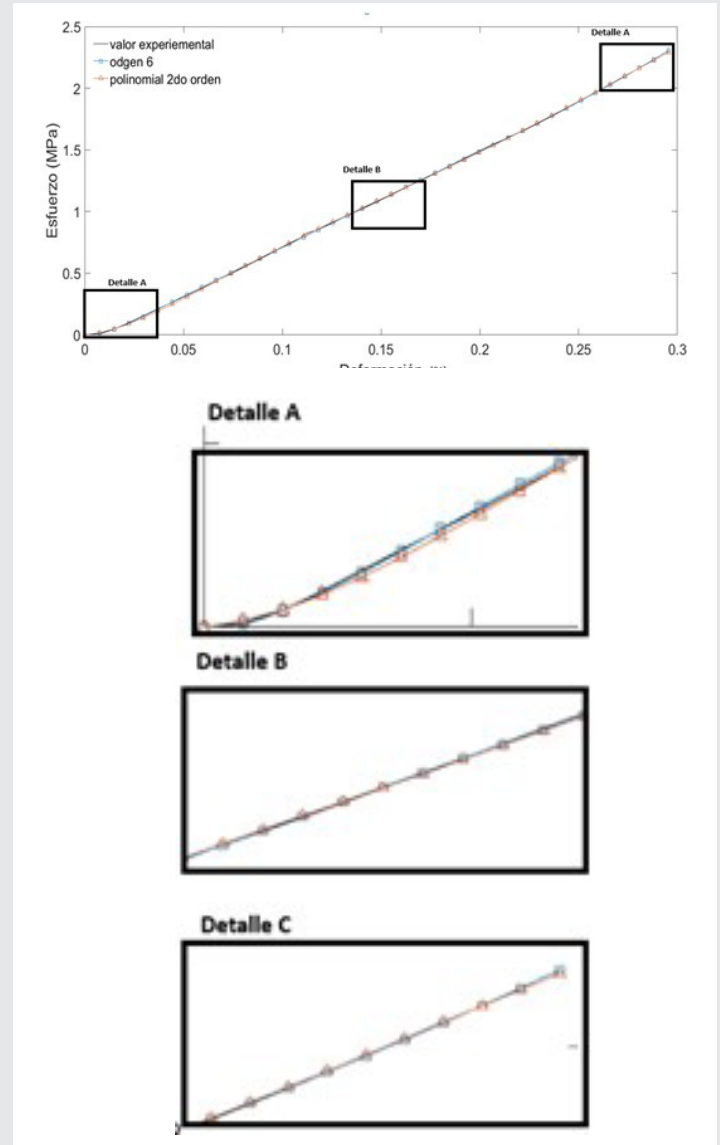


Figura 6. Comparación de modelos próximos al valor experimental

Abaqus permite obtener las constantes de los modelos hiperelásticos a partir de los datos experimentales agregados [13]. Esto permite tener una aproximación para representar el comportamiento hiperelástico del material, esto facilita la reproducción de los modelos con dicho material.

En la Tabla 1, se muestran las constantes para los modelos de Ogden de 6to. orden, polinomial de 2do. grado y polinomial reducido de 2do. grado. Los modelos polinomiales tienen una aproximación similar diferenciándose en que el modelo polinomial reducido en las ecuaciones características no considera la volumetría, dando por igual resultados aproximados a los datos experimentales.

Tabla 1. Constantes de modelos constitutivos

Modelo		Polinomial 2do orden	
D1=0.00000000	C10= 25.1267903	C01=-24.8977144	
D2=0.00000000	C20=-180.362444	C11=478.163660 C02=-330.986926	

Modelo		Ogden 6to orden	
I	MU_I	ALPHA_I	D_I
1	19980.0632	-1.53015512	0.00000000
2	-12463.3277	1.25388094	0.00000000
3	2490.09473	4.25655446	0.00000000
4	-33413.1312	-6.65045249	0.00000000
5	34466.6852	-9.06608360	0.00000000
6	11060.5044	-11.4171028	0.00000000

Modelo		Polinomial reducido 2do orden	
D1=0.00000000	C10= 0.556644823	C01=-0.00000000	
D2=0.00000000	C20=3.43641517	C11=0.00000000 C02=0.00000000	

Modelos numéricos

Al obtener las constantes de los modelos constitutivos se realizó un modelo numérico para analizar que la simulación correspondiera a los experimentos. Figura 7. Una es ver la deformación presentada en ambos casos, así como una comparación de las gráficas de esfuerzo deformación.

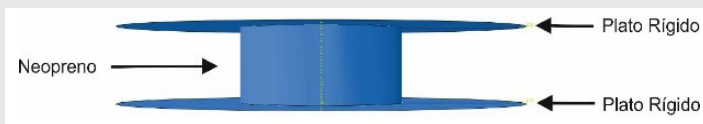


Figura 7. Elementos del modelo discreto

Para el cilindro con propiedades del neopreno cuenta con una malla general de 0.5 mm de tipo C3D4 los platos rígidos cuentan con una malla general de 2 mm y de tipo R3D4 (ver Figura 8). Se consideran los platos de la maquina universal como rígidos, debido a que la deformación que habrá en ellos con respecto a la probeta de neopreno será casi nula y para este caso no se requiere la información de los platos, además que el tiempo de simulación disminuye considerablemente. Las condiciones de frontera se aprecian en la Figura 9, donde el plato rígido inferior se queda fijo mientras que el superior baja por 5 mm, teniendo contacto la probeta con los platos rígidos un coeficiente de fricción de $\mu=0.7$.

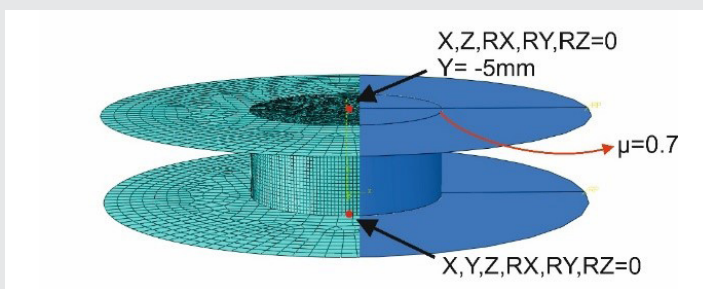


Figura 8. Mallado de piezas del modelo discreto y las condiciones de frontera

Con los resultados obtenidos del modelo numérico como se muestra en la Figura 9, se compararon con los resultados experimentales, lo que da una diferencia menor al 15 % entre cada uno de los resultados. Al ser

una diferencia mínima se puede dar como validado el modelo.

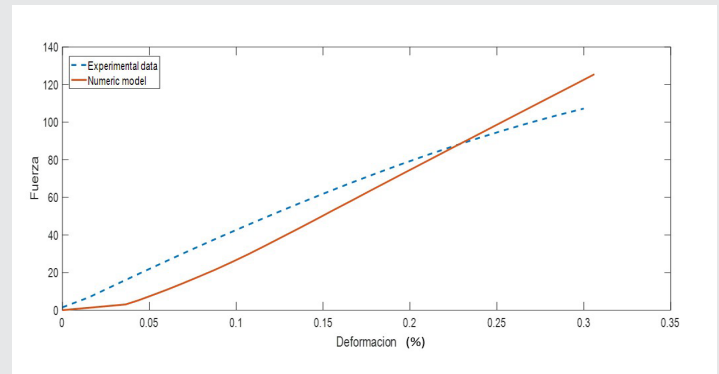


Figura 9. Comparación de resultados experimentales y numéricos del modelo polinomial reducido de 2do orden

Aplicación

El uso de un elemento de neopreno, depende en gran medida de la geometría del elemento y de la aplicación que se necesite puesto que es versátil. Por esta razón es importante tener un modelo adecuado del material, la geometría propuesta es un cilindro con ondulaciones como se muestra en la Figura 11. El elemento ondulado en este caso se aplica para transmitir el torque y como elemento de seguridad de una unión mecánica. Con dicha geometría se comprobará si los datos obtenidos de las probetas siguen siendo válidos aun con el cambio de geometría.

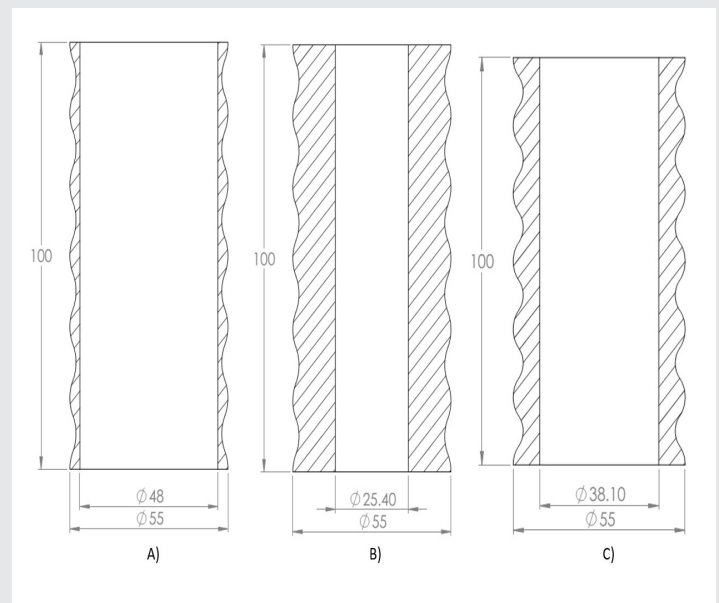


Figura 10. Esquema de probeta cilíndrica de neopreno con ondulaciones

Esta probeta cilíndrica con ondulaciones por su funcionamiento, fue sometida a las mismas pruebas, una compresión de 10 mm durante 10 ciclos obteniendo su gráfica de esfuerzo desplazamiento. En la Figura 11 se muestra la manera en que fue montada la prueba en la máquina universal Shimadzu.

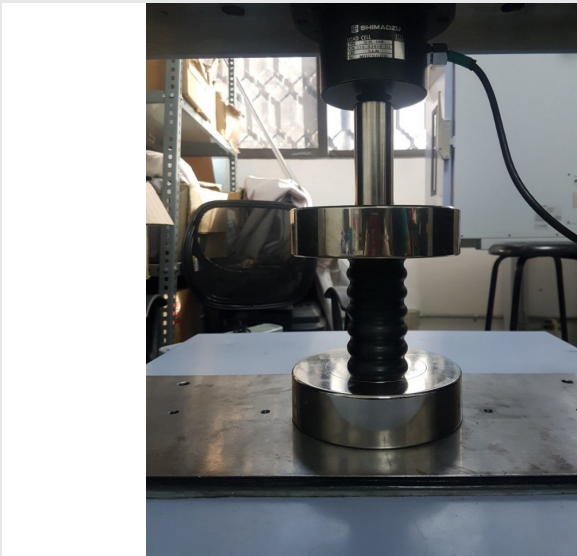


Figura 11. Montaje del cilindro en las placas de máquina universal

En la Figura 12 se muestra la gráfica fuerza-desplazamiento obtenida de la prueba a compresión, donde se puede observar el efecto Mullins. En el primer ciclo la fuerza de compresión es mayor y cada ciclo se reduce hasta estabilizarse después de 5 ciclos.

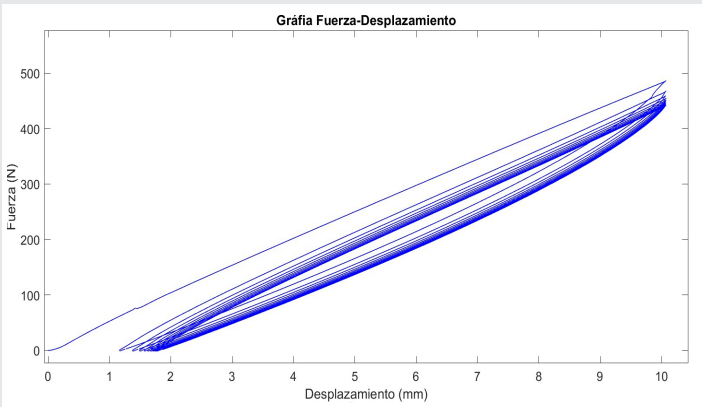


Figura 12. Fuerza para prueba cíclica de compresión del elemento ondulatorio

Con los datos obtenidos a partir de la caracterización del neopreno se realizó un modelo discreto con la geometría de los elementos ondulatorios. Tomando la compresión del primer ciclo se compararon de los resultados de dos pruebas experimentales y la del modelo discreto, esto con la finalidad de corroborar que los datos de la caracterización tengan resultados aproximados a los de la prueba experimental. El modelo numérico cuenta con las mismas condiciones de frontera que la parte experimental en la Figura 13 a) se muestra las condiciones de frontera y malla tipo C3D8R para el cilindro con ondulaciones y de tipo R3D4 para los platos rígidos, en la Figura 13 b) se muestra los esfuerzos que presenta el cilindro con ondulaciones observando la distribución uniforme y simétrica en el elemento.

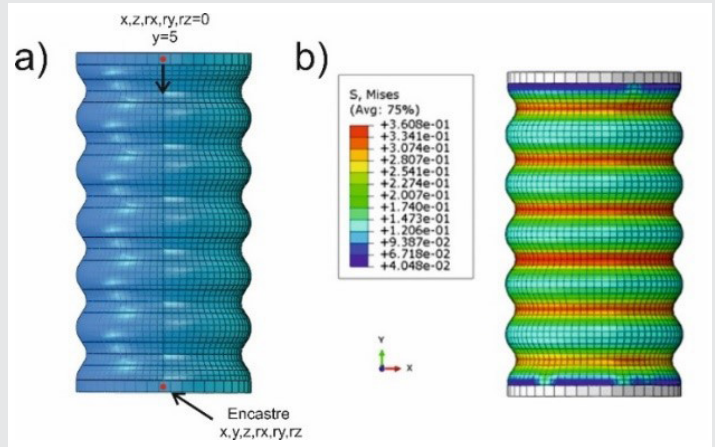


Figura 13. Elemento ondulatorio donde: a) son condiciones de frontera y malla, b) distribución de esfuerzos

En la Figura 14 se muestra una comparación de las gráficas Fuerza Desplazamiento de las pruebas experimentales y el análisis numérico, dando como resultado menos del 6% de diferencia entre ambas gráficas. Que pasas cuando se hacen las pruebas de compresión en ondulosos.

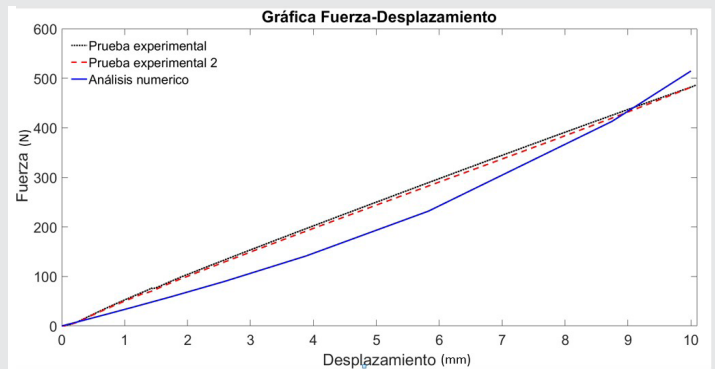


Figura 14. Gráfica comparación de resultados experimentales y numérico

Con la validación del material en diversas geometrías se puede hacer un cambio de parámetros y condiciones de frontera. El uso del cilindro con ondulaciones en el uso de un fusible mecánico que limitara el torque de transmisión según la precarga que a este se le someta. Como ejemplo se puede observar en la Figura 15 una banda transportadora por la cual está siendo transportada diversas cargas y el cilindro con ondulaciones está montado entre la polea y el eje secundario y opcionalmente entre el eje secundario y el rodillo de la banda. En el corte A-A de la Figura 15 se puede observar una vista amplia de la polea con el montaje del cilindro con ondulaciones.

Si la carga es mayor a la precarga dada ocurrirían deslizamientos, por lo que dejará de transmitirse la potencia de la parte motriz a la secundaria, así evitando sobrecargas, calentamiento en el motor y otros problemas ocasionados con líneas de producción o daños en usuarios.

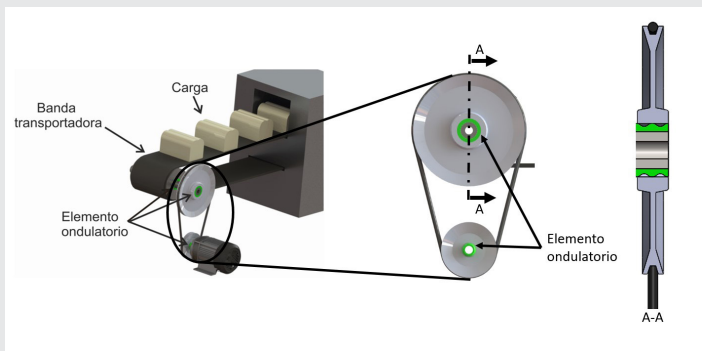


Figura 15. Ejemplo de uso del cilindro con ondulaciones

CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó los modelos constitutivos integrados en el software Abaqus para la descripción del comportamiento mecánico de los elastómeros bajo cargas de compresión.

De acuerdo a los resultados presentados, modelos de segundo orden, tales como el modelo polinomial y el polinomial reducido presentan mayor proximidad a los resultados de la prueba experimental a compresión.

Obteniendo el modelo constitutivo que represente el comportamiento mecánico del elastómero se procede al cambio de geometría del elemento el cual seguirá siendo representado por el mismo modelo hiperelástico.

El modelado con la probeta cilíndrica con ondulaciones permitió obtener resultados numéricos, aproximados a los resultados experimentales de las pruebas de compresión cuasiestática del cilindro con ondulaciones.

Con la verificación de la estructura modelada por FEM es correcta, se pueden esperar que las modificaciones de la estructura reflejen correctamente los cambios de resistencia, rigidez, etc.

El modelado por FEM permite la verificación de las estructuras y materiales, por lo que, en la etapa del diseño de modificaciones en geometría permite el ahorro de tiempos y costos asociados a los cambios en procesos de producción.

El cilindro con ondulaciones da un cambio de rigidez con respecto a un cilindro liso, por lo que los usos con ondulaciones son de mayor provecho en la industria que si fura liso.

El rango de compresión del cilindro con ondulatorio está en el rango de deformación del 10% como se observa en la figura 14, por lo que está en el rango de aplicación del modelo polinomial reducido.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Franta. (1989). *Elastomers and Rubber Compounding Materials*. 607

[2] Borah, B. (2020). *Finite Element Modelling of Confined Masonry Wall under In-plane Cyclic Load*. *International Conference on Materials, Mechanics and Structures (ICMMS2020)*, July 14-15, 2020, on Google Meet, Organized by National Institute of Technology (NIT) Calicut, Kerala, India

[3] Jarosław, R., Marlena, R., 2010, "The Methodology of the Analysis of Elastomer Bearings Properties", Slovakia

[4] Rivlin R.S., 1948, "Large Deformations of isotropic materials, IV. Further Developments of the general theory". *Phil. Trans. R. Soc. United States*

[5] Austrell, 1997, "Modeling of elasticity and damping for filled elastomers", PhD Thesis, Lund University, Sweden

[6] Minglei Ju, Hamdi Jmal, Raphaël Dupuis, Evelyne Aubry, 2014 "A comparison among Polynomial model, Reduced polynomial model and Ogden model for polyurethane foam". *Advanced Materials Research, Trans Tech Publications, Material Science and Engineering Technology II*, p.169

[7] Tobajas, R., Elduque, D., Javierre, C., Ibarz, E., Gracia, L., 2016, "A Comparative Study of Hyperelastic Constitutive Models for an Automotive Material". *Proceedings of the European Modeling and Simulation Symposium*, 338-347

[8] Ogden, R.W., 1972. "Large deformation isotropic elasticity-on the correlation of theory and experiment for incompressible rubberlike solids". *Proc. R. Soc. Lond. A, United States*

[9] Garcia, M. Ruiz, C., 2005, "Hyperelastic Material Modeling", *Reporte Técnico, Univeridad EAFIT, Colombia*

[10] International, A. (25 de 08 de 2020). *ASTM D395 - 03*. Obtenido de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D395-03.htm>

[11] Fediuc, D. O., Budescu, M., Fediuc, V., & Venghiac, V.-M. (2013). *Compression Modulus of Elastomers*. *The Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy*, 62(Lxiii), 157-166

[12] Wu, C., & Chiou, Y. (2019). *Stress-Strain Response of Cylindrical Rubber Fender*. <https://doi.org/10.3390/ma12020282>

[13] Smith, M. (2009). *ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.9*. Dassault Systèmes Simulia Corp.