

Análisis estructural de los cangilones de un elevador fabricados con materiales poliméricos

Alan Felipe Tinjacá Castillo

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Mecánico

Director

Octavio Andrés González Estrada

PhD. Ingeniería mecánica y de materiales

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2020

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos.....	12
2. Marco Teórico	13
3. Metodología.	18
3.1 Caracterización.....	19
3.1.1 Descripción De Los Ensayos Astm.....	20
3.1.2 Tipo De Probetas.....	22
3.2 Condiciones Comunes De Operación	24
3.3 Modelado Elementos Finitos.....	24
4. Resultados.	25
4.1 Ensayos Estáticos	26
4.2 Modelo Numérico	31
4.2.1 Mallado	31
4.2.2 Análisis De Esfuerzos	35
4.3 Comparación De Materiales.....	36
4.4 Modificaciones Del Diseño.....	37

5. Conclusiones	39
Referencias Bibliográficas	40
Apéndices	44

Lista de Tablas

<i>Tabla 1. Propiedades mecánicas del UHMW y Nylon 66.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 2. Costo volumen material por cangilón.</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 3. Dimensiones cangilón tipo C 6x5.</i>	<i>25</i>
<i>Tabla 4. Resultados para ensayos estáticos del material UHMW.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 5. Resultados para ensayos estáticos del material Nylon 66.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 6. Comparación de los resultados experimentales con los teóricos.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 7. Convergencia de los desplazamientos máximos del cangilón de material UHMW. .</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 8. Convergencia de los desplazamientos máximos del cangilón de material Nylon 66.</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 9. Resultados desplazamientos del cangilón de material UHMW y Nylon 66.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 10. Resultados esfuerzos del cangilón de material UHMW y Nylon 66.</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 11. Parámetros ponderados de un cangilón.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 12. Factores de seguridad variando el espesor del cangilón.</i>	<i>37</i>

Lista de Figuras

Figura 1. Cangilón de material UHMW.....	19
Figura 2. Cangilón de material Nylon 66.....	19
Figura 3. Máquina MTS Bionix usada para los ensayos a tracción.	22
Figura 4. Acotación probeta de ensayos	23
Figura 5. Gráfica Sigma vs Épsilon de materiales sometidos a ensayos a tracción.....	28
Figura 6. Probetas sometidas a carga estática material UHMW.....	29
Figura 7. Probetas sometidas a carga estática material Nylon 66.....	30
Figura 8. Detalle de la rotura conseguida en la probeta.....	30
Figura 9. Detalle de la rotura conseguida en la probeta.....	31
Figura 10. Mallado final del cangilón.....	32
Figura 11. Convergencia del desplazamiento máximo de los materiales en el cangilón.....	32
Figura 12. Distribución de los desplazamientos en el cangilón de material Nylon 66.....	34
Figura 13. Detalle del cangilón sometido a esfuerzos de material UHMW.....	35
Figura 14. Modelado cangilón de espesor de 3mm de material Nylon 66.....	38

Lista de apéndices

Apéndice A. Condiciones comunes de operación.....	44
Apéndice B. Caracterización UHMW y Nylon 66.....	46
Apéndice C. Simulación en ANSYS.....	49

Resumen

Título: Análisis estructural de los cangilones de un elevador fabricados con materiales poliméricos*

Autor: Alan Felipe Tinjacá Castillo**

Palabras Clave: Tracción, Uhmw, Nylon 66, Astm D638-14.

Descripción: En este trabajo se realiza la caracterización, modelado y simulación de los cangilones de un elevador vertical fabricados principalmente de dos materiales diferentes, el primero polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) y el segundo Nylon 66 con 35% de fibra de vidrio. Se realizaron pruebas a tracción bajo cargas estáticas de acuerdo a la norma ASTM D638-14 para caracterizar los dos materiales, y los datos obtenidos fueron comparados con los proporcionados por los catálogos del fabricante. Se analiza mediante elementos finitos el comportamiento mecánico del cangilón utilizando los dos materiales, para ello se genera un modelo isométrico del cangilón y se especifican sus condiciones de trabajo donde se escogen dos diferentes datos de propiedades mecánicas, las obtenidas en el laboratorio y las proporcionadas por el fabricante. Se obtienen los campos de desplazamientos y esfuerzos en la geometría con el software de elementos finitos ANSYS, consiguiendo los puntos críticos de los cangilones y determinando el mejor material de acuerdo a su comportamiento mecánico. Finalmente, se proponen mejoras en el diseño en términos de costo – beneficio variando el espesor de las caras del cangilón, pero sin modificar la cara que va anclada a la banda del elevador como lo sugiere la norma.

*Proyecto de grado

**Facultad: Fisico-mecanicas Escuela: Ingeniería Mecánica Director: Octavio Andrés González Estrada PhD.
Ingeniería mecánica y de materiales

Abstract

Title: Structural analysis of the buckets of an elevator made of polymeric materials*

Author: Alan Felipe Tinjacá Castillo**

Key Words: Traction, UHMW, Nylon 66, ASTM D638-14.

Abstract: In this work, the characterization, modeling and simulation of the vertical elevator buckets made mainly of two different materials is carried out, the first ultra high molecular weight polyethylene (UHMW) and the second Nylon 66 with 35% fiberglass. Tensile tests were carried out under static loads according to ASTM D638-14 to characterize the two materials, and the data obtained was compared with that provided by the manufacturer's catalogs. The mechanical behavior of the bucket is analyzed using finite elements using the two materials, for this an isometric model of the bucket is generated and its working conditions are specified where two different mechanical properties data are chosen, those obtained in the laboratory and those provided by the manufacturer. The displacement and stress fields in the geometry are obtained with the ANSYS finite element software, obtaining the critical points of the buckets and determining the best material according to their mechanical behavior. Finally, improvements in the design in terms of cost - benefit are proposed by varying the thickness of the bucket faces, but without modifying the face that is anchored to the elevator band as suggested by the standard.

*Degree project

**Faculty: Physics-Mechanics Career: Mechanical Engineering Director: Octavio Andrés González Estrada PhD.

Introducción

Un elevador de cangilones consiste en un mecanismo que se utiliza en el manejo o transporte de materiales a granel, radica en una cinta transportadora de orientación vertical donde posee acoplados varios cangilones separados una distancia equidistante que transportan verticalmente el material, como lo pueden ser granos, semillas, fertilizantes o minerales.

La pieza que sufre más desgaste o tiene un porcentaje de falla más alto, es el cangilón, que sufre por los esfuerzos de tensión y deformación generados al recoger y transportar el material en sus condiciones comunes de operación al que es sometido.

En la actualidad existen varios materiales para la fabricación de cangilones y entre ellos está el polietileno de ultra alto peso molecular más conocido como (UHMW) y nylon 66 con 35% de fibra de vidrio y disponen de un campo de estudios diverso que se puede desarrollar mediante la simulación.

Estudiando las propiedades mecánicas de cada material por medio de un ensayo a tracción se obtienen las curvas típicas de Sigma Vs Épsilon mostrando la tendencia de cada material determinando si sus propiedades mecánicas son de un material plástico, polímero frágil o elastómero y si coinciden con las tabuladas en los catálogos del fabricante.

Con la implementación del software ANSYS se proporciona un modelo numérico por medio del método de elementos finitos que analiza el estado de las tensiones y deformaciones del cangilón y proporciona una interfaz gráfica para interpretar los resultados obtenidos y comparar cuál de los dos materiales utilizados en el cangilón es el óptimo para sus sollicitaciones mecánicas.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar el análisis estructural de los cangilones de un elevador fabricados con polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) y nylon 66, los cuales están sometidos a esfuerzos de tensión y deformación, debido a su sollicitación mecánica.

1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades mecánicas del polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) utilizado para la fabricación de los cangilones mediante ensayos a tensión según la norma ASTM D638-14.
- Caracterizar las propiedades mecánicas del nylon 66 utilizado como alternativa para la fabricación de los cangilones mediante ensayos a tensión según la norma ASTM D638-14.
- Realizar el análisis mediante elementos finitos de los cangilones del elevador sometido a cargas distribuidas dadas por las condiciones de operación mediante el software ANSYS, con el fin de obtener los campos de tensión, deformación y aplicar un criterio de fallo.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos de las tensiones y deformaciones en los cangilones fabricados con diferentes materiales: polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) y nylon 66.

2. Marco teórico

Habitualmente el transporte de materia prima o material a granel en condiciones normales de operación y cuando el espacio para un transportador convencional es insuficiente o su pendiente es muy elevada. El método más idóneo para el transporte vertical o muy inclinado de graneles es un elevador de cangilones. Generalmente son instalaciones fijas muy rentables en alturas de siete (7) a veinticinco (25) metros, pero pueden llegar hasta los treinta (30) metros, normalmente se combinan con transportadores continuos horizontales para dar un flujo continuo al material transportado y son parte de un sistema de transporte de material a granel completo (Miravete & Larrodé, 2007).

La alimentación de estos elevadores se hace de forma en que el material cae en los cangilones y una vez lleno los cangilones estos son elevados a la parte superior llamada cabeza del elevador, donde se produce la descarga del material. El elemento que aloja la carga en su carrera ascendente en el sistema de elevación, son los cangilones, compuestos de materiales metálicos de chapa soldada, estampados, fibra de vidrio, acero inoxidable, fundición o materiales poliméricos, existen infinidad de formatos y dimensiones donde cada fabricante de elevadores normalmente cuenta con un diseño particular (Miravete & Larrodé, 2007).

Los cangilones son fijados a la correa a través de bulones especiales de cabeza plana y de gran diámetro. Los profundos poseen gran capacidad, son usados en materiales que no se apelmazan, movedizos y de fácil descarga, como los cereales, en cambio los cangilones poco profundos son usados en transportadores inclinados y manipulan mercancías que se apelmazan, en cuyo caso se

pueden emplear también en forma de V, tienen dientes en su borde de ataque para facilitar la carga en los que su llenado se realiza por dragado. Algunos poseen guías laterales o escamas que tienen su base sin redondear, utilizados en elevadores con descarga dirigida por gravedad. Cuando no existe separación entre los cangilones, y se forma una cadena continua, se da un flujo seguido de materia, permitiendo manipular una gran cantidad a velocidades relativamente pequeñas, se consigue que el material que no entra en uno, lo haga en el siguiente, evitando que se acumule en el fondo (Miravete & Larrodé, 2007).

Los cangilones distanciados se emplean en sistemas de dragado para el transporte de materiales que no ofrecen resistencia a la extracción, polvorientos y de granulación fina. Por lo general los cangilones se clasifican de dos maneras, por el tipo de material y por su tipo de estructura según la necesidad del elevador. Sus materiales más comunes son el polietileno, nylon, uretano, hierro, aluminio, acero y su estructura puede ser de tipo: AA–RB, B, SC y HF (García, 2015).

La evolución de los elevadores de cangilones se ha caracterizado por ser un proceso de mejora constante, donde se definen por ser óptimos y más agradables con el medio ambiente, trabajando con materiales biodegradables y disminuyendo sus causas de falla, naciendo de la necesidad de transportar y elevar material en gran cantidad para alimentar una criba vibratoria donde esta se abastece de manera eficiente y constante según (Acosta et al., 2016).

En un estudio realizado por (Manga-Rodríguez, 2014) se enfocó en las fallas de las uniones soldadas de las ruedas de los cangilones, determinando los estados tensionales presentes en las

uniones y las posibles tensiones residuales debido a la soldadura. Las pautas de diseño de los elevadores de cangilones se agregaron por (Garofoli & Garofoli, 2014) donde se tiene en cuenta los problemas de degradación de material durante el transporte y el gasto energético que producen, sugiriendo instalaciones robustas con un costo mayor inicial, pero con un menor costo por metro cúbico transportado, con una mayor vida útil y un adecuado tratamiento del material transportado.

La protección contra explosiones en los elevadores de cangilones mediante ventilación fue informada por (Holbrow, Lunn, & Tyldesley, 2002) y (Bennetts, Moinuddin, Goh, & Thomas, 2005) ejecutaron pruebas de fuego en elevadores proporcionando datos y antecedentes útiles para ayudar a la estructura y partes de los elevadores mejorando su resistencia a altas temperaturas.

La velocidad a la que viajan los cangilones que desplazan un gran volumen de aire y modifican la dinámica de descarga de la carga granular manejando un método de límite sumergido (IMB) y un método de elemento discreto (DEM) es descrito por (Sinnott, Hilton, McBride, & Cleary, 2017). Una de las desventajas principales de estos elevadores las propone (Rademacher, 1979) donde el desgaste producido por la descarga de los cangilones lleva a explorar nuevos tipos de polímeros en busca del mejor para el proceso a cumplir en el elevador.

Los problemas referentes a la integridad estructural como el comportamiento y la vida útil de la fatiga y la fractura, o el periodo de servicio basado en la confiabilidad (Xiong & Sheno, 2019) destacaron los nuevos avances en ingeniería mecánica proporcionando una idea de los aspectos generales de la integridad estructural. El estudio de la síntesis y caracterización del polietileno

realizador por (Garzón, 2015), haciendo ensayos de dicho material, con el fin de obtener propiedades eléctricas, magnéticas y mecánicas, además, muestra el uso de las máquinas para cada tipo de ensayo y los resultados de cada una de las muestras cilíndricas de diferente diámetro y altura usadas.

Un análisis espectral y termo gravimétrico ejecutado por (Tugui, Tiron, Dascalu, Sacarescu, & Cazacu, 2019) confirma la estructura, pureza y estabilidad térmica del polietileno de ultra alto peso molecular (UHMW) comparado con unos elastómeros de pesos moleculares muy bajos y más comerciales, manifestando una recuperación elástica superior y decaimiento de tensión a alta elongación.

El desgaste tribológico del UHMW expuesto a varios ciclos de vida o fatiga es estudiado y observado por (Petrica, Duscher, Koch, & Archodoulaki, 2015) donde el coeficiente de fricción de las muestras expuestas a fatiga tenía un valor de más del doble para las muestras iniciales, pero se debe tener en cuenta que también tienen una vida útil límite donde sus propiedades van cambiando luego de su manejo como lo muestra (Laska, Archodoulaki, & Duscher, 2016).

Se evidenció su biocompatibilidad mejorando sus propiedades mecánicas y físicas incorporando PSI (ácido aspártico) a la matriz para aumentar su dureza, disminución del desgaste y aumento de elasticidad como lo muestra en su estudio (Polaczek, Majka, Sístak, & Pielichowski, 2013).

El siguiente polímero de estudio se caracterizó por su forma de cristalización debido a sus cadenas moleculares, (Rwei, Tseng, Chiu, Chang, & Chen, 2013) demuestran que es un polímero isomorfo, mediante el desarrollo de la aplicación Flash DSC. El Nylon 66 con 35% de fibra de vidrio siendo un material compuesto como lo estudia (Martínez, González-Estrada, & Martínez, 2107) donde investigan las propiedades mecánicas y tribológica de un material compuesto evaluando su desgaste.

La conductividad térmica del Nylon 66 después de su completa cristalización caracterizada por, (Xie, He, Cai, & Wenbing, 2019) donde la temperatura alrededor de su punto de fusión demostrando que la conductividad del nylon aumenta con su densidad molecular. Las producciones catalíticas del Nylon 66 como las estudio (Lee, Andrew Lin, Kwon, & Lee, 2019) a partir del desperdicio de alimentos donde su producción aún no es tan rentable como en los métodos petroquímicos, pero ya se encuentra en desarrollo su comercialización.

En el sector petroquímico (Nguyen, Moon, & Kim, 2020) investigaron las propiedades mecánicas y la microestructura del endurecido de pasta de cemento mezclado a nivel molecular con nano fibras de Nylon 66 a través de un proceso de electrohilado, manifestando una mejora en la resistencia a la tracción de un 30%, resistencia a la compresión de 8%, y aumentando su tenacidad en 49%, mejorando notoriamente sus propiedades mecánicas.

En este trabajo analizamos mediante elementos finitos el cangilón de un elevador. En primer lugar, caracterizamos según la norma ASTM D638-14 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2014) polietileno de UHMW y el Nylon 66 con 35% de fibra de vidrio,

sometidos a carga axial. Luego, realizamos el modelo CAD del cangilón en el software SolidWorks v2018. Posteriormente, definimos los parámetros del modelo numérico, incluyendo la geometría, las propiedades mecánicas de los materiales, y sus condiciones normales de operación. Se obtienen las distribuciones de tensión y deformación, los factores de diseño, comparando los dos materiales y proponiendo mejoras de diseño en la estructura del cangilón y en sus costos de fabricación.

3. Metodología.

La forma de los cangilones depende principalmente de los materiales a transportar, así como de la velocidad del elevador, (Limited, 2016) muestra los datos técnicos y referencias de ingeniería empleados habitualmente. Por medio de elementos finitos (González-Estrada, Leal-Enciso, & Reyes-Herrera, 2016) estudia la integridad estructural, caracterizando el material por medio de ensayos en el laboratorio.

Con respecto al espaciamiento de los cangilones, éstos se colocarán más próximos conforme aumente la velocidad, puesto que el material sale despedido más radialmente. Otro factor importante es el coeficiente de llenado del cangilón, que se define como la relación del volumen real de llenado al volumen teórico del mismo (Miravete & Larrodé, 2007). El cangilón modelado fue de la serie C 6x5, con un peso de 243g y un volumen de material para su fabricación de $374265,75 \text{ mm}^3$. En la Figura 1 y Figura 2 se presentan los cangilones utilizados en el elevador de material UHMW y Nylon 66 respectivamente.

Figura 1. Cangilón de material UHMW



Figura 2. Cangilón de material Nylon 66.



3.1 Caracterización

El UHMW y el Nylon 66 son materiales poliméricos termoestables aprobados por la FDA para tener contacto con alimentos, resistentes a agentes químicos corrosivos como el ácido sulfúrico. El UHMW es un material termoplástico no polar semicristalino, empleado en la industrial por su variado uso, siendo prácticamente insoluble en casi todos los disolventes y teniendo buen aislamiento eléctrico, también por sus propiedades de deslizamiento, resistencia al desgaste y abrasión como lo define su fabricante Metalcort en la Tabla 1.

El Nylon 66 tabulado en la Tabla 1 obtenido de Metalcort es un plástico reforzado caracterizado por tener buena rigidez y soportar grandes cargas durante largos periodos, siendo

muy versátil en aplicaciones agrícolas y de manejo de carga debido a su alta tenacidad junto con una excelente resistencia al impacto.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del UHMW y Nylon 66.

Propiedades	Material	
	UHMW	NYLON 66
Densidad	960 kg/m ³	1340 kg/m ³
Módulo de Young	680 MPa	5500 MPa
Coefficiente de Poisson	0,46	0,41
Módulo de Cizalladura	233 MPa	1950 MPa

Fuente. Metalcort.

3.1.1 Descripción de los ensayos ASTM

El método de prueba estándar para propiedades de tracción de plásticos cubre la determinación de las propiedades de tracción de plásticos reforzados y no reforzados en muestras de prueba estándar con forma de mancuerna cuando se prueban en condiciones definidas de pretratamiento, temperatura, humedad y velocidad de la máquina de prueba (American Society for Testing and Materials, 2014). Este método de prueba es aplicable para probar materiales de cualquier espesor de hasta 14 mm (0.55 in.). Sin embargo, para analizar muestras en forma de láminas delgadas, incluida una película de menos de 1,0 mm (0,04 in.) De espesor, la norma ASTM D882 es el método de prueba preferido. Los materiales con un espesor superior a 14 mm (0,55 in.) Se reducirán mediante mecanizado (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2014).

Este método de ensayo incluye la opción de determinar el coeficiente de Poisson a temperatura ambiente. Además, esta prueba está diseñado con el fin de recolectar datos de propiedades de tracción para el control y especificación de materiales plásticos. Algunas especificaciones de material que requieren el uso de este método de prueba, con algunas modificaciones de procedimiento que tienen prioridad al cumplir con la especificación (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2014).

Una máquina de prueba de velocidad constante tipo de movimiento de cruceta y que comprende esencialmente el seguimiento para las mediciones de módulo de elasticidad, se utilizará un extensómetro con un error de deformación máxima de 0,0002 mm / mm (in / in) que registra de forma automática y continua. Un extensómetro clasificado por la práctica E83 que cumple los requisitos de una clasificación B-2 dentro del rango de uso para mediciones de módulo cumple con este requisito (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2014).

Para realizar mediciones en alargamientos superiores al 20%, se aceptan técnicas de medición con un error que no supere el 10% del valor medido. Para la ejecución de los ensayos estáticos de tracción se utilizó una máquina MTS Bionix Tabletop, mostrada en la Figura 3. Máquina MTS Bionix usada para los ensayos de caracterización, modelo 370.02 con una celda de carga de capacidad de 25KN y un desplazamiento de ± 57 mm.

Figura 3. Máquina MTS Bionix usada para los ensayos a tracción.



Siguiendo la norma D638-14 para observar el comportamiento de los dos materiales se debe obtener la resistencia a la tracción. Esta propiedad se encuentra aplicando carga sobre las probetas normalizadas sometiéndose a esfuerzos axiales crecientes hasta que se produzca su rotura correspondiente produciendo la resistencia a la rotura de los materiales, la cual es determinada a partir de la fuerza máxima realizada justo antes de la falla.

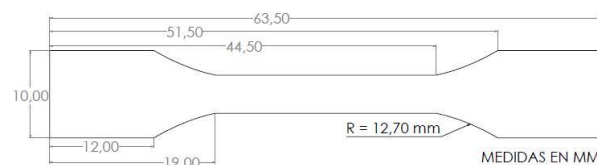
3.1.2 Tipo de probetas

El espécimen de prueba debe cumplir con las dimensiones determinadas por la norma. Debido a las condiciones limitadas y exclusivas del material y que se debe importar desde Alemania y Brasil, el tipo de probeta más específico para este trabajo es tipo V.

El espécimen Tipo V se utilizará cuando solo se encuentre disponible para evaluación un material limitado con un espesor de 4 mm (0.16 in.) O menos, o cuando se exponga un gran número de especímenes en un espacio limitado (pruebas de estabilidad térmica y ambiental) (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2014). Se ensayaron 10 probetas la mitad de material UHMW y las restantes de material Nylon 66.

Garantizando resultados reales, se determinó la geometría de las probetas según la norma D638-14 (American Society for Testing and Materials (ASTM), 2014). Donde se establecen los parámetros a tener en cuenta para realizar el ensayo a tracción. Las probetas seleccionadas para esta prueba son de tipo V como se puede ver en la Figura 4 con sus respectivos parámetros.

Figura 4. Acotación probeta de ensayos



Las probetas se obtuvieron directamente de los cangilones del elevador respectivamente de cada material donde su mecanizado se hizo principalmente con una máquina láser para terminar mecanizados según los parámetros requeridos por la norma con una máquina motortool.

3.2 Condiciones comunes de operación

Los cangilones seleccionados trabajan en un elevador donde el flujo de material es de una tonelada por minuto (1 Ton/min). La altura de descarga del material es de ocho metros (8 m).

Como se puede ver en el Apéndice A se requieren 197 cangilones, y como el flujo es de una tonelada por minuto entonces cada cangilón debe llevar 5,1kg por cada ciclo del elevador. Según los cálculos y recomendaciones del fabricante, el cangilón a utilizar es 6x5, que es el tipo de cangilón de estudio en este proyecto.

Los costos de fabricación del cangilón dependiendo del material se exponen en la Tabla 2.

Tabla 2. Costo volumen material por cangilón.

Material	Costo unitario
UHMW	\$ 4600 COP
Nylon 66	\$ 27600 COP

Fuente. Metalcort.

3.3 Modelado elementos finitos

El preámbulo de herramientas computacionales en el mundo del diseño mecánico permite la creación de sistemas mecánicos de una forma mucho más eficiente, también permite analizar el

comportamiento dinámico que tendrá el sistema, mediante programas de elementos finitos detectando fallas en su funcionamiento, permitiendo tomar decisiones y evitar que estos problemas aparezcan en fases más avanzadas donde serían difíciles y costosos de solucionar (González, 2010).

Se elaboró un modelo del cangilón con las propiedades mecánicas del UHMW y Nylon 66 respectivamente, donde se agregaron sus condiciones comunes de operación. Se realizó una independencia de malla en workbench de ANSYS, donde se ejecutaron varias mallas de diferente tamaño buscando la convergencia en desplazamientos y distorsión de elementos (skewness). Las dimensiones del cangilón se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones cangilón tipo C 6x5.

Largo	Distancia entre centros	Proyección	Profundidad	Altura base	Peso
145 mm	60 mm	130 mm	125 mm	70 mm	243 g

Fuente. Elaboración propia.

4. Resultados.

A continuación, se expone el procedimiento experimental para la caracterización, los resultados de la simulación con elementos finitos del cangilón, la comparación de los dos materiales de estudio y las modificaciones del diseño del cangilón.

4.1 Ensayos estáticos

Para realizar la caracterización de los materiales se realizaron ensayos estáticos según la norma ASTM D638-14 donde se pudo determinar la carga máxima y el desplazamiento máximo que soportan las probetas. Se realizaron cinco ensayos con cada material para un total de diez pruebas ejecutadas, donde se observó una conducta análoga en las probetas de cada material, y una conducta diferente de un material al otro. Las pruebas se realizaron a una velocidad de 1mm/min, según la norma, para probetas tipo V, donde se mantuvo velocidad constante hasta la ruptura de las probetas.

La ruptura de las probetas fue diferente para cada material, en el caso del UHMW fue casi imperceptible provocando una rotura parcial, en cambio el Nylon 66 presentó una rotura completa del material. La máquina de la Figura 3 nos arrojó los valores de cada ensayo de las probetas para elaborar las curvas de esfuerzo vs deformación, observándose un comportamiento no lineal como lo sugería la norma.

En la Tabla 4 y Tabla 5 se muestra los resultados de los ensayos a las probetas según la norma ASTM D638-14 para el UHMW y el Nylon 66 respectivamente.

Tabla 4. Resultados para ensayos estáticos del material UHMW.

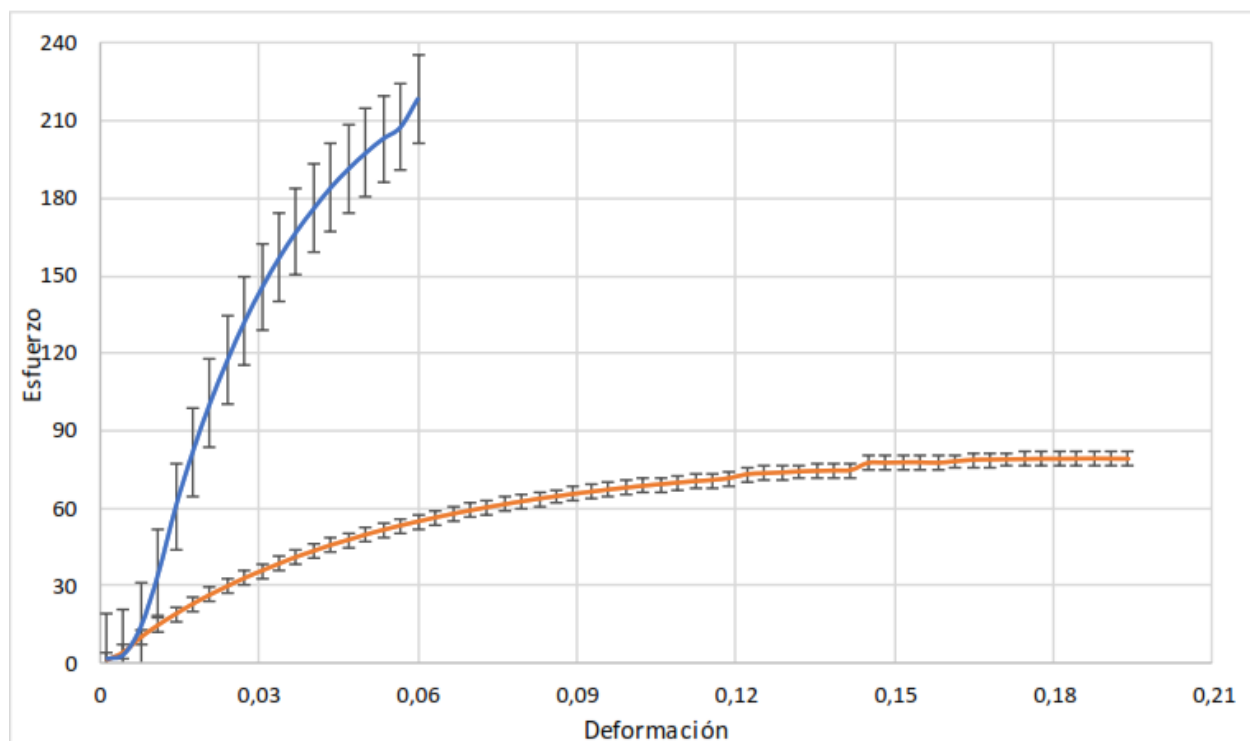
Ensayo	Área	Carga máxima	Resistencia a la tracción	Desplazamiento máximo
1	8,97 mm ²	756,06 N	84,47 N/mm ²	5,96 mm
2	8,95 mm ²	629,52 N	70,33 N/mm ²	5,57 mm
3	8,90 mm ²	593,02 N	66,25 N/mm ²	4,98 mm
4	8,96 mm ²	717,71 N	80,19 N/mm ²	5,85 mm
5	8,93 mm ²	647,03 N	72,29 N/mm ²	5,66 mm
Promedio	8,94 mm ²	668,66 N	74,70 N/mm ²	5,6 mm

Tabla 5. Resultados para ensayos estáticos del material Nylon 66.

Ensayo	Área	Carga máxima	Resistencia a la tracción	Desplazamiento máximo
1	8,92 mm ²	1587,79 N	177,40 N/mm ²	0,82 mm
2	8,93 mm ²	1906,52 N	213,02 N/mm ²	1,05 mm
3	8,95 mm ²	2139,32 N	239,03 N/mm ²	1,1 mm
4	8,91 mm ²	1301,28 N	145,39 N/mm ²	0,69 mm
5	8,96 mm ²	2210,69 N	247 N/mm ²	1,15 mm
Promedio	8,93 mm ²	1829,12 N	204,36 N/mm ²	0,96 mm

En la Figura 5 se contrasta el UHMW con el Nylon 66, donde se observa el tipo de tendencia que ofrecen respectivamente los dos materiales, identificando el UHMW como un material con tendencia de tipo elastómero, con un área de sección transversal de probeta relativamente igual, presentando una deformación de 0,18 y su valor máximo de esfuerzo de 83 MPa y el Nylon 66 con tendencia tipo plástico mostrando un rango un poco grande en sus barras de error con una deformación de 0,07 y un valor máximo de esfuerzo de 220 MPa ver Apéndice B.

Figura 5. Gráfica Sigma vs Épsilon de materiales sometidos a ensayos a tracción.



En la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** se comparan los datos de los catálogos del fabricante con los resultados obtenidos en el laboratorio donde se evidencia un porcentaje de error medio en los dos materiales debido a su dificultad de mecanizado.

Tabla 6. Comparación de los resultados experimentales con los teóricos.

Material	Sigma	Épsilon	Módulo de Young		Error
	Experimental	Experimental	Experimental	Teórico	
UHMW	83 MPa	0,18	461 MPa	680 MPa	32%
Nylon 66	220 MPa	0,06	3666 MPa	5500 MPa	33%

En la Figura 6 se puede observar las probetas de UHMW sometidas al ensayo de carga estática a tracción.

Figura 6. Probetas sometidas a carga estática material UHMW.



En la Figura 7 se puede observar las probetas de material Nylon 66 sometidas al ensayo de carga estática a tracción.

Figura 7. Probetas sometidas a carga estática material Nylon 66.



La Figura 8 muestra el aspecto de la rotura conseguida de la probeta de material UHMW en detalle, como se describió anteriormente, su rotura no fue completa y fue muy cerca a la cabeza de la probeta que no es lo recomendable en la norma, pero es debido a la dificultad del mecanizado en las probetas.

Figura 8. Detalle de la rotura conseguida en la probeta.



La Figura 9 muestra el aspecto de la rotura conseguida de la probeta de material Nylon 6 en detalle.

Figura 9. Detalle de la rotura conseguida en la probeta.



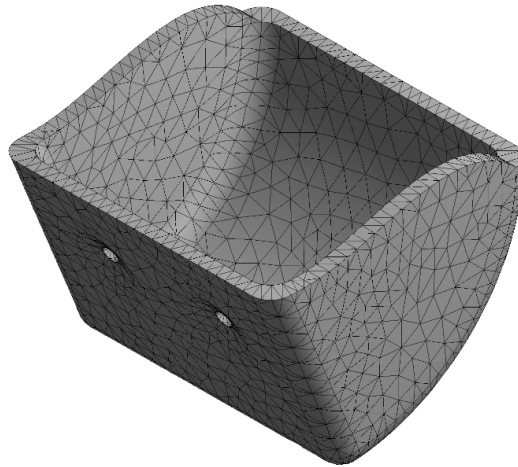
4.2 Modelo numérico

Se utilizaron dos tipos diferentes de propiedades mecánicas para el modelo numérico, la primera tipo teórica obtenida según el fabricante en sus catálogos, la segunda calculada según las pruebas experimentales. Para la simulación del cangilón se tuvo en cuenta las condiciones comunes de operación donde se usó la carga promedio que actúa sobre el área de aplicación en el cangilón, correspondiente a un valor aproximado de 50 N.

4.2.1 Mallado

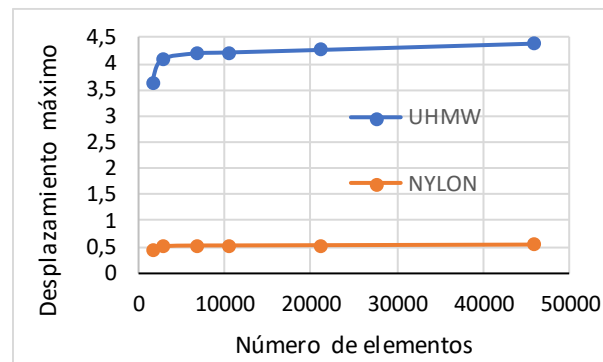
El mallado se realiza con elementos tetraédricos, buscando una variación del esfuerzo en la superficie de contacto principal como se puede ver en la Figura 10, donde un mallado de 5 mm con 6628 elementos y 12954 nodos se puede obtener resultados sin un gasto computacional alto.

Figura 10. Mallado final del cangilón.



Se realizaron pruebas de independencia de malla con el fin de controlar el error de discretización comprobando la convergencia de la deformación al rango asintótico como se puede observar los resultados en la Figura 11.

Figura 11. Convergencia del desplazamiento máximo de los materiales en el cangilón.



En la

Tabla 7 y Tabla 8 se muestran los desplazamientos obtenidos en cada uno de los mallados realizados en el cangilón para el UHMW y el Nylon 66 respectivamente calculando el error del desplazamiento máximo de un mallado con respecto al mallado anterior.

Tabla 7. Convergencia de los desplazamientos máximos del cangilón de material UHMW.

Número de elementos	Desplazamiento máximo (mm)	Error
1512	3,6253	12%
2700	4,0866	2,84%
6628	4,203	0,58%
10458	4,2275	1,16%
21052	4,2767	2,85%
45738	4,398	

Tabla 8. Convergencia de los desplazamientos máximos del cangilón de material Nylon 66.

Número de elementos	Desplazamiento máximo (mm)	Error
1512	0,46	12%
2700	0,51545	2,9%
6628	0,53043	0,38%
10458	0,53247	1,07%
21052	0,53818	2,62%
45738	0,55229	

En la Tabla 9 se muestran los resultados de los desplazamientos y los esfuerzos de von Mises obtenidos de la simulación numérica, teniendo como base las propiedades obtenidas en los

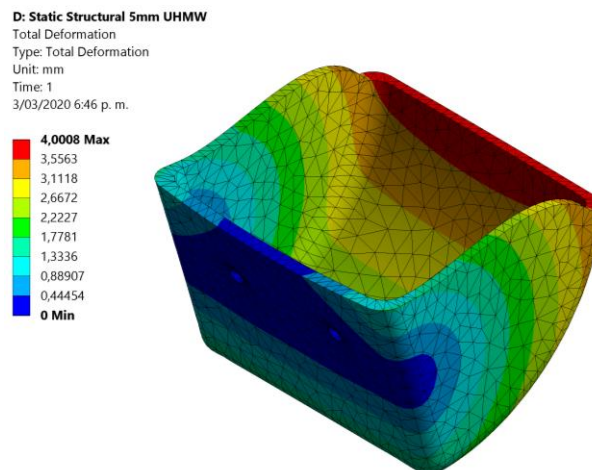
catálogos y las obtenidas en las pruebas experimentales y las condiciones comunes de operación. Afirmando el modelo de los materiales y las condiciones de contorno estimadas en el modelo numérico del cangilón ver Apéndice C.

Tabla 9. Resultados desplazamientos del cangilón de material UHMW y Nylon 66.

Material	Carga máxima	Propiedades	Desplazamientos máximos
UHMW	50 N	Teórica	4,07 mm
		Experimental	5,10 mm
Nylon 66	50 N	Teórica	0,522 mm
		Experimental	0,666 mm

En la Figura 12 se muestra la distribución de los desplazamientos en el cangilón de Nylon 66.

Figura 12. Distribución de los desplazamientos en el cangilón de material Nylon 66.



4.2.2 Análisis de esfuerzos

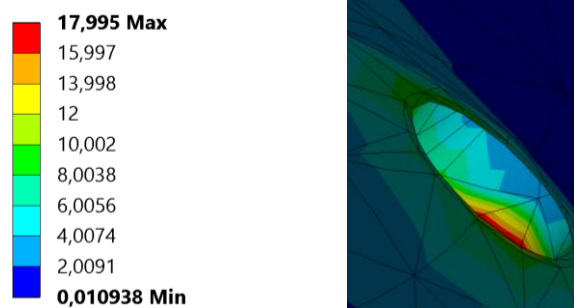
Se analizaron los esfuerzos generados en el cangilón según la teoría de von Mises, aplicando su carga de operación en los dos materiales evaluados con sus propiedades mecánicas según el fabricante y según las pruebas experimentales, calculando sus respectivos factores de seguridad como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados esfuerzos del cangilón de material UHMW y Nylon 66.

Material	Carga máxima	Propiedades	Esfuerzo máximo	Factor de seguridad
UHMW	50 N	Teórica	17,995 MPa	38
		Experimental	17,125 MPa	40
Nylon 66	50 N	Teórica	16,597 MPa	331
		Experimental	16,049 MPa	342

En la Figura 13 se muestra en detalle los esfuerzos generados en los puntos de apoyo del cangilón de material UHMW.

Figura 13. Detalle del cangilón sometido a esfuerzos de material UHMW.



4.3 Comparación de materiales

La Tabla 11 muestra los factores para seleccionar el material para un cangilón de un elevador.

Tabla 11. Parámetros ponderados de un cangilón

Tabla de ponderados		
Carga máxima axial	Mayor a 1000 N	6
	Menor a 1000 N	1
Deformación	Alta	1
	Media	3
	Baja	6
Costo de material	Alto	1
	Medio	3
	Bajo	6
Flexibilidad a impactos por agentes externos	Si	6
	No	1
Costos de mantenimiento	Alto	3
	Bajo	1
Impacto a temperaturas altas	Si	3
	No	1

Recogiendo los datos expuestos a lo largo de este estudio y en la Tabla 11, se da como material óptimo por una pequeña diferencia, el Nylon 66 con una sumatoria de 16 puntos ponderados respecto a los 15 puntos obtenidos por el UHMW ver Apéndice C.

4.4 Modificaciones del diseño

Se modificó el espesor variando de los 7mm iniciales, disminuyendo a 5mm y 3mm los lados y la zona de aplicación de la carga del cangilón, simulando nuevamente cada tipo de cangilón de material Nylon 66 con sus respectivos nuevos espesores y las mismas condiciones de trabajo identificando sus nuevos esfuerzos y factores de diseño expuesto sus resultados en la Tabla 12.

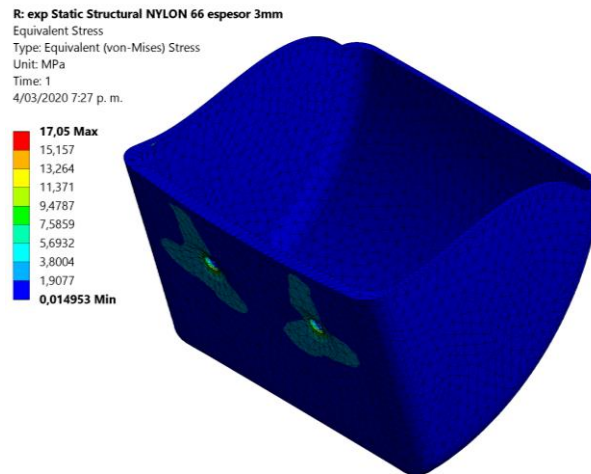
Tabla 12. Factores de seguridad variando el espesor del cangilón.

Espesor	Esfuerzo	Factor de seguridad
7 mm	16,049 MPa	342
5 mm	16,597 MPa	331
3 mm	17,05 MPa	322

En la Figura 14 se denotan los esfuerzos que actúan sobre el cangilón de 3mm de espesor de material Nylon 66. El costo del volumen de material nuevo del cangilón de espesor de 3 mm es \$16400 COP teniendo un ahorro de \$11200 COP con respecto al cangilón de 7 mm y una disminución de su factor de seguridad en 5,84% siendo este diseño menos costoso y aun

resistente a las solicitaciones del fabricante mejorando la relación costo – beneficio de los cangilones.

Figura 14. Modelado cangilón de espesor de 3mm de material Nylon 66.



5. Conclusiones

Se realizó la caracterización del UHMW y Nylon 66 mediante pruebas estáticas a tracción según la norma ASTM D638-14, determinando su tensión máxima y su desplazamiento máximo antes de la rotura. Se validaron los materiales calculando el error entre los datos proporcionados por el fabricante en catálogos y el calculado en las pruebas, validando los parámetros utilizados en las pruebas.

Se definió numéricamente el modelo de los dos materiales utilizando las propiedades mecánicas dadas por el fabricante y las recopiladas en los ensayos a tracción obteniendo los desplazamientos y esfuerzos generados en el cangilón al aplicarse las cargas de operación logrando resultados muy parecidos en los dos tipos de modelos numéricos aprobando las condiciones de trabajo aplicadas en el cangilón.

Se elaboró una tabla de ponderados donde se incluyen los parámetros más importantes para escoger el material de un cangilón donde el Nylon 66 obtuvo un mayor puntaje en las medidas establecidas, siendo este material seleccionado para hacer un rediseño del cangilón con sus propiedades mecánicas.

Con una reducción de 5,84% del factor de seguridad, el nuevo modelo del cangilón mostró una relación costo - beneficio óptima donde su costo de volumen de material de fabricación bajó considerablemente manteniendo un factor de seguridad sobredimensionado.

Referencias Bibliográficas

- Acosta, A., Loa, J., Lomeli, E., Monroy, F., Ortiz, J., Ortiz, I., & Silva, H. (2016). *Diseño y construcción de elevador de cangilones para alimentación de una criba*. Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, México.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, ASTM D638-14*. West Conshohocken, PA: American Society for Testing and Materials.
- Bennetts, I. D., Moinuddin, K. A. M., Goh, C. C., & Thomas, I. R. (2005). Testing and factors relevant to the evaluation of the structural adequacy of steel members within fire-resistant elevator shafts. *Fire Safety Journal*, 40(8), 698–727.
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2005.06.005>
- García, C. (2015). Manejo de materiales. In *Planeación y diseño de instalaciones* (2nd ed., pp. 1–61). Tijuana , Baja California: SEP.
- Garofoli, A., & Garofoli, J. (2014). Elevadores a cangilones de descarga centrífuga. Pérdidas ocasionadas por problemas de diseño. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 18(2), 55–67.
- Garzón, A. (2015). *Síntesis y caracterización de un material compuesto a base de polietileno de alta densidad y magnetita pulverizada*. Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

- González-Estrada, O. A., Leal-Enciso, J., & Reyes-Herrera, J. (2016). Análisis de integridad estructural de tuberías de material compuesto para el transporte de hidrocarburos por elementos finitos. *Revista UIS Ingenierías*, 15(2), 105–116. <https://doi.org/10.18273/revuin.v15n2-2016009.106>
- González, F. (2010). *Interacción de ANSYS con entornos de ventanas a medida. Aplicación al campo de la Ingeniería Mecánica*. Escuela Ingeniería Industrial, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España.
- Holbrow, P., Lunn, G. A., & Tyldesley, A. (2002). Explosion venting of bucket elevators. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 15(5), 373–383. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(02\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(02)00021-9)
- Laska, A., Archodoulaki, V. M., & Duscher, B. (2016). Failure analysis of retrieved PE-UHMW acetabular liners. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 61, 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.01.007>
- Lee, Y., Andrew Lin, K. Y., Kwon, E. E., & Lee, J. (2019). Renewable routes to monomeric precursors of nylon 66 and nylon 6 from food waste. *Journal of Cleaner Production*, 227, 624–633. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.194>
- Limited, C. (2016). *Catálogo Componentes para elevadores de cangilones diseñados para aplicaciones agrícolas e industriales*. Morton, IL USA.
- Manga-Rodríguez, C. (2014). *Determinación de causas de falla en el elevador de cangilones del transportador de clínker de argos*. Escuela Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Colombia.
- Martínez, E., González-Estrada, O. A., & Martínez, A. (2107). Evaluación de las propiedades tribológicas de materiales compuestos de matriz metálica (MMCs) procesados por técnicas

de fabricación aditiva con haz láser (SLM). *Revista UIS Ingenierías*, 16(1), 101–114.
<https://doi.org/10.18273/revuin.v16n1-2017010>

Miravete, A., & Larrodé, E. (2007). *Elevadores: Principios e innovaciones* (7th ed.; A. Miravete & E. Larrodé, Eds.). Retrieved from <http://books.google.com.co/books?id=BsaqGTRli58C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Nguyen, T. N. M., Moon, J., & Kim, J. J. (2020). Microstructure and mechanical properties of hardened cement paste including Nylon 66 nanofibers. *Construction and Building Materials*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117134>

Petrica, M., Duscher, B., Koch, T., & Archodoulaki, V. M. (2015). Tribological investigations on virgin and accelerated aged PE-UHMW. *Tribology International*, 87, 151–159.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.02.024>

Polaczek, J., Majka, T. M., Sístak, M., & Pielichowski, K. (2013). Application of Ultra-high Molecular Weight Polyethylene Modified with Poly (aspartic acid) for Implant Materials. *Modern Polymeric Materials for Environmental Applications*, 5(1), 31–155.

Rademacher, F. J. C. (1979). Non-spill discharge characteristics of bucket elevators. *Powder Technology*, 22(2), 215–241. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(79\)80029-7](https://doi.org/10.1016/0032-5910(79)80029-7)

Rwei, S. P., Tseng, Y. C., Chiu, K. C., Chang, S. M., & Chen, Y. M. (2013). The crystallization kinetics of Nylon 6/6T and Nylon 66/6T copolymers. *Thermochimica Acta*, 555, 37–45.
<https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.12.026>

Sinnott, M. D., Hilton, J. E., McBride, W., & Cleary, P. W. (2017). Coupled gas-particulate discharge from a bucket elevator. *Powder Technology*, 314, 203–217.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.018>

- Tugui, C., Tiron, V., Dascalu, M., Sacarescu, L., & Cazacu, M. (2019). From ultra-high molecular weight polydimethylsiloxane to super-soft elastomer. *European Polymer Journal*, *120*(September), 109243. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.109243>
- Xie, K., He, Y., Cai, J., & Wenbing, H. (2019). Thermal Conductivity of Nylon 46, Nylon 66 and Nylon 610 Characterized by Flash DSC Measurement. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, *683*, act 2019. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.07.019>
- Xiong, J. J., & Shenoi, R. A. (2019). General aspects on structural integrity. *Chinese Journal of Aeronautics*, *32*(1), 114–132. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2018.07.018>

Apéndices

Apéndice A. Condiciones comunes de operación

los cangilones de tipo profundo y de material como el UHMW y el Nylon 66 se utilizan para productos granulares muy abrasivos y se determina que el rango de velocidad de ellos en la banda es de 1.6 – 1.8 (m/s) según el fabricante.

La descarga del material es realizada por fuerza centrífuga y no por gravedad, entonces su velocidad de descarga centrífuga recomendada es $V_t = 120 \text{ m/min}$ (2 m/s).

Para un flujo de 2 ton/min la velocidad de banda es $V_t = 120 \text{ m/min}$, es decir recorre 120 m en un minuto y en promedio se dan 2 vueltas por minuto por lo que en 60 m se debe colocar tal número de cangilones que suministren una tonelada.

Los fabricantes recomiendan instalar cangilones espaciados a una distancia de doce pulgadas (12" o 0.305 m), entonces en 60 m se requieren 197 cangilones, ahora dividiendo la cantidad de material a proveer por el número de cangilones, obtendrá el peso que debe llevar cada cangilón

$$\frac{1 \text{ toneladas}}{197 \text{ cangilones}} = 0.0051 \frac{\text{ton}}{\text{cangilon}}$$

La densidad promedio de los materiales a transportar por los cangilones es:

$$\beta = 5,55 \times 10^{-3} \text{Kg/cm}^3$$

$$V = \frac{m}{\beta} \quad (1)$$

$$V = \frac{0.0051 \times 1000}{5.55 \times 10^{-3}} = 919 \text{ cm}^3$$

El ancho del cangilón recomendado por el fabricante es de 6" (15,24 cm), con esta medida se obtiene el área A que debe tener el cangilón.

$$\text{Area} \times \text{Ancho} = V \quad (3)$$

$$\text{Area} \times 15,24 = 919 \text{ cm}^3$$

$$\text{Area} = 60,3 \text{ cm}^2$$

Según el fabricante el cangilón a utilizar es de 6x5, que es el tipo de cangilón de estudio en este proyecto.

Apéndice B. Caracterización UHMW y Nylon 66.

El esfuerzo de la probeta se calcula dividiendo su fuerza axial entre el área de la sección transversal de la probeta

$$F^{tu} = \frac{P^{max}}{A} \quad (1)$$

Donde:

- F^{tu} es la resistencia a la tracción.
- P^{max} fuerza máxima antes del fallo.
- A medida de la zona de la sección transversal de la probeta.

Ensayo	Área [mm ²]		
1	8,97		
2	8,95		
3	8,90		
4	8,96		
5	8,93		
Prom	8,94		
S	0,02		
		PROBETA 1	PROBETA 1
		area 2	ESFUERZO (N/mm) 1 Axial Force (N)
		7	1,129747527 7,908232689

Épsilon se calcula dividiendo el desplazamiento axial sobre la longitud de la probeta.

L 1	Axial Displacement (mm)	epsilon 1
25,5	0,000303984	1,19209E-05

El módulo de Young se calcula dividiendo sigma sobre épsilon.

Tabla. Cálculo Módulo de Young según datos experimentales.

Material	Sigma	Épsilon	Módulo de Young
UHMW	83 MPa	0,18	461 MPa
Nylon 66	220 MPa	0,07	3666 MPa

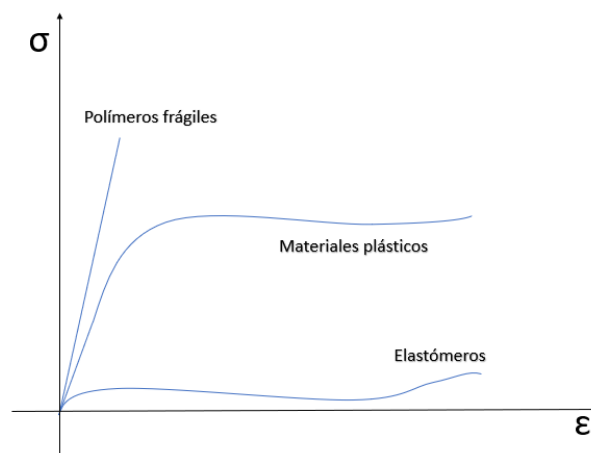
En las tablas de los resúmenes de datos obtenidos en las pruebas de tracción se calcula el promedio del área, carga máxima, resistencia a la tracción y desplazamiento máximo.

$$prom\ area = \frac{\sum Area\ 1 + Area\ 2 + Area\ 3 + Area\ 4 + Area\ 5}{n}$$

$$prom\ area = \frac{\sum 8,97 + 8,95 + 8,90 + 8,96 + 8,93}{5} = 8,94$$

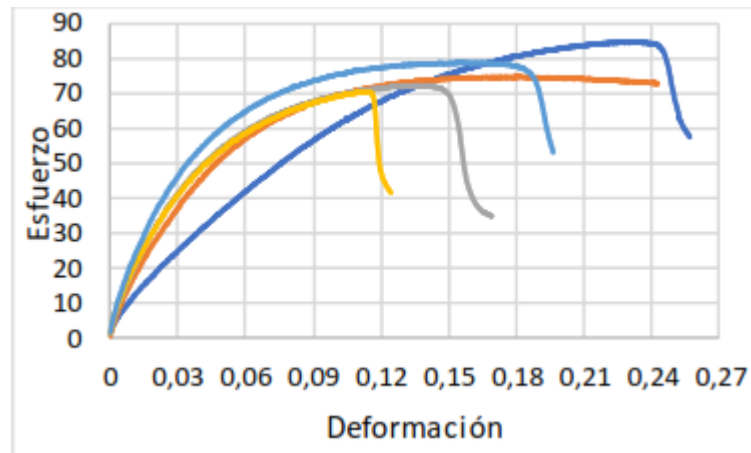
Existen tres tipos de tendencias típicas de curva esfuerzo contra deformación unitaria en los materiales polímeros frágiles, materiales plásticos y elastómeros.

Curva típica Esfuerzo Vs Épsilon para materiales polímeros.



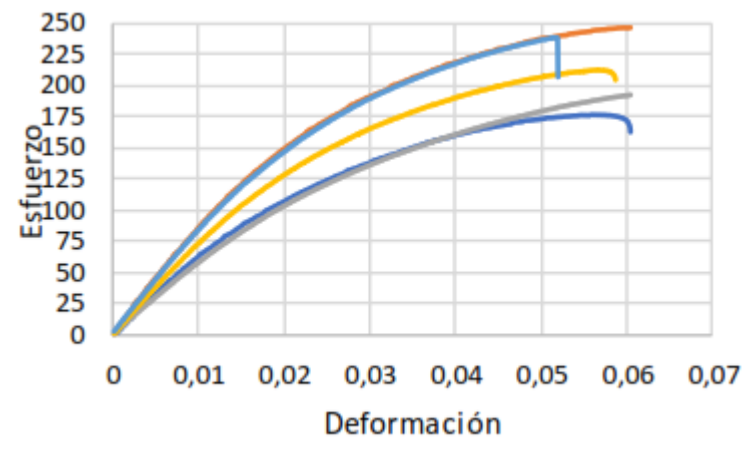
Se adjunta la gráfica de esfuerzo contra épsilon en las probetas de UHMW

Grafica Esfuerzo Vs Épsilon para ensayos a tracción UHMW.



Se adjunta la gráfica de esfuerzo contra épsilon en las probetas de Nylon 66.

Grafica esfuerzo Vs deformación ensayos a tracción Nylon 66 con 35% fibra de vidrio.



Apéndice C. Simulación en ANSYS

El cálculo del módulo de rigidez se realiza mediante la siguiente ecuación, de las tablas de ficha técnica de cada material podemos encontrar el módulo de Young y el coeficiente de poisson, podemos calcular el módulo de rigidez.

$$E = 2G(r + 1)$$

Donde:

- E es el módulo de Young
- G módulo de rigidez.
- r es el coeficiente de poisson.

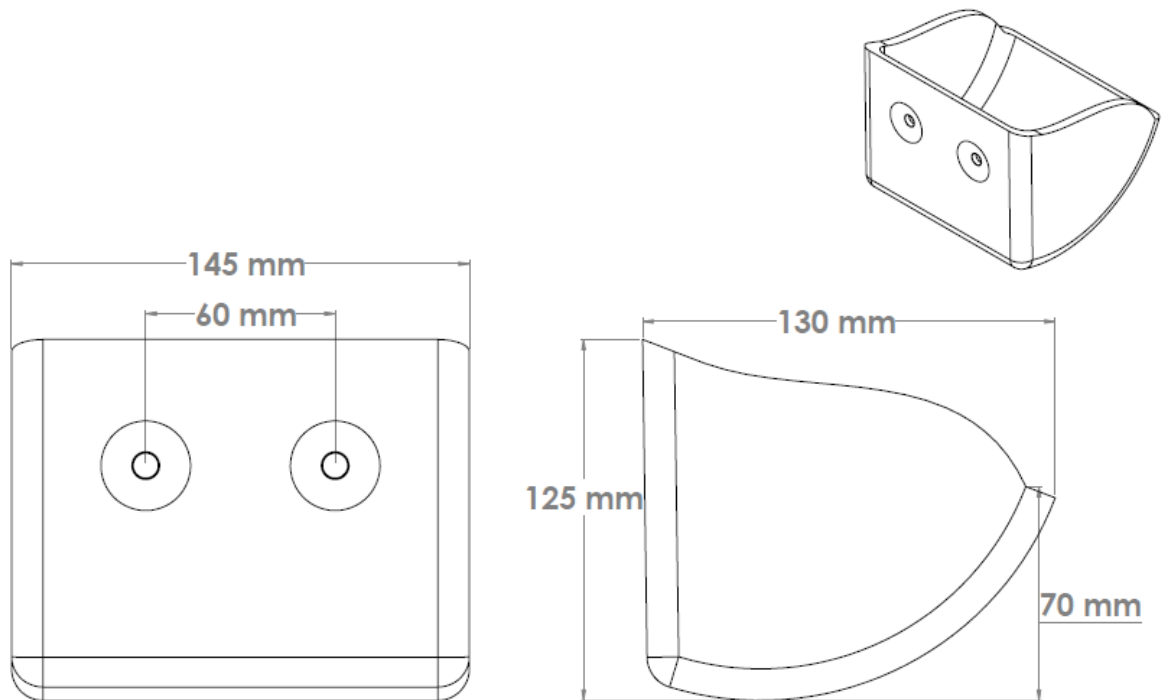
UHMW

- Módulo de Young = 680 MPa
- coeficiente de poisson= 0,46

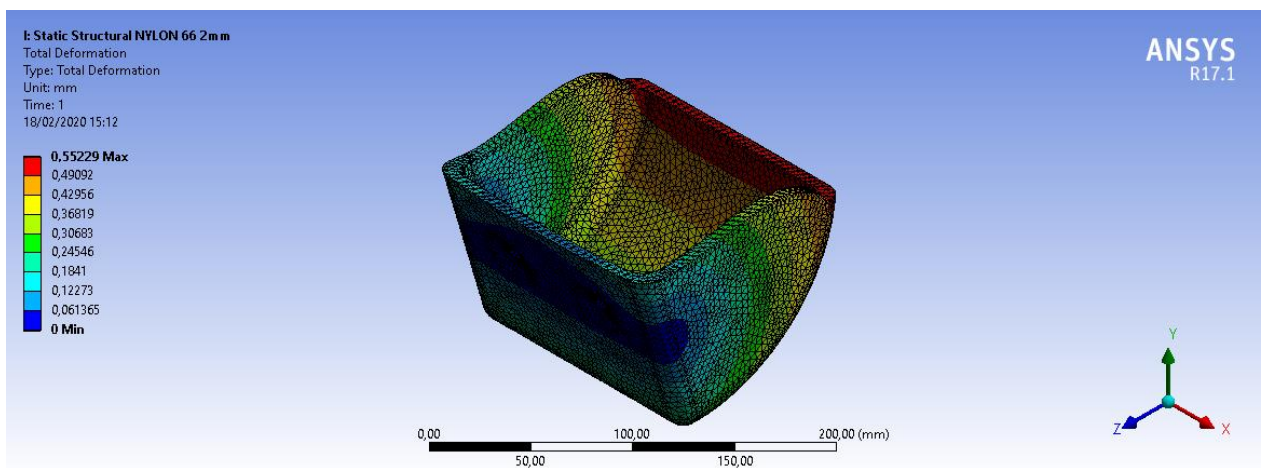
$$G = \frac{E}{2(r + 1)}$$

$$G = \frac{680}{2(0,46 + 1)} = 233 \text{ MPa}$$

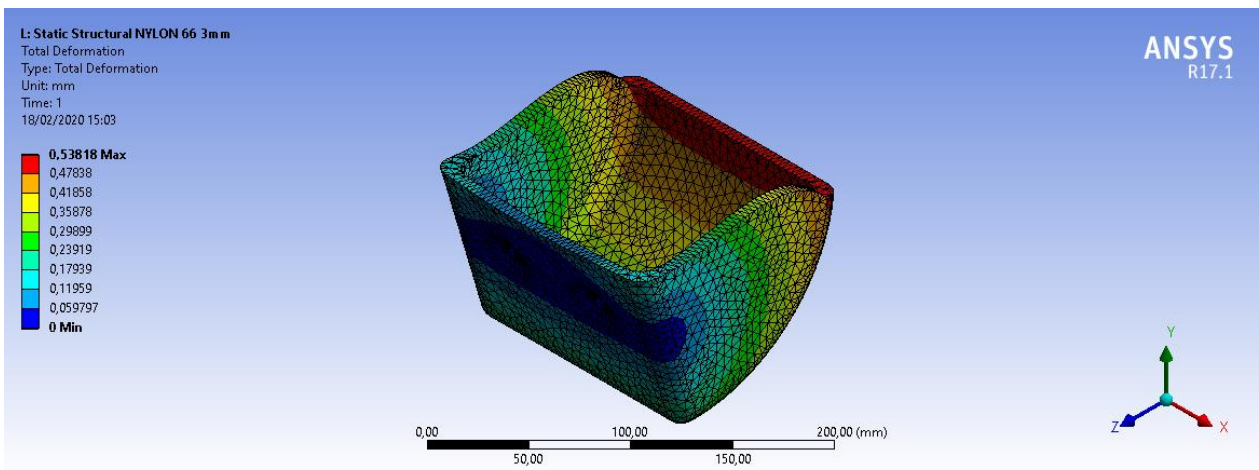
Se deben ingresar el resto de propiedades de material al software ANSYS y después importar el modelado del cangilón para agregarle sus condiciones comunes de operación.

Dimensiones del cangilón tipo 6x5.

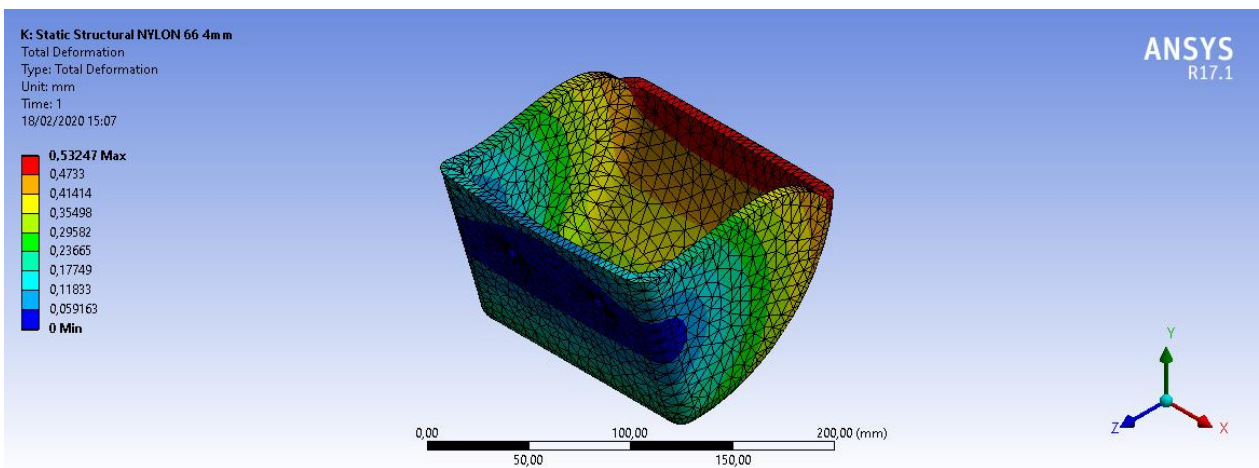
Se realizan mallados de 20mm, 10mm, 5mm, 4mm, 3mm y 2mm buscando la convergencia.

Desplazamientos en el cangilón de Nylon 66 mallado de 2mm.

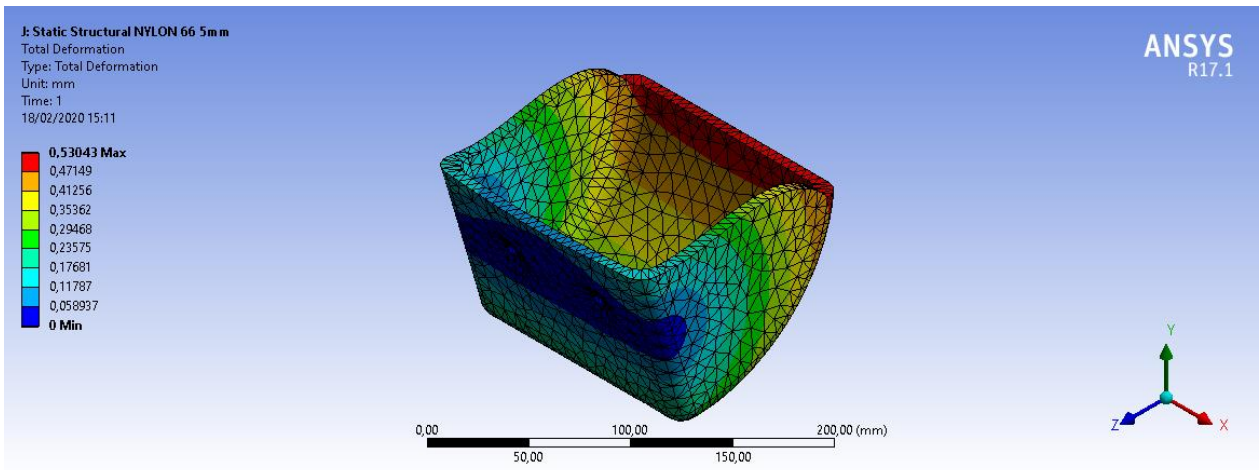
Desplazamientos en el cangilón de Nylon 66 mallado de 3mm.



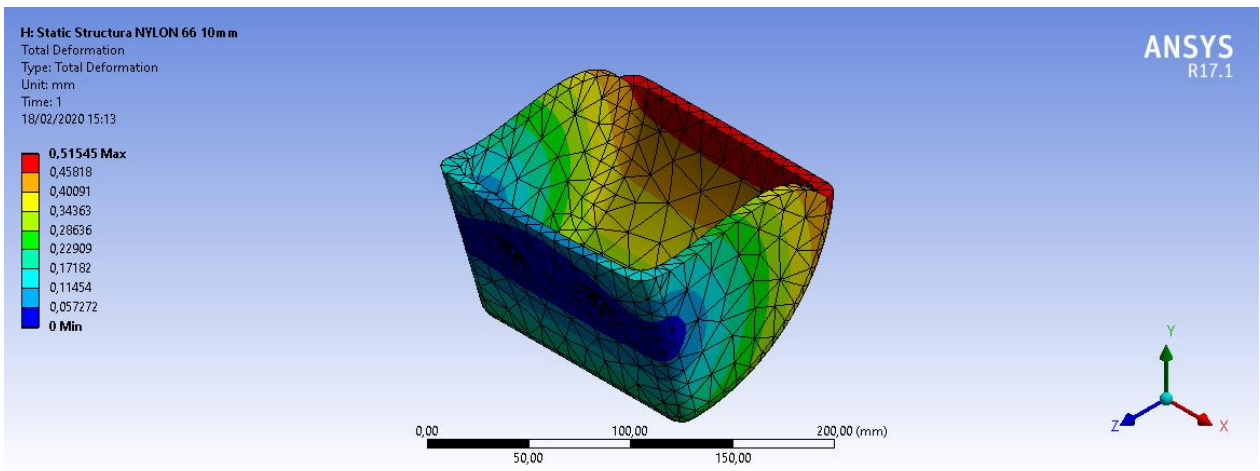
Desplazamientos en el cangilón de Nylon 66 mallado de 4mm.



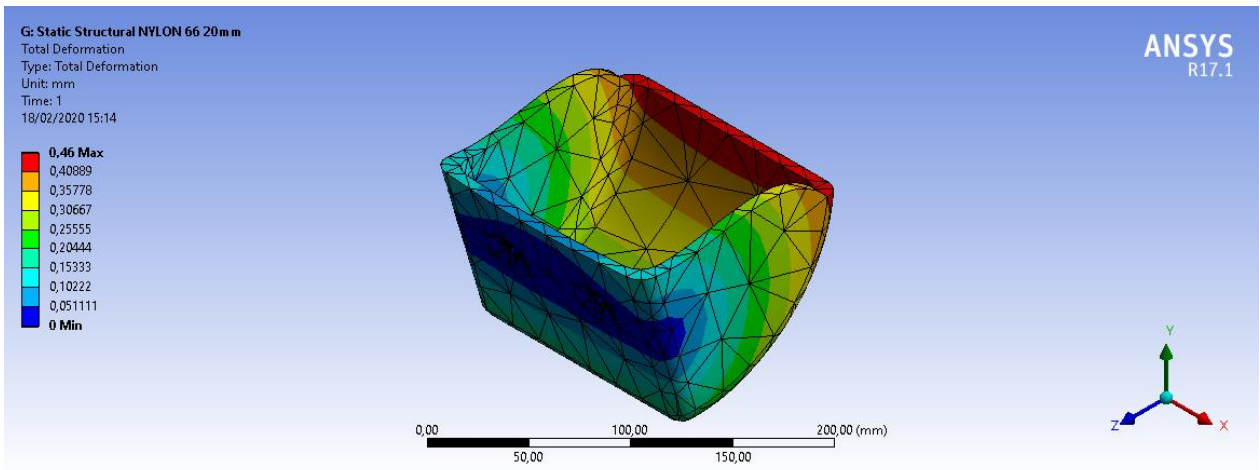
Desplazamientos en el cangilón de Nylon 66 mallado de 5mm.



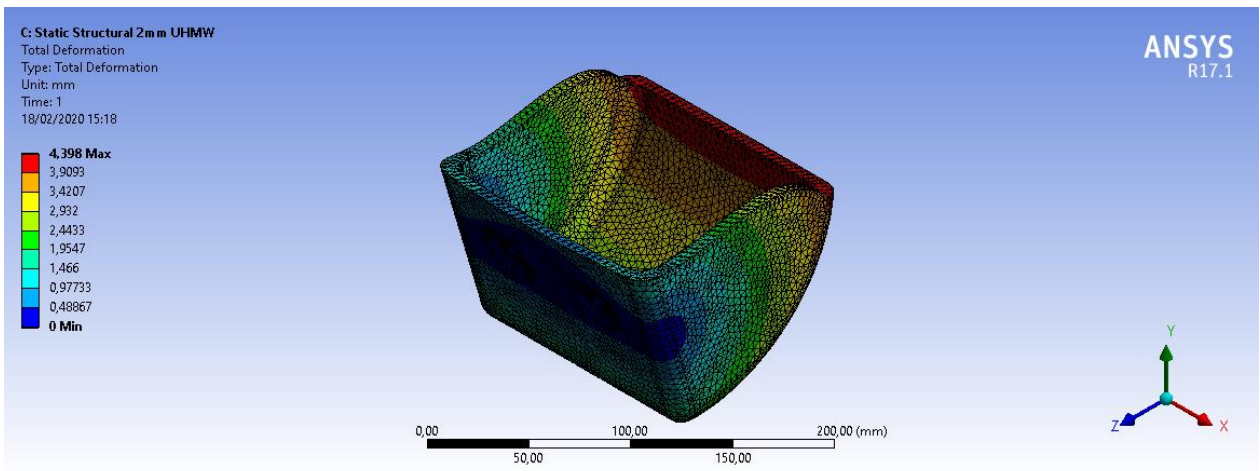
Desplazamientos en el cangilón de Nylon 66 mallado de 10mm.



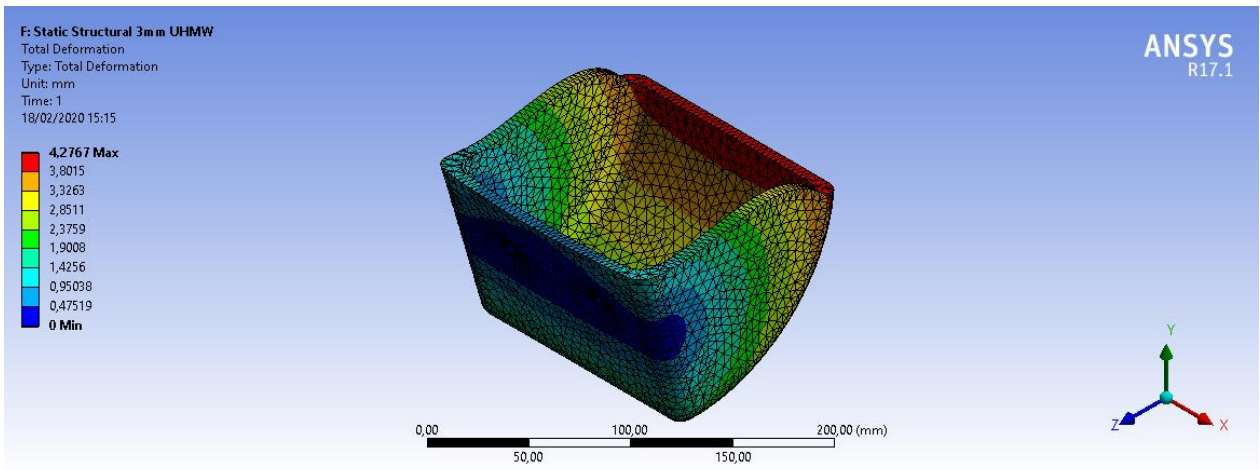
Desplazamientos en el cangilón de Nylon 66 mallado de 20mm.



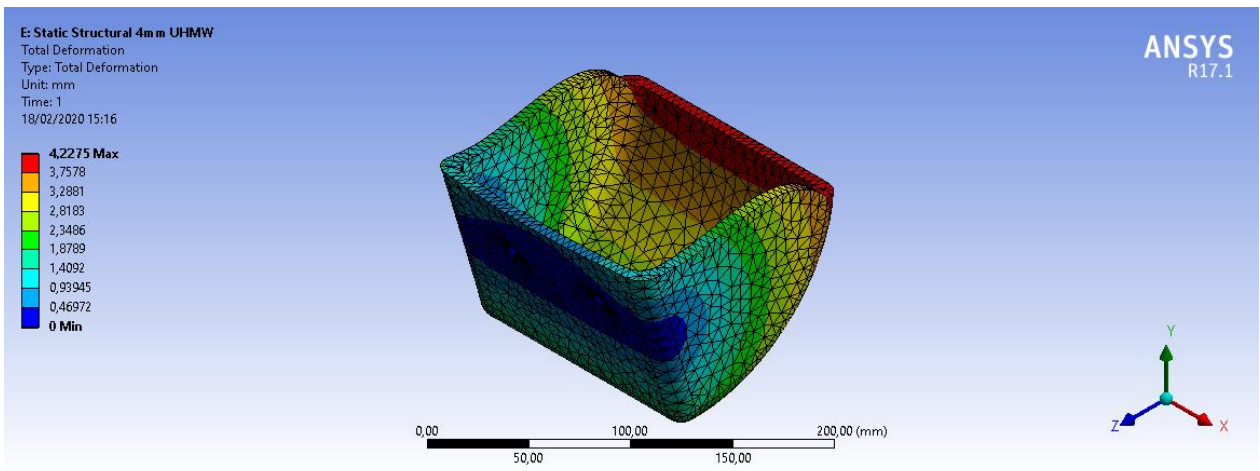
Desplazamientos en el cangilón de UHMW 66 mallado de 2mm.



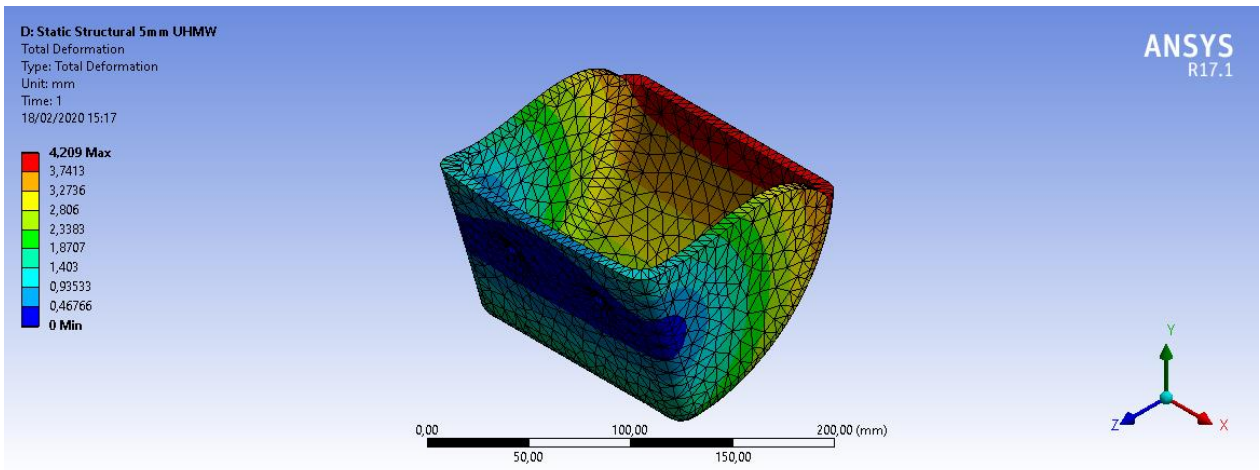
Desplazamientos en el cangilón de UHMW 66 mallado de 3mm.



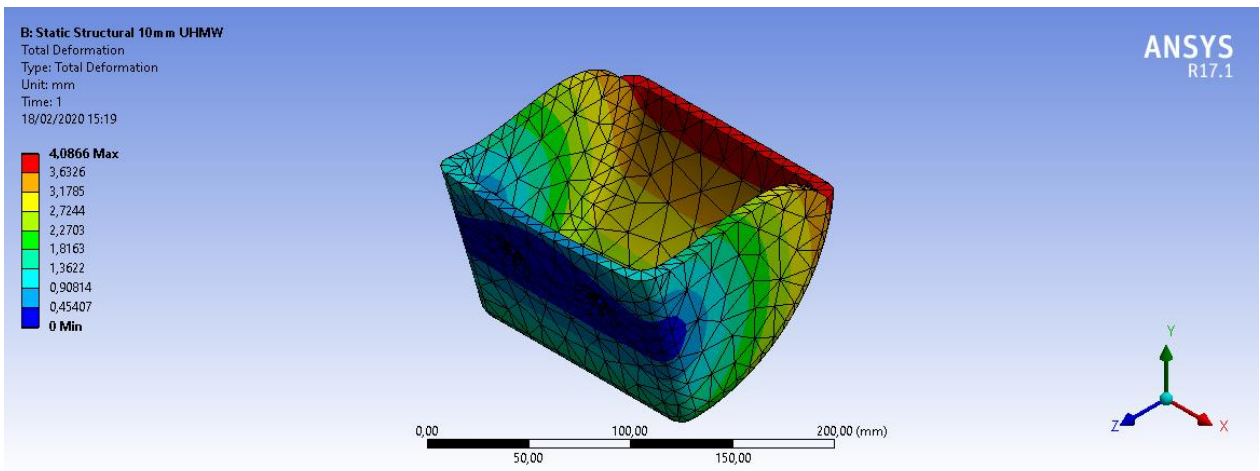
Desplazamientos en el cangilón de UHMW 66 mallado de 4mm.



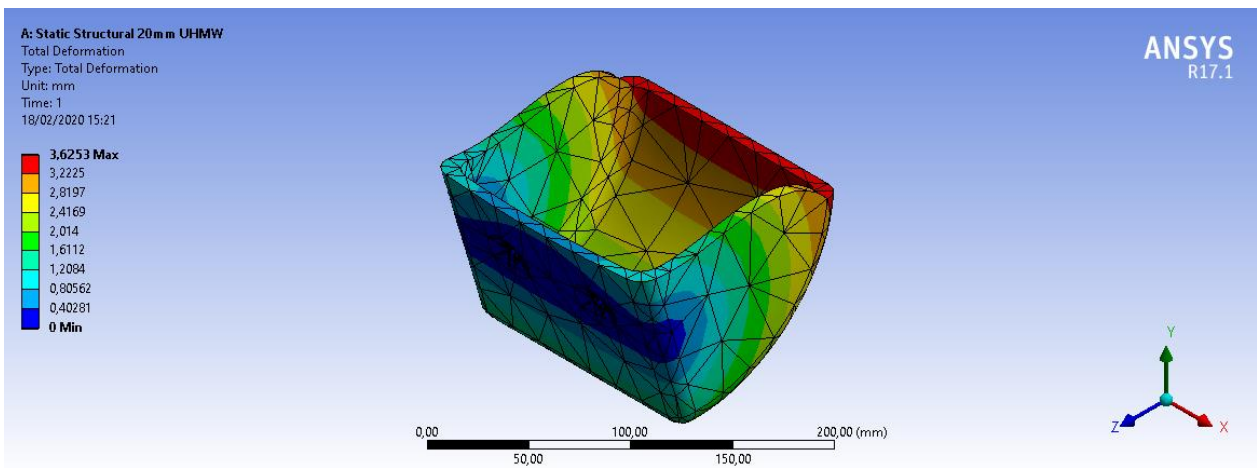
Desplazamientos en el cangilón de UHMW 66 mallado de 5mm.



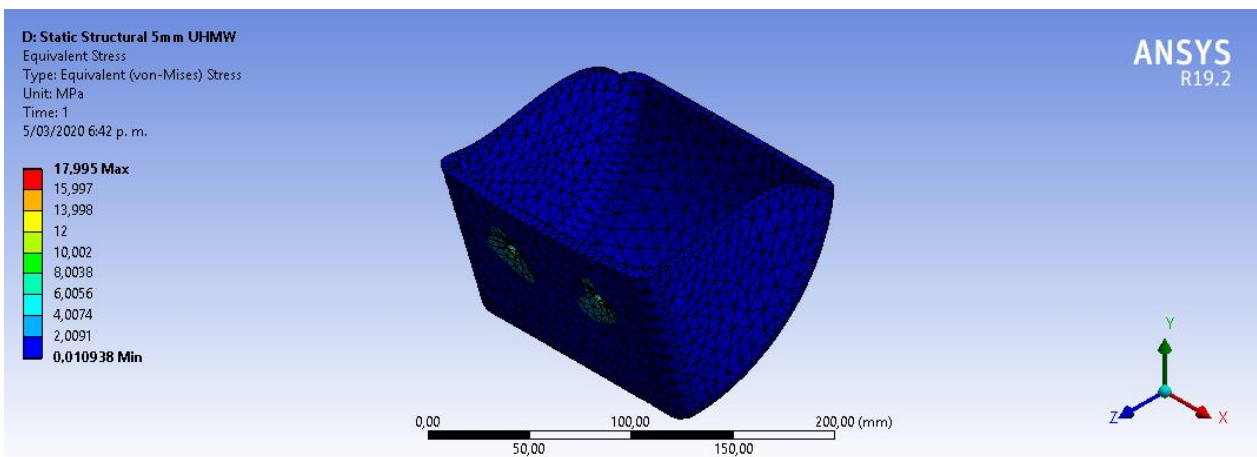
Desplazamientos en el cangilón de UHMW 66 mallado de 10mm.



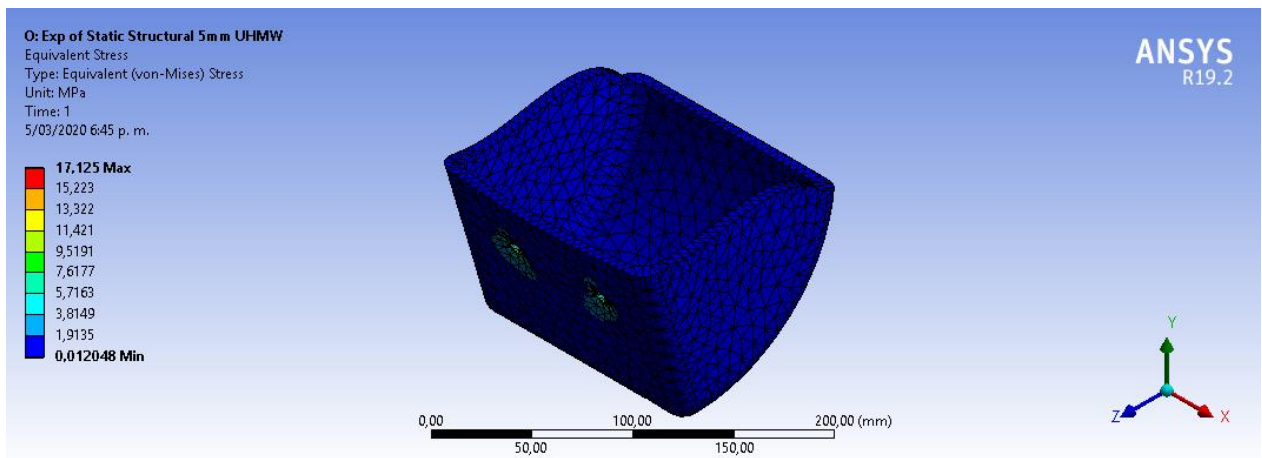
Desplazamientos en el cangilón de UHMW 66 mallado de 20mm.



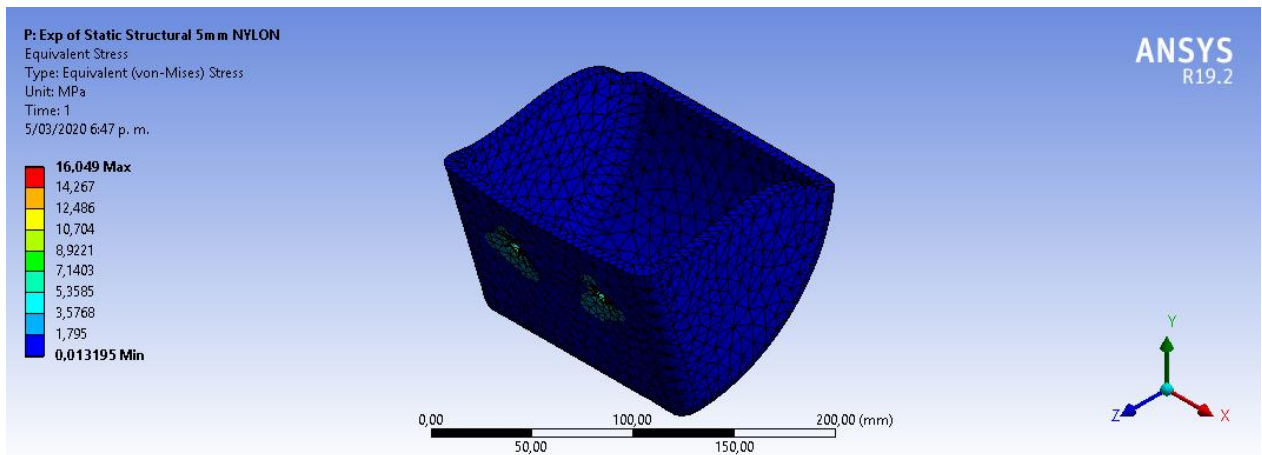
Esfuerzos en el cangilón de UHMW mallado de 5mm con propiedades teóricas.



Esfuerzos en el cangilón de UHMW mallado de 5mm con propiedades experimentales.



Esfuerzos en el cangilón de Nylon 66 mallado de 5mm con propiedades teóricas.



Esfuerzos en el cangilón de Nylon 66 mallado de 5mm con propiedades experimentales.

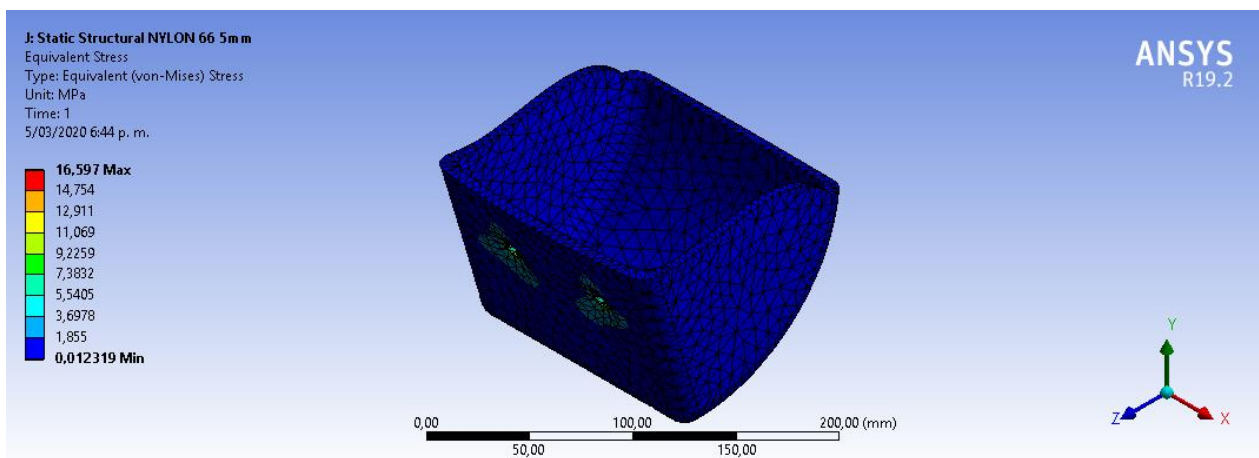


Tabla de ponderados para los dos materiales.

Material UHMW		
Carga máxima axial	Menor a 1000 N	1
Deformación	Alta	1
Costo de material	Medio	3
Flexibilidad a impactos por agentes externos	Si	6
Costos de mantenimiento	Bajo	1
Impacto a temperaturas altas	Si	3
Puntos totales		15

Material Nylon 66		
Carga máxima axial	Menor a 1000 N	6
Deformación	Alta	6
Costo de material	Medio	1
Flexibilidad a impactos por agentes externos	Si	1
Costos de mantenimiento	Bajo	1
Impacto a temperaturas altas	Si	1
Puntos totales		16
