NUEVAS REALIDADES PARA LA EDUCACIÓN EN INGENIERÍA: CURRÍCULO, TECNOLOGÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
13 - 16 DE SEPTIEMBRE 2022 CARTAGENA DE INDIAS, COLOMBIA
Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI

# Estudio de materiales para el diseño del sistema de dirección y el asiento de un vehículo detracción humana para la exploración espacial

**Mariana Gómez Casadiego, Robinson Bueno, John Archila**

**Universidad Industrial de Santander**
**Bucaramanga, Colombia**

## Resumen

Este trabajo presenta el estudio de materiales de un sistema de dirección y el asiento de un vehículo de tracción humana (VTH) para la exploración espacial (rover). El diseño presentado considera las condiciones mecánicas de los elementos mencionados, ya que estos, además de interactuar directamente con el usuario, están constantemente sometidos a condiciones de carga externa y fuerzas aplicadas. Este análisis se lleva a cabo con el fin de elegir los materiales con los que serán construidas las piezas y así mejorar la experiencia del usuario con el vehículo, su desempeño y la eficiencia de las tareas a ejecutar.

Para esto, se simularon diferentes escenarios y condiciones en las cuales podría trabajar el vehículo y se evaluaron las condiciones de esfuerzo y deformación de los materiales según las características de movilidad propias de la exploración espacial. Así mismo, se tuvieron en cuenta variables como peso, densidad de los materiales, tensión de rotura, módulo de elasticidad, elongación y facilidad de manufactura.

El diseño tuvo en cuenta la aplicación de estándares y normas internacionales de la ergonomía. Así mismo, se tomaron como punto de partida experiencias similares de vehículos de tracción humana para la exploración espacial presentadas en el estado del arte y la literatura especializada, identificando las debilidades reportadas en las pruebas de conducción. Esto permitió encontrar oportunidades de rediseño y mejoras en el desempeño. Los componentes físico-mecánicos han sido modelados usando softwares CAD como SolidWorks.

Este trabajo hace parte de un proyecto colaborativo desarrollado por estudiantes de ingeniería mecánica y diseño industrial del semillero de investigación de Diseño, Innovación y Robótica (DIRO)

de la Universidad Industrial de Santander (Colombia). Los resultados finales de este trabajo serán parte de la participación del semillero DIRO en el concurso internacional NASA Challenge (HERC) 2023, el cual tiene como objetivo diseñar y construir un vehículo de tracción humana para la exploración espacial.

**Palabras clave**: CAD; materiales; rover; vehículo de tracción humana

***Abstract***

*This work presents the study of materials of a steering system and the seat of a human-powered vehicle for space exploration (rover). The design considers the mechanical conditions of the mentioned elements, that are constantly subjected to external loads and forces. The analysis includes the selection of the materials of the elements in order to improve the user experience, performance, and efficiency of the rover.*

*For this purpose, different driving scenarios and working conditions of the vehicle were simulated. The stress and deformation of the materials were evaluated according to the space exploration mobility considering variables such as weight, material density, breaking stress, modulus of elasticity, elongation and manufacturing features.*

*The design considers the application of international standards of ergonomics. Furthermore, similar experiences of human-powered vehicles for space exploration presented in the state-of-the-art and specialized literature were studied as a starting point, identifying the weaknesses reported in the driving tests. This allows finding redesign opportunities and performance improvements. The physical-mechanical components have been modeled using CAD software such as SolidWorks.*

*This work is part of a collaborative project developed by mechanical engineering and industrial design students from the Design, Innovation and Robotics Research hotbed (DIRO) of the Universidad Industrial de Santander (Colombia). The final results of this work will be part of the participation of DIRO in the international NASA Human Exploration Rover Challenge (HERC) 2023, which aims to design and build a human-powered vehicle for space exploration.*

***Keywords****: CAD; materials; rover; human-powered vehicle*

## 1. Introducción

Un vehículo de tracción humana es cualquier vehículo impulsado únicamente por la fuerza muscular del ser humano (Real Academia de la Lengua Española) por ejemplo, bicicletas, triciclos y algunos botes que funcionan con pedales. En este trabajo se realizará el análisis y el diseño CAD (computer-aided design) del sistema de dirección y el asiento de un VTH para la exploración espacial, que además de ser propulsado por la fuerza de sus conductores, tendrá propiedades físicas y mecánicas para explorar terrenos inusuales y para soportar condiciones climáticas extremas. Según (García J. C., 2006) el diseño CAD es la tecnología en la cual se utilizan los computadores para mejorar

el diseño, fabricación y desarrollo de los productos y elaborarse con mayor rapidez, precisión y menor costo. Es por lo anterior que este diseño representa una ventaja al realizar la fabricación del modelo físico y, por lo tanto, permite conseguir mejores resultados.

El diseño de los rovers suele enfocarse en la selección de estructuras y materiales que hacen del VTH un medio de transporte de alta calidad y con excelentes propiedades mecánicas. La selección de estos materiales debe tener en cuenta variables como la disponibilidad, la versatilidad, los costos, y, por otro lado, las propiedades mecánicas que harán del vehículo un dispositivo apto para operar bajo diversas condiciones. En este trabajo se pondrán a prueba materiales metálicos y poliméricos para la construcción de estas piezas, que son de fácil manejo para los estudiantes.

Como punto de partida, se realizó una revisión del estado del arte con el fin de analizar las tendencias en usos de materiales en rovers que han realizado misiones espaciales. Entre estos se destacan el Spirit y el Opportunity como parte de la misión Mars Exploration Rover y el Perseverance de la misión Mars 2020, enviados por la NASA (Clos Rodríguez A, 2020). Este análisis se realizó teniendo en cuenta que, aunque ninguno de estos rovers estuvo diseñado para transportar seres humanos, los materiales implementados son de alta resistencia y durabilidad, por lo que variando el espesor y la estructura de las piezas se pueden lograr los resultados esperados.

El desarrollo de este trabajo está compuesto por tres etapas: La primera etapa corresponde al diseño y modelado CAD. En la segunda etapa se realiza un análisis de los materiales utilizados en algunos rovers teniendo en cuenta aspectos como densidad, tensión de ruptura, módulo de Young y elongación. La tercera etapa consiste en la simulación de diferentes cargas externas y fuerzas aplicadas en las piezas. Finalmente, en la sección de resultados se muestran los valores obtenidos en las simulaciones y se eligen los materiales más idóneos según la función que desempeñan.

## 2. Desarrollo del trabajo

### 2.1 Primera etapa: Diseño y modelado CAD

Esta etapa consistió en el diseño del sistema de dirección y el asiento del rover, para lo cual se inició mediante la generación de ideas y realización de bocetos a mano alzada. Los bocetos tomaron como referencia algunos VTH participantes en versiones anteriores del *NASA HERC,* como por ejemplo el propuesto por el grupo MIND de la Universidad Nacional de Colombia, ganador del concurso en 2021. De este modelo se puede resaltar la implementación de dos sillines diferentes, uno para el conductor que ejerce la fuerza de pedaleo y el otro para el conductor que guía la dirección. También se evidencia el uso de un sistema de dirección tipo manubrio, similar al que se puede encontrar en otros VTH como las bicicletas.

Figura 1. Modelado CAD rover grupo MIND (UNAL). Fuente: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia (https://bit.ly/37DFPEx)

Partiendo de esto, se eligió diseñar un manubrio tipo bicicleta y un sillín con espaldar reclinable con el fin de tener en cuenta algunas normas básicas de la ergonomía como el ángulo ideal de la espalda en las posturas sedantes y los diámetros óptimos para herramientas con mango cilíndrico. Tras la generación de bocetos y la depuración de ideas, se realizó el modelado en 3D de las piezas.

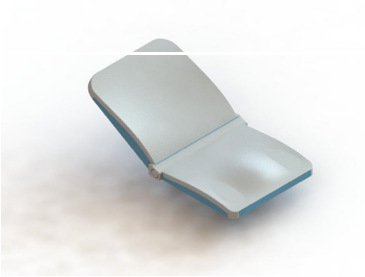


Figura 2 y 3. Modelado CAD del manubrio y del asiento para el rover. Fuente: autores.

En el caso del manubrio, se tomó como referencia un manubrio de bicicleta, dado que la simpleza de su forma reduce el peso y mejora su practicidad. Por otro lado, los usuarios que utilicen la pieza estarían familiarizados con su funcionamiento por su similitud con un objeto de frecuente uso. Este elemento se diseñó con las medidas y la forma sugeridas por la ergonomía, teniendo en cuenta el diámetro de la sección transversal, longitud y forma. Estas medidas se encuentran en los planos técnicos al final de esta sección.

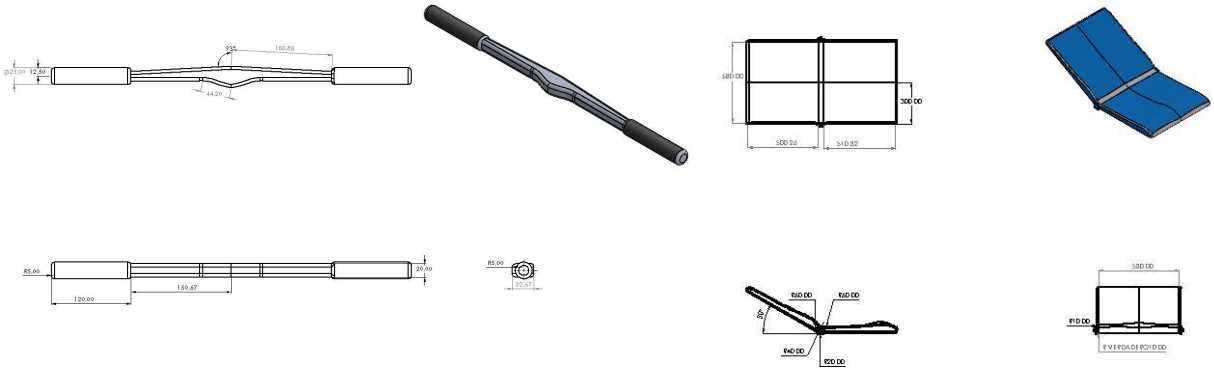
Para el sillín, se tomaron como referencia formas utilizadas en las sillas ergonómicas para trabajo de oficina, dado que los usuarios de estos asientos generalmente presentan molestias físicas por uso prolongado y las sillas de tipo ergonómico suelen mitigar estos riesgos. Las formas que se utilizaron fueron la curva del respaldo y de la parte del asiento con zonas ligeramente acanaladas con el fin de imitar la forma natural del cuerpo.

Se implementó un sistema de variación de ángulo del espaldar que puede modificarse de acuerdo al terreno en el que se encuentre el vehículo con tres posibles variaciones. La primera de 30° de inclinación respecto al suelo, implementada para situaciones en las que se requiere mayor fuerza

de tracción. La segunda de 50° para situaciones en terrenos de dificultad media. Finalmente, la tercera variación de 70° de inclinación, ángulo utilizado para mantener una postura relajada y de descanso, de modo que se puede implementar para terrenos planos o que no necesitan tanto esfuerzo de tracción por parte del usuario.

Figuras 4, 5 y 6. Vistas superior, lateral y frontal del sillín. Fuente: autores.

Al igual que con el manubrio, las medidas fueron elegidas teniendo en cuenta normas ergonómicas y se pueden observar en los planos técnicos incluidos a continuación. Algunas de estas medidas de longitud se relacionan directamente con datos antropométricos extraídos del grupo poblacional al que pertenecen los potenciales conductores del vehículo en la prueba física. Así mismo, se determinó utilizar en el sillín un material textil de tipo acolchado como recubrimiento de la estructura base con el fin de proporcionar más comodidad al usuario y aumentar el coeficiente de fricción entre la superficie del asiento y el cuerpo del conductor.



Figuras 7 y 8. Planos técnicos del manubrio y del sillín. Fuente: autores.

## 2.2 Segunda etapa: Análisis de posibles materiales

Los materiales frecuentemente utilizados para las partes mecánicas de los rovers son metales y polímeros, abundando las aleaciones que tienen mayor resistencia y durabilidad. En este caso se tuvo en cuenta, además de las propiedades mecánicas, la facilidad de acceso a estos materiales y su facilidad de manufactura, ya que el prototipo en físico deberá construirse en etapas futuras del proyecto. Es por esto que se elige analizar tres tipos de material para el manubrio: la aleación de

acero 1023, la fibra de carbono y la aleación de aluminio 1060. En cuanto al sillín, se decidió analizar tres materiales poliméricos con excelentes propiedades mecánicas, alta resistencia al impacto y larga duración. Estos son el polietileno de alta densidad, el copolímero de polipropileno y el tereftalato de polietileno (PET). En la siguiente tabla se pueden ver las principales propiedades de los materiales mencionados.

| **Material** | $\rho\ [kg/m^3]$ | $S\ [MPa]$ | $E\ [GPa]$ | $l\ [\%]$ |
|---|---|---|---|---|
| Acero 1023 | 7900 | 841 | 190 | - |
| Fibra de carbono | 1600 | 600 | 70 | 1.8 |
| Aluminio 1060 | 2710 | 90 | 71.7 | 20 |
| Polietileno de alta densidad | 950 | 37 | 1.07 | 12 |
| Copolímero de polipropileno | 900 | 28 - 38 | 0.7 - 1.4 | 14 |
| PET | 1390 | 90 | 3.7 | 15 |

Tabla 1. Análisis de materiales para la simulación de las piezas. Fuente: autores.

Donde los parámetros mostrados son: $\rho$: Densidad. $S$: Tensión de rotura. $E$: Módulo de Young. $l$: Elongación.

El acero al carbono SAE 1023 es un acero de bajo carbono con un 0.23% de contenido de carbono, aproximadamente. Su límite elástico está entre $240 - 410\ MPa$ y su resistencia a la tracción es de $430 - 480\ MPa$. De acuerdo con (Choudhary A. y Kumar M., 2019), este material tiene una amplia gama de aplicaciones en sectores industriales que incluyen piezas de maquinaria, componentes de construcción, armaduras, y troqueles. Debido a su buena soldabilidad, son comúnmente llamados aceros de cementación.

La fibra de carbono posee más resistencia al impacto que el acero siendo a la vez mucho más liviano (tan ligero como la madera o el plástico) y con un elevado módulo de elasticidad. Según (Clos Rodríguez A., 2020) es un material compuesto no metálico de tipo polimérico, constituido principalmente por carbono. La fibra de carbono tiene gran capacidad de aislamiento térmico y resistencia a las variaciones de temperatura, manteniendo su forma cuando es combinado con una matriz termoestable.

En cuanto al aluminio 1060, las propiedades que este material y sus aleaciones presentan lo hacen uno de los más empleados en la industria por su economía, versatilidad y la facilidad de encontrarlo en diversas presentaciones (Carrera Ramos, D. S., 2018). En el ámbito del transporte, es muy utilizado por su baja densidad que, en comparación con el acero, llega a tener una relación de 1 a 3, lo cual lo hace muy apetecido en la construcción de vehículos terrestres, marítimos y aeroespaciales.

De acuerdo con (Lemus, F., 2005) el polietileno de alta densidad es el polímero más popular debido a su bajo costo y versatilidad a la hora de manufactura. En la literatura (Garzón Posada, A. O, 2015) se indica que este material combina una serie de propiedades físicas y mecánicas como son una baja densidad y una buena relación resistencia / peso, que junto a su facilidad para el procesado lo hacen idóneo en una gran variedad de aplicaciones. Su bajo valor de módulo de elasticidad, junto con las grandes deformaciones alcanzadas antes de la rotura, supone la posibilidad de absorber una gran cantidad de energía.

Por otro lado, el copolímero de polipropileno es un material con una gran resistencia al agrietamiento por esfuerzo y por bajas temperaturas, que tiene una excelente resistencia química a ambientes corrosivos. Según (Nicolae Nicolau, I, 2011), este material tiene importantes propiedades como un bajo punto de fusión, estabilidad térmica, rigidez, propiedades a impacto y deformación. Existen varios tipos de PP copolímero, sin embargo, en este trabajo las simulaciones serán realizadas con un PP copolímero al azar.

El PET tiene una gran resistencia al desgaste, a la corrosión y a esfuerzos prolongados. De acuerdo con (Alvarez Raymundo, J. Y., & Bartolo Guerra, J. N, 2020) la baja densidad del PET junto a su excelente aislamiento térmico, su resistencia química y alta resistencia al desgaste por roce, lo hacen un material interesante para esta aplicación.

### 2.3 Tercera etapa: Simulación de las piezas

Para el desarrollo de esta etapa se utilizó la herramienta de simulación que incluye SolidWorks y se analizaron las tensiones, los desplazamientos y la deformación unitaria.

En una simulación con cargas externas, las fuerzas internas de un sólido varían de un punto a otro. La **tensión** denota la intensidad de estas fuerzas (fuerza por unidad de superficie). Las funciones de **desplazamiento** definen el valor del movimiento en todas las secciones de un cuerpo, en función de la distancia al extremo inicial de este, indicando cuánto y cómo se mueve dicha sección bajo un estado deformacional concreto (Basset Salom, L. 2011). La **deformación unitaria** es la proporción de cambio de longitud $\delta$ a la longitud original L. La deformación unitaria es una cantidad sin dimensión.

Para el manubrio se aplicó una fuerza de torsión, ya que esta pieza estará sometida a fuerzas similares con una magnitud de aproximadamente 8 [N], equivalente a la fuerza manual de una persona al direccionar el vehículo (igual que conducir una bicicleta). Al sillín se le aplicó una fuerza externa de 784 [N] sobre su cara superior intentando simular la masa que puede tener un usuario adulto en promedio.

### 2.3.1 Simulación del manubrio

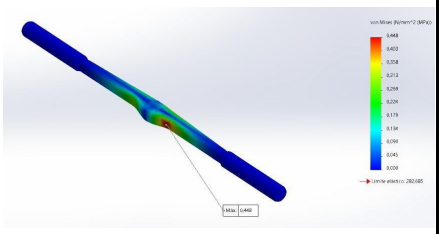
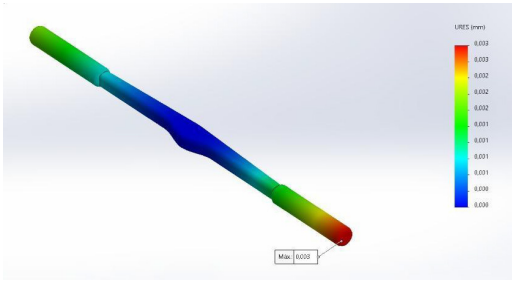
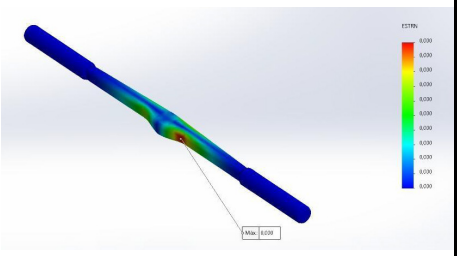
| **Acero 1023 (Chapa de acero al carbono)** | | |
|---|---|---|
| Tensiones | Desplazamientos | Deformación unitaria |
|  |  |  |

Tabla 2. Resultados simulación del manubrio. Fuente: autores

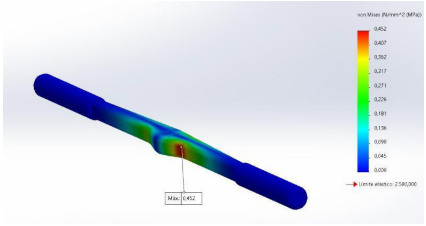
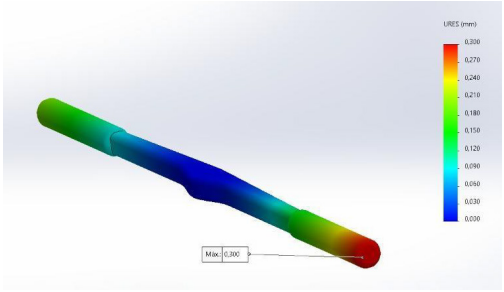
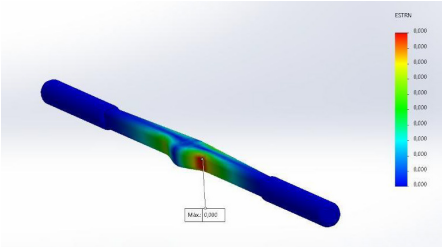
| **Fibra de carbono** | | |
|---|---|---|
| Tensiones | Desplazamientos | Deformación unitaria |
|  |  |  |

Tabla 2.1. Resultados simulación del manubrio. Fuente: autores

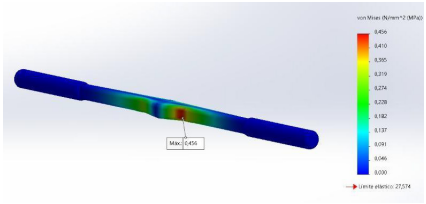
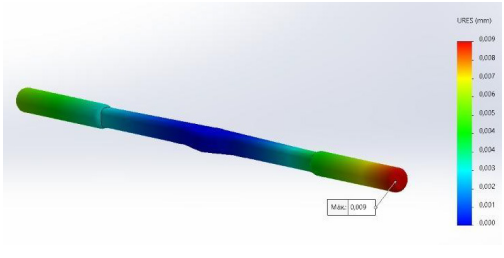
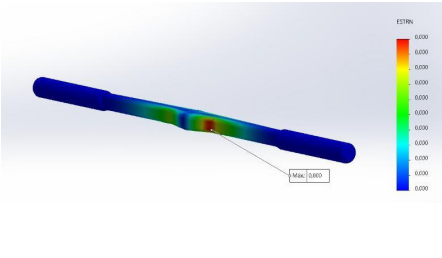
| **Aluminio 1060** | | |
|---|---|---|
| Tensiones | Desplazamientos | Deformación unitaria |
|  |  |  |

Tabla 2.2. Resultados simulación del manubrio. Fuente: autores

Como se puede observar en la simulación de la chapa de acero al carbono, la pieza no presenta mayores riesgos de tensión, desplazamiento o deformación, ya que las propiedades de este material la dotan de una resistencia suficiente y capaz de soportar movimientos y cargas como las que aplicaría la capacidad manual de un solo usuario.

Así mismo en la simulación de la fibra de carbono, la pieza tampoco presenta mayores riesgos a la fractura o a la deformación. Se debe tener en cuenta que la pieza no estaría sometida a cargas mucho mayores que la simulada, por lo que se podría elegir este material de acuerdo a su peso (entre más liviano mejor) y a sus excelentes propiedades mecánicas. Según (Rodríguez, E. S., 2012), en el caso puntual de la industria aeroespacial, los materiales utilizados deben cumplir requisitos específicos como estabilidad dimensional, alta tenacidad y resistencia a altas temperaturas, por lo que los materiales compuestos reforzados con fibras de carbono tienen gran potencial para este tipo de aplicaciones.

Finalmente, la simulación de la aleación 1060 de aluminio, como ya se puede predecir, tampoco presenta mayores riesgos la deformación o a la fractura por la baja carga a la que está siendo sometido el elemento.

### 2.3.2 Simulación del sillín

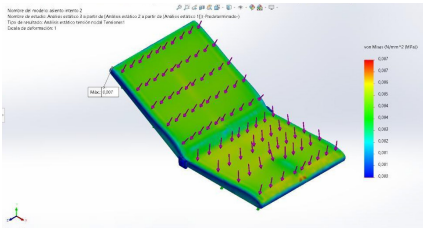
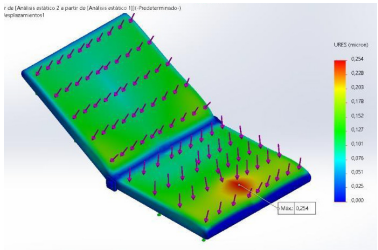
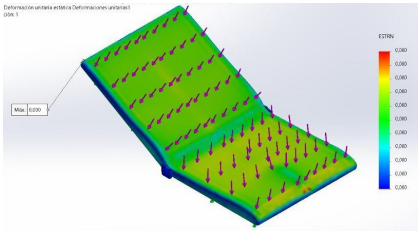
| **Polietileno de alta densidad** | | |
|---|---|---|
| Tensiones | Desplazamientos | Deformación unitaria |
|  |  |  |

Tabla 3. Resultados simulación del sillín. Fuente: autores.

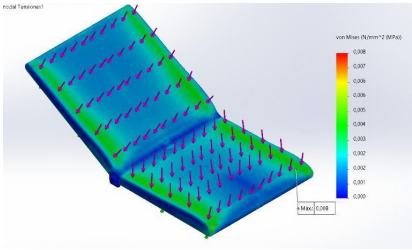
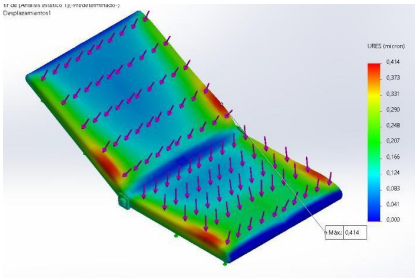
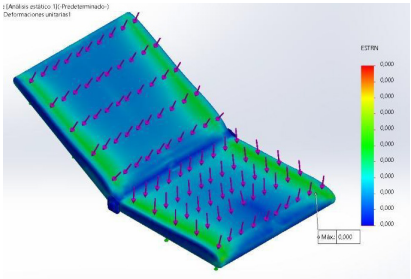
| **Copolímero de polipropileno** | | |
|---|---|---|
| Tensiones | Desplazamientos | Deformación unitaria |
|  |  |  |

Tabla 3.1. Resultados simulación del sillín. Fuente: autores

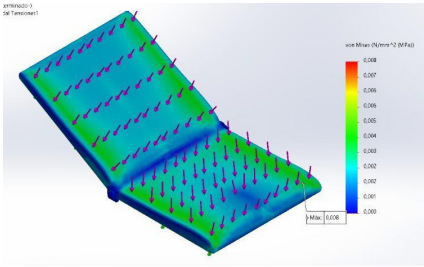
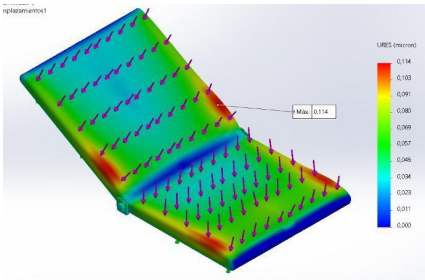
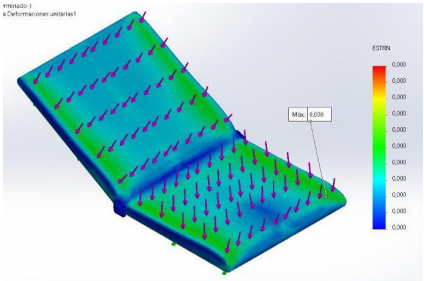
| **Tereftalato de polietileno (PET)** | | |
|---|---|---|
| Tensiones | Desplazamientos | Deformación unitaria |
|  |  |  |

Tabla 3.2. Resultados simulación del sillín. Fuente: autores

En cuanto a los anteriores resultados se puede ver que para la simulación del polietileno de alta densidad, aunque esta pieza no presenta riesgos ante la carga aplicada, esta se encuentra aproximadamente en la mitad de la escala, por lo que se puede afirmar que la pieza está sufriendo un esfuerzo de dificultad media.

Para la simulación del copolímero de polipropileno se encontró que las zonas azules (menor esfuerzo y deformación) son mayores a las del material previamente simulado. Sin embargo, presenta unas zonas de color rojo en los bordes del sillín, las cuales se pueden eliminar con el aumento del tamaño del chaflán. En el caso del PET no hubo mayor diferencia en las simulaciones con respecto al copolímero de polipropileno.

## 3. Conclusiones

- Dado que en ninguno de los casos de simulación las piezas sufren un esfuerzo alto o un riesgo a la ruptura, se tendrán en cuenta los aspectos de terreno, climáticos y meteorológicos de Marte, para la selección de los materiales.
- El material más idóneo para la fabricación del manubrio en un contexto ideal, es la fibra de carbono por su relación resistencia-peso. Sin embargo, en términos de costos y manufactura, es el más complejo de utilizar. Es por esto que finalmente se decidió utilizar el aluminio 1060 para la fabricación de esta pieza. Aunque este material es un poco más pesado que la fibra de carbono, sigue siendo ligero, altamente resistente y no presenta riesgo alguno.
- Respecto al sillín, se seleccionó el copolímero de polipropileno por su excelente resistencia, su ligereza y su facilidad de manipulación. Así mismo, se concluye que es primordial recubrir este asiento con un material textil acolchado que facilite el cumplimiento de las normas ergonómicas.

## 4. Referencias

### Proyectos de grado


- Alvarez Raymundo, J. Y., & Bartolo Guerra, J. N. (2020). Propiedades físico-mecánicas de los ladrillos de tereftalato de polietileno para el diseño de viviendas unifamiliares en Ate-Huaycán 2020. (Tesis de Ingeniería Civil. Universidad César Vallejo, Perú).
- Carrera Ramos, D. S. (2018). Estudio de las propiedades mecánicas (resistencia última a la tracción, límite de fluencia, dureza, resistencia al impacto) de la aleación aluminio 1060 con magnesio obtenido mediante el proceso de pulvimetalurgia (Tesis de Ingeniería Mecánica. Universidad Técnica de Ambato, Ecuador).
- Clos Rodríguez, A. (2020). Estudio de un Rover para misiones a marte (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, España).
- Garzón Posada, A. O. (2015). Síntesis y caracterización de un material compuesto a base de polietileno de alta densidad y magnetita pulverizada. (Tesis de Maestría en Ingeniería –Materiales y Procesos de manufactura. Universidad Nacional de Colombia).
- Lemus Muñoz, F. (2005). Análisis del efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas del polietileno de alta densidad reforzado con cascarilla de café. (Tesis de Ingeniería Química, Universidad de Los Andes, Colombia.)
- Nicolae Nicolau, I. R. (2011). Propiedades moleculares, físicas y morfológicas en mezclas físicas de polipropileno con bajos contenidos de elastómero. (Proyecto de fin de carrera. Universidad Rey Juan Carlos, España).


### Artículos


- Basset Salom, L. (2011). Leyes de esfuerzos y funciones de desplazamiento a lo largo de una barra. Escuela Técnica Superior de Arquitectura Universitat Politècnica de València.
- Choudhary, A., Kumar, M., & Ununе, D. R. (2019). Experimental investigation and optimization of weld bead characteristics during submerged arc welding of AISI 1023 steel. Defence Technology, 15(1), 72-82.

- García, J. C. C. (2006). Tecnología avanzada del diseño y manufactura asistidos por computador-CAD/CAM. Prospectiva, 4(1), 75-81.
- Rodriguez, E. S. (2012). Desarrollo de materiales compuestos avanzados basados en fibras de carbono para la industria aeroespacial. Academia Nacional de Ciencias Exactas Físicas y Naturales.


**Fuentes electrónicas**


- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española, 23.ª ed., [versión 23.5 en línea]. <https://dle.rae.es> [Consultado en febrero de 2022].


## Sobre los autores


- **Mariana Gómez Casadiego**: Estudiante Escuela de Diseño Industrial, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander. mariana2192344@correo.uis.edu.co
- **Robinson Bueno**: Estudiante Escuela de Diseño Industrial, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander. robinsonbueno16@gmail.com
- **John Archila**: Profesor Titular Laureado, Escuela de Diseño Industrial, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Universidad Industrial de Santander. john.faber@saber.uis.edu.co


---


Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2022 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)