

CAPITULO VI

EVALUACIÓN DE LA PIEZA POR EL MÉTODO DE ELEMENTO FINITO

6.1 Consideraciones para el Análisis

Para realizar el análisis es necesario poder definir cuestiones como lo son el material a usar y las fuerzas a las que está sometida la pieza así como su magnitud. Teniendo definido esto se puede realizar el análisis de manera correcta.

6.2 Material a Usar

Independientemente de los materiales que se encuentran en el motor se ha decidido que el diseño se probará con un polímero y un metal, los resultados nos dirán cual de éstos materiales es el adecuado para el mejor desempeño de la pieza, también es importante observar los procesos de manufactura para los costos.

Los materiales presentan muchas propiedades que los hacen adecuados para ciertas funciones, para este caso el material no necesita ser algo fuera de lo normal, sólo son unos cuantos puntos los que se deben de cumplir con esto. Para nuestro caso se puede decir que tiene que presentar las siguientes características:

- Soportar temperaturas alrededor de 150° C
- Vibraciones menores y por lo tanto no entrar en resonancia con el motor
- Buena rigidez aunque no importa tanto el que vibre, lo importante es sujetar el dispositivo.
- Fácil de manufacturar

Estas características las poseen algunos polímeros y metales. En cuanto a los polímeros los encontramos en diferentes puntos del automóvil como los son las pinturas, mangueras, chasis, conectores, tableros, paneles, vestiduras, alfombras, bolsas de aire, películas aislantes, lubricantes entre otros. De los materiales más comunes que encontramos en el motor y que no tiene un costo alto, además de que sus propiedades son buenas para nuestro objetivo son las poliamidas, dentro de estas se usará el **PA66** para nuestro análisis.

Ahora bien, al hablar de los metales en el motor es muy extenso el campo que tienen en este sector y encontramos muchas piezas que son hechas de este material. Para nuestros análisis tomaremos el acero estructural **A36**. Las propiedades de ambos materiales son las siguientes:

Tabla 6.1 Propiedades del acero estructural A36 y la poliamida PA66 [8: 699, 701].

Propiedades	Material	
	<i>Acero ASTM- A36 estructural</i>	<i>Nylon tipo 6/6</i>
Densidad (kg/m ³)	7860	1140
Resistencia Última	Tensión (MPa)	400
	Compresión (MPa)	75
	Cortante (MPa)	95
Fluencia ³	Tensión (MPa)	250
	Cortante (MPa)	45
Resistencia a punto cedente (MPa)	248	65
Módulo de Elasticidad (GPa)	200	2.8
Módulo de Rigidez (GPa)	77	
Coeficiente de Expansión Térmica (10 ⁻⁶ /°F)	11.7	144
Ductilidad, porcentaje de elongación en 50 mm	23	50

6.3 Fuerzas en el Soporte

Las fuerzas que se tienen en el soporte son pocas comparadas a las que sufren las demás piezas ensambladas. Tenemos que sufre deformaciones al:

- Apretarlo con el tornillo, el torque crea una carga de afianzamiento.
- Colocar el dispositivo en la posición deseada, pues al momento de insertarlo se flexionan las extremidades del dispositivo.

Con estos dos puntos podemos señalar que se tienen fuerzas en dos zonas de la pieza, las cuales están señalados a continuación:

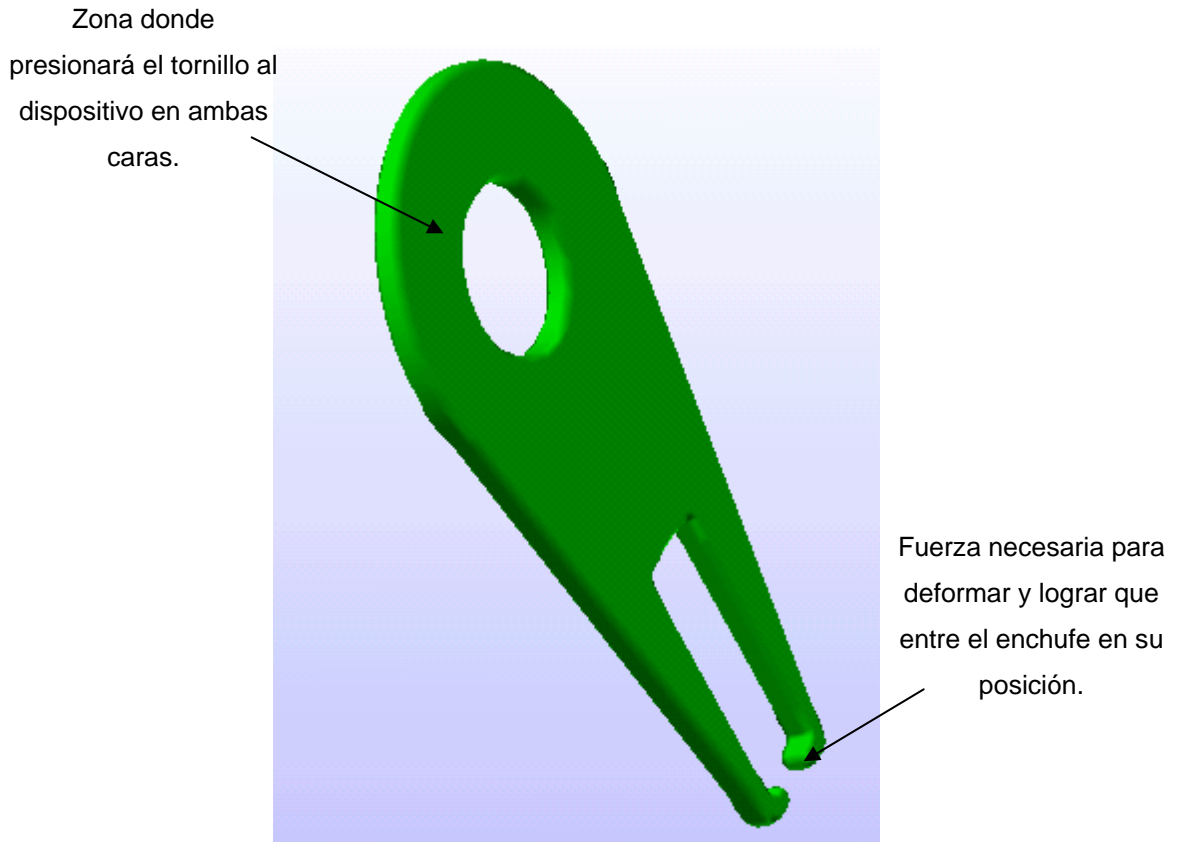


Figura 6.1 Fuerzas aplicadas al dispositivo.

6.3.1 Fuerza de afianzamiento del torque del tornillo

La carga de afianzamiento es generada en un perno o tornillo al ejercer un torque para apretar la tuerca, o bien al ejercerlo sobre la cabeza del tornillo. Una relación entre el torque y la fuerza de tracción axial en el perno o tornillo (la fuerza de afianzamiento) [9, 748-749] es:

$$T = KDP$$

Ecuación 6.1

Donde $T =$ torque, lb·pulg
 $D =$ diámetro exterior nominal de las cuerdas, pulg
 $P =$ carga de afianzamiento, lb
 $K =$ constante dependiente de la lubricación presente

Esta fórmula funciona de la misma manera para las unidades métricas, teniendo el torque en N·m, el diámetro en metros y la carga en Newtos. Ahora, para condiciones comerciales promedio, se utiliza $K = 0.15$ si existe algún tipo de lubricación. Si los hilos de la cuerda están bien limpios y secos, es mejor $K = 0.20$ [9, 749]. Para nuestro diseño utilizaremos un promedio de estos valores, dejando el valor de K en 0.175. Con estos datos podemos calcular la fuerza que se aplica al dispositivo.

El tornillo que se utiliza se muestra en la Figura 6.2 y 6.3 marcado por un número 1 y en cerrado en rojo, en donde se aprecia su designación así como su torque necesario para apretarlo con la caja de velocidades en la Tabla 6.2. Estos datos fueron tomados del manual de reparaciones de la caja de cambios para un motor de 1.8 ltr. y mayores de Volkswagen, del Apéndice B.

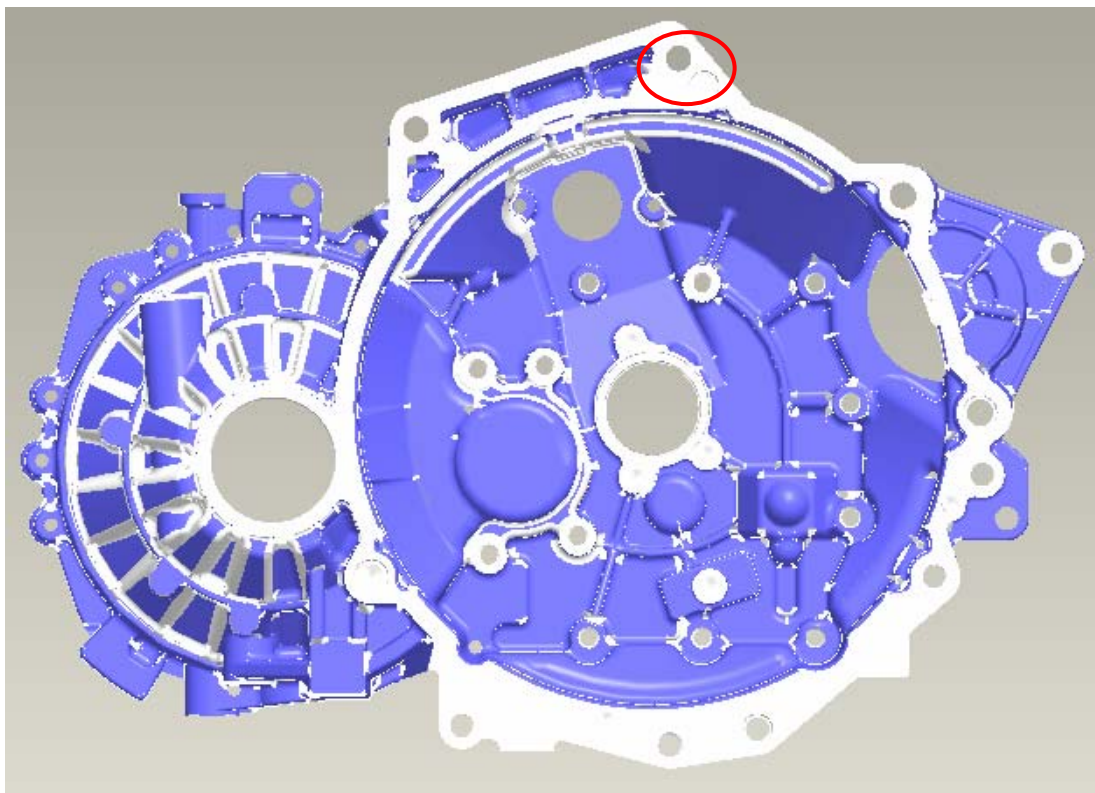


Figura 6.2 Tornillo usado para el montaje del dispositivo.

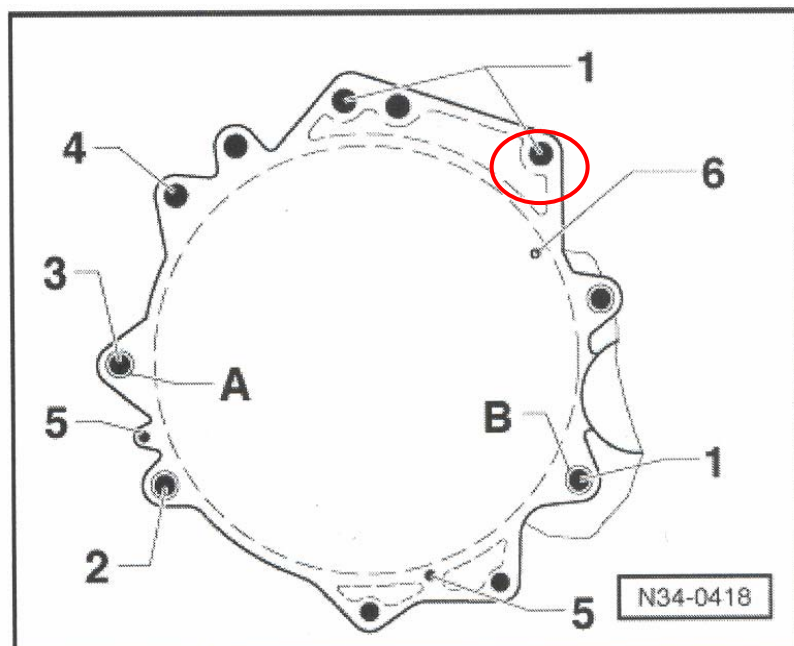


Figura 6.3 Diagrama del manual de reparaciones mostrando los tornillos para la caja de cambios para motores 1.8 litros en adelante.

Tabla 6.2 Dimensiones de los tornillo de la caja de velocidades.

<i>Posición</i>	<i>Tornillo</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Nm (Torque)</i>
1	M 12 X 55	3	80
2	M 10 X 50	1	25
31)	M 12 X 130	1	80
41)	M 12 X 55	1	80
52)	M 7 X 12	2	10
63)	M 6 X 8	1	10

Ahora teniendo los datos se introducen a la fórmula:

$$T = 80 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$K = 0.175$$

$$D = 0.012 \text{ m}$$

$$P = \text{¿?} \text{ N}$$

$$P = \frac{T}{KD} = \frac{80\text{N}\cdot\text{m}}{0.175\cdot(0.012\text{m})} = 3809.52 \text{ N}$$

$$\mathbf{P = 3809.52 \text{ N}}$$

La fuerza obtenida en la parte de arriba es la que se obtiene de realizar el torque recomendado por la Volkswagen para el ensamble de la pieza.

6.3.2 Fuerza de colocación del dispositivo

También es necesario saber la fuerza necesaria para deformar las extremidades del dispositivo para su ensamble con el enchufe del sensor de revoluciones, además esta fuerza

obtenida se aplicará al enchufe del sensor, por lo que no tiene que haber deformación. Por esto primeramente analizaremos al enchufe con fuerzas aplicadas y determinaremos cual es la carga máxima que puede soportar. El enchufe está hecho de una poliamida, la PA612 y viene especificado en el plano de la pieza del Apéndice A como se muestra en la Figura 6.4.

Gehaeuse/Stecker:	Polyamid 612 waerme-
	stabilisiert, (33±2)% GF
HOUSING/CONNECTOR:	POLYAMIDE 612 HEAT STABILIZED
	33±2% GLASS FILLED
Leitung:	Mantelleitung: 3 x 0.5mm
	D = 5 ±0.2mm
	Mantelisolierung: PUR
CABLE:	MOULDED CABLE COVER: 3 x 0.5 mm
	D = 5 ±0.2mm
	COVER INSULATION: PUR

Figura 6.4 Material del enchufe del sensor de revoluciones.

Al momento de insertar el enchufe en el dispositivo las fuerzas serán aplicadas como lo muestra la Figura 6.5, no será una carga en toda la superficie sino que irá avanzando conforme se vaya insertando el enchufe, la forma en que será aplicada la fuerza será en forma línea

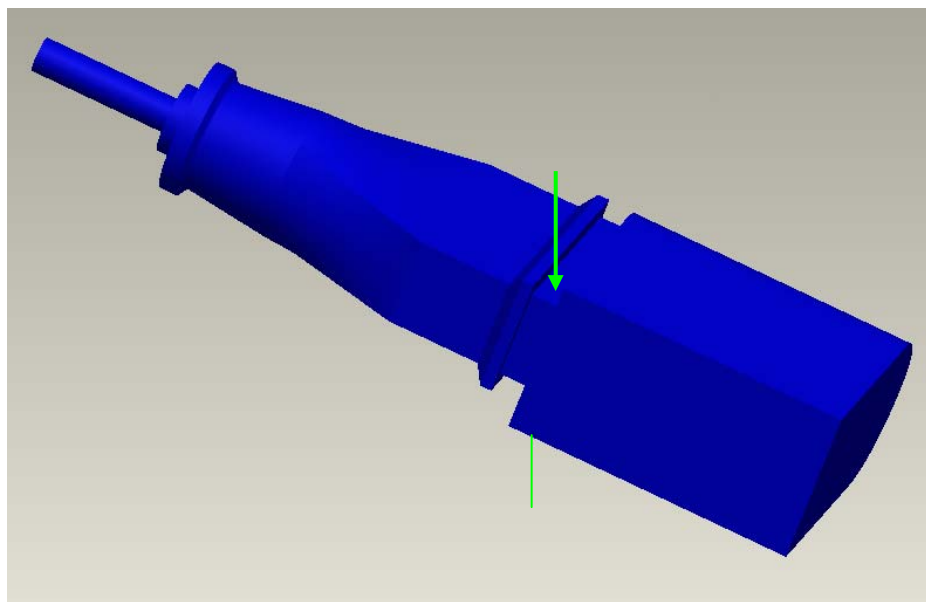


Figura 6.5 Fuerza producida por el dispositivo en el enchufe del sensor

Para determinar hasta qué punto el material no sufre alguna deformación es necesario poder hacer pruebas con diferentes fuerzas y notar que no se produzca una deformación muy grande en la pieza, además de que no supere el esfuerzo de cedencia. Las propiedades de este material se exponen en la Tabla 6.3, vienen en el Apéndice C.

Tabla 6.3 Propiedades del PA612 .

<i>Poliamida PA-612</i>	
Propiedad	
Densidad (kg/m ³)	1400
Módulo de elasticidad (GPa)	8
Razón de Poisson	0.24
Esfuerzo de cedencia (MPa)	200

Estos datos se introducen en Algor para realizar el análisis. Las fuerzas que se aplicaron en el dispositivo fueron en tres diferentes puntos, mostrados en la Figura 6.6.

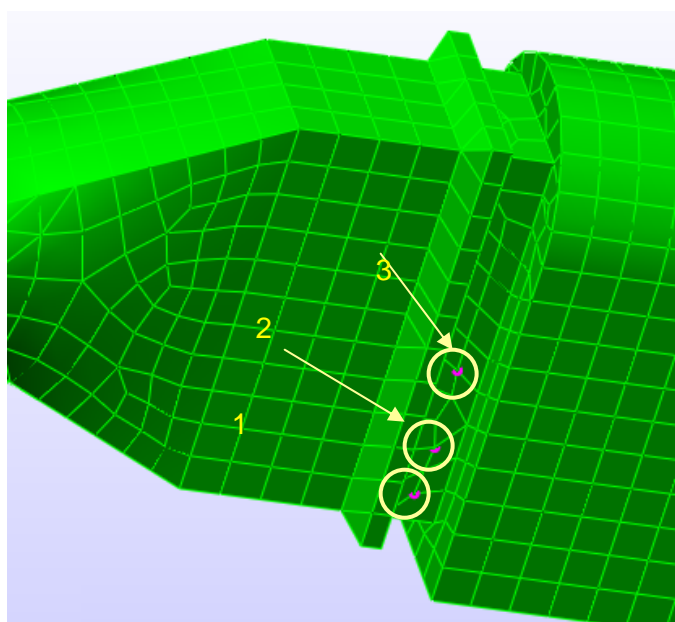


Figura 6.6 Lugar de aplicación de las fuerzas en el enchufe

La forma en que debería de aplicarse la fuerza es en forma lineal, pero debido a la falta de nodos en la malla del dispositivo se colocaron las fuerzas como puntuales. En la Figura 6.7 se observa la geometría de las extremidades del dispositivo que se toma en cuenta para el análisis. Los datos que se obtuvieron del análisis se muestran en la Tabla 6.4, el esfuerzo máximo permitido es de 200 MPa, con los datos obtenidos podemos ver que este esfuerzo está aproximadamente cuando se aplican los 200 Newtons. Para nuestro análisis tomaremos como fuerza máxima 100 Newtons, considerando un factor de seguridad de 2 para el análisis.

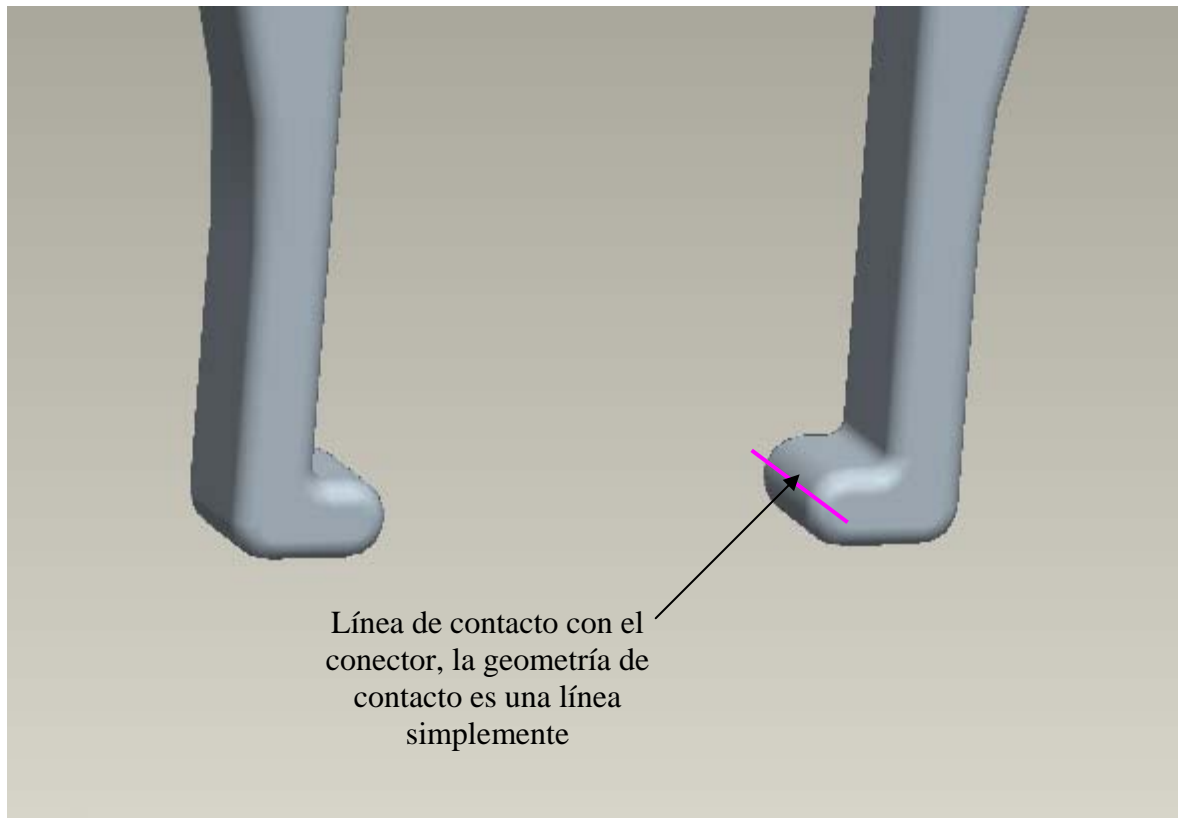
**Figura 6.7** Línea de presión (2.6 mm) que se aplicaría al dispositivo.

Tabla 6.4 Esfuerzos y desplazamientos del análisis del enchufe

<i>Resultados del análisis del enchufe</i>			
<i>Punto</i>	<i>Fuerza aplicada (N)</i>	<i>Desplazamiento máximo (mm)</i>	<i>Esfuerzo máximo (MPa)</i>
1	4	0.000589	3.54
	5	0.000731	4.43
	6	0.008760	5.32
	7	0.001020	6.20
	8	0.001170	7.09
	9	0.001300	7.98
	10	0.001460	8.86
	40	0.005850	35.46
	80	0.011700	70.93
	160	0.023400	141.87
	320	0.046800	283.74
2	4	0.000523	2.82
	5	0.000652	3.52
	6	0.000786	4.23
	7	0.000911	4.93
	8	0.001040	5.64
	9	0.001170	6.35
	10	0.001300	7.05
	40	0.005210	28.22
	80	0.001040	56.45
	160	0.020800	112.91
	320	0.041700	225.82
3	4	0.000504	2.63
	5	0.000626	3.29
	6	0.000763	3.94

	7	0.000877	4.60
	8	0.001000	5.26
	9	0.001120	5.92
	10	0.001250	6.58
	40	0.005140	27.56
	80	0.010200	55.13
	160	0.020500	110.26
	320	0.041100	220.52

Con este valor se puede empezar a trabajar con el diseño que ya se tiene, el límite para saber si es que funciona el dispositivo con un material u otro será al no pasar el límite de la fuerza permitida de 100 Newtons.

Para calcular la fuerza necesaria para mover las extremidades del dispositivo utilizaremos Algor y obtendremos la fuerza de una manera iterativa, la distancia que se tiene que desplazar el dispositivo es de 2 milímetros en total, por lo que cada pata tiene que desplazarse 1 milímetro. Se harán comparaciones para los materiales antes mencionados, por lo que tendremos dos respuestas. Se empieza a hacer el trabajo con Algor y primeramente se genera la malla, cada pequeño grano que se ve en la pieza representa a un elemento finito (Figura 6.8).

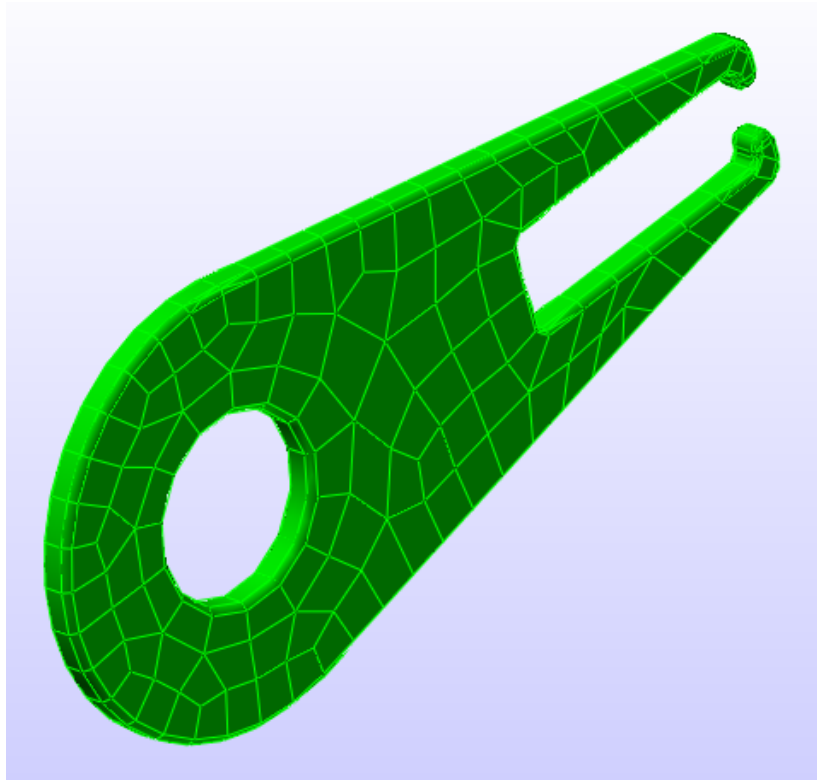


Figura 6.8 Malla generada en el dispositivo para el análisis.

Las unidades escogidas para el análisis son las métricas, por lo que se escogen éstas para el análisis:

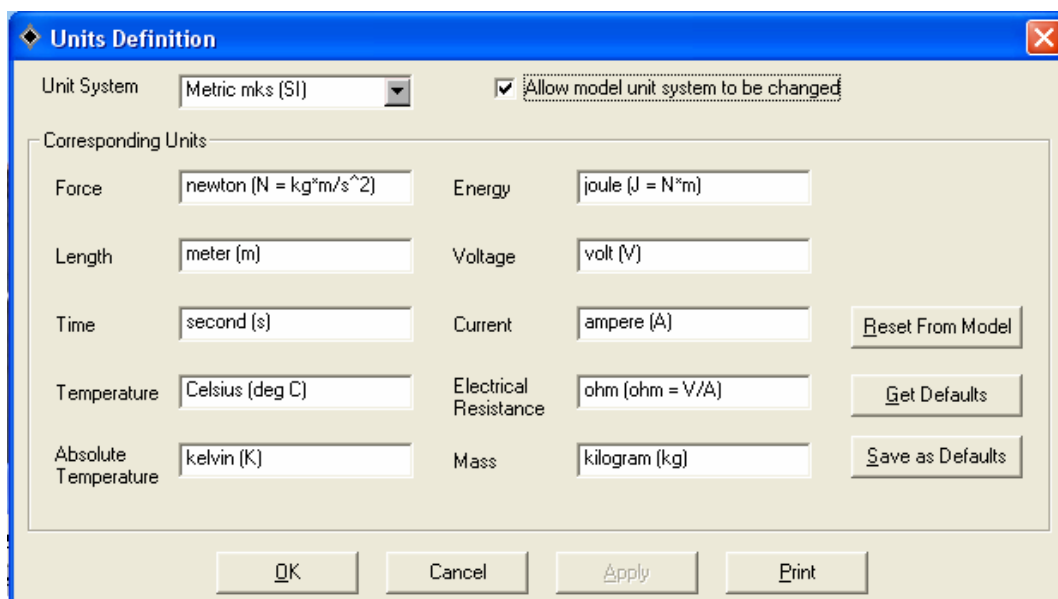


Figura 6.9 Unidades usadas para el análisis.

Las restricciones que tiene la pieza es justamente en la parte del barreno, en esa parte no habrá ningún tipo de movimiento rotacional ni de translación, teniendo las restricciones de la siguiente manera:

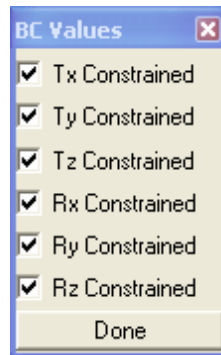


Figura 6.10 Restricciones del barreno del dispositivo.

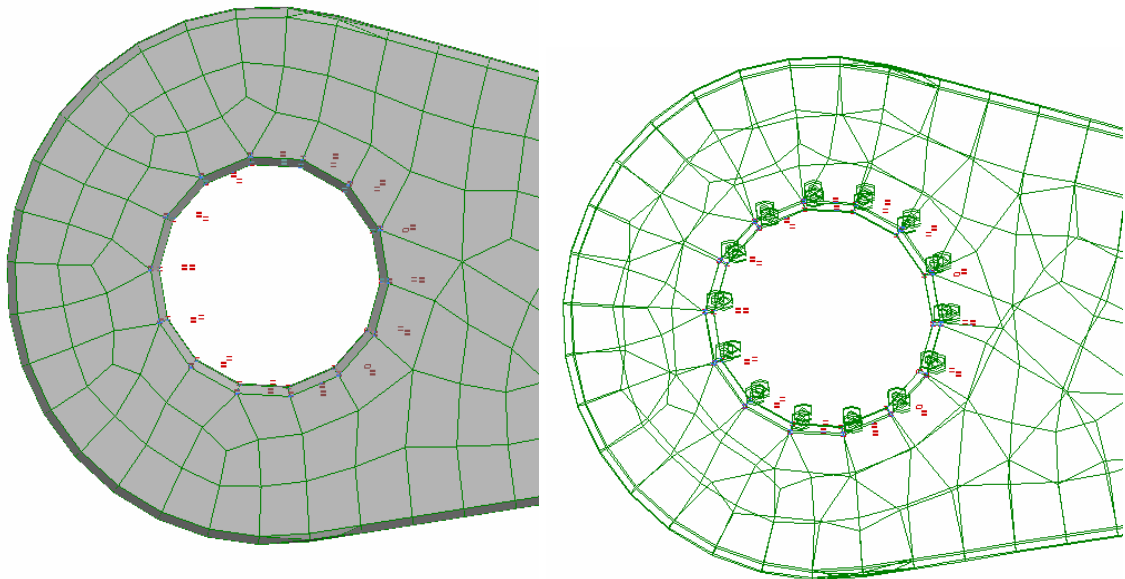


Figura 6.11 Restricciones en el sólido y malla del dispositivo.

Para analizar las fuerzas que se necesitan para deformar lo necesario al material empezaremos por descomponer fuerzas que actúan sobre cada una de las patas del

dispositivo. Estas fuerzas darán una resultante que es la que nos interesa para el análisis con las demás fuerzas, por el momento sólo se considera la deformación de las patas. Las fuerzas estarán descompuestas en los ejes X y Y, como se muestra en la figura siguiente:

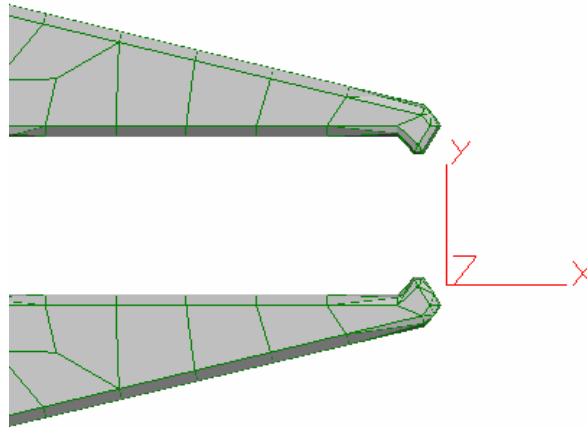


Figura 6.12 Ejes Y y X por donde las fuerzas actuarán.

Para nuestro proceso iterativo vamos a poner fuerzas sólo en el eje Y, obtendremos las fuerzas necesarias para desplazar el dispositivo para que se así se pueda realizar la inserción del enchufe. Las fuerzas estarán de esta forma:

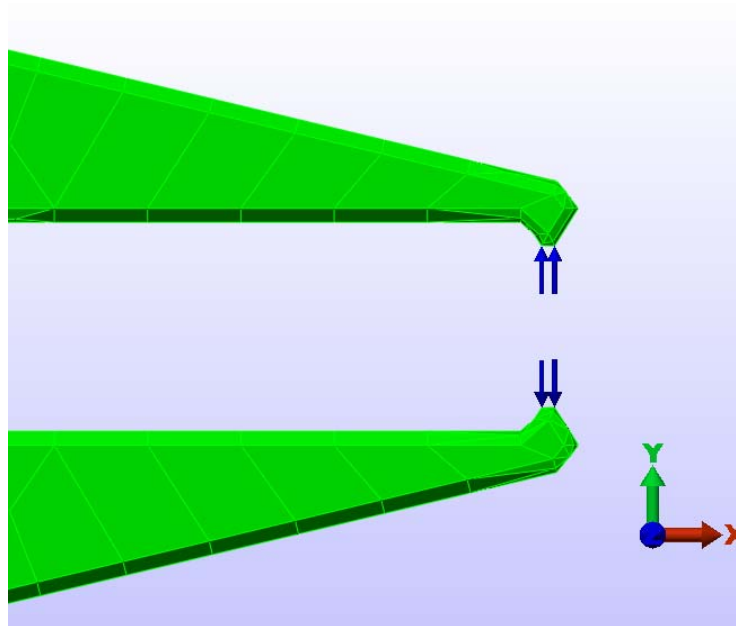


Figura 6.13 Aplicación de las fuerzas en el dispositivo.

Primero empezaremos por utilizar el acero estructural A36, donde se tienen las siguientes propiedades para el material en Algor:

6.3.2.1 Fuerza usando el acero estructural ASTM A36

En esta parte se calculará la fuerza necesaria para poder tener ese desplazamiento utilizando el acero A36, las propiedades de este material se encuentran en la librería de Algor, por lo que no es necesario cargar los datos de este. En la Figura 6.14 se observan las propiedades del material en Algor.

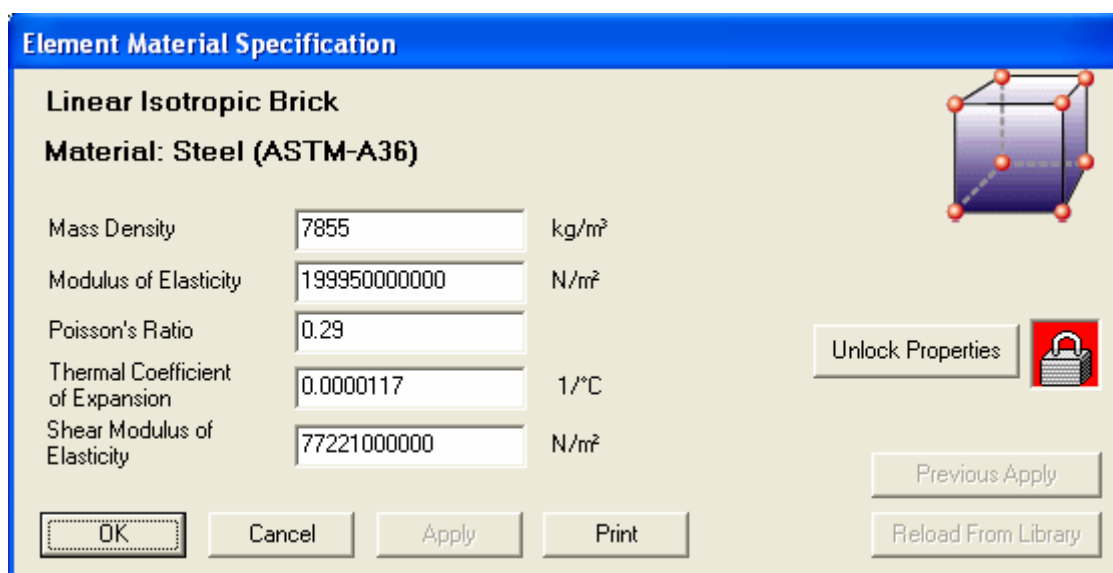


Figura 6.14 Propiedades del acero estructural A36 en Algor.

Habiendo escogido el material se colocan las primeras fuerzas que se aplicarán que serán de 2, 5 y 10 Newtons, por lo tanto tenemos tres casos que darán desplazamientos diferentes. En la Figuras 6.15 se muestra un diagrama de desplazamientos del dispositivo. En líneas verdes aparece la malla del dispositivo inicial, mientras que las deformaciones mostradas están a escala de 5 para apreciar mejor el cambio del estado de la pieza. Al ser

las fuerzas aplicadas en los mismos puntos siempre se generan de la misma manera los diagramas de desplazamiento y es por eso que las imágenes de desplazamiento son las mismas, sólo que con diferente valor para cada una de ellas mostrada en la esquina superior derecha.

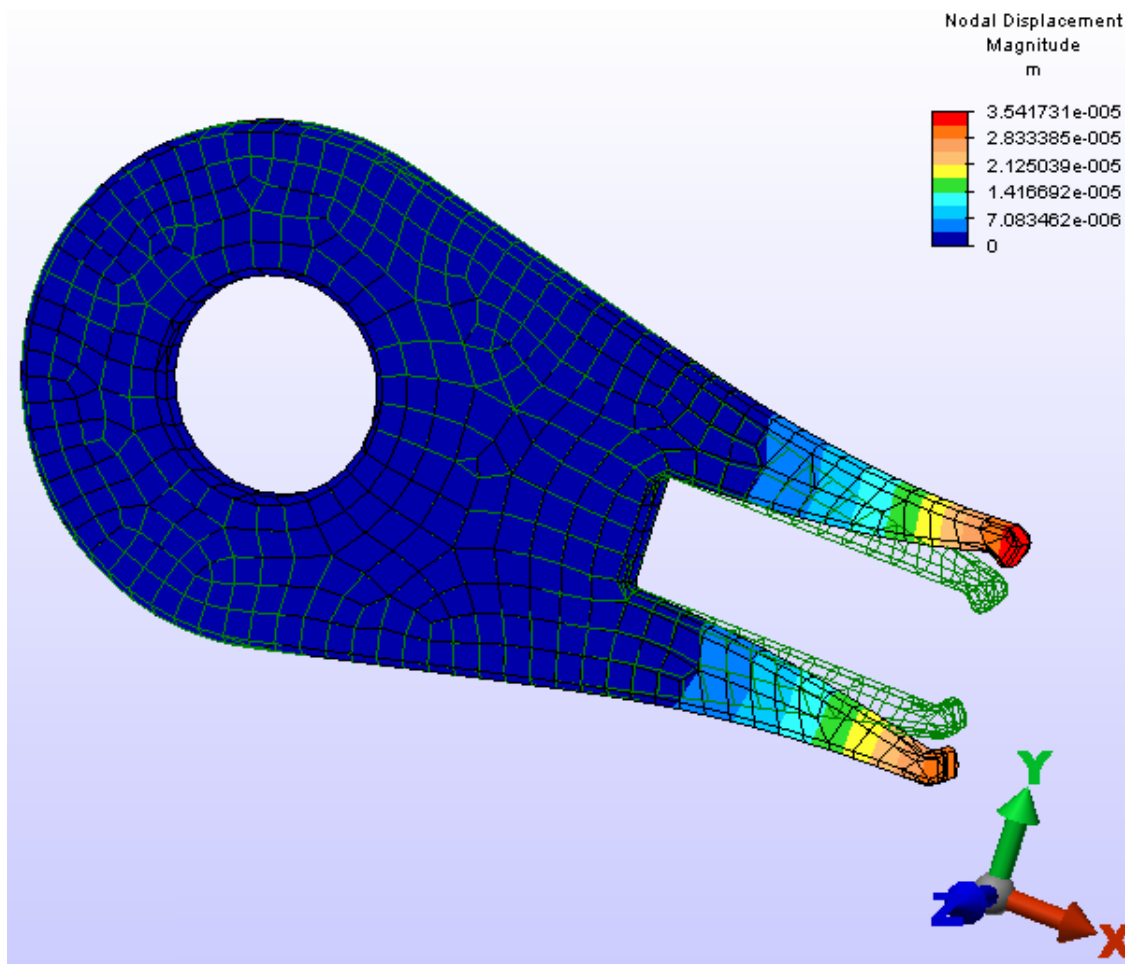


Figura 6.15 Desplazamiento del dispositivo con la fuerza de 10N con una escala de desplazamiento de 5.

Los resultados se presentan en la Tabla 6.5, donde se observa que el valor máximo que se ha tenido en los tres casos es el de los 10N, teniéndose apenas un desplazamiento de

35.4 micrómetros. En la Figura 6.16 se presentan los esfuerzos que se tienen para el caso de los 10N, el comportamiento de los esfuerzos en los demás casos es parecido, variando solo los valores presentados en los resultados.

Tabla 6.5 Resultados de las fuerzas aplicadas

<i>Fuerza Aplicada (N)</i>	<i>Desplazamiento Máximo (m)</i>	<i>Esfuerzo Máximo Presentado (MPa)</i>
2	7.08×10^{-6}	25.95
5	1.77×10^{-5}	64.89
10	3.54×10^{-5}	129.00

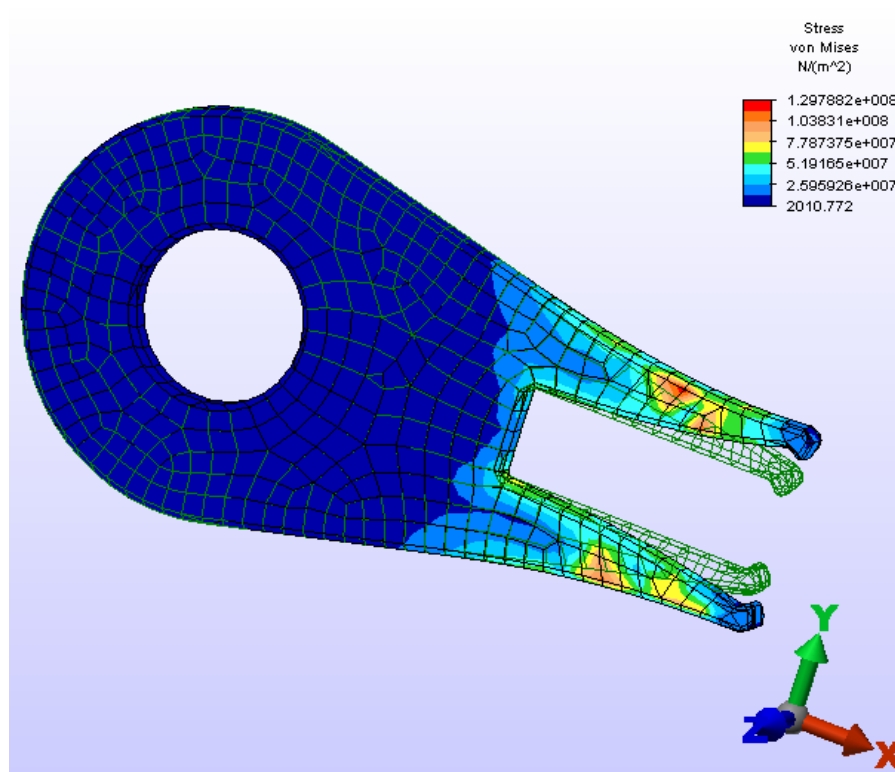


Figura 6.16 Esfuerzos del dispositivo con la fuerza de 10N con una escala de desplazamiento de 5.

Hasta este punto se no se ha cumplido con el requisito de desplazamiento de los 2 milímetros en total, el valor se encuentra apenas en 35.4 micrómetros de desplazamiento por extremidad dándonos un total de 70.8 micrómetros (por las dos extremidades). Se hicieron más pruebas con otros valores, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 6.6 Segunda iteración de las fuerzas.

<i>Fuerza Aplicada (kN)</i>	<i>Desplazamiento Máximo (m)</i>	<i>Esfuerzo Máximo Presentado (MPa)</i>
15	5.31×10^{-5}	194.68
25	8.85×10^{-5}	324.47
50	0.0001993	973.00
100	0.000398	1.94×10^3
200	0.000797	3.89×10^3
300	0.001196	5.84×10^3

En la Tabla 6.6 podemos observar que los dos últimos datos son los que nos interesan, quedando los desplazamientos totales con esas fuerzas así:

Con la fuerza de 200N = $0.000797\text{m} \times 2 = 1.59 \text{ mm}$.

Con la fuerza de 300N = $0.001196\text{m} \times 2 = 2.39 \text{ mm}$.

De aquí obtenemos que la fuerza necesaria para mover el dispositivo está entre los 200 y 300N. Esta fuerza es mucho mayor de lo que tenemos permitido para el enchufe del sensor de revoluciones. Para el análisis vamos a considerar una fuerza de 250 N.

Fuerza a usar en el análisis = 250N

6.3.2.1 Fuerza usando la poliamida PA66

Para este segundo paso se cambia el material a utilizar, por lo que escogemos una poliamida de la librería de Algor. Las poliamidas se presentan mucho en las partes automotrices y es por eso que se ha escogido este material. A continuación se observan las propiedades de este material (Figura 6.17)

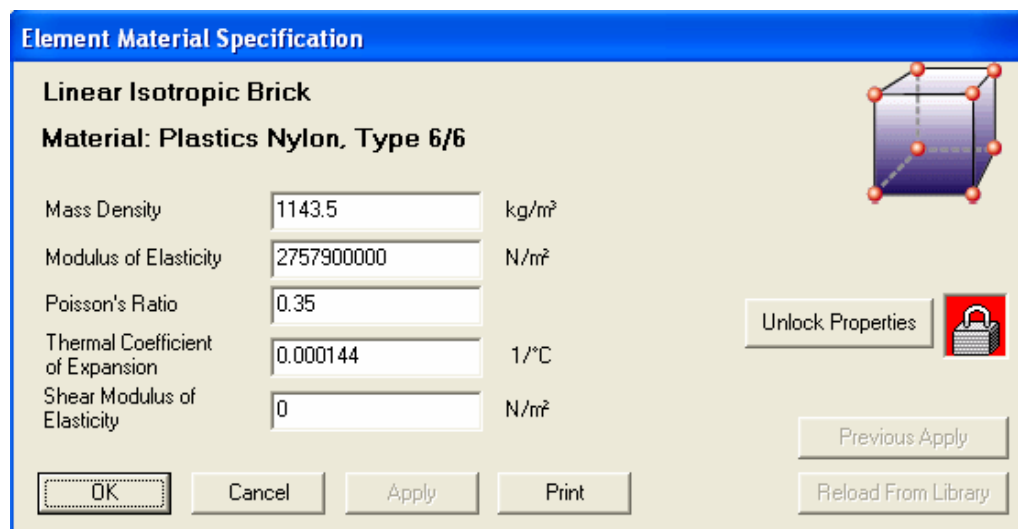


Figura 6.17 Propiedades de la poliamida.

Las fuerzas aplicadas al principio fueron las mismas que se aplicaron para el caso del acero estructural. 2, 5 y 10 Newtons fueron los iniciales para obtener los diagramas de desplazamiento y los esfuerzos. Los resultados de este análisis se encuentran en la Tabla 6.7. Como se puede observar en los desplazamientos se ha presentado uno de 0.505 milímetros con una fuerza de 2N, con una fuerza de 5N tenemos un desplazamiento de 1.126 milímetros por extremidad, lo cual nos da un desplazamiento total de 2.252 milímetros, cumpliendo con el requisito que se había pedido. Los esfuerzos son grandes y se compararán resultados más adelante. Por lo tanto, la fuerza que se ha tomado para el análisis en este caso es la de 5N.

Tabla 6.7 Resultados de las fuerzas aplicadas

<i>Fuerza Aplicada (N)</i>	<i>Desplazamiento Máximo (m)</i>	<i>Esfuerzo Máximo Presentado (MPa)</i>
2	0.000505	24.63
5	0.001126	61.58
10	0.002527	123.17

Fuerza a utilizar para el análisis = 5N

6.4 Análisis Del Soporte

Sabiendo las fuerzas que se aplican en el dispositivo podemos calcular los esfuerzos que sufre el dispositivo utilizando ambos materiales. Los resultados obtenidos nos servirán para realizar modificaciones a la pieza para generar otros prototipos. Primeramente se analiza el dispositivo con el material acero A36 para después hacerlos con la Poliamida PA66. Las fuerzas que se aplican en cada caso son en el mismo punto, teniendo las mismas condiciones, cambiando sólo la magnitud de las fuerzas y el material a evaluar. Para ambos casos tenemos que la fuerza de afianzamiento es la misma, siendo de 3809.52N. Esta fuerza estará aplicada sobre el dispositivo producido por la cabeza del tornillo. De igual manera las restricciones que ambas tienen son de no rotación ni traslación del dispositivo en el barreno, también un lado del dispositivo estará fijo ya que se encontrará junto a la caja de cambios, como se muestra en la Figura 6.18. La fuerza afianzamiento se muestra en la Figura 6.19, donde también aparecen las fuerzas en las extremidades de sujeción del dispositivo.

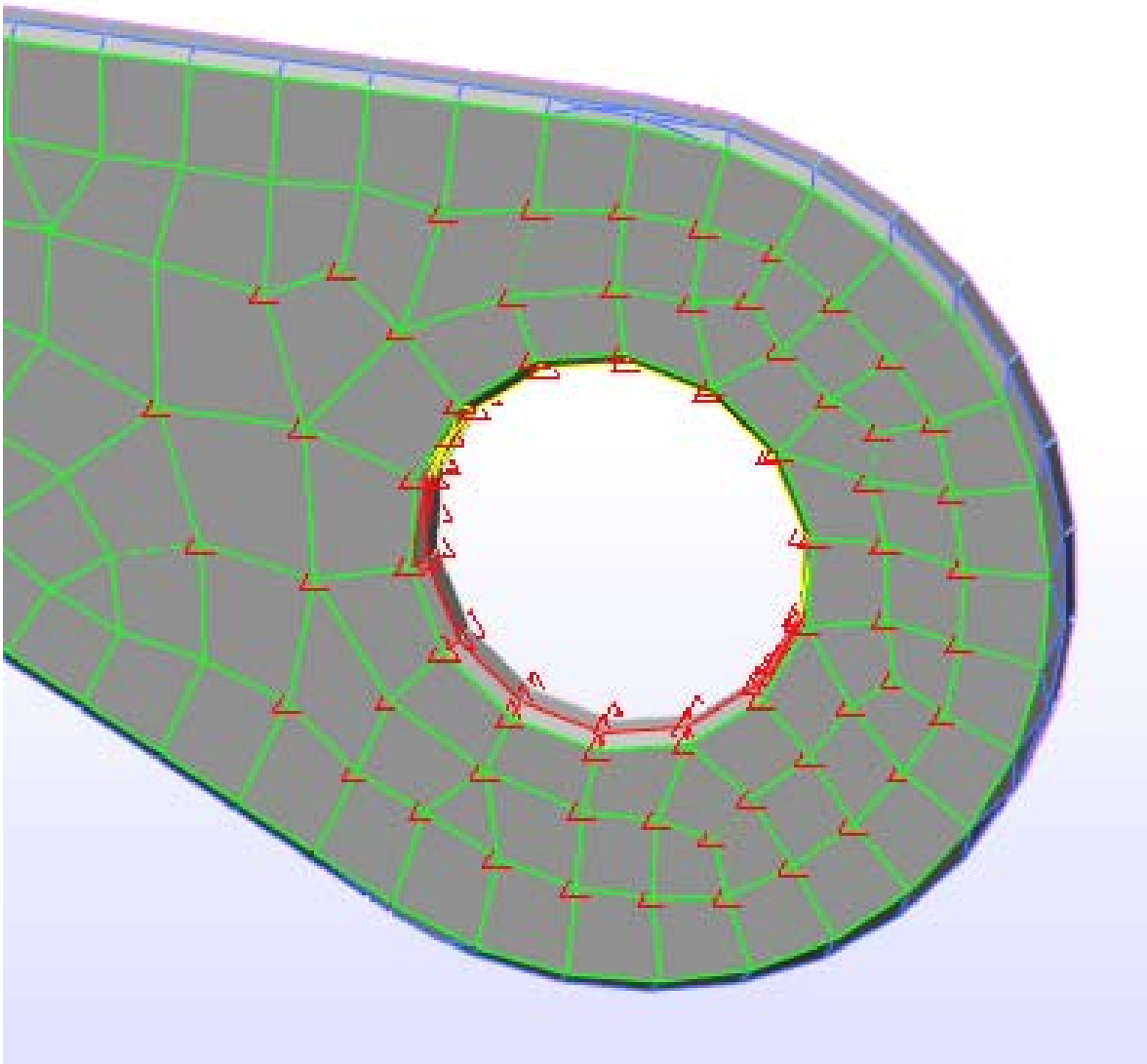


Figura 6.18 Restricciones de la pieza para el análisis en el barreno y en la pared.

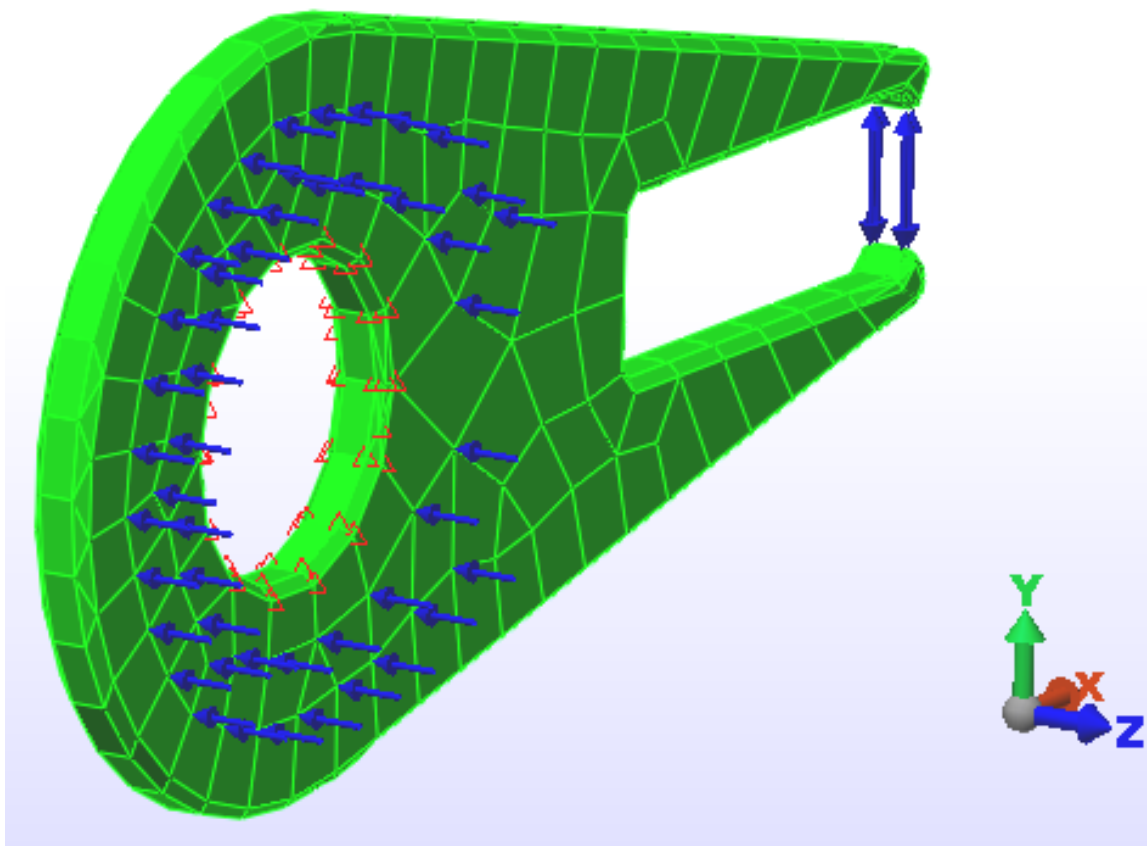


Figura 6.19 Fuerzas en el dispositivo

6.4.1 Análisis del soporte con acero ATM A36

Para este caso tenemos que la fuerza de afianzamiento es de 3809.52N. La fuerza requerida para el desplazamiento de las patas al introducir el dispositivo es de 250N, y estará puesta en cada una de las extremidades del dispositivo, se pueden ver en la Figura 6.20.

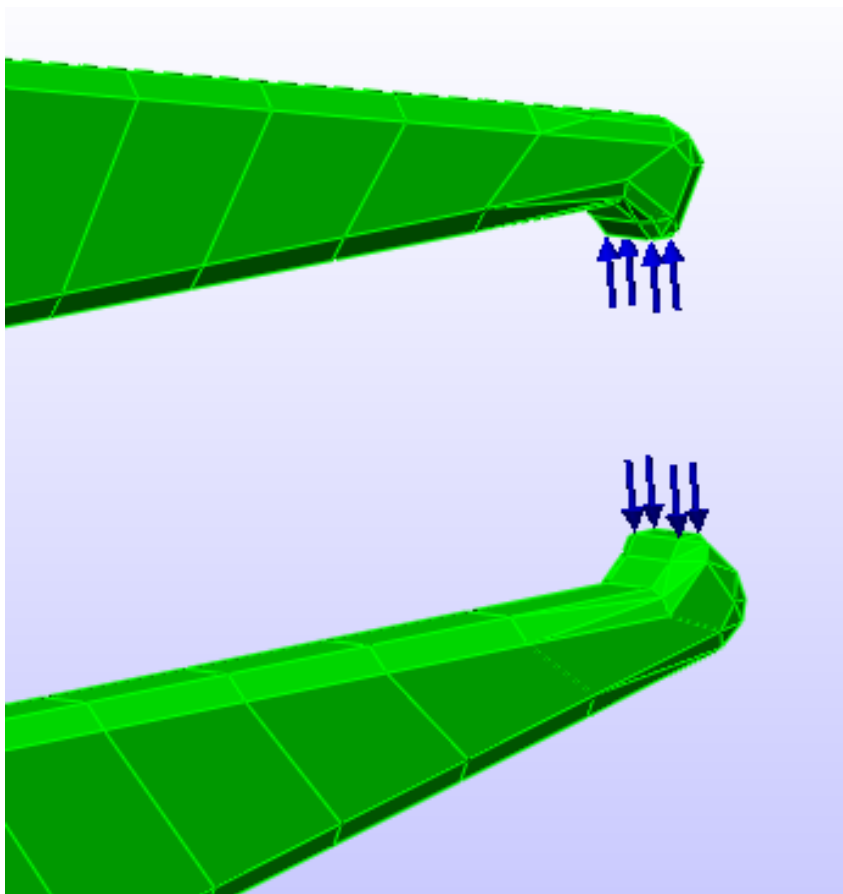


Figura 6.20 Fuerzas para el desplazamiento de las extremidades

Introduciendo estos valores tenemos que el análisis nos da los siguientes resultados mostrados en la Tabla 6.8, mientras que en la Figura 6.21 se observan los desplazamientos de la pieza mientras que en la Figura 6.22 se pueden ver los esfuerzos en Von Mises.

Tabla 6.8 Resultados del análisis usando el ASTM A36

<i>Resultados con el acero ASTM A36</i>			
Fuerza de afianzamiento (kN)	Fuerza de colocación del enchufe (N)	Esfuerzo máximo (GPa)	Desplazamiento total máximo (m)
3.809	250	4.86	0.00097

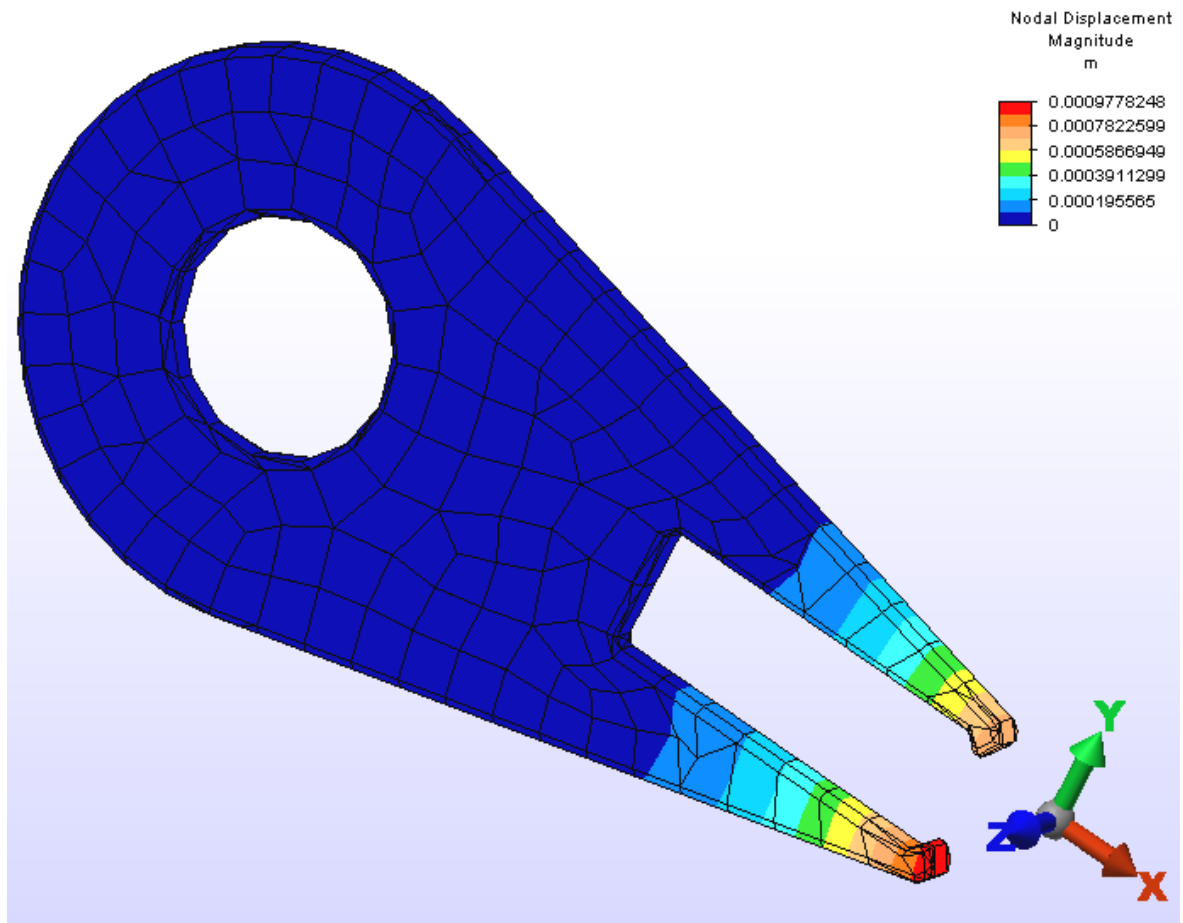


Figura 6.21 Desplazamientos del dispositivo con el ASTM A36

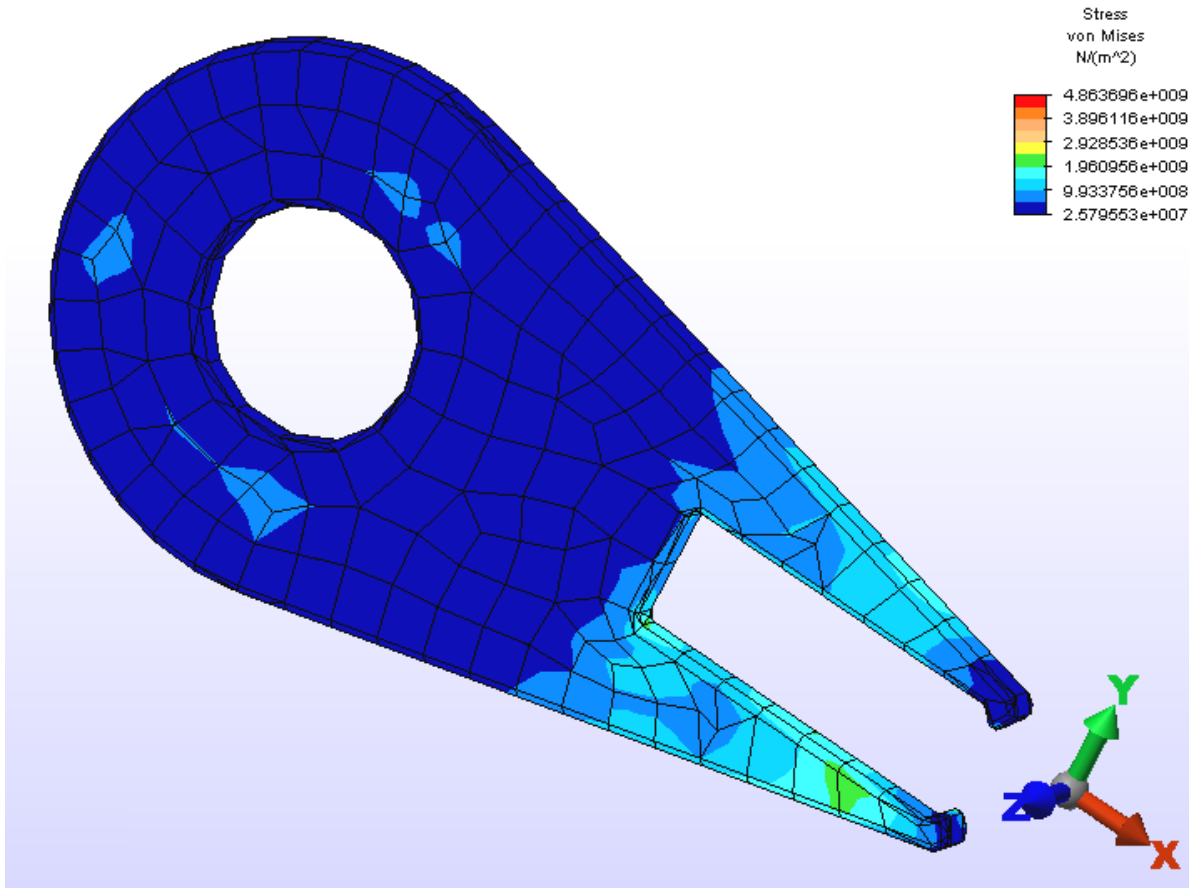


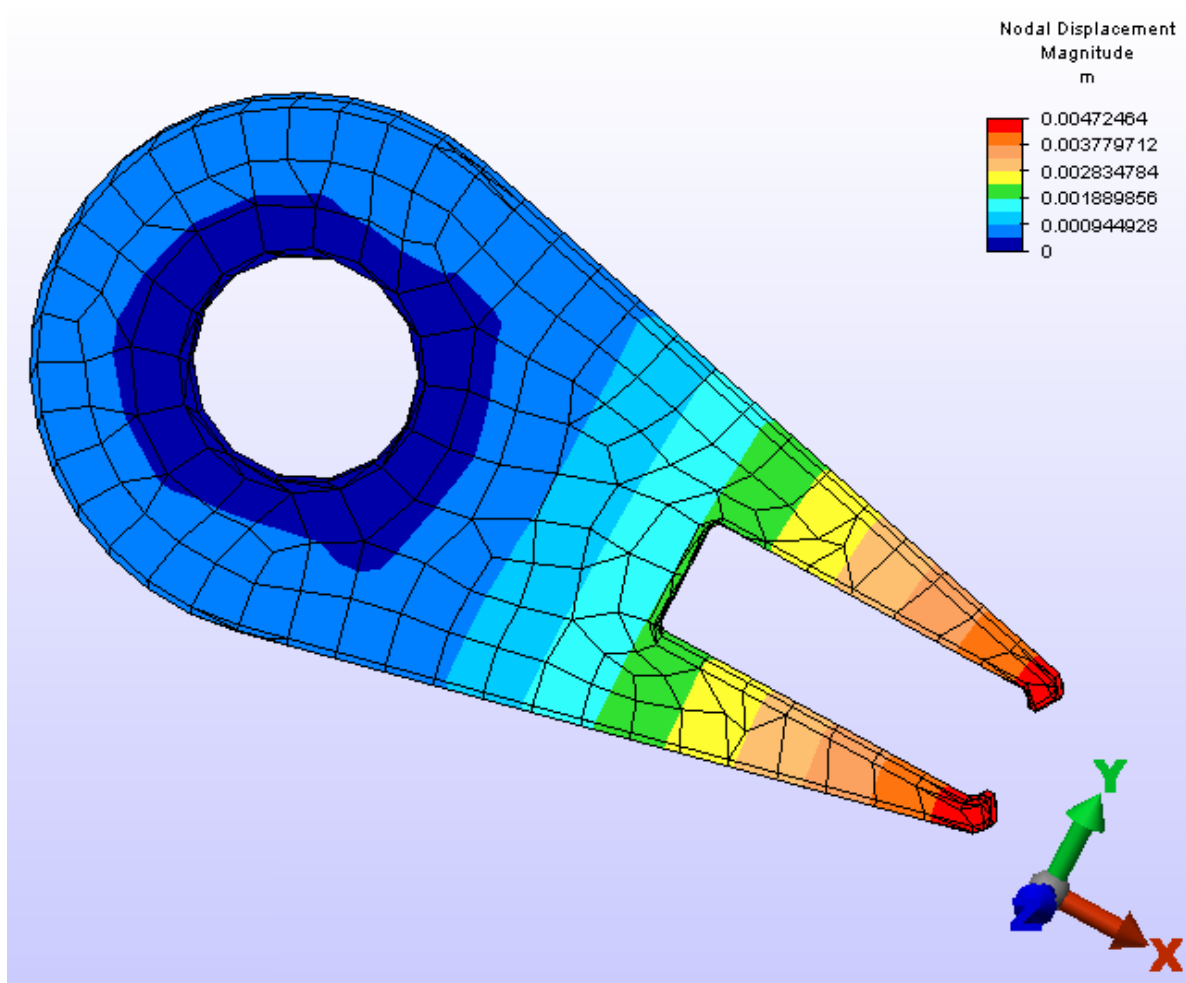
Figura 6.22 Esfuerzos del dispositivo con el ASTM A36

6.4.2 Análisis del soporte con la poliamida PA66

Para este caso tenemos que la fuerza de afianzamiento y las restricciones son las mismas, presentándose ahora una fuerza en las extremidades del dispositivo de 5N. Usando las propiedades del material y analizando obtenemos los siguientes resultados presentados en la Tabla 6.9, donde podemos observar que el dispositivo se mueve una distancia total de 9.4 milímetros. Las figuras 6.23 y 6.24 nos dan el desplazamiento y esfuerzo respectivamente del dispositivo.

Tabla 6.9 Resultado del análisis

<i>Resultados con la poliamida PA66</i>			
Fuerza de afianzamiento (kN)	Fuerza de colocación del enchufe (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Desplazamiento total máximo (m)
3.809	5	779.18	0.0047

**Figura 6.23** Desplazamientos del dispositivo con PA66

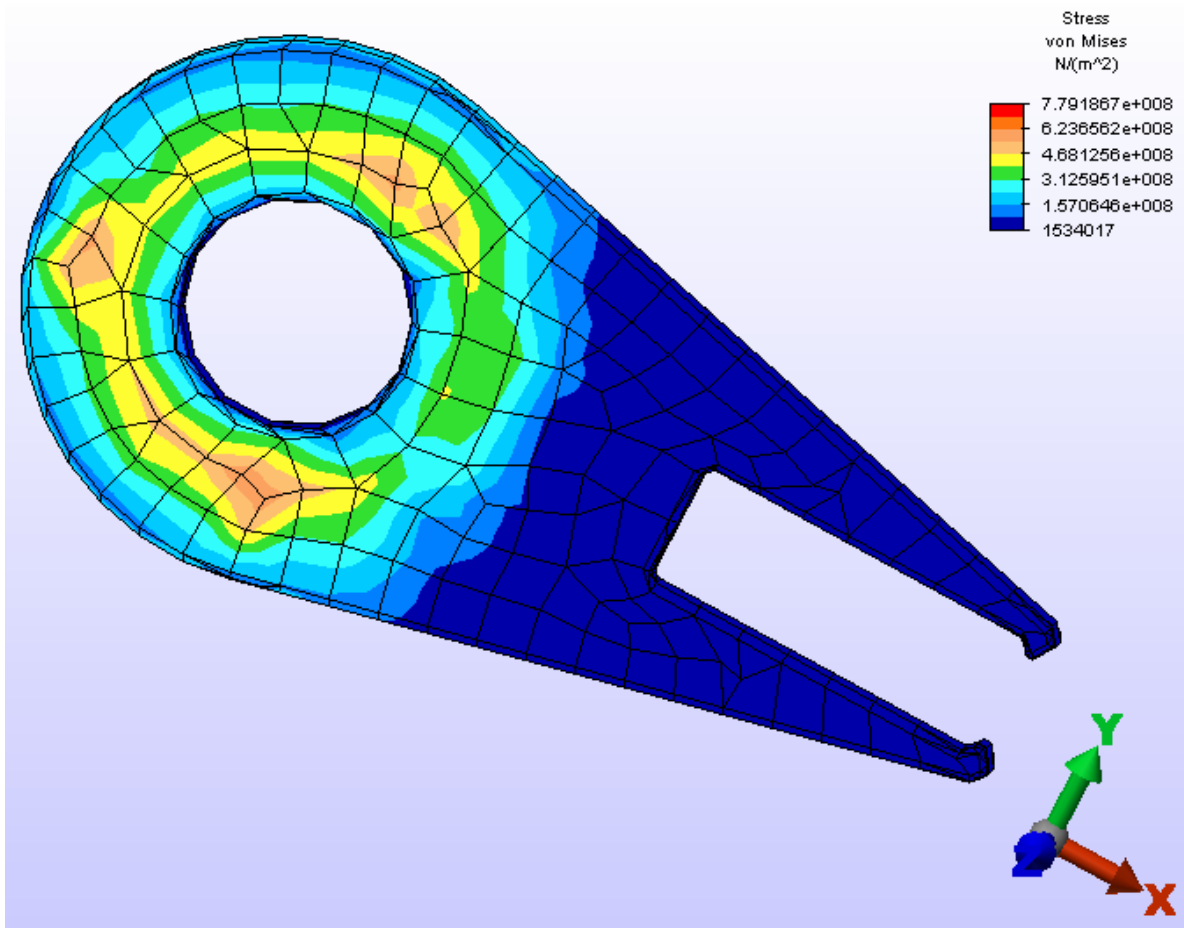


Figura 6.24 Esfuerzos del dispositivo con PA66