



International Multidisciplinary Congress of Engineering CONIMI

Booklets



RENIECYT - LATINDEX - Research Gate - DULCINEA - CLASE - Sudoc - HISPANA - SHERPA UNIVERSIA - Google Scholar DOI - REDIB - Mendeley - DIALNET - ROAD - ORCID - V|LEX

Title: Design and Mechanical Analysis of TPU Bushings Using Additive Manufacturing and the Finite Element Method

Authors: Contreras-Chávez, Axel A., Villagómez-Moreno, José, Manríquez-Padilla, Carlos G. and Pérez-Cruz, Ángel

Editorial label ECORFAN: 607-8948

BCONIMI Control Number: 2024-01

BCONIMI Classification (2024): 250924-0001

RNA: 03-2010-032610115700-14

Pages: 28

Universidad Autónoma de Querétaro LTF-7342-2024 0009-0000-7834-8873 1345044
 Universidad Autónoma de Querétaro LTY-7778-2024 0000-0001-7044-9282 1035567
 Universidad Autónoma de Querétaro JKH-7361-2023 0000-0003-1332-5173 347939
 Universidad Autónoma de Querétaro AAQ-5139-2021 0000-0001-5320-4064 230815

CONAHCYT classification:

Area: Engineering

Field: Engineering

Discipline: Mechanical Engineering

Subdiscipline: Mechanical Design

ECORFAN-México, S.C.

Park Pedregal Business. 3580,
Anillo Perif., San Jerónimo
Aculco, Álvaro Obregón,
01900 Ciudad de México, CDMX,
Phone: +52 1 55 6159 2296
Skype: MARVID-México S.C.
E-mail: contact@marvid.org
Facebook: MARVID-México S. C.
Twitter: MARVID-México S. C.

www.marvid.org

Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

ÍNDICE

❑ Introducción	3
❑ Generalidades	5
❑ Sistemas de suspensión y bujes	7
❑ Manufactura aditiva	8
❑ Esfuerzos	11
❑ Método por elemento finito	12
❑ Metodología	13
❑ Resultados	18
❑ Conclusiones.....	25
❑ Prospectivas	26
❑ Referencias	27

INTRODUCCIÓN

- ❑ La relación entre el **hombre** y la **máquina** ha impulsado el desarrollo de **tecnologías** clave, siendo el **automóvil** un ejemplo claro. Desde la **Revolución Industrial**, los avances permitieron la creación de los **motores de combustión interna** (MCI), cruciales en la historia del automóvil. Hoy, los automóviles continúan evolucionando, integrando **motores eléctricos** y mejorando su **rendimiento, seguridad y eficiencia**.
- ❑ Uno de los sistemas más relevantes es el de **suspensión**, encargado de absorber las irregularidades del camino y mantener la **estabilidad y confort**. Los **bujes**, elementos vitales en este sistema, permiten flexibilidad, previenen rupturas y protegen el chasis, garantizando **seguridad y maniobrabilidad**.

INTRODUCCIÓN

- ❑ Con el avance de la **ingeniería automotriz** y la evolución de la **manufactura**, surge la **fabricación aditiva** o **impresión 3D** como un factor clave. Según estudios, esta técnica permite **reducir costos** y **tiempos** en la producción, ofreciendo mayor flexibilidad y capacidad para geometrías complejas. Esto es esencial en la producción de piezas como los **bujes**, donde una rápida respuesta ante la **escasez de refacciones** es crítica.
- ❑ En conclusión, la **manufactura aditiva** optimiza procesos y brinda soluciones innovadoras al sector automotriz. Para desarrollar un **buje** resistente y con un **factor de seguridad mayor a 2**, el uso del **método de elementos finitos** será fundamental para calcular los esfuerzos y garantizar su desempeño bajo **cargas exigentes**.

GENERALIDADES

- ❑ La llegada de la **Industria 4.0** ha revolucionado la **industria automotriz**, destacando la **manufactura aditiva (MA)** como una de las tecnologías más importantes. Tradicionalmente, los componentes se producían con procesos **sustractivos**, generando desperdicios. La **MA**, en cambio, optimiza **recursos** y reduce los **tiempos de fabricación** (Dilberoglu et al., 2017; Haleem & Javaid, 2019).
- ❑ Aunque enfrenta desafíos en costos y **resistencia de materiales**, su uso en **metales** y otros materiales innovadores ofrece **ventajas** significativas. Los **polímeros elastómeros**, como el **caucho de nitrilo** y el **poliuretano**, se utilizan en sistemas de suspensión y sellado de combustibles debido a su **resistencia** y capacidad de absorber impactos (Ramos, 2018; Lewitzke & Lee, 2001).



Figura 1 Horquilla de cuatrimoto con los bujes de interés.

GENERALIDADES

Estudios sobre **bujes elastómeros** han mostrado comportamientos **no lineales** bajo esfuerzos torsionales y de deflexión (Kadlowec et al., 2009). El uso de **simulaciones por el método de elementos finitos (MEF)** ha mejorado la precisión en la predicción de su comportamiento, aunque no siempre coincide con los resultados experimentales (Elango et al., 2022).

La **escasez de piezas automotrices** ha incrementado los tiempos de espera, afectando la industria desde 2020 (Torres, 2022; Navarrete, 2022). La **MA** surge como una solución para producir rápidamente componentes críticos y aquellos fuera de producción. La combinación de **MA** y **MEF** optimiza el diseño de los bujes, mejorando su **durabilidad** y reduciendo los **costos** y tiempos de producción.



Figura 2 Forma de los Bujes de acuerdo a la aplicación (NAVCAR®, 2023)

SISTEMAS DE SUSPENSIÓN Y BUJES

□ El **sistema de suspensión** reduce los impactos del camino mediante componentes como **resortes**, **amortiguadores** y **bujes** (Arellano et al., 2016). Los **bujes**, ubicados en las uniones del sistema de suspensión y el **chasis**, absorben energía y permiten movimiento sin comprometer la **rigidez** del sistema, evitando la rotura de componentes y reduciendo el **ruido** y las **vibraciones** (Ortega, 2022). Fabricados con goma o **materiales sintéticos**, mejoran la **durabilidad** y previenen la **fricción**.

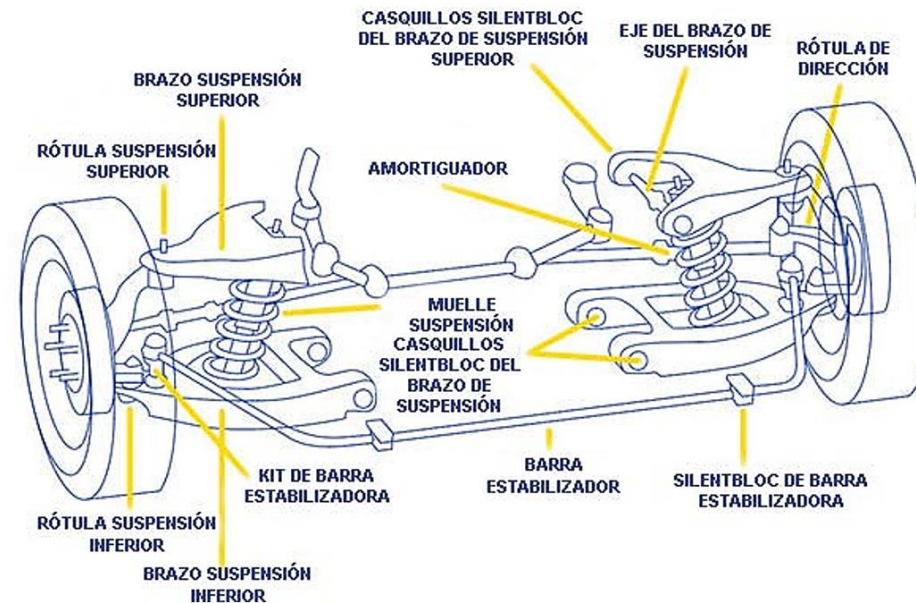


Figura 3 Principales componentes del sistema de suspensión y dirección (MOOG®, 2023).

MANUFACTURA ADITIVA

❑ La **manufactura aditiva (MA)** o **impresión 3D** se define como el conjunto de tecnologías que crean objetos mediante la **adición de material** capa por capa (ISO/ASTM 52900-2015; Costa, 2019). La técnica de **extrusión de material**, conocida como **FFF** o **FDM**, es el método más común, usado ampliamente en **impresoras de escritorio**. Este proceso requiere tres ejes de movimiento y un material que fluya a través de una boquilla, permitiendo la construcción de objetos tridimensionales.

❑ En este caso, se empleará la **impresora Dremel DigiLab 3D45** (ver **Figura 2**), que utiliza esta tecnología. Tiene un extrusor que alcanza hasta **280 °C** y es compatible con **PLA**, **nailon** y **ABS ecológico**, con una resolución de capa de entre **50 y 100 micras** y un volumen de impresión de **25,5 x 15,5 x 17 cm**.



Figura 4 Dremel DigiLab 3D45
(Dremel®, 2023).

MANUFACTURA ADITIVA

□ Todas las muestras de prueba se imprimieron bajo las siguientes condiciones:

- Temperatura de la boquilla = 225 °C
- Velocidad de impresión = 30 mm/s
- Temperatura de la placa de construcción = 30 mm/s
- Temperatura de la placa de construcción = 30 °C
- Relleno = 100%



Figura 5 Bujes impresos.

MANUFACTURA ADITIVA

El filamento que será empleado para la fabricación de los bujes es el PolyFlex™ TPU95 (ver Figura 3).



Figura 6 PolyFlex TPU95 (Polymaker™, 2023).

Tabla 1 Condiciones de impresión recomendadas basado en boquilla de 0.4 mm.

Parámetro	
Temperatura de la boquilla	210 - 230 (°C)
Material de la superficie de construcción	BuildTak®, vidrio, cinta azul
Tratamiento de superficie de construcción	Ninguno, aplicando pegamento PVA a la superficie de construcción
Temperatura de la placa de construcción	25 - 60 (°C)
Ventilador	Encendido
Velocidad de impresión	20-40 (mm/s)
Distancia de separación de balsa	0.2 (mm)
Distancia de retracción	1 (mm)
Velocidad de retracción	20 (mm/s)
Temperatura ambiente recomendada	Temperatura ambiente - 45 (°C)
Ángulo de voladizo de umbral	35 (°C)
Material de soporte recomendado	PolySupport™ y PolyDissolve™ S1

ESFUERZOS

- ❑ **Esfuerzo cortante:** se genera cuando se aplican fuerzas transversales opuestas sobre un cuerpo, produciendo un desplazamiento paralelo a la sección transversal del material.
- ❑ **Esfuerzo torsional:** Ocurre cuando un objeto experimenta un momento de torsión que tiende a hacer girar el objeto alrededor de su eje longitudinal.
- ❑ **Factor de seguridad:** Para asegurar la integridad estructural del diseño, se utiliza el factor de seguridad (F.S.), que relaciona el esfuerzo de cedencia con el esfuerzo de diseño.

$$\tau_{prom} = \frac{P}{A}$$

$$\tau_{max} = \frac{Tc}{J}$$

$$F.S. = \frac{\sigma_y}{\sigma_{diseño}}$$

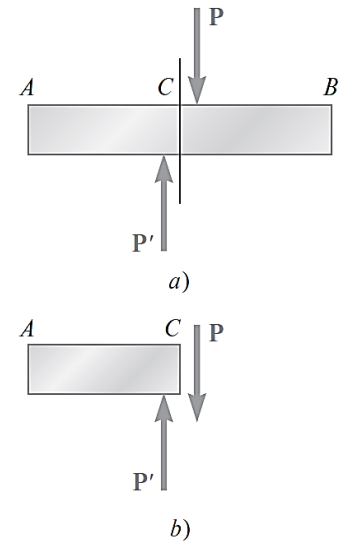


Figura 7 Ilustración de la fuerza cortante resultante en una sección entre fuerzas transversales (Beer et al., 2017).

MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

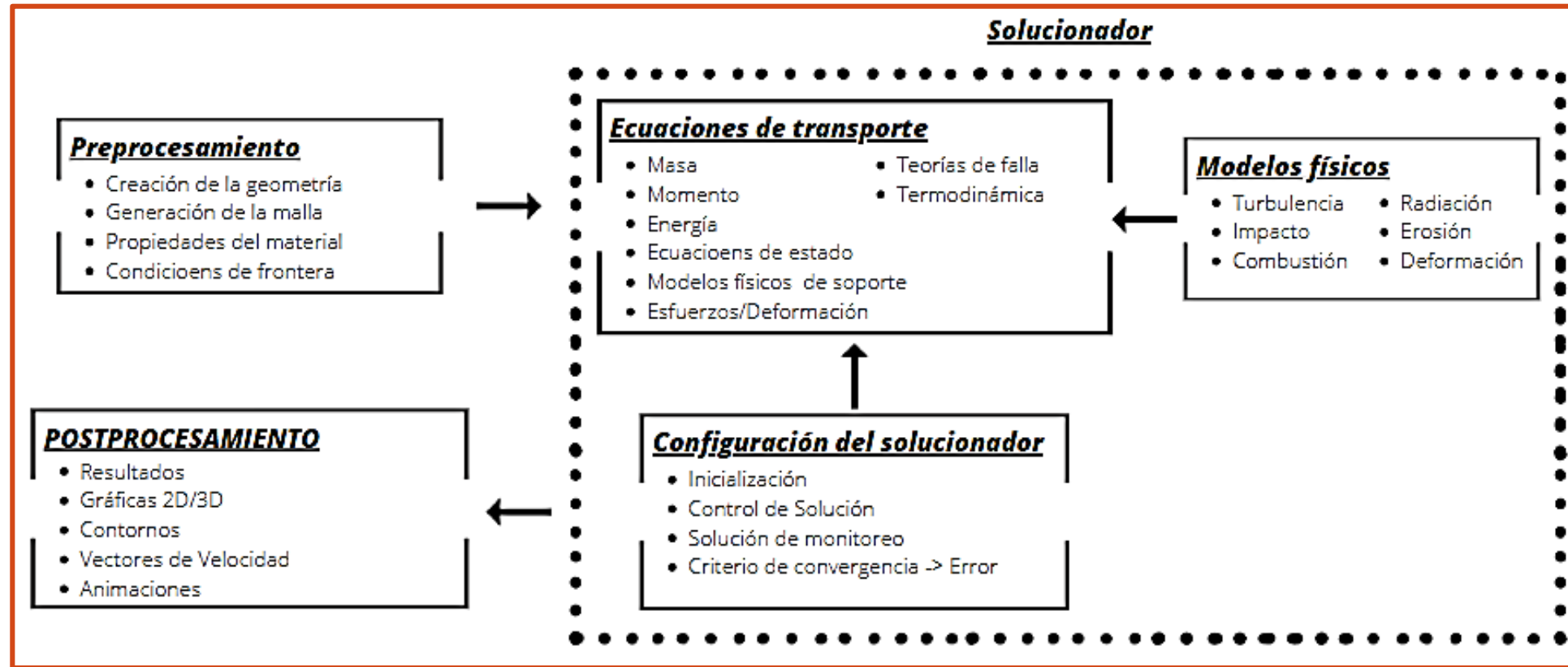


Figura 8 Proceso del análisis de elemento finito.

METODOLOGÍA

Modelado del Buje:



Figura 9 Buje correspondiente a la horquilla de una cuatrimoto.

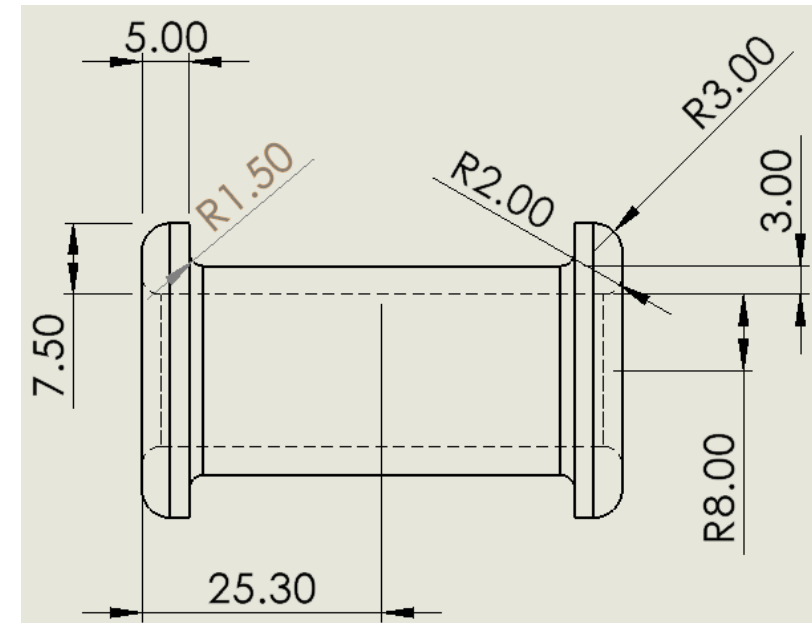


Figura 10 Medidas correspondientes al Buje.

METODOLOGÍA

Propiedades del material:

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Density	7850	kg m ⁻³
3	  Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
5	  Isotropic Elasticity		
6	Derive from	Young's Modu...	
7	Young's Modulus	2E+11	Pa
8	Poisson's Ratio	0.3	
9	Bulk Modulus	1.6667E+11	Pa
10	Shear Modulus	7.6923E+10	Pa
11	  Strain-Life Parameters		
19	  S-N Curve	 Tabular	
23	 Tensile Yield Strength	2.5E+08	Pa
24	 Compressive Yield Strength	2.5E+08	Pa
25	 Tensile Ultimate Strength	4.6E+08	Pa
26	 Compressive Ultimate Strength	0	Pa

Figura 11 Caracterización del TPU realizada en ANSYS.

METODOLOGÍA

Mallado:

- ❑ El mallado se realizará de forma automática con los elementos tetraédricos que el mismo software ofrece por defecto, en este caso se calcularon diferentes números de elementos y nodos, generándose de forma automática 2422 elementos y 4605 nodos.

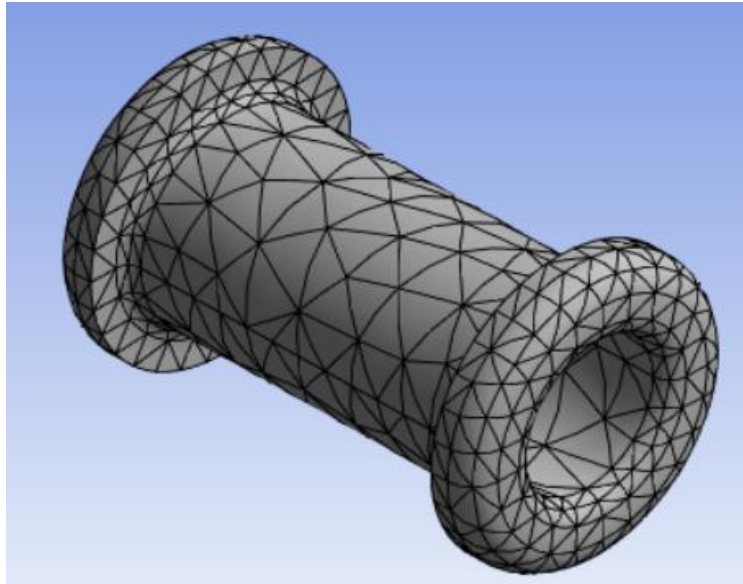


Figura 12 Mallado del Buje de TPU.

METODOLOGÍA

- ❑ El buje estará sometido antes esfuerzos torsionales y cortantes, por lo cual es necesario realizar un análisis estático que recree estos esfuerzos. De acuerdo a una gran variedad de modelos de cuatrimotos de la marca Italika como por ejemplo la ATV200 o ATV150 la capacidad de carga máxima es de 150 kg. Idealmente el peso que carga un vehículo es repartido entre el número de ruedas, al tratarse de una cuatrimoto se asignará un valor de aproximadamente 40 kg de carga en cada rueda en las condiciones de carga máxima.
- ❑ **Esfuerzo Cortante y Torsional:** El primer tipo de esfuerzo que se analizará será ante esfuerzos torsionales, por lo tanto, será necesario calcular el momento torsional que se aplica sobre el buje:

$$F_{carga} = 40 \text{ kg} * 9.81 \frac{m}{s^2} = 392.4 \text{ N}$$

$$M = 392.4 \text{ N} * 0.07343 \text{ m} = 28.8139 \text{ Nm}$$

METODOLOGÍA

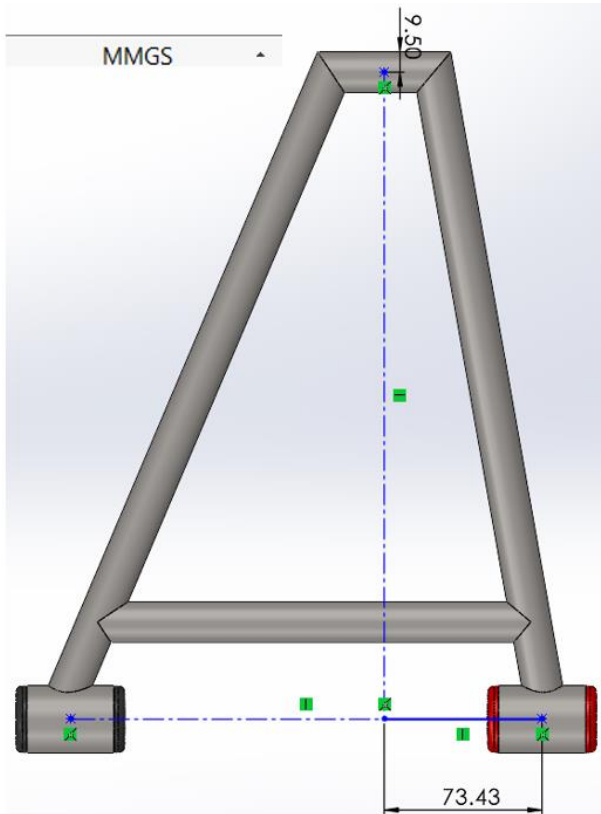


Figura 13 Cálculo de la distancia para obtener el momento.

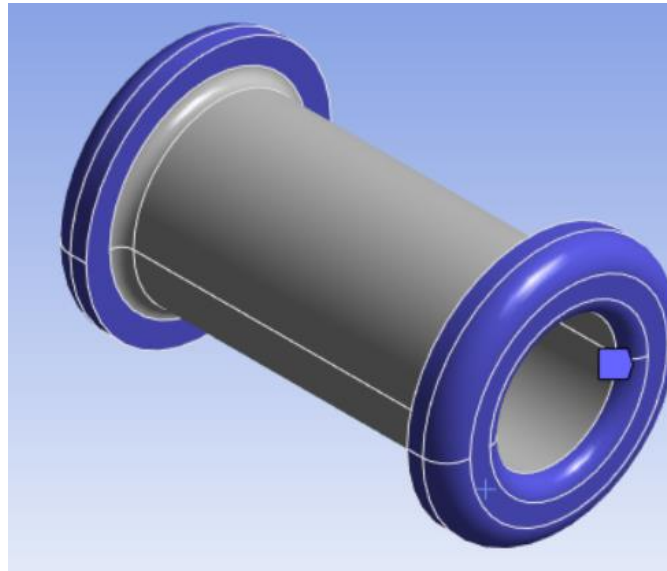


Figura 14 Soportes fijos a los extremos del buje.

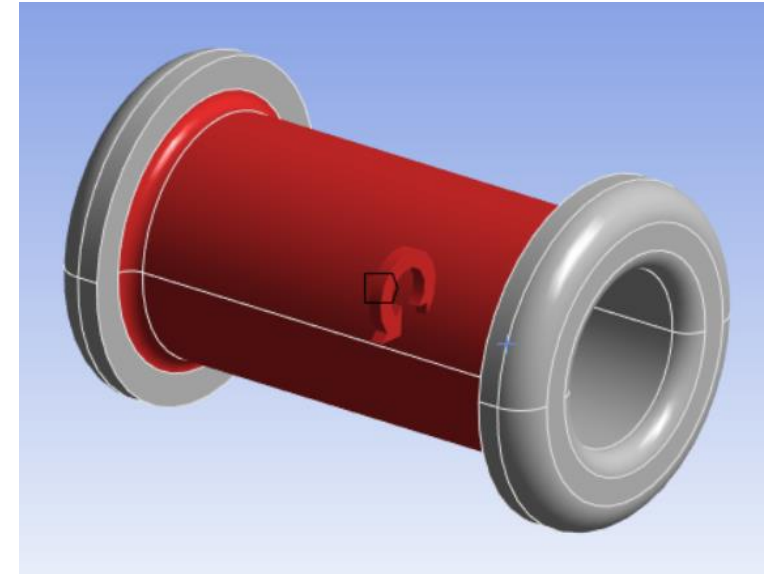


Figura 15 Configuración del momento.

RESULTADOS

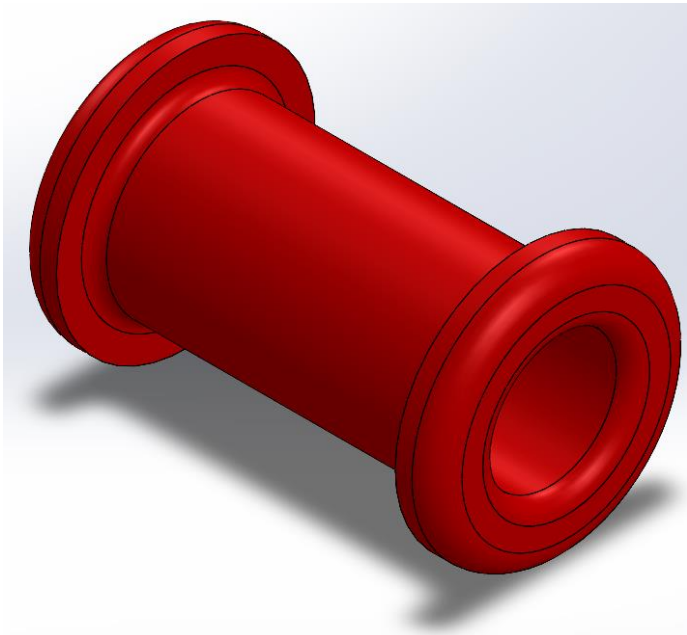


Figura 16 Modelado final del buje de TPU.

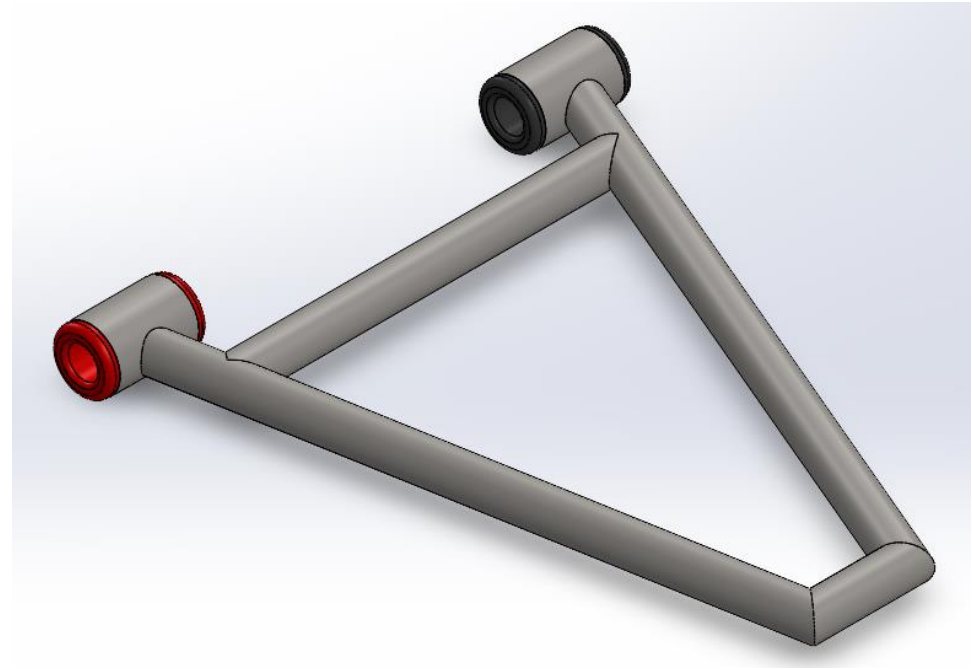


Figura 17 Ensamble del conjunto horquilla-bujes

RESULTADOS

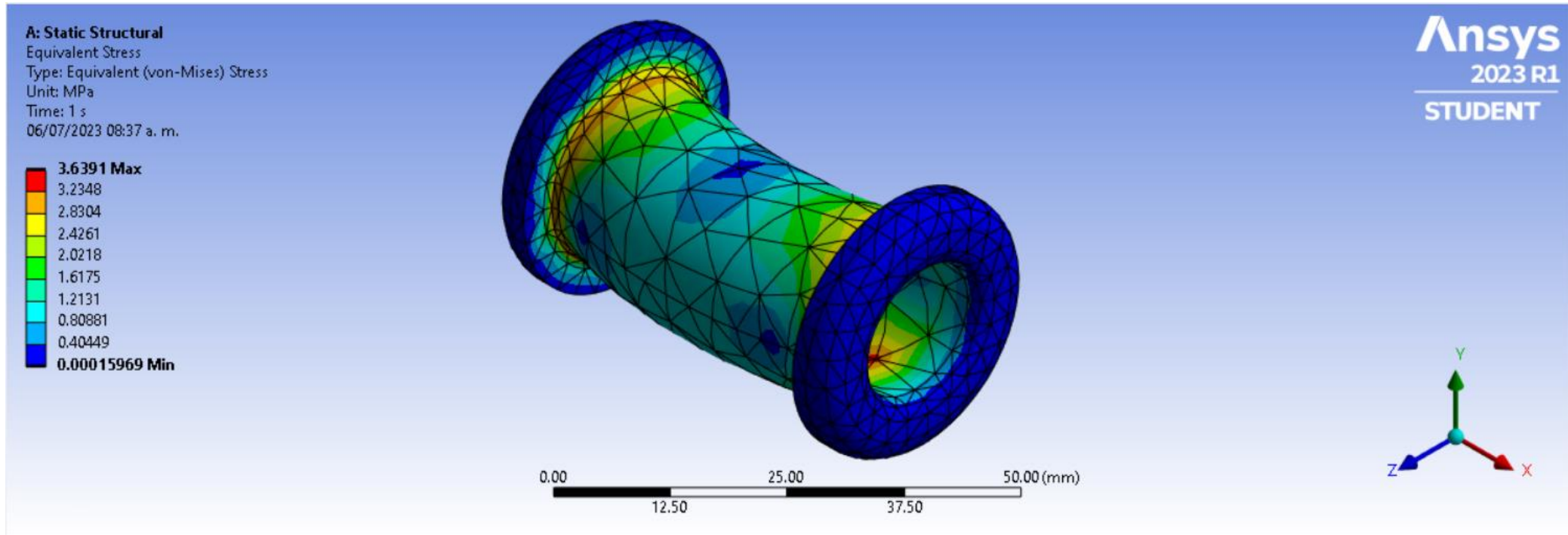


Figura 18 Esfuerzo Equivalente de Von-Mises ante esfuerzo cortante.

RESULTADOS

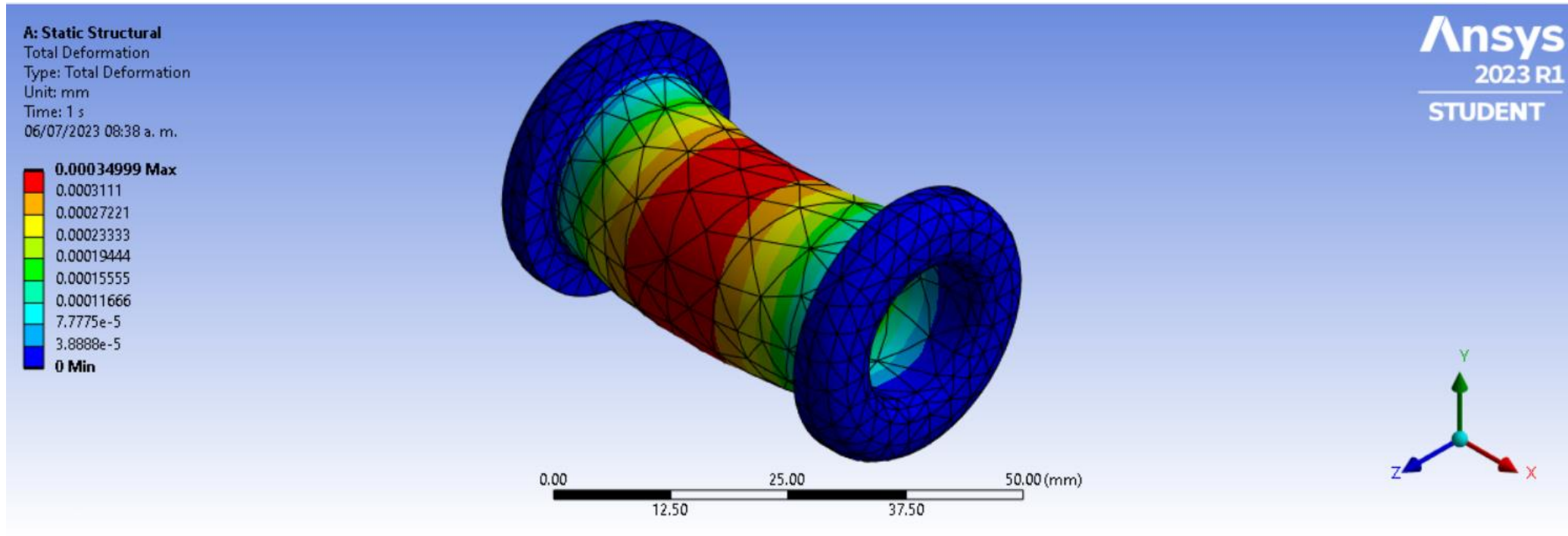


Figura 19 Deformación total ante esfuerzo cortante.

RESULTADOS

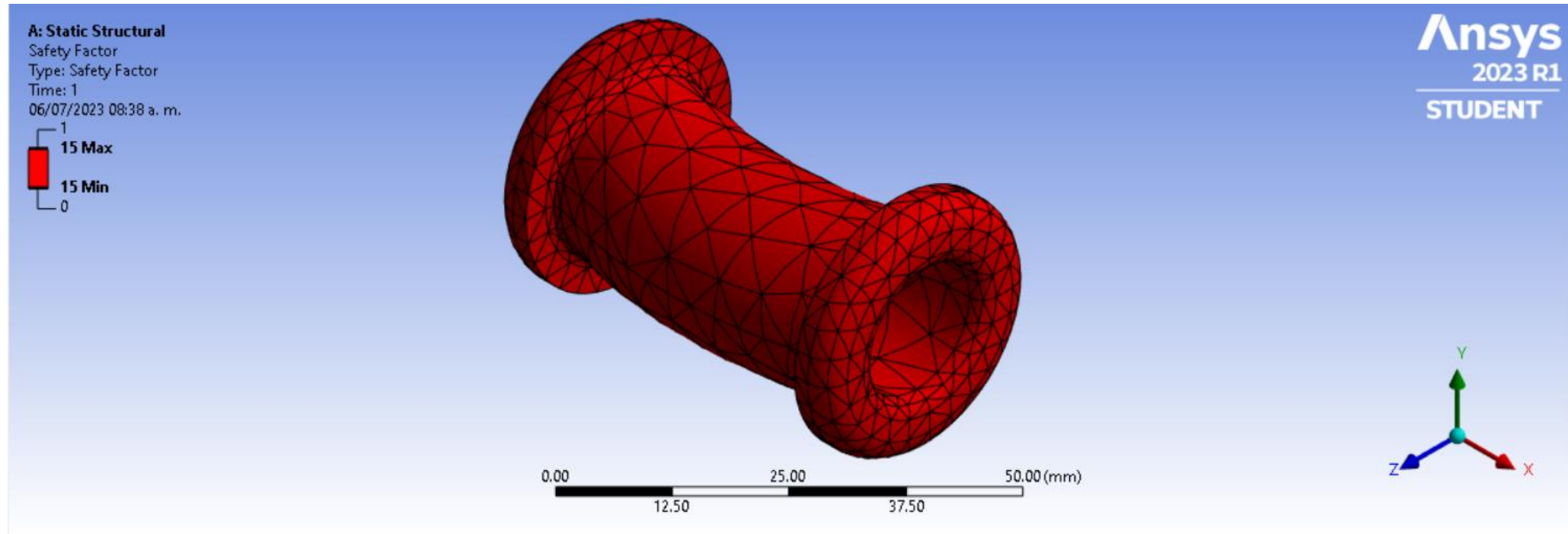


Figura 20 Factor de seguridad correspondiente ante esfuerzo cortante.

RESULTADOS

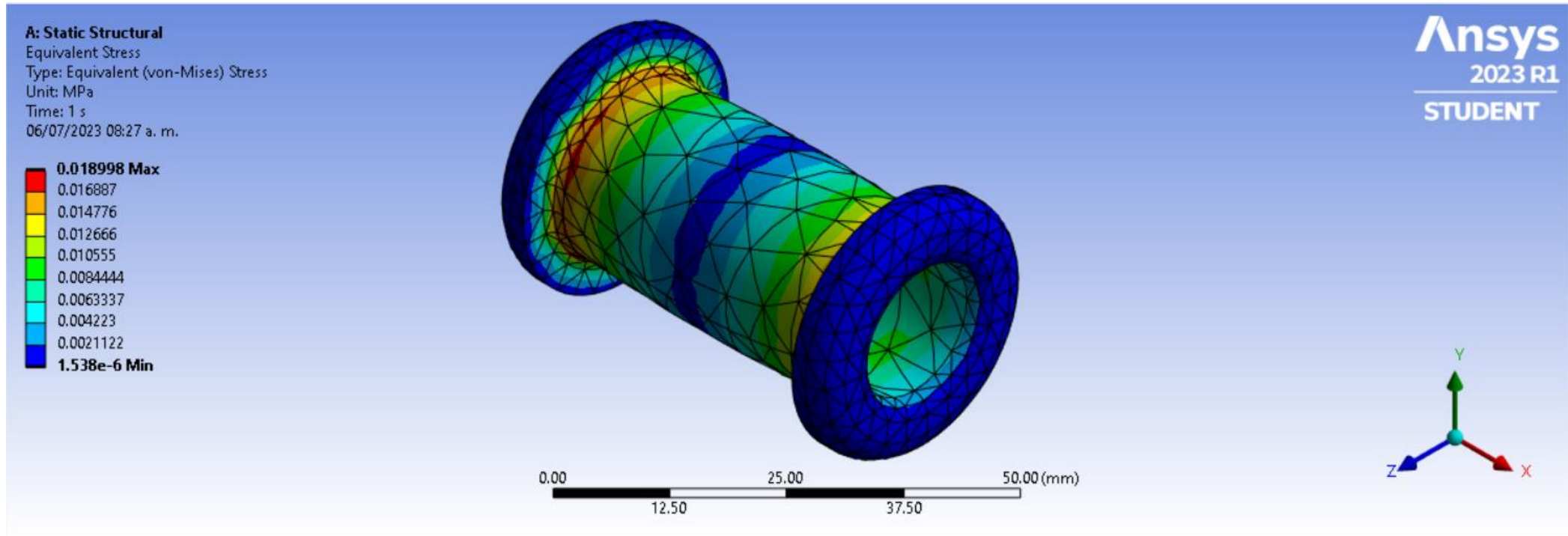


Figura 21 Esfuerzo Equivalente de Von-Mises ante esfuerzo torsional.

RESULTADOS

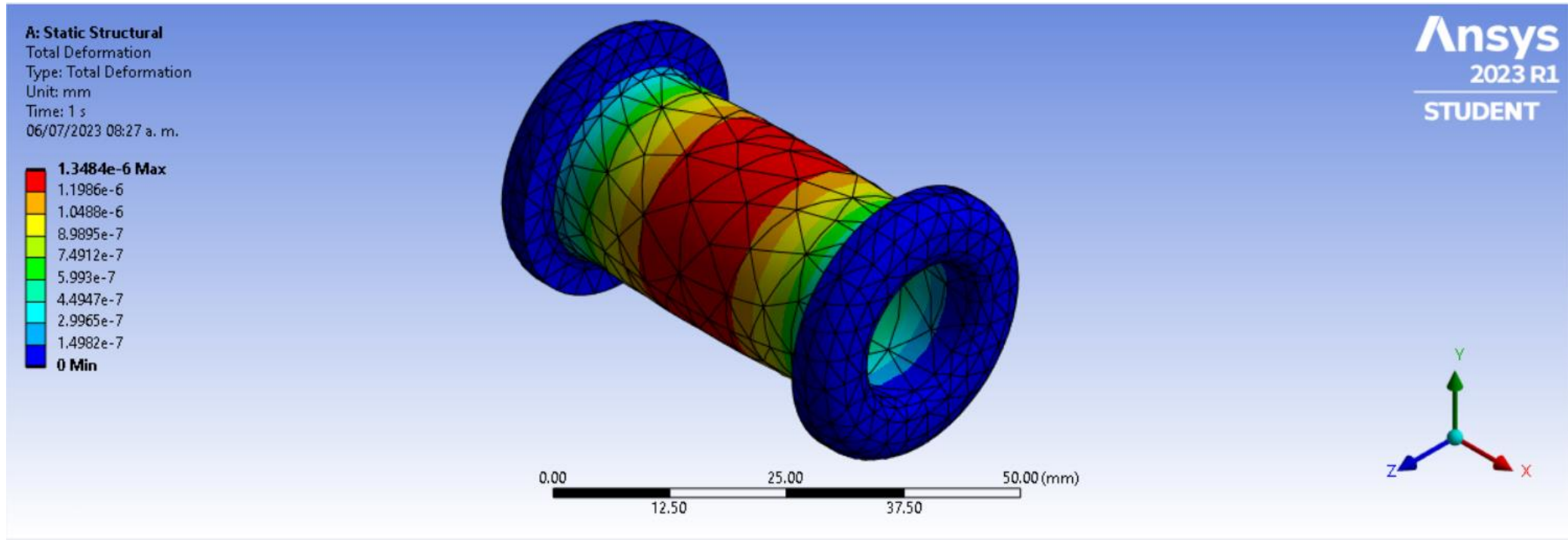


Figura 22 Deformación total ante esfuerzo torsional.

RESULTADOS

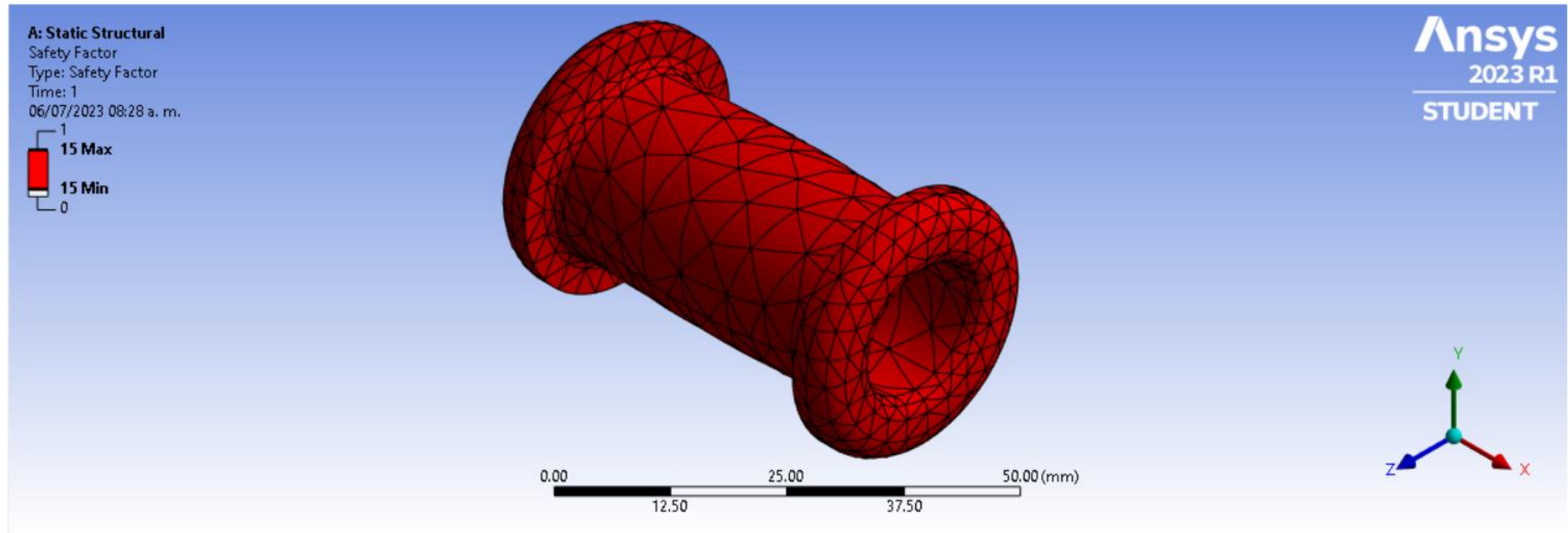


Figura 23 Factor de seguridad correspondiente ante esfuerzo torsional.

CONCLUSIONES

- ❑ El presente análisis del buje de Poliuretano Termoplástico (TPU) ha demostrado su potencial como una solución viable para abordar la escasez de refacciones en la industria automotriz, especialmente para piezas que son difíciles de obtener o están descontinuadas en México.
- ❑ A lo largo del desarrollo del proyecto, se ha evaluado el comportamiento mecánico del TPU en comparación con el caucho convencional, lo que sugiere la posibilidad de sustituir el caucho en su totalidad.
- ❑ Con los resultados obtenidos conforme a las deformaciones y los esfuerzos puede observarse que el factor de seguridad deseable es mayor a 2 obteniendo un modelo factible dentro de las características de diseño deseadas.
- ❑ Es fundamental señalar que este estudio se basa únicamente en pruebas mecánicas, y el comportamiento térmico del TPU representa un área de investigación futura valiosa, dado que el sistema de suspensión experimenta variaciones de temperatura durante su funcionamiento.

PROSPECTIVAS

❑ La validación experimental, que aún está en desarrollo, se beneficiará de los cálculos de esfuerzos obtenidos en este análisis, lo que permitirá realizar pruebas más precisas en condiciones reales. Para avanzar, se sugiere montar el buje en una cuatrimoto funcional, ya que la actual, que se encuentra desarmada, limita el alcance de las pruebas prácticas. En definitiva, los resultados obtenidos hasta ahora indican que el TPU podría ser una alternativa prometedora para resolver la problemática actual en la disponibilidad de refacciones.



Figura 24 Montaje para pruebas experimentales.

REFERENCIAS

- ❑ Arellano Villares, J. C., & Taday Yupanqui, E. F. (2016). Diseño y construcción de un sistema de suspensión para un vehículo tipo fórmula para la Escuela de Ingeniería Automotriz (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- ❑ Bathe, K. J. (2007). Finite element method. Wiley encyclopedia of computer science and engineering, 1-12.
- ❑ Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2017). Mecánica de materiales. Mc Graw Hill.
- ❑ Cortés, C. B. Y., Landeta, J. M. I., Chacón, J. G. B., Pereyra, F. A., & Osorio, M. L. (2017). El entorno de la industria 4.0: implicaciones y perspectivas futuras. Conciencia tecnológica, (54).
- ❑ Costa, J. A. (2019). Procesos de manufactura con tecnología 3D. CTS Cafe, 40-49.
- ❑ Dhatt, G., Lefrançois, E., & Touzot, G. (2012). Finite element method. John Wiley & Sons.
- ❑ Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0. Procedia manufacturing, 11, 545-554.

REFERENCIAS

- ❑ Elango, C., Pandi, S. K., Mahadule, R. N., & Zarrin-Ghalami, T. (2022). Fatigue Life Prediction and Correlation of Engine Mount Elastomeric Bushing using A Crack Growth Approach (No. 2022-01-0760). SAE Technical Paper.
- ❑ Haleem, A., & Javaid, M. (2019). Additive manufacturing applications in industry 4.0: a review. Journal of Industrial Integration and Management, 4(04), 1930001.
- ❑ Horst, D. J., Duvoisin, C. A., & de Almeida Vieira, R. (2018). Additive manufacturing at Industry 4.0: a review. International journal of engineering and technical research, 8(8).
- ❑ Kadlowec, J., Gerrard, D., & Pearlman, H. (2009). Coupled axial–torsional behavior of cylindrical elastomer bushings. Polymer Testing, 28(2), 139-144.
- ❑ Kumar, A. (2018). Safety factor: definition, equation, examples, calculator (with PDF). What is Piping.
- ❑ Lewitzke, C., & Lee, P. (2001). Application of elastomeric components for noise and vibration isolation in the automotive industry (No. 2001-01-1447). SAE Technical Paper.
- ❑ Macías, A. (2019). Cálculo e Interpretación del Factor de Seguridad. Recuperado 21 de junio de 2023, de <https://intelligy.com/blog/2019/05/07/calculo-e-interpretacion-del-factor-de-seguridad/>

REFERENCIAS

- ❑ Navarrete, F. (2022). Refacciones para automóviles tienen 'lento avance' en México. El Financiero. Recuperado 18 de marzo de 2023, de <https://www.elfinanciero.com.mx/empresas/2022/09/28/tardan-hasta-4-meses-en-llegar-las-refacciones-para-automoviles/>
- ❑ Ortega, J. (2022). What are suspension bushings and what are they for? AutoMexico. Recuperado 18 de marzo de 2023, de <https://automexico.com/mantenimiento/bujes-de-suspension-que-son-para-que-sirven-datos-aid12597>
- ❑ Ramos Rivero, V. L. (2018). Evolución del uso de los materiales plásticos en la industria automotriz. Recuperado 18 de marzo de 2023, de <https://revistas.uide.edu.ec/index.php/innova/article/view/928>
- ❑ Torres, O. (2022). Escasez de refacciones para autos puede durar hasta 2024. Expansión. Recuperado 26 de marzo de 2023, de <https://expansion.mx/empresas/2022/09/20/escasez-refacciones-autos-durara-hasta-2024>
- ❑ Xu, T., Shen, W., Lin, X., & Xie, Y. M. (2020). Mechanical properties of additively manufactured thermoplastic polyurethane (TPU) material affected by various processing parameters. *Polymers*, 12(12), 3010.



MARVID®

© MARVID-Mexico

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162, 163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169, 209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCONIMI is part of the media of MARVID-Mexico., E: 94-443.F: 008- (www.marvid.org/booklets)