



**ESPE**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

# UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS “ESPE”

## TEMA:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA REALIZAR ENSAYO DE FATIGA EN LAS JUNTAS ELÁSTICAS DE MECANISMOS FLEXIBLES.

## AUTORES:

FIGUEROA GUERRERO, RUBÉN JOSÉ  
TAPIA RODRÍGUEZ, MARÍA JOSÉ

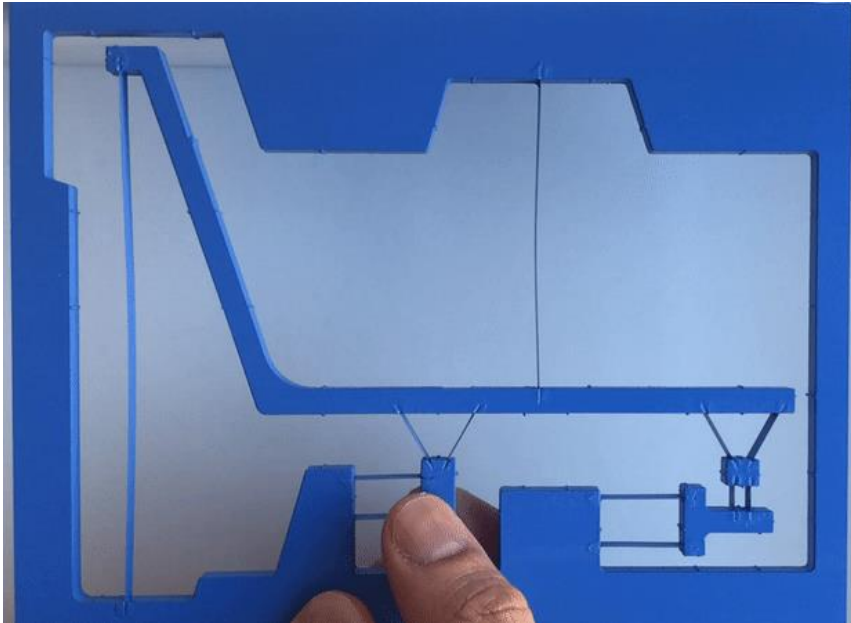
## TUTOR:

ING. JOSÉ FERNANDO OLMEDO SALAZAR



# Introducción

Para estar a la vanguardia en la tecnología es necesario la optimización de procesos y recursos, con el uso de materiales que tengan buenas propiedades mecánicas y cuya producción sea sencilla y de bajo costo.



Los mecanismos flexibles pueden ser construidos de distintos tipos de materiales y son elementos que se están implementando para reemplazar ciertos elementos de máquina en las industrias del Ecuador.

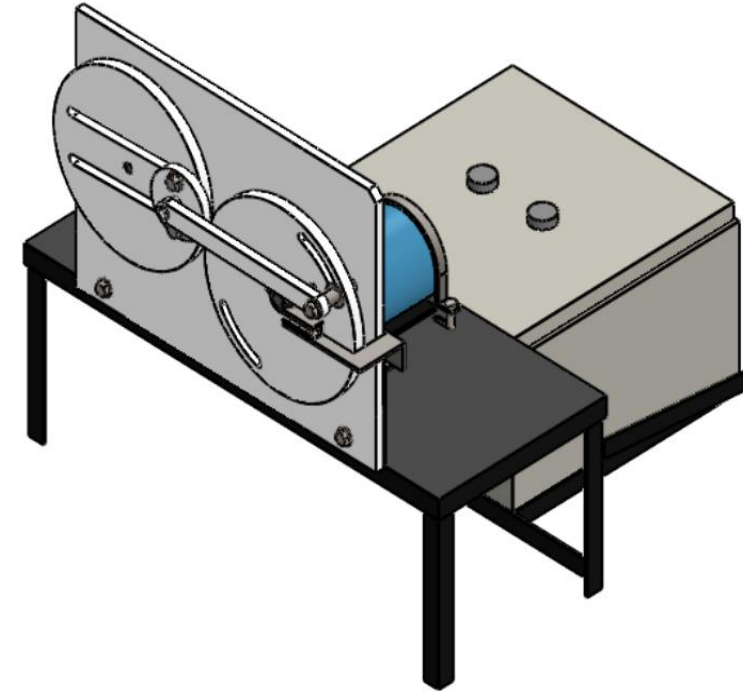
# Objetivos

## Objetivo General

- Diseñar y construir un dispositivo para realizar ensayo de fatiga en juntas elásticas de mecanismos flexibles, siendo la flexión la sollicitación de interés.

## Objetivos Específicos

- Analizar y seleccionar la mejor alternativa de diseño de la máquina para ensayar fatiga en juntas elásticas, la cual deberá ser de fácil uso y con control pasivo de vibraciones.
- Construir y montar en su totalidad la máquina de un mecanismo de cuatro barras destinado a ensayar fatiga de juntas flexibles construidas con impresión 3D.
- Caracterizar la fatiga de juntas elásticas en la resina estándar a dos tiempos de curado para extrapolar diagramas tensión vs ciclos.



# Compliant Mechanism



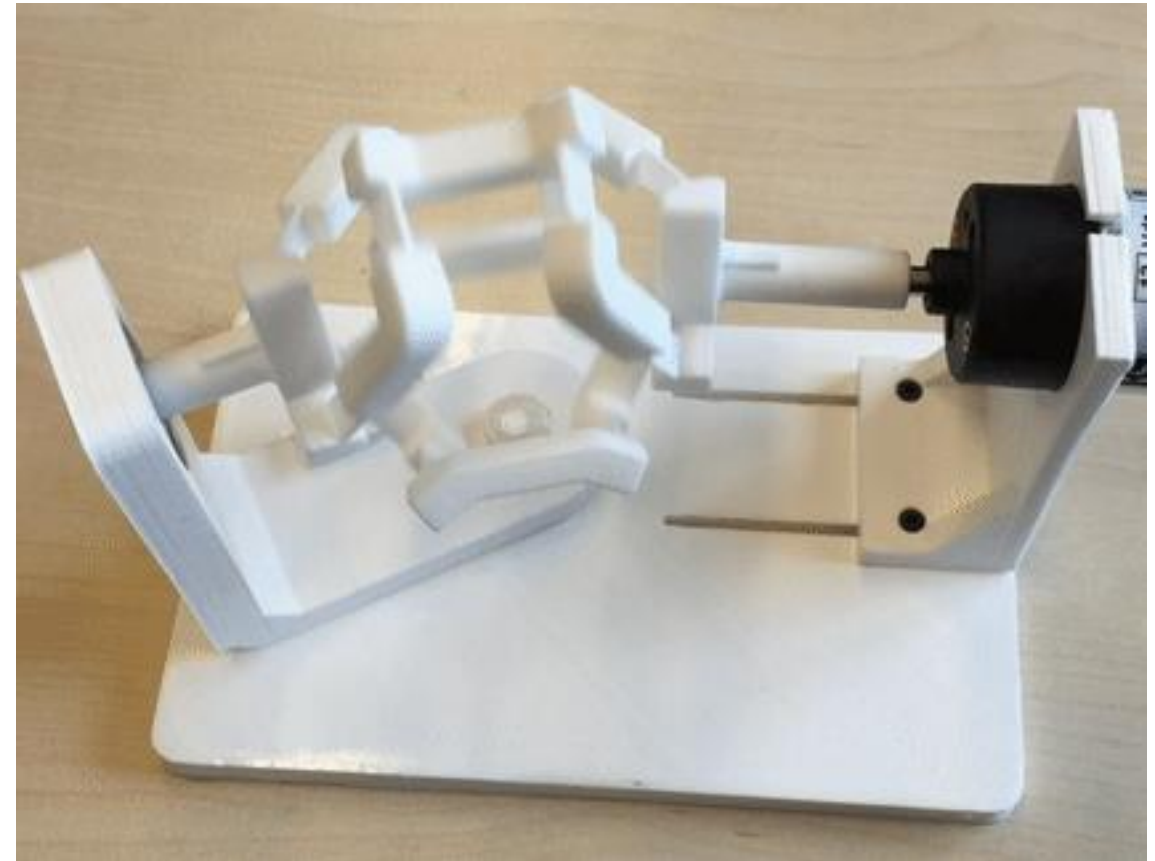
Son estructuras monolíticas que logran transmitir movimiento y fuerza a través de la deflexión de sus miembros flexibles, la deflexión se define como la capacidad que tiene el elemento para desviarse de su posición original mientras está sometido a una carga

# Aplicaciones

Baja Solicitación Mecánica



Alta Solicitación Mecánica

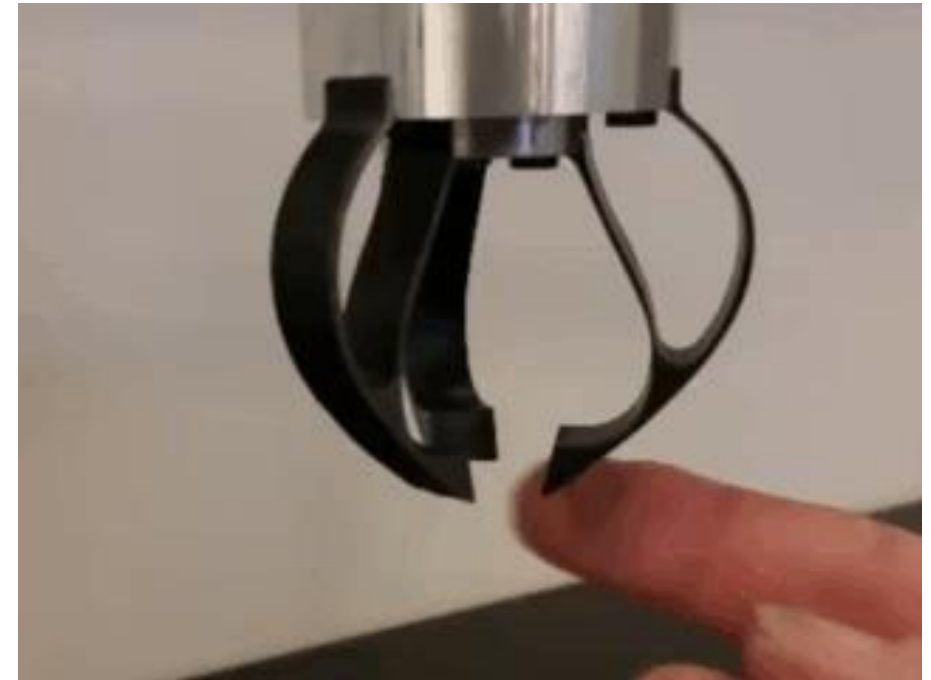


# Aplicaciones

Alta Solicitación Mecánica



Efactor Final

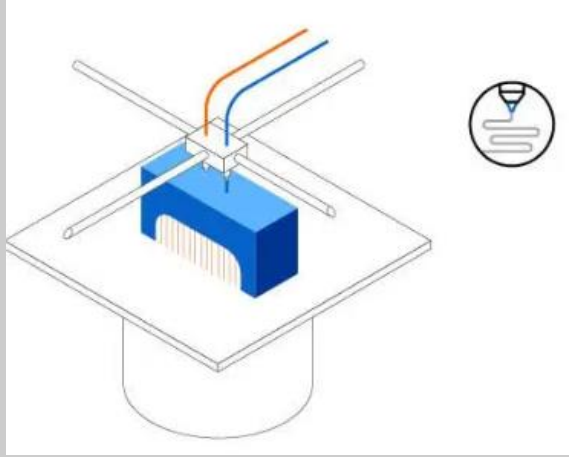


**ESPE**  
ESCUOLA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

# Manufactura Aditiva

## FDM

### Modelado por deposición fundida



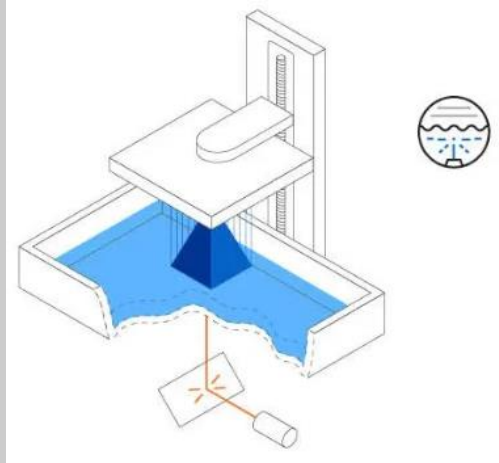
- Funde y extruye un filamento termoplástico

#### SUS MEJORES USOS SON:

Modelos de prueba de concepto básico y prototipos simples

## SLA

### Estereolitografía



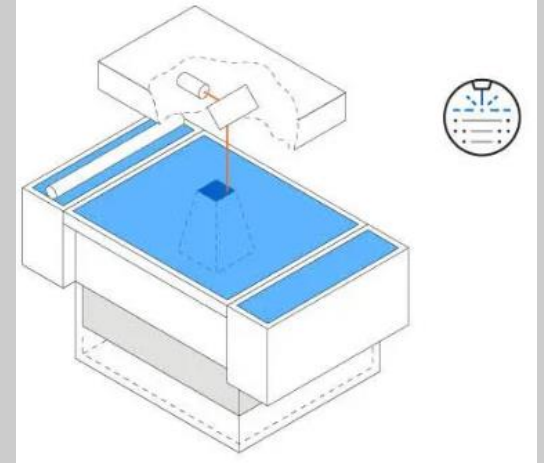
- Un láser cura resina fotopolimerizable

#### SUS MEJORES USOS SON:

Prototipos funcionales, patrones, moldes y utillaje

## SLS

### Sinterizado selectivo por láser

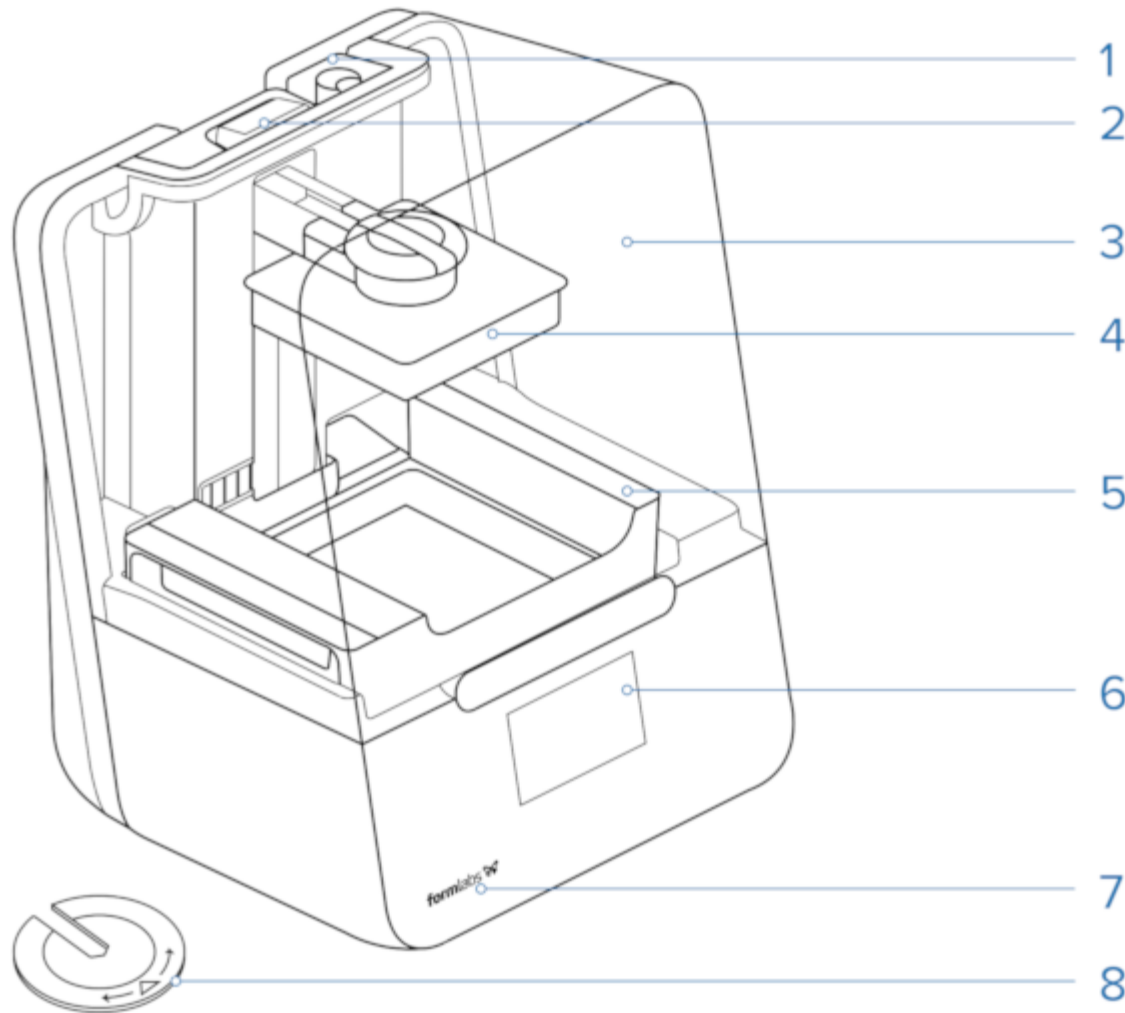


- Un láser funde polímero en polvo

#### SUS MEJORES USOS SON:

Creación de prototipos funcionales y producción de uso final.

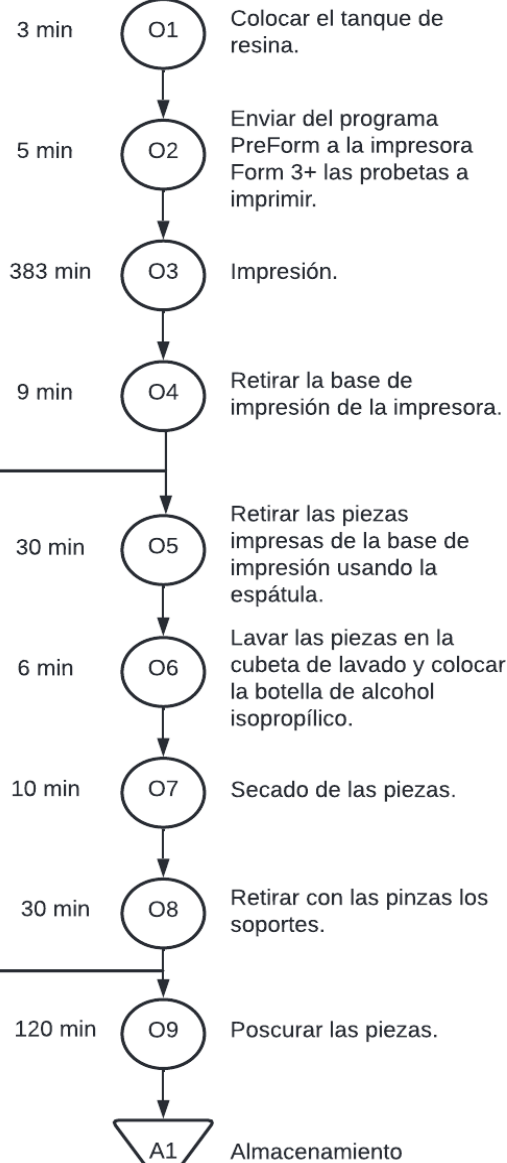
# SLA



1. Cartucho de resina
2. Luz de estado
3. Cubierta
4. Base de impresión
5. Tanque de resina
6. Pantalla táctil
7. Luz de estado
8. Disco de nivelación



# High Temp Resin V2 1L



- Cubetas de lavado
- Cesta de lavado
- Botella de alcohol isopropílico
- Pinzas
- Espátula

- Secadora LED UV a 80°C

1



2



3



4



5



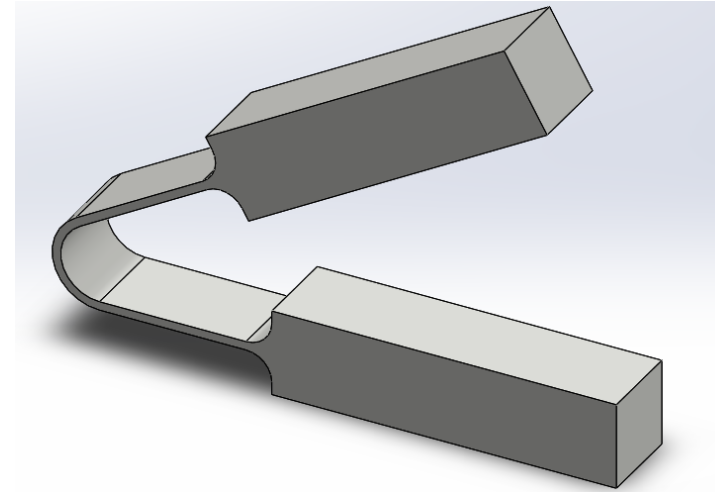
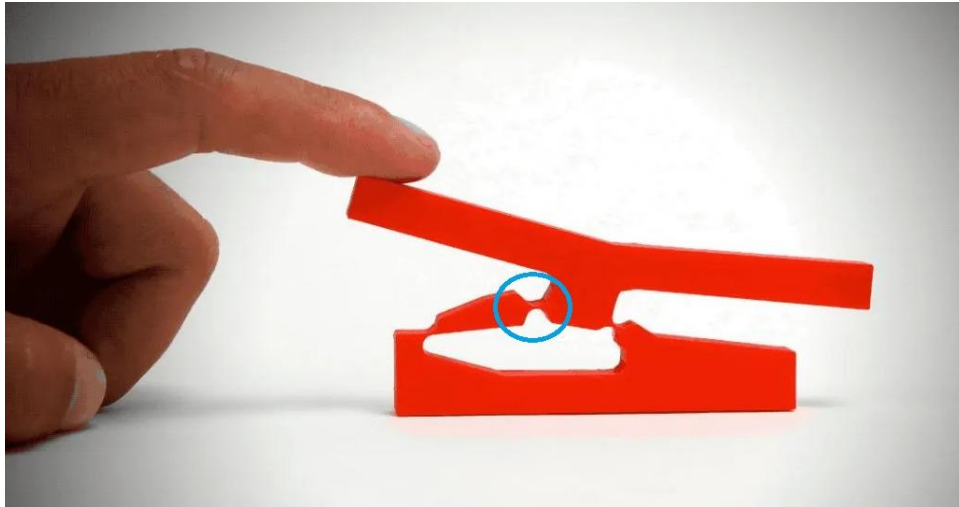
6



7



# Junta Flexible



## Fatiga

La falla por fatiga se refiere a la deformación plástica o la ruptura de un componente bajo carga cíclica.

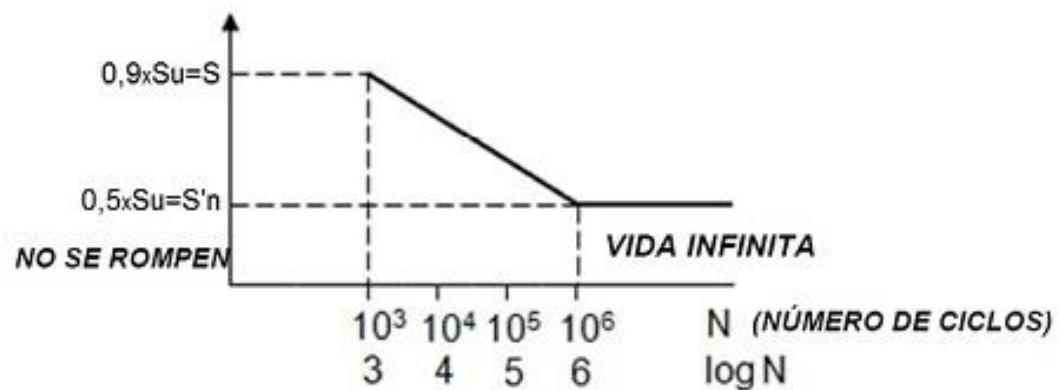
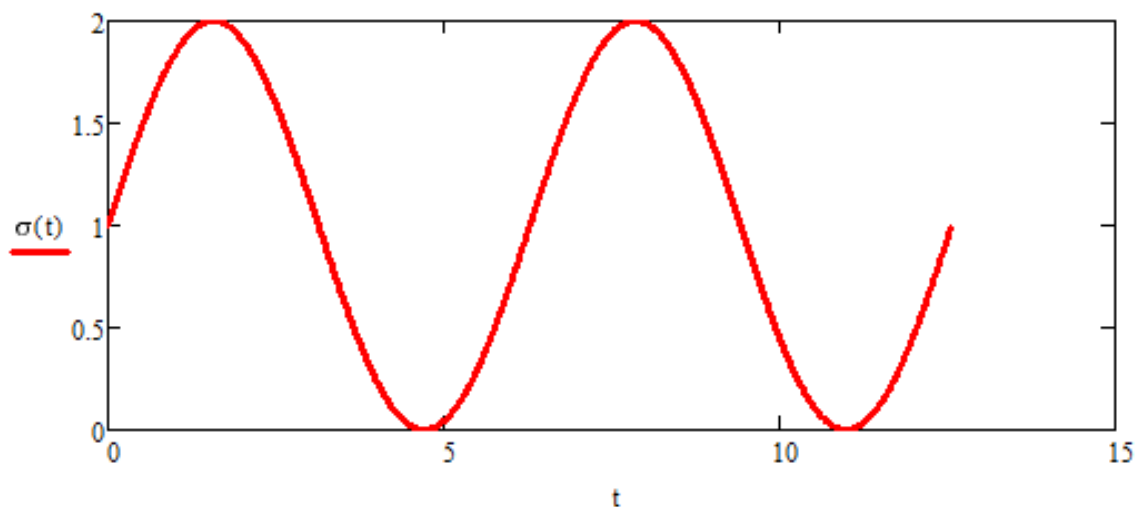


Diagrama S-N para el acero

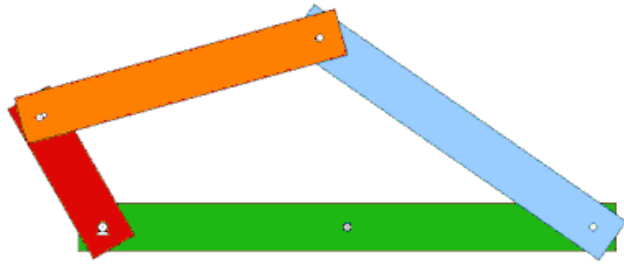
### Diagrama S-N

El diagrama de un material ayuda a estimar su vida útil cuando sobre él actúan cargas cíclicas, de manera que se pueda calcular su resistencia a fatiga para poder soportar un determinado número de ciclos de aplicación de la carga.

### Esfuerzo cero Base

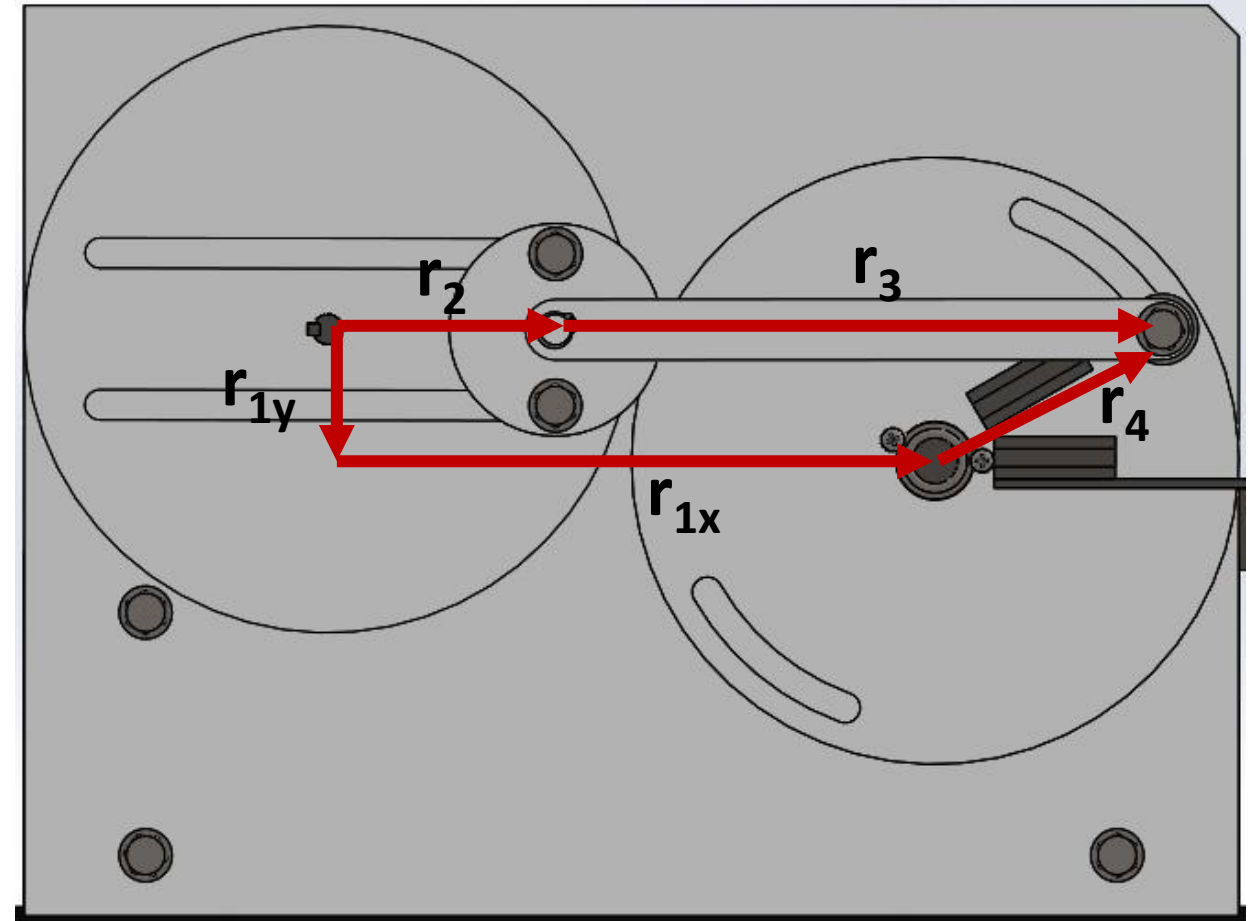


# Requisitos del Diseño del Mecanismo



## Mecanismo de 4 barras

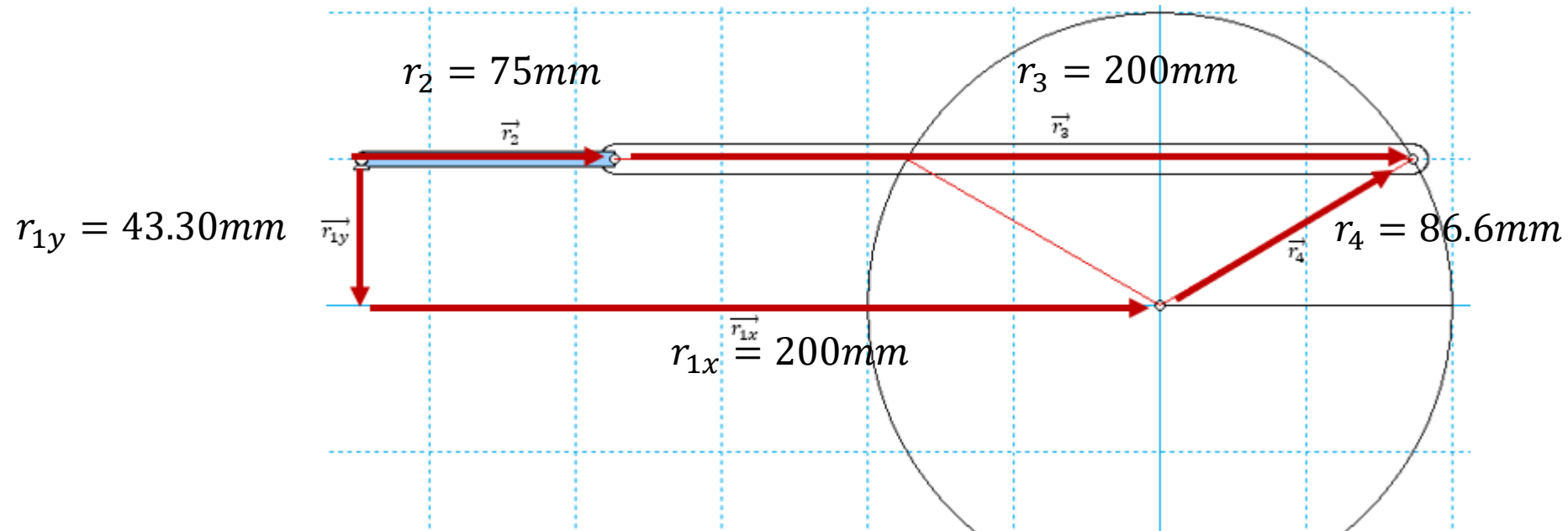
El mecanismo de 4 barras esta compuesto por tres barras móviles y una fija unidos entre si por nudos articulados.



# Diseño del Mecanismo de Ensayo

## Síntesis Dimensional

La síntesis dimensional es la determinación de las longitudes y ángulos necesarios para crear un mecanismo que logre transformar el movimiento deseado.



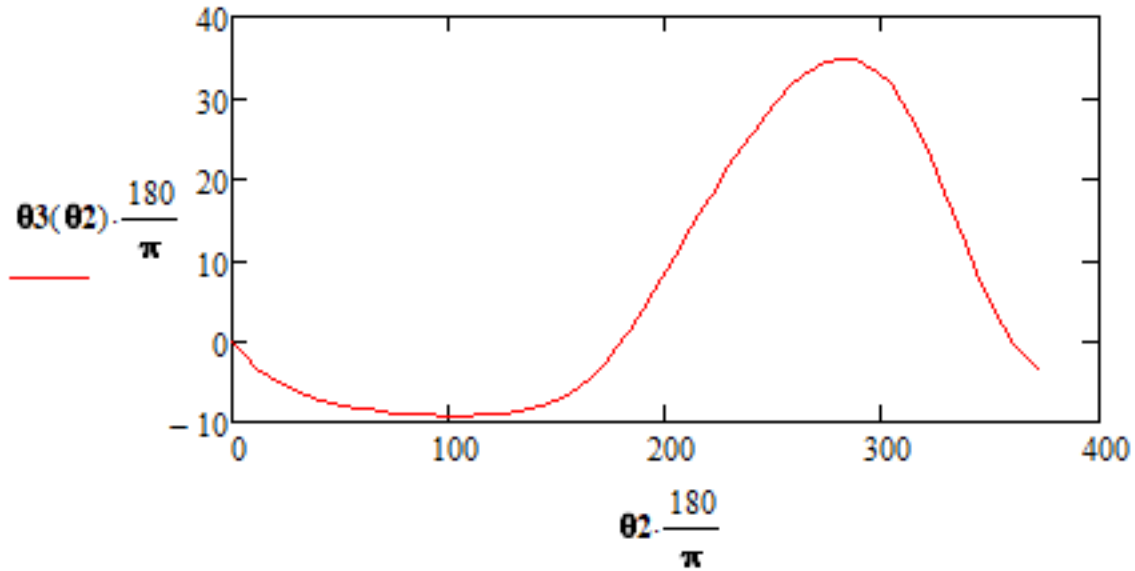
$$\vec{r}_2 + \vec{r}_3 = \vec{r}_{1x} + \vec{r}_{1y} + \vec{r}_4$$

# Análisis Cinemático

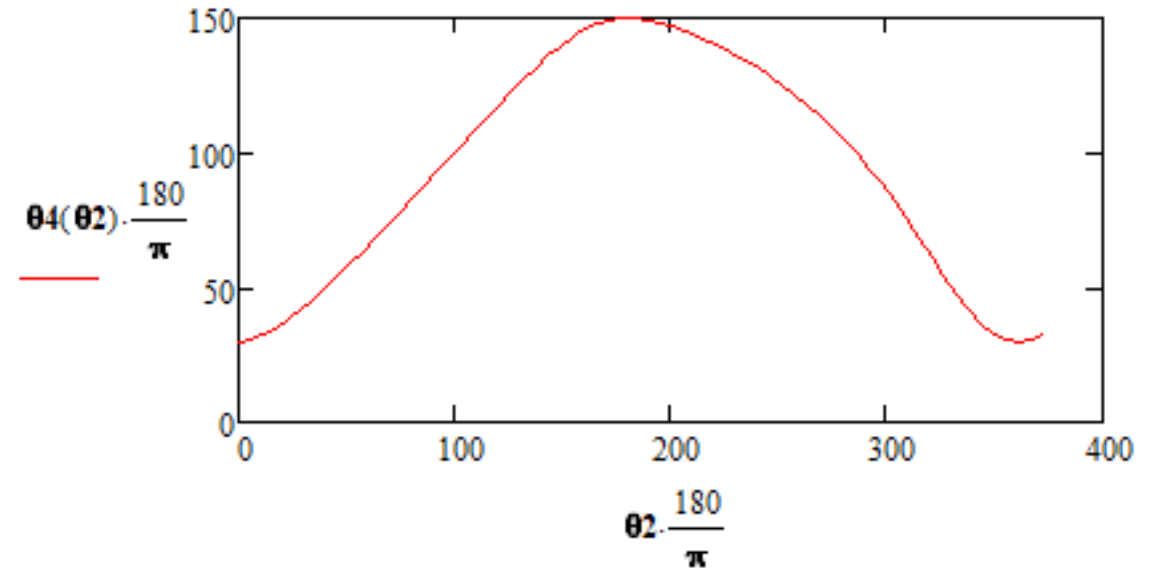
## Análisis de Movimiento

$$r_2 \cdot e^{i\theta_2} + r_3 \cdot e^{i\theta_3} = r_{1x} \cdot e^{i\cdot 0} + r_{1y} \cdot e^{i\cdot 270} + r_4 \cdot e^{i\theta_4}$$

THETA3



THETA4



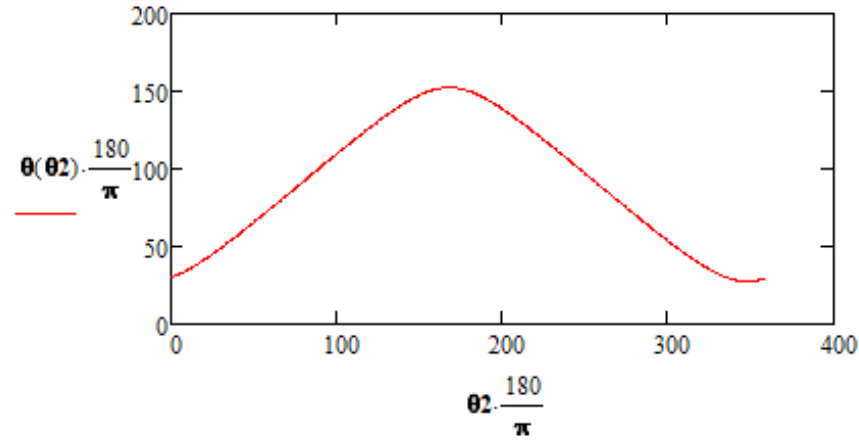
$$\theta_3 = 2 \cdot \tan \left( \frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4 \cdot D \cdot F}}{2 \cdot D} \right)$$

$$\theta_4 = 2 \cdot \tan \left( \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} \right)$$



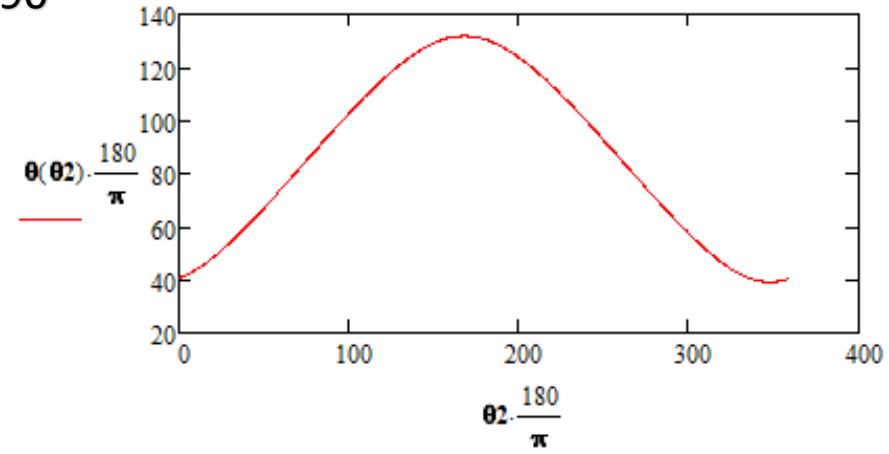
120°

Ángulo de Transmisión



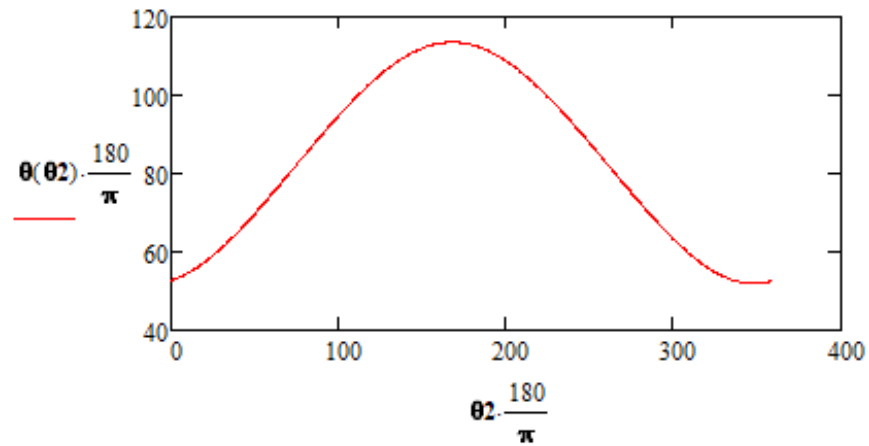
90°

Ángulo de Transmisión



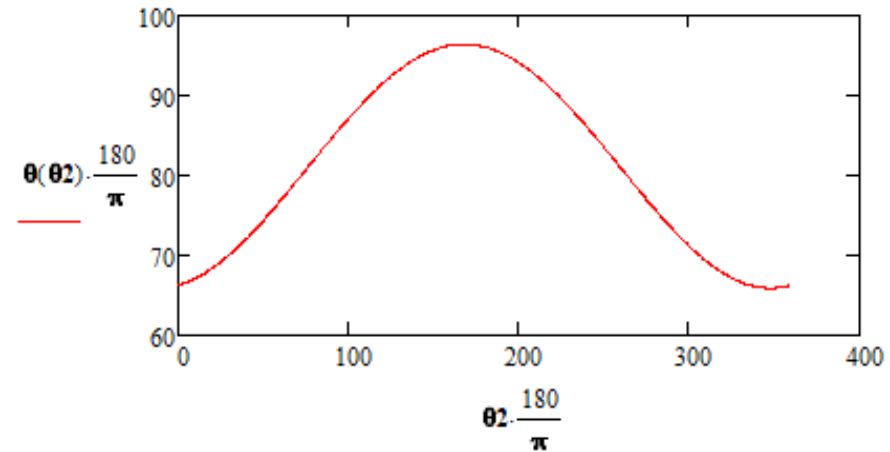
60°

Ángulo de Transmisión



30°

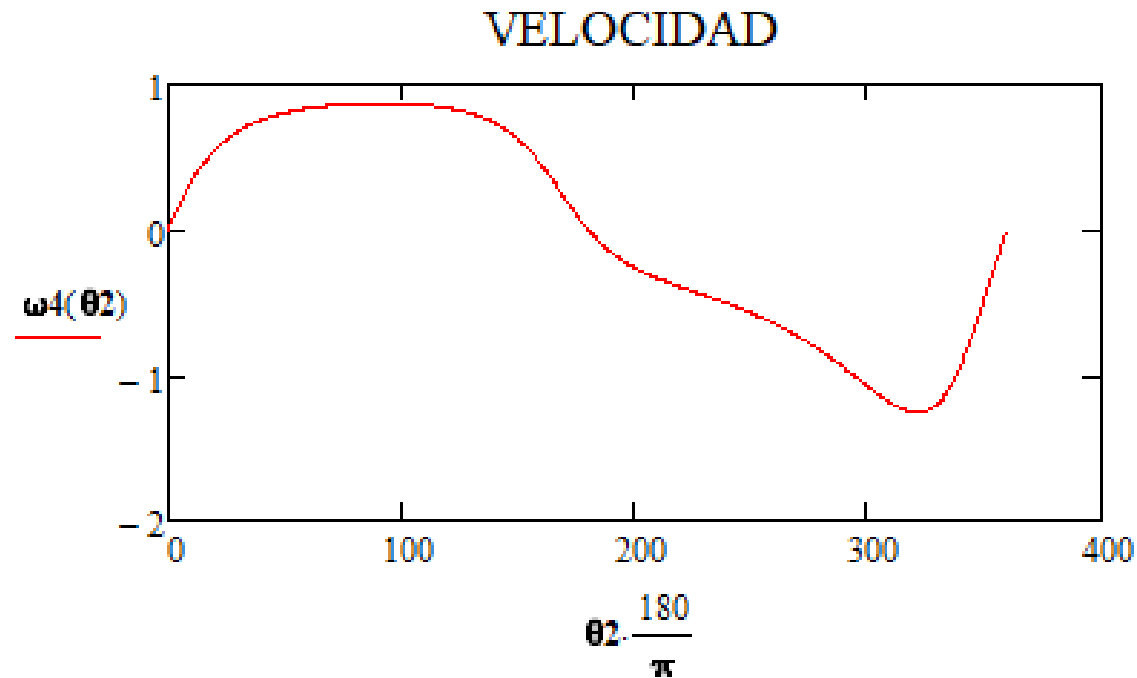
Ángulo de Transmisión



## Análisis de Velocidad

$$i \cdot \omega_2 \cdot r_2 \cdot e^{i \cdot \theta_2} + i \cdot \omega_3 \cdot r_3 \cdot e^{i \cdot \theta_3} = i \cdot \omega_4 \cdot r_4 \cdot e^{i \cdot \theta_4}$$

$$\omega_3 = -\frac{r_2 \cdot \omega_2 \cdot \sin(\theta_2 - \theta_4)}{r_3 \cdot \sin(\theta_3 - \theta_4)} \quad \omega_4 = -\frac{r_2 \cdot \omega_2 \cdot \sin(\theta_2 - \theta_3)}{r_4 \cdot \sin(\theta_3 - \theta_4)}$$





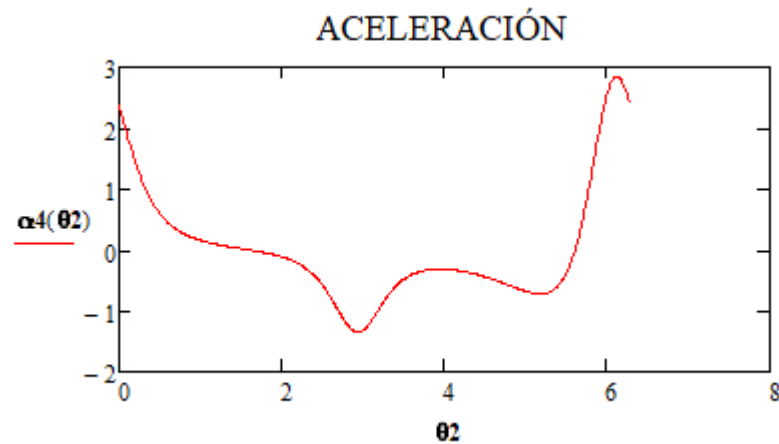
## Análisis de Aceleración

$$-\omega_2^2 \cdot r_2 \cdot e^{i \cdot \theta_2} + i \cdot \alpha_3 \cdot r_3 \cdot e^{i \cdot \theta_3} - \omega_3^2 \cdot r_3 \cdot e^{i \cdot \theta_3}$$

$$= i \cdot \alpha_4 \cdot r_4 \cdot e^{i \cdot \theta_4} - \omega_4^2 \cdot r_4 \cdot e^{i \cdot \theta_4}$$

$$\alpha_3 = - \frac{r_2 \cdot \omega_2^2 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_4) + r_3 \cdot \omega_3^2 \cdot \cos(\theta_3 - \theta_4) - r_4 \cdot \omega_4^2}{r_3 \cdot \sin(\theta_3 - \theta_4)}$$

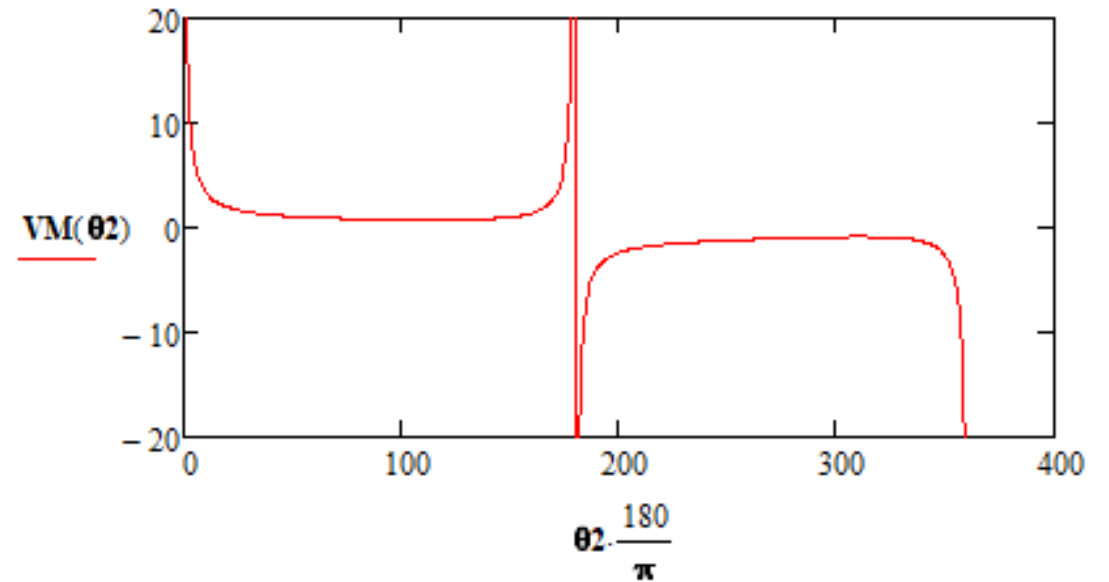
$$\alpha_4 = - \frac{r_2 \cdot \omega_2^2 \cdot \cos(\theta_2 - \theta_3) - r_4 \cdot \omega_4^2 \cdot \cos(\theta_3 - \theta_4) + r_3 \cdot \omega_3^2}{r_4 \cdot \sin(\theta_3 - \theta_4)}$$



## Ventaja Mecánica

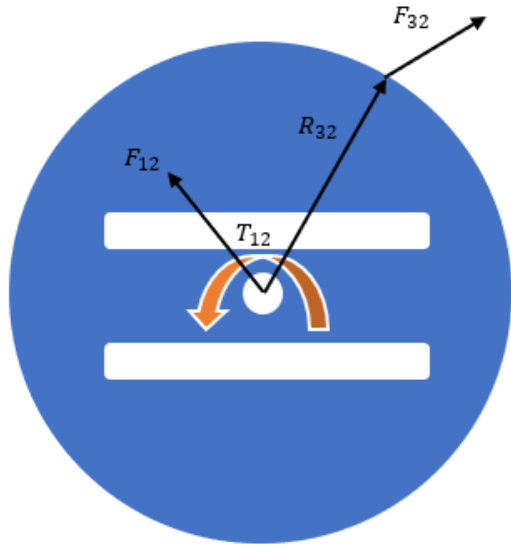
$$P_{entrada} = P_{salida}$$

$$VM = \frac{F_{salida}}{F_{entrada}}$$



# Análisis Dinámico

## Análisis Rueda Impulsora

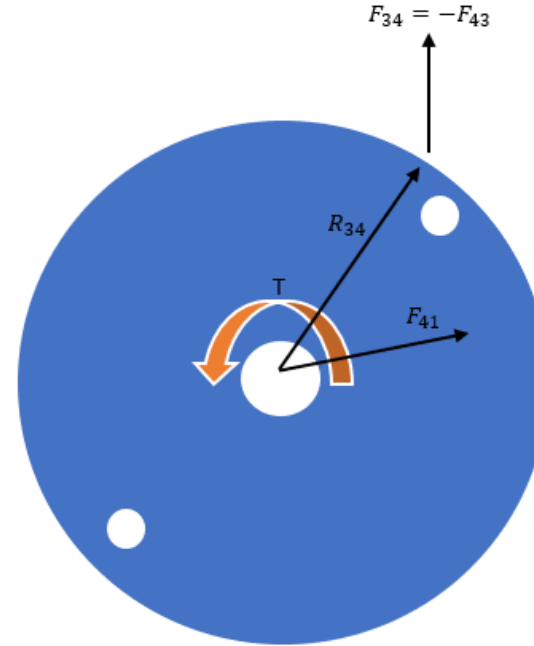


$$\sum F_x \rightarrow F_{21x} + F_{32x} = 0$$

$$\sum F_y \rightarrow F_{21y} + F_{32y} = 0$$

$$\sum T \rightarrow r_2 \cdot \cos(\theta_2) \cdot F_{32y} - r_2 \cdot \sin(\theta_2) \cdot F_{32x} + T_{12} = 0$$

## Análisis Rueda Impulsada

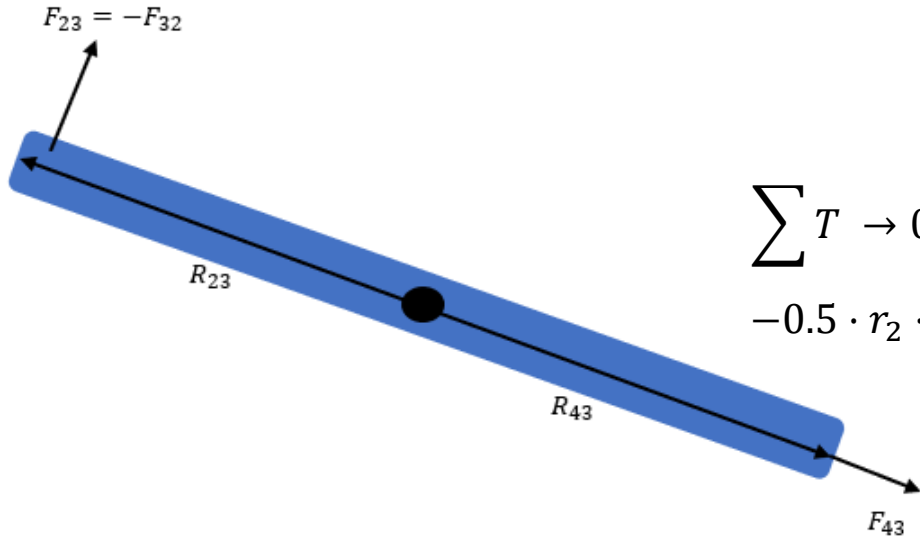


$$\sum F_x \rightarrow F_{41x} - F_{43x} = 0$$

$$\sum F_y \rightarrow F_{41y} - F_{43y} = 0$$

$$\begin{aligned} \sum T \rightarrow & -r_4 \cdot \cos(\theta_4(\theta_2)) \cdot F_{43y} + r_4 \cdot \sin(\theta_4(\theta_2)) \cdot F_{43x} \\ & + K \cdot \left( \theta_4(\theta_2) - 30 \frac{\pi}{180} \right) = I_4 \alpha_4 \end{aligned}$$

## Análisis de Acoplador



$$\sum F_x \rightarrow F_{43x} - F_{32x} = m_3 \cdot [-r_2 \cdot \omega_2^2 \cdot \cos(\theta_2) - 0.5 \cdot r_3 \cdot \alpha_3 \cdot \sin(\theta_3) - 0.5 \cdot r_3 \cdot \omega_3^2 \cdot \cos(\theta_3)]$$

$$\sum F_y \rightarrow F_{43y} - F_{32y}$$

$$= m_3 \cdot [-r_2 \cdot \omega_2^2 \cdot \sin(\theta_2) + 0.5 \cdot r_3 \cdot \alpha_3 \cdot \cos(\theta_3) - 0.5 \cdot r_3 \cdot \omega_3^2 \cdot \sin(\theta_3)]$$

$$\sum T \rightarrow 0.5 \cdot r_3 \cdot \cos(\theta_3(\theta_2)) \cdot F_{43y} - 0.5 \cdot r_3 \cdot \sin(\theta_3(\theta_2)) \cdot F_{43x} + 0.5 \cdot r_2 \cdot \cos(\theta_3(\theta_2)) \cdot F_{32y} - 0.5 \cdot r_2 \cdot \sin(\theta_3(\theta_2)) \cdot F_{32x} = I_3 \alpha_3$$

## Solución de las Ecuaciones Vectoriales

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_{32y} & 0 & R_{32x} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & R_{23y} & 0 & -R_{23x} & 0 & -R_{43y} & R_{43x} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{34y} & -R_{34x} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{21x} \\ F_{32x} \\ F_{21y} \\ F_{32y} \\ T_{12} \\ F_{43x} \\ F_{43y} \\ F_{41x} \\ F_{41y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_3 \cdot a_{CG3x} \\ m_3 \cdot a_{CG3y} \\ I_3 \alpha_3 \\ 0 \\ 0 \\ I_4 \alpha_4 + K\theta \end{bmatrix}$$

$$[M(\theta)][F(\theta)] = [C(\theta)] \rightarrow [F(\theta_2)] = [M(\theta_2)]^{-1}[C(\theta_2)]$$

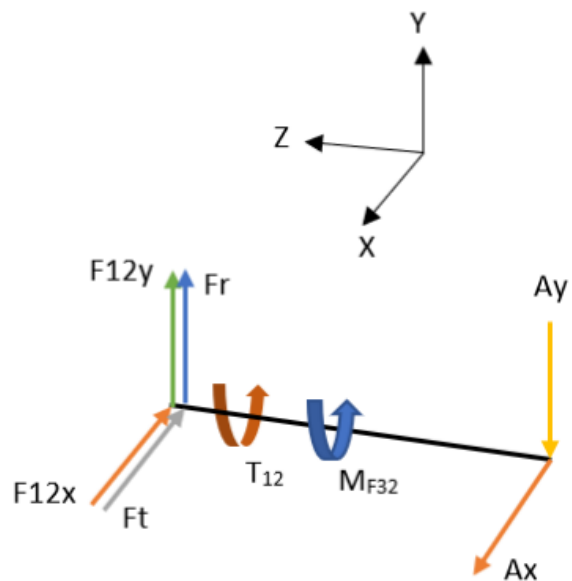


$r_2$ (mm)	Ángulo (°)	Velocidad [rpm]	$T_{med}$ [Nm]	$P_{med}$ [W]
75	120	600	0.0110	0.69
61	90	700	0.0143	1.05
43	60	800	0.0126	1.06
22	30	850	0.004	0.44
11	15	1000	0.002	0.26

$F_{12_y}$ [N]	$F_{12_x}$ [N]	$F_{41_y}$ [N]	$F_{41_x}$ [N]	$F_{43_y}$ [N]	$F_{43_x}$ [N]	$F_{32_y}$ [N]	$F_{32_x}$ [N]	$T_{12}$ [Nm]
0.2157	-0.9961	-0.2157	0.9961	0.9961	-0.2157	0.9961	-0.2157	0.112



# Diseño de flecha



$$F_{tpr} = \frac{2(T_{12} + M_{F32})}{d_p}$$

$$F_{rpr} = F_{tpr} \cdot \tan(\varphi)$$

$$\sum F_y = 0 \quad - \quad \sum F_x = 0$$

$$\sigma_{b1} = \frac{My}{s} = \frac{M_{T1} \cdot d_1}{d_1^4 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{64}} = \frac{32 \cdot M_{T1}}{\pi \cdot d_1^3}$$

$$T_{b1} = \frac{T_p}{J} = \frac{T_1 \cdot d_1}{d_1^4 \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{32}} = \frac{16 \cdot T_1}{\pi \cdot d_1^3}$$

$$\frac{1}{FS} = \frac{\sigma_{eqm1}}{S_u} + \frac{\sigma_{eqa1}}{S_e}$$

$$d_1 = \sqrt[3]{FS \left( \frac{32 \cdot T_1}{\pi \cdot S_u} \cdot k_t + \frac{32 \cdot M_{T1}}{\pi \cdot S_e} \cdot k_f \right)}$$

$$S'_e = 0.5 S_{ut}$$

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot S'_e$$

$$d_1 = 4.235 \text{ [mm]}$$

$$d_2 = 4.853 \text{ [mm]}$$

$$C_{r1a} = P * \sqrt[p]{L_{10}}$$

$$C_{r1a} = 49.805 \text{ [N]}$$

**Acero 1018**

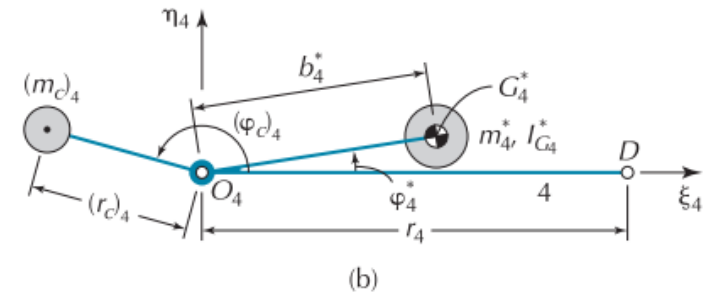
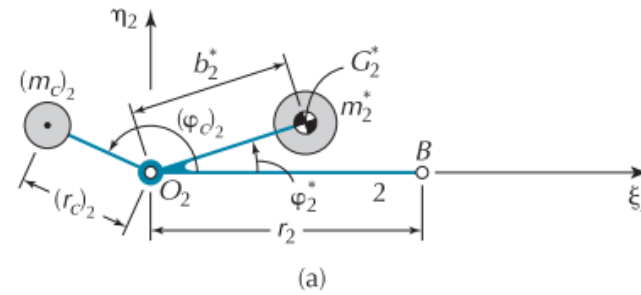
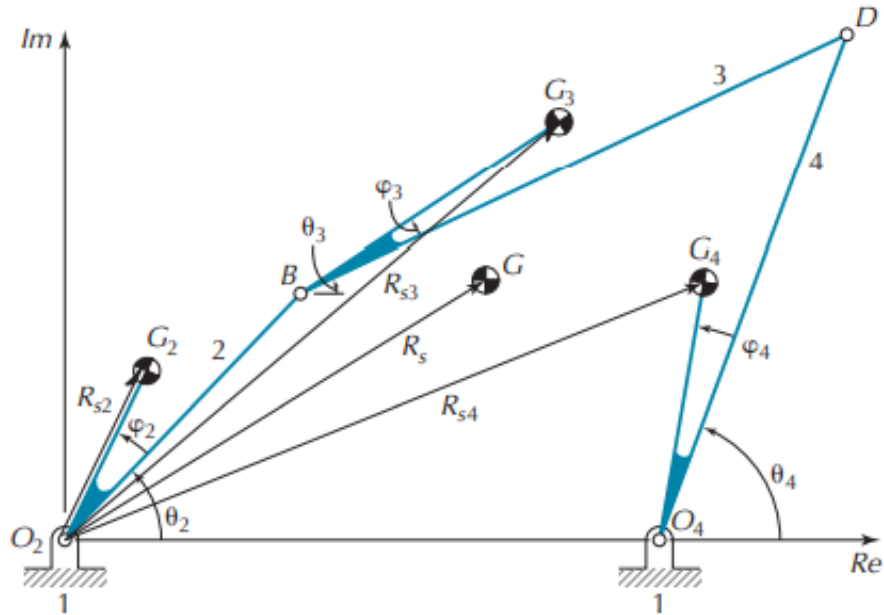
**Esfuerzo de Fluencia**      220 [MPa]

**Esfuerzo Último**      341 [MPa]



**ESPE**  
 ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
 CAMINO A LA EXCELENCIA

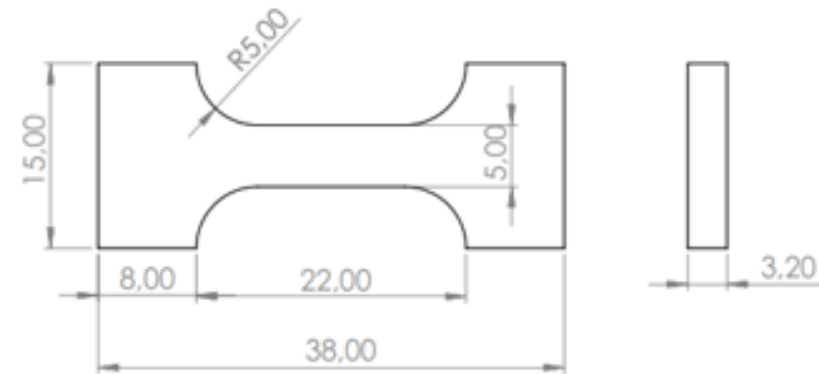
# Balaceo por el método de los vectores linealmente independientes



	Masa (g)	Distancia (mm)
Rueda Impulsora	59	25
Rueda Impulsada	20	86.6

# Dimensionamiento de las juntas flexibles

## Ensayo a Tracción



**ASTM Designation: D1708-13**  
Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics by Use of Microtensile Specimens

Número de ensayos

5

Velocidad de ensayo

5mm/min



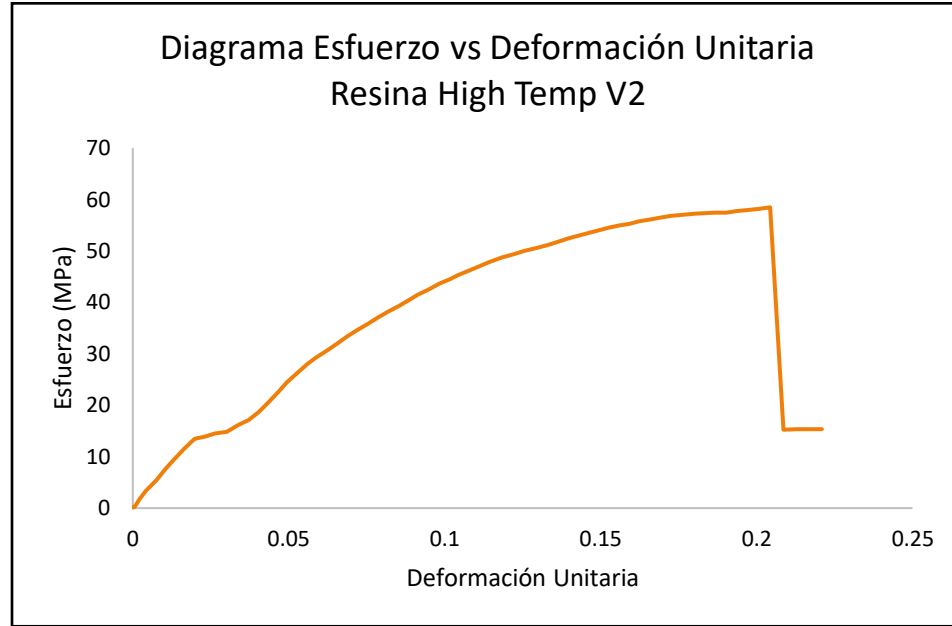
Ensayo a tracción de espécimen poscurado en resina High Temp V2 mediante SLA.

Ensayo a tracción de espécimen sin poscurado en resina High Temp V2 mediante SLA.

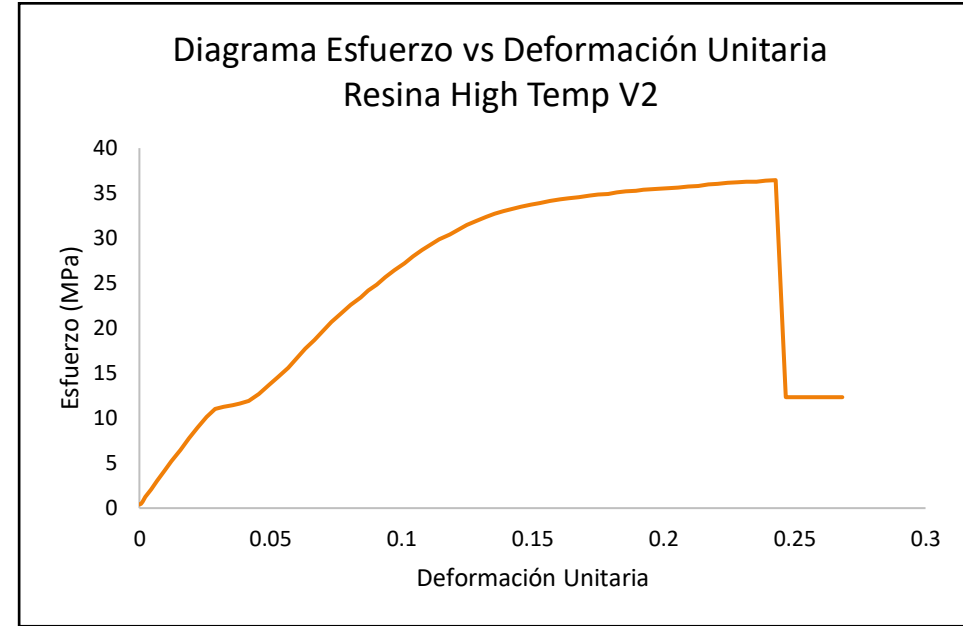


**ESPE**  
ESCUOLA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

Curva esfuerzo vs deformación unitaria de la resina High Temp V2 poscurada.



Curva esfuerzo vs deformación unitaria de la resina High Temp V2 sin poscurado.



### Propiedades mecánicas de la resina High Temp V2.

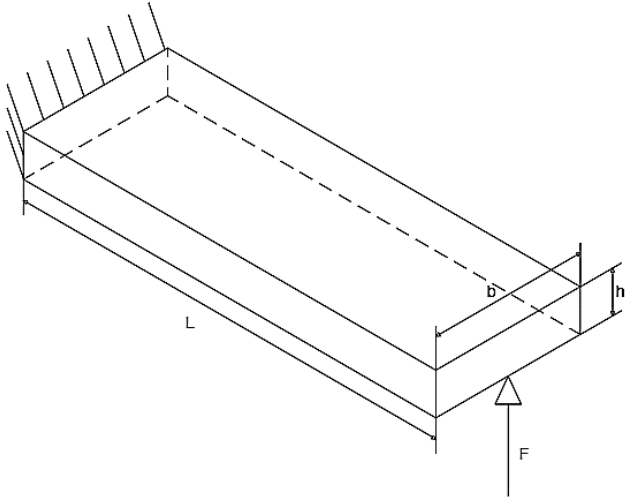
	$E$ (MPa)	$S_y$ (MPa)	$S_{ut}$ (MPa)
High Temp V2 poscurada	661.32	13.97	58.46
High Temp V2 sin poscurar	389.01	11.40	36.43





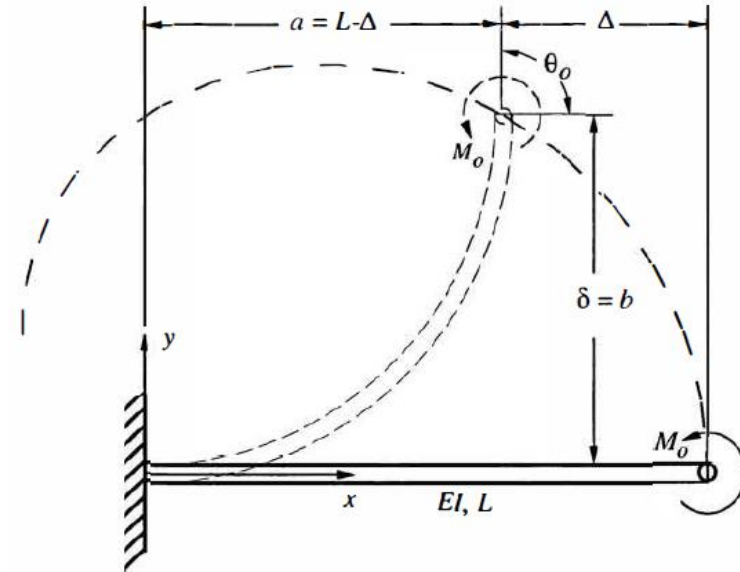
# Esfuerzos en las juntas y factor de seguridad

## Esfuerzos debido a flexión



Ecuación de Navier

$$\sigma = \frac{M_{max}C}{I}$$



$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{M_o}{EI}$$

$$\int_0^{\theta_o} d\theta = \int_0^L \frac{M_o}{EI} ds$$

$$\theta_o = \frac{M_o L}{EI}$$

$$M_o = \frac{\theta_o EI}{L}$$

Viga en Voladizo. *Compliant Mechanism*, por Larry Howell, 2001.

Viga en Voladizo con grande deflexión en su extremo. *Compliant Mechanism*, por Larry Howell, 2001.

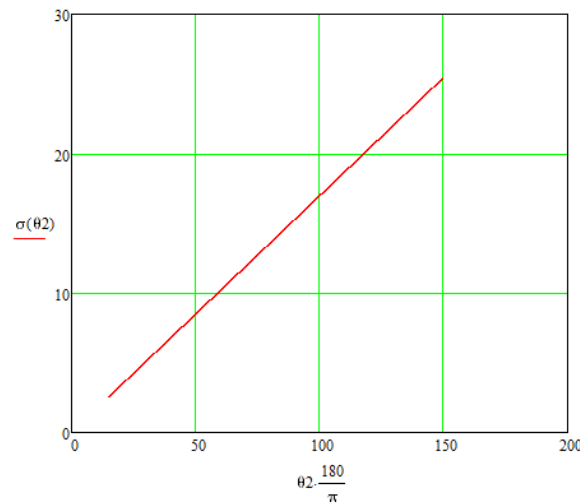
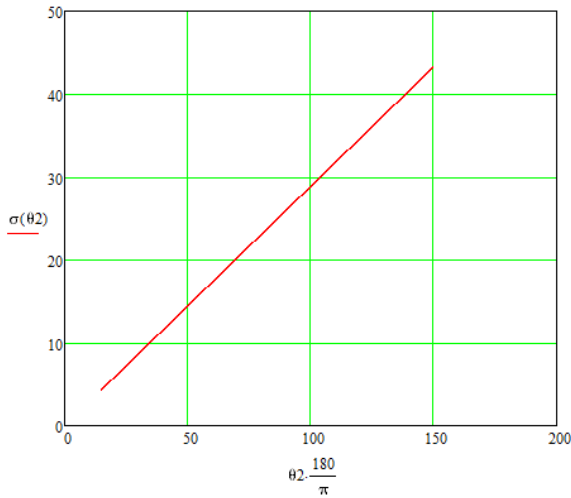


	$E$ (MPa)	$S_y$ (MPa)	$h$ (mm)	$L$ (mm)
High Temp V2 poscurada	661.32	13.97	0.6	12
High Temp V2 sin poscurar	389.01	11.40		

$$\sigma = \frac{\theta_o E \left(\frac{h}{2}\right)}{L}$$

$$N = \frac{S_y}{\sigma}$$

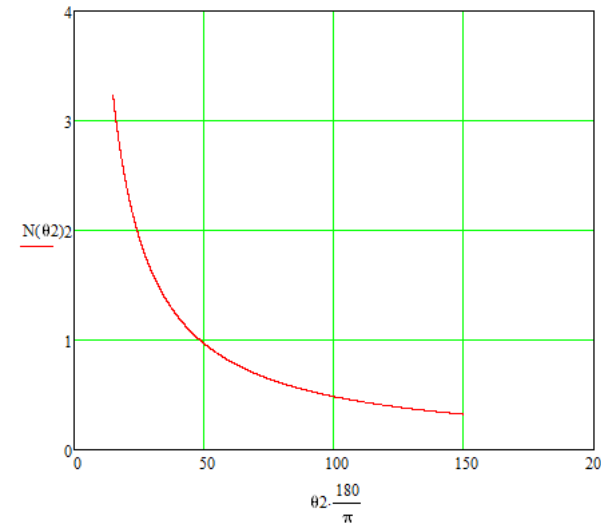
### Comportamiento de $\sigma$ con la variación de $\theta_2$



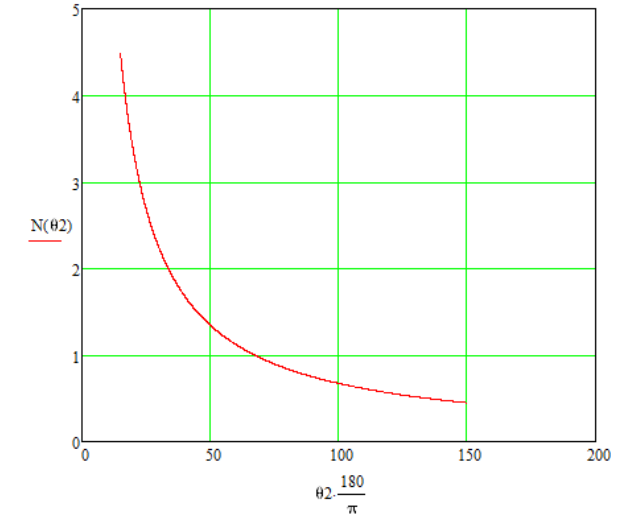
a) Resina High Temp V2 poscurada.

b) Resina High Temp V2 sin poscurado.

### Comportamiento de $N$ con la variación de $\theta_2$



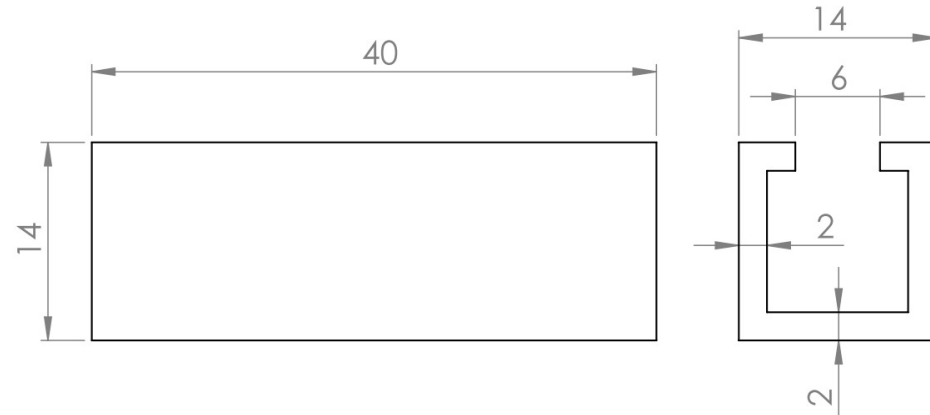
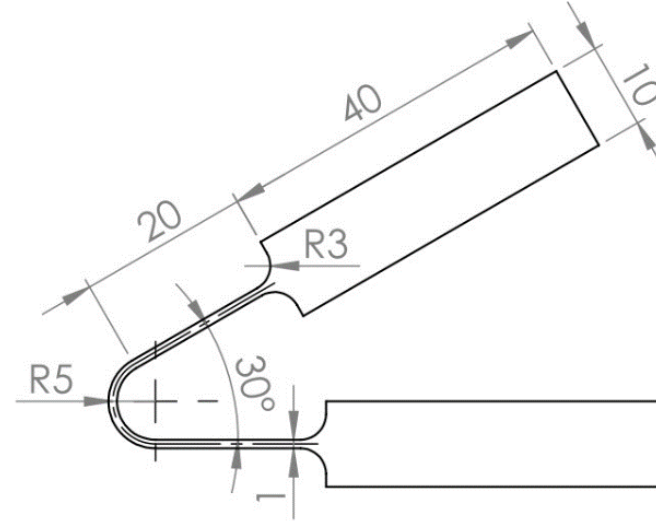
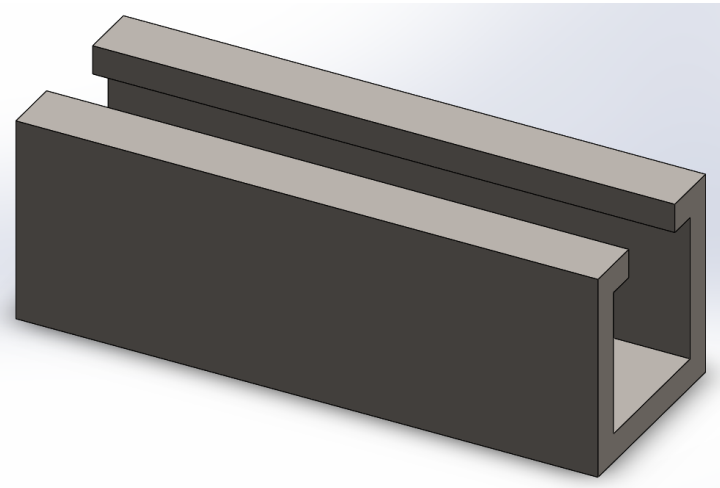
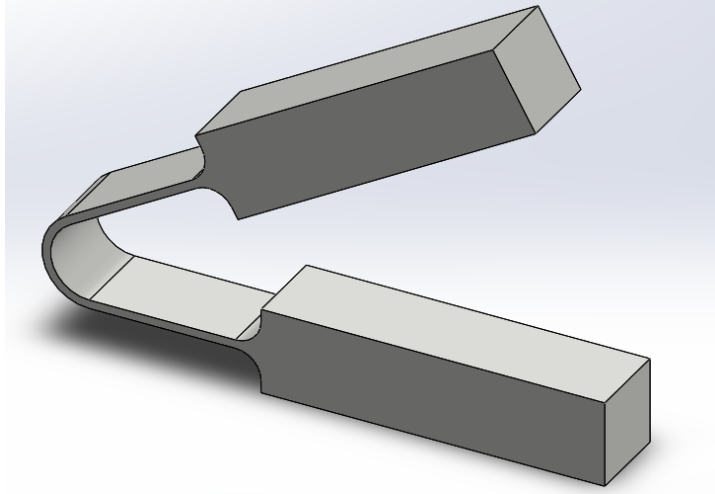
a) Resina High Temp V2 poscurada.



b) Resina High Temp V2 sin poscurado.

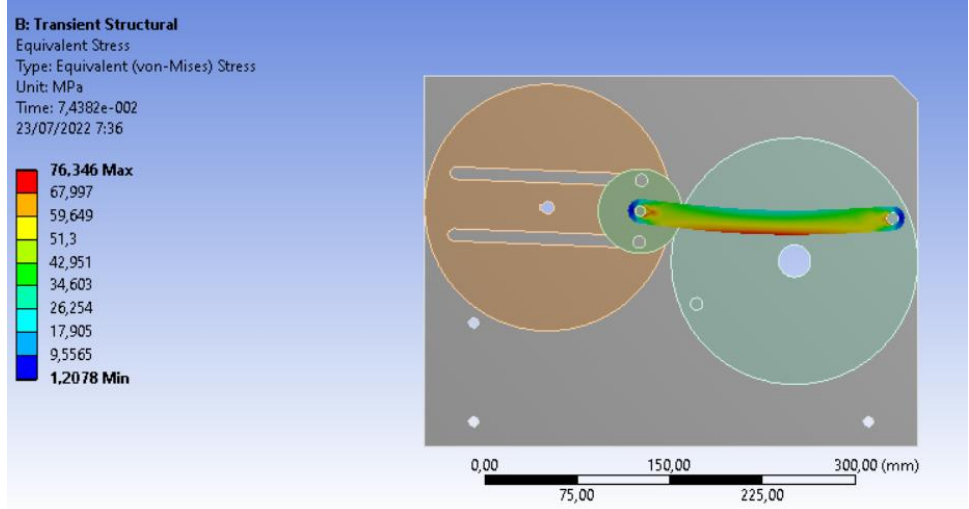
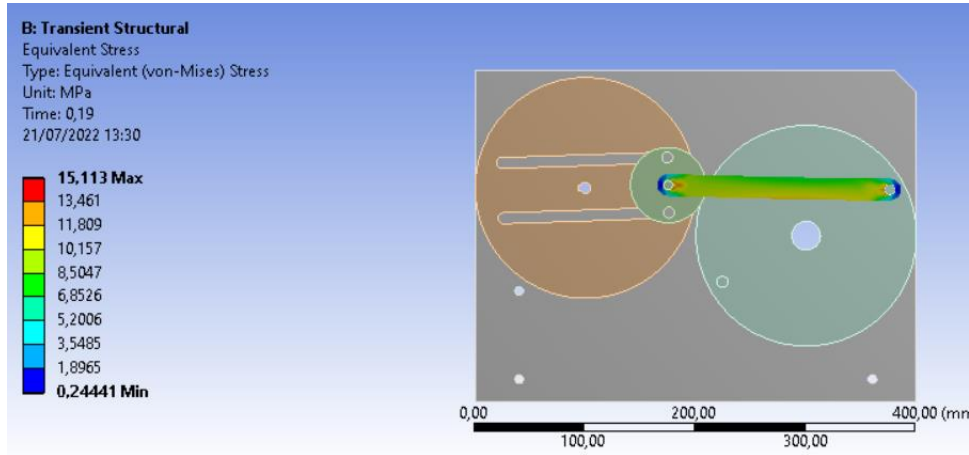


# Modelado de una Junta Flexible

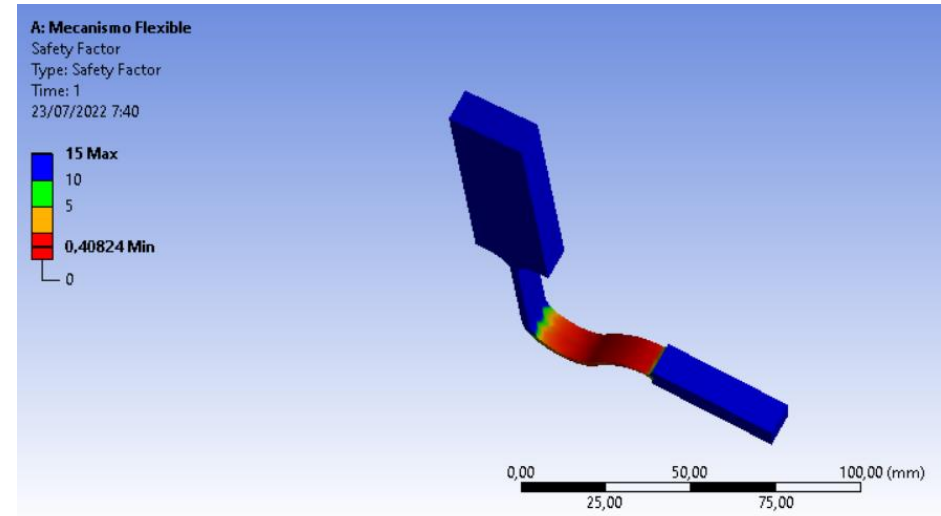
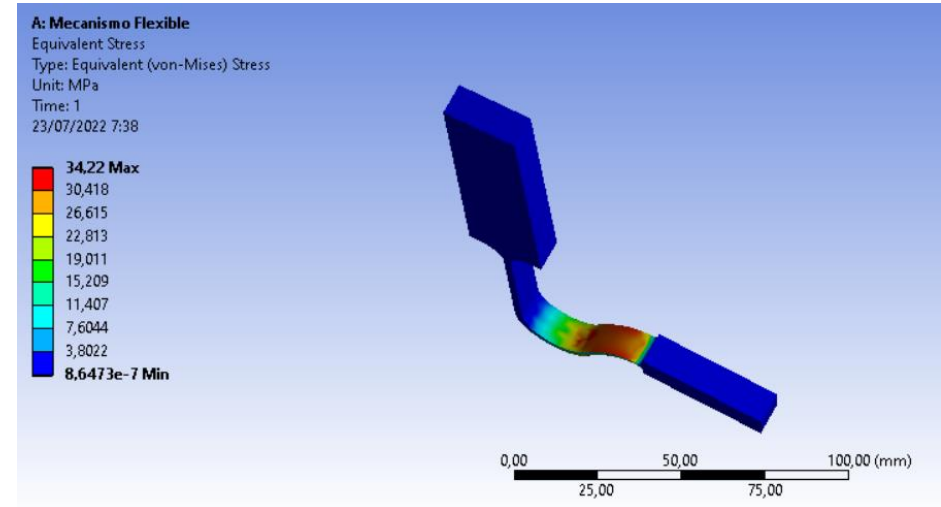


# Simulación Numérica

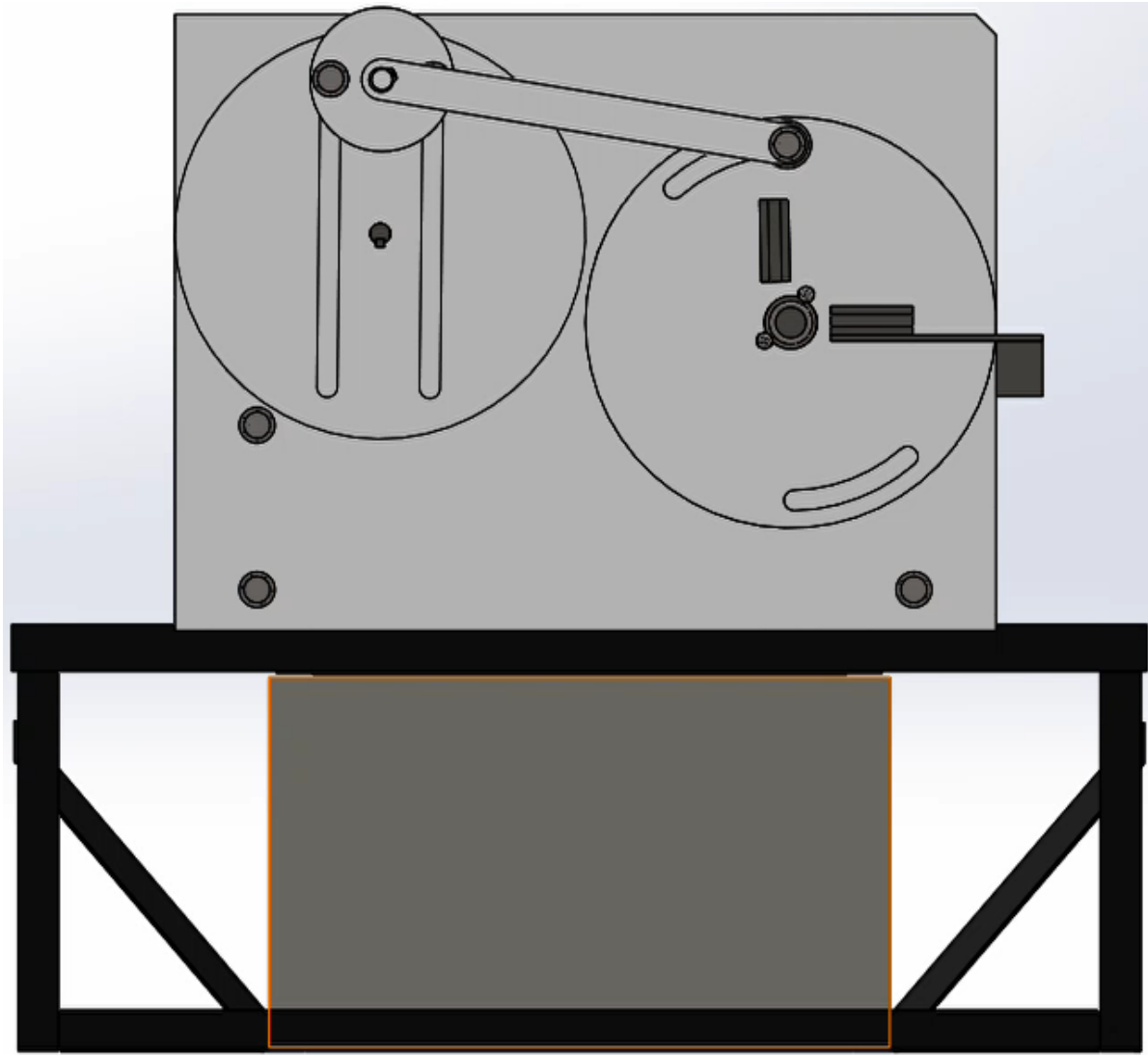
120°



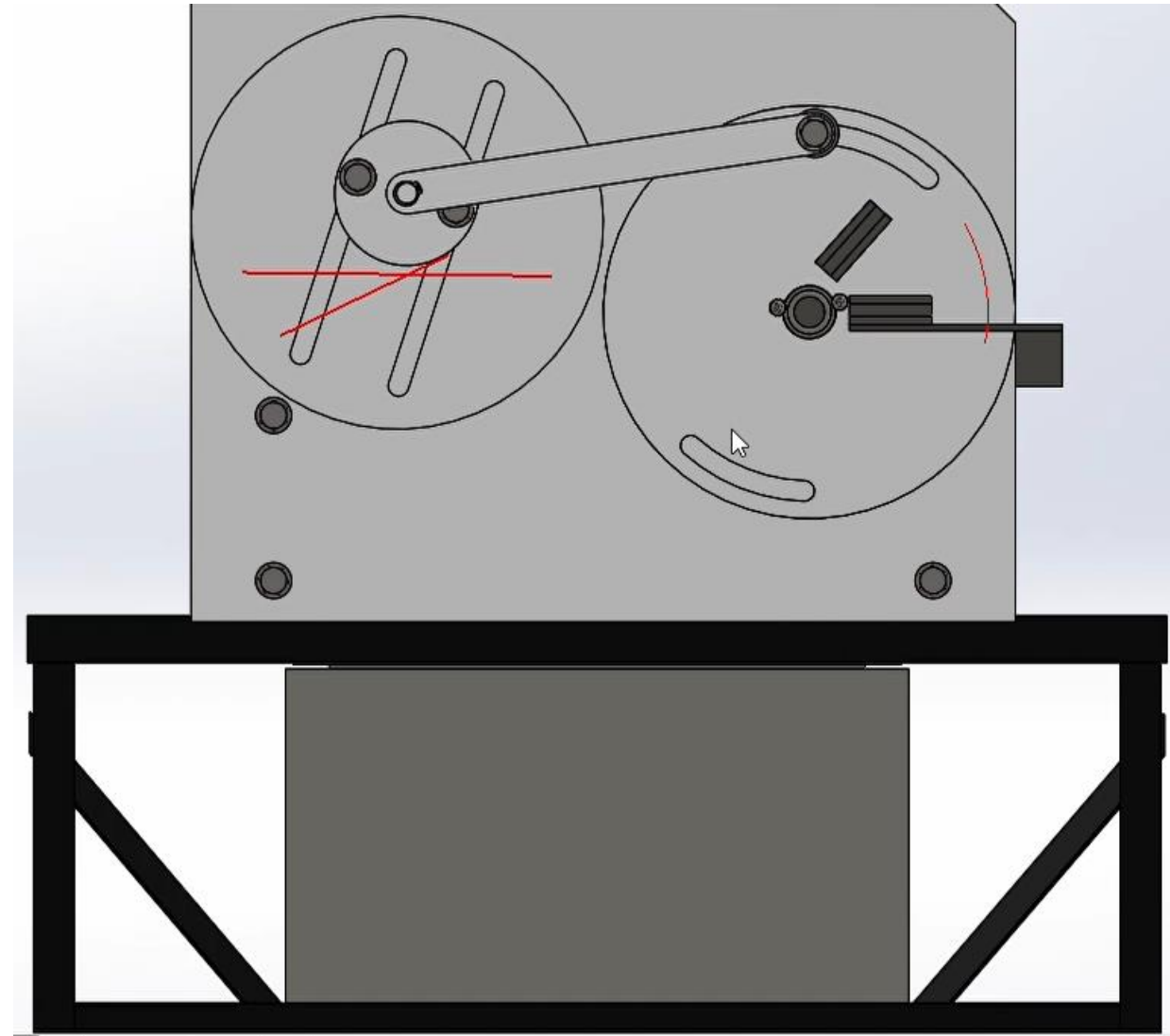
120°



120°

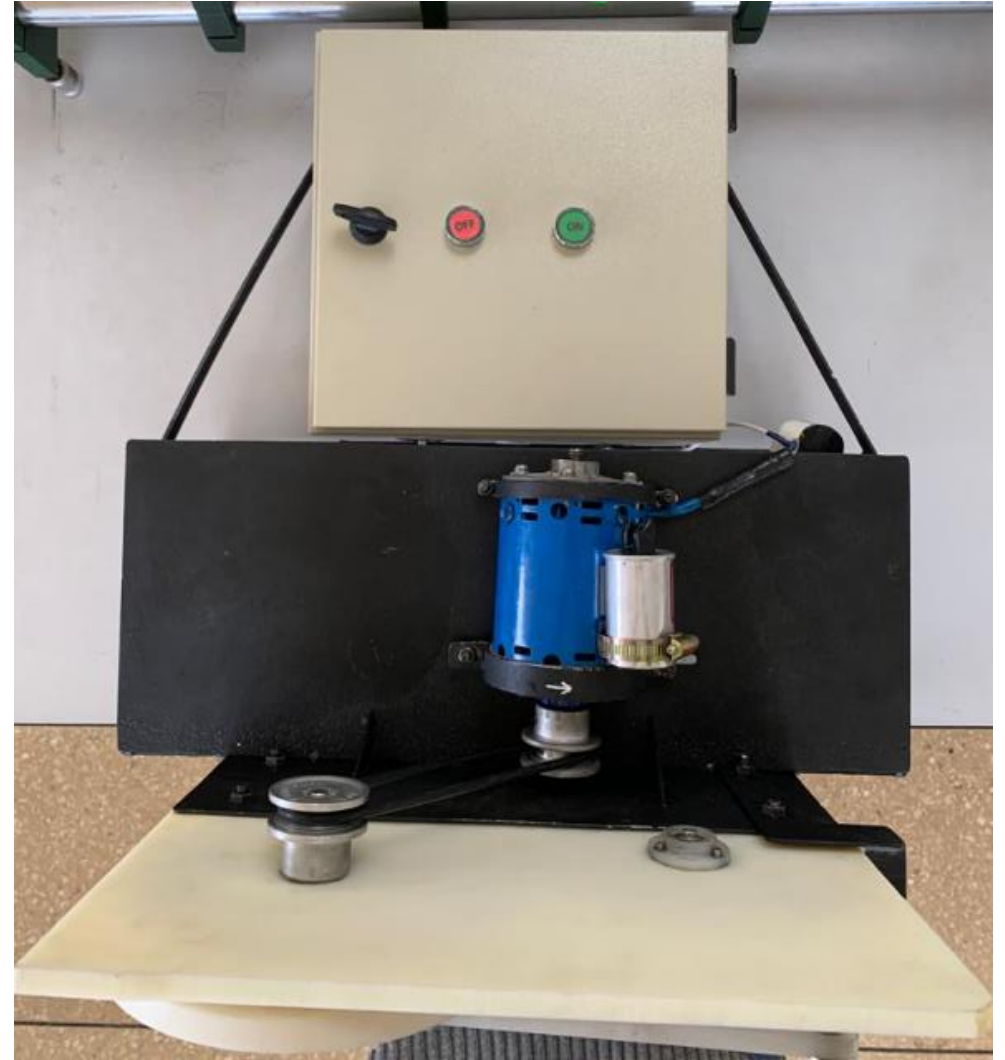
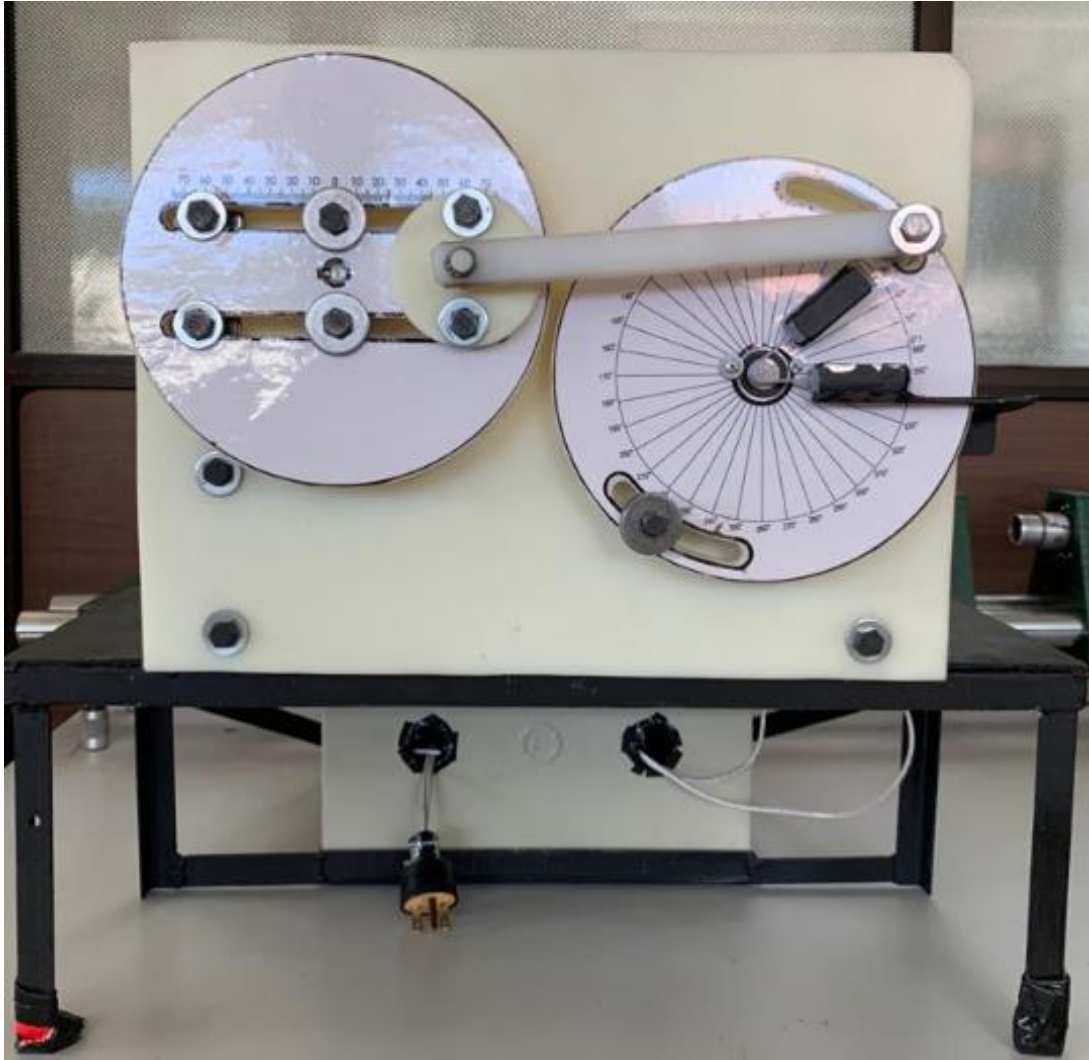


30°



**ESPE**  
ESCUOLA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

# Partes del dispositivo

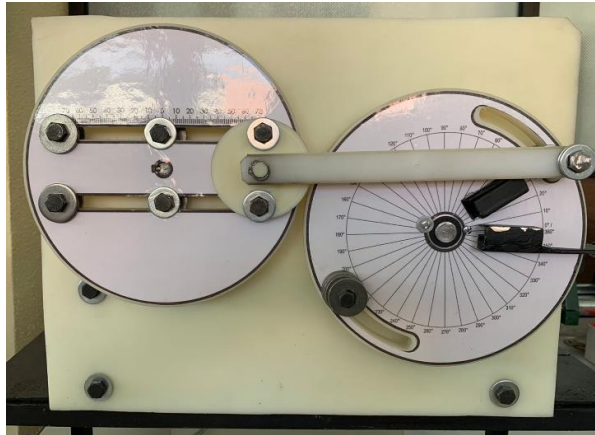




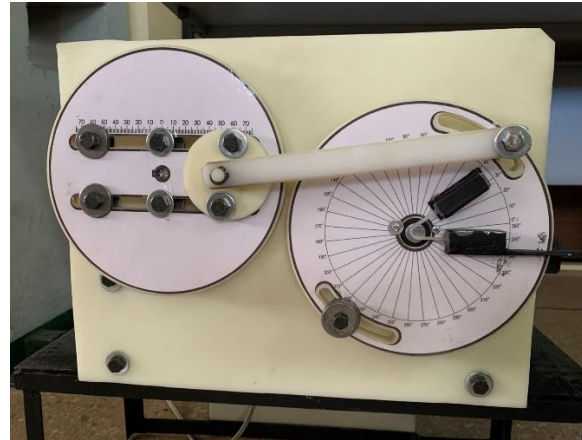
**ESPE**  
ESCUOLA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

# Pruebas

120°



90°



**ESPE**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA



# Pruebas



**ESPE**  
ESCUOLA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

# Análisis de Resultados

Esfuerzo de junta en resina High Temp V2 poscurada.

ORD	Ángulo [°]	Ciclos	Esfuerzo [MPa]
1	120	32	34.63
2	90	1976	25.97
3	60	2104	17.31
4	30	Infinita	8.66

$$S(N) = -2.4632 \ln(4.63845 \times 10^{-8} N)$$

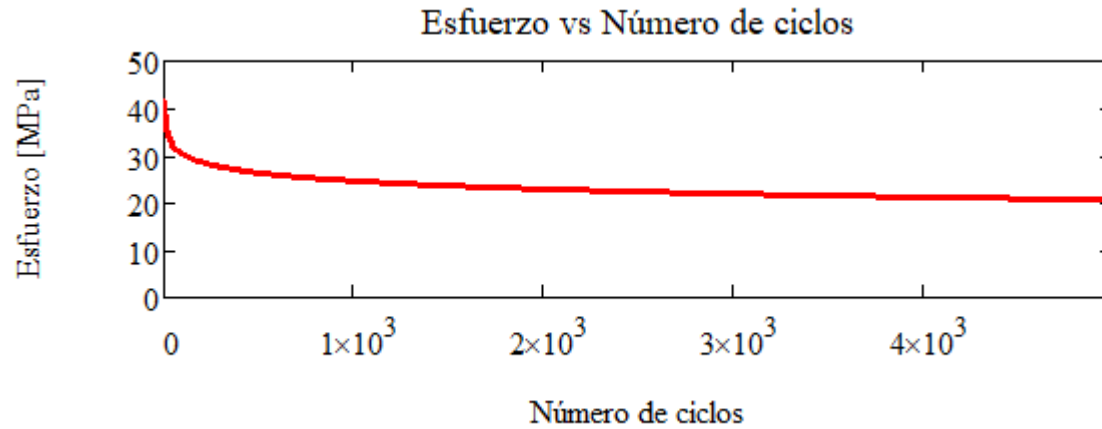
Esfuerzo de junta en resina High Temp V2 sin poscurar

ORD	Ángulo [°]	Ciclos	Esfuerzo [MPa]
1	120	1650	20.37
2	90	6976	15.87
3	60	640783	10.18
4	30	Infinita	5.09

$$S(N) = -1.95152 \ln(2.81895 \times 10^{-8} N)$$



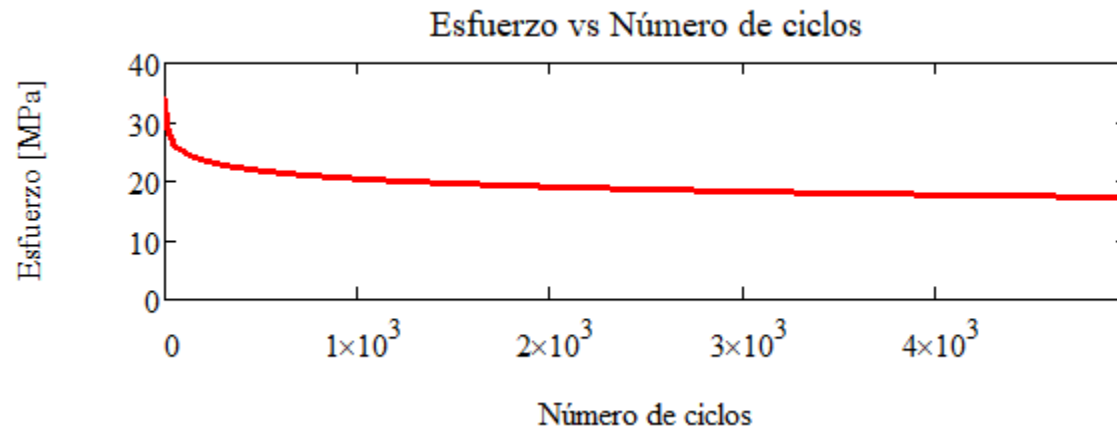
### Curva S – N de la resina High Temp V2 poscurada.



$$n = \frac{7.62}{58.46} = 0.13$$

$$S'_e = 0.13 * S_{ut}$$

### Curva S – N de la resina High Temp V2 sin poscurar.



$$n = \frac{6.97}{36.43} = 0.19$$

$$S'_e = 0.19 * S_{ut}$$



# Análisis Económico

## Costo total del proyecto.

Descripción	Costo Total (USD)
<b>Costos Directos</b>	<b>\$ 4,607.96</b>
Honorarios a Profesionales y Estudiantes	\$ 4,043.12
Costos de Materiales y Equipos	\$ 564.84
<b>Costos Indirectos</b>	<b>\$ 2,041.45</b>
Costos Indirectos del Proyecto	\$ 233.50
Costo de laboratorios e instalaciones	\$ 1,807.95
<b>Total, Proyecto (USD)</b>	<b>\$ 6,649.41</b>

La Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE asume un valor correspondiente a \$4 930.22 lo que representa un 74% de los costos del proyecto y los estudiantes asumen un valor de \$1 719.19, lo que representa el 26% de los costos restantes del proyecto, siendo de esta manera el mayor auspiciante la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.



# Conclusiones

- Se ha demostrado que con la tecnología y materiales disponibles se puede abordar la construcción de cualquier mecanismo compliance con garantía de fiabilidad.
- El dispositivo es adecuado para realizar ensayos a fatiga en cualquier tipo de mecanismo flexible, manufacturado por diferentes procesos de impresión 3D como modelado por deposición fundida (FDM), estereolitografía (SLA) y sinterizado selectivo por láser (SLS).
- El dispositivo diseñado para ensayo a fatiga basado en un mecanismo de cuatro barras con el fin de ensayar juntas elásticas de mecanismos flexibles a varios ángulos y diferentes velocidades para determinar la gráfica S – N funciono de manera satisfactoria superando el millón de ciclos.



# Conclusiones

- El estudio nos permite caracterizar el material para futuras aplicaciones. La resina High Temp V2 sin poscurado se puede dirigir a aplicaciones de componentes cuasi estáticas con ángulos de  $60^\circ$  a  $90^\circ$ , mientras que los ángulos inferiores a  $30^\circ$  se dirigirá a aplicaciones con alta sollicitación mecánica. En cuanto a la resina High Temp V2 poscurada las aplicaciones de componentes cuasi estáticos van desde ángulos de  $90^\circ$  a  $120^\circ$  y de  $60^\circ$  a  $30^\circ$  se destinará a aplicaciones donde se requiera alta sollicitación mecánica.
- El presente estudio es un análisis preliminar para futuros trabajos donde se pueda implementar el ensayo de fatiga en diferentes tipos de mecanismos flexibles para poder obtener nuevas graficas Esfuerzo – Número de ciclos, que se puedan comparar con las mostradas en este documento, y seguir caracterizando las diferentes resinas y modelos pseudo rígidos.



# Recomendaciones

- Es importante considerar las velocidades de ensayo en el dispositivo diseñado en el presente trabajo, para ángulos grandes la máquina trabaja a bajas velocidades y para ángulos pequeños la máquina puede trabajar a altas velocidades, esto con el fin de evitar resonancia y fallas en el elemento más crítico que es el acoplador.
- Para las probetas impresas por SLA se recomienda que no sean expuestas al sol puesto que las mismas empiezan un proceso de poscurado al estar bajo la radiación UV, y sus propiedades pueden verse afectadas, en especial para las probetas que no son sometidas a un poscurado.
- Es recomendable utilizar el dispositivo por periodos no mayores a 3 horas seguidas, ya que el motor tiene baja eficiencia y por ende bajo ciclos de trabajo, pasado este tiempo el motor empieza a perder potencia y velocidad, por lo que puede afectar el análisis a fatiga.
- Se debe utilizar el tacómetro cada 30 min para verificar que la velocidad inicial a la que empezó el ensayo se mantenga constante durante el tiempo de encendido de la máquina, para disminuir el porcentaje de error.



# Gracias por su atención



**ESPE**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA