



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TEMA:**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA PRUEBAS DE FATIGA DEL COMPONENTE AERONÁUTICO ENGINE COWLING DOOR LATCH ASSY P/N 314-12781-401 DE LA AERONAVE A-29B SÚPER TUCANO”**

**AUTORES:**

**Sr. ANDRANGO PAILLACHO, ALEX ALEJANDRO**  
**Sr. GUILLÉN SÁNCHEZ, STALIN XAVIER**

**DIRECTOR: ING. OLMEDO SALAZAR, JOSÉ FERNANDO MSc.**

**SANGOLQUÍ - 2022**





1. Generalidades
2. Análisis metrológico
3. Análisis químico y metalográfico para el elemento crítico
4. Cálculo teórico
5. Modelamiento del elemento crítico
6. Diseño y Construcción del mecanismo Biela – Manivela
7. Implementación del mecanismo Biela – Manivela a la máquina de ensayo universal INSTRON
8. Conclusiones y Recomendaciones





# GENERALIDADES



**E S P E**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA



Diseñar y construir un sistema para pruebas de fatiga del componente aeronáutico engine cowling door latch assy p/n 314-12781-401 de la aeronave A-29B súper tucano.





- Análisis de zona de fractura y caracterización del material del elemento crítico
- Modelamiento del resorte en el software de investigación ANSYS
- Síntesis del mecanismo biela – manivela, para pruebas a fatiga del elemento crítico
- Diseño y Construcción del mecanismo biela – manivela
- Análisis Experimental





Aeronave A-29 B Súper Tucano  
De origen Brasileño

Operaciones y misiones aéreas

Diseñado para:

- Ataque a tierra,
- Contrainsurgencia
- Entrenamiento avanzado de pilotos



# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE) no posee manuales de reparación, depende del soporte de ingeniería de cada fabricante

El componente aeronáutico tiene como función principal asegurar las capotas del motor.

Hasta el día de hoy, se han reemplazado 12 EA por resorte interno roto en los 11 años de operación de la aeronave A-29B.

El componente aeronáutico tiene un costo de \$ 2.696,91 USD.





# DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE AERONÁUTICO



**Mecanismo original de accionamiento**



**Resorte a torsión (Elemento Crítico)**







## Contribución del Proyecto

Al momento se encuentran fuera de servicio de vuelo **cuatro** aeronaves A-29B Súper Tucano

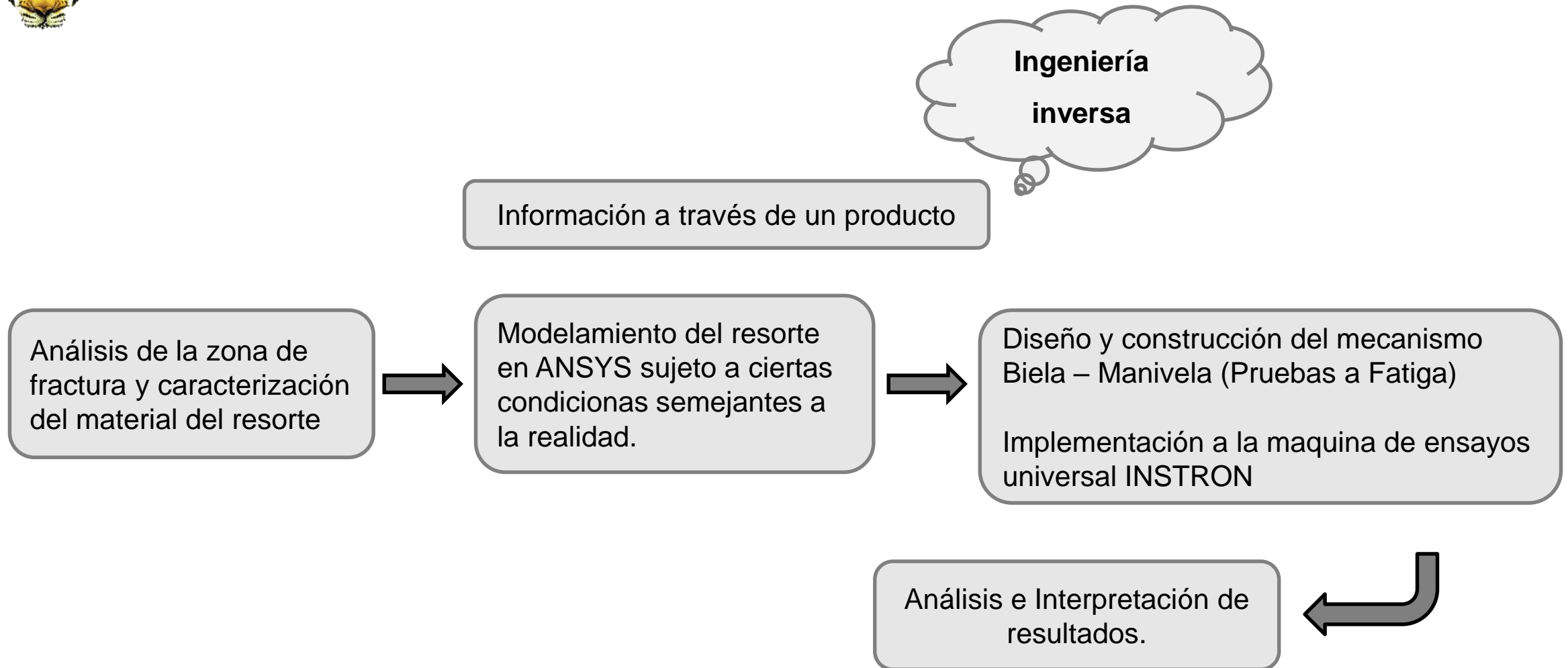
Espera de la reparación o cambio del resorte



- Disminución en costos de logística aérea
- Mantenimiento y reparación a través de la industria nacional
- Garantizar la disponibilidad de aeronaves para el cuidado de la integridad nacional

Potencial desarrollo tecnológico

Beneficiando de forma directa a las Fuerzas Armadas





**RESORTE**

(De que material esta hecho y porque falla)



**DISEÑO Y  
CONSTRUCCIÓN**

(Mecanismo a implementar)



**Máquina de Pruebas**





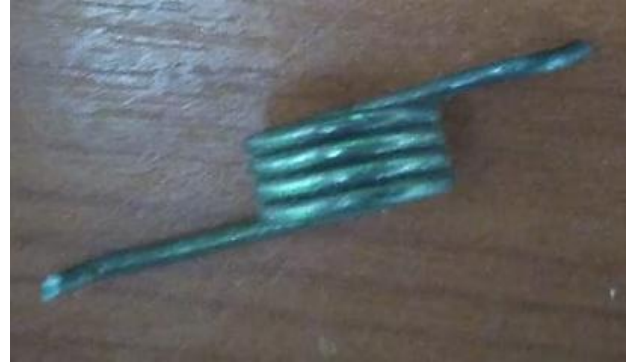
# ANÁLISIS METROLÓGICO



**E S P E**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA



# DISPONIBILIDAD DE RESORTES PARA EL ANÁLISIS



a) Resorte original fracturado

b) Resorte alterno

c) Resorte Nuevo

**Siendo a, b proporcionados a través de la  
Fuerza Aérea Ecuatoriana (FAE)**

**c, manufacturado en un taller  
local (Sangolquí)**





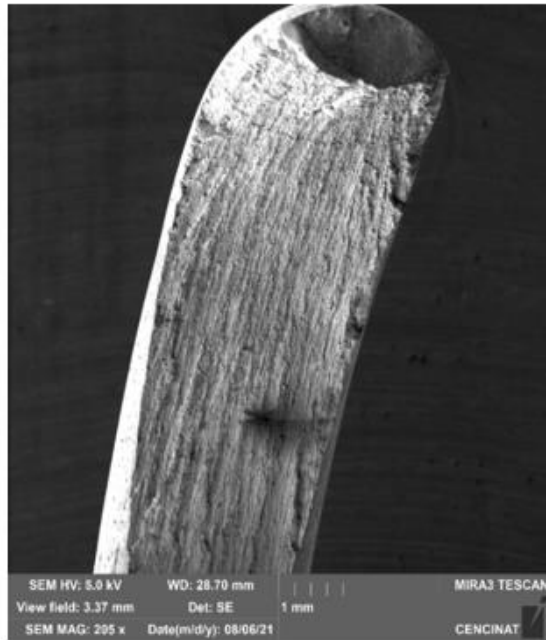
# ANÁLISIS QUÍMICO Y METALOGRÁFICO DEL RESORTE



**E S P E**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA



Gráfica 1



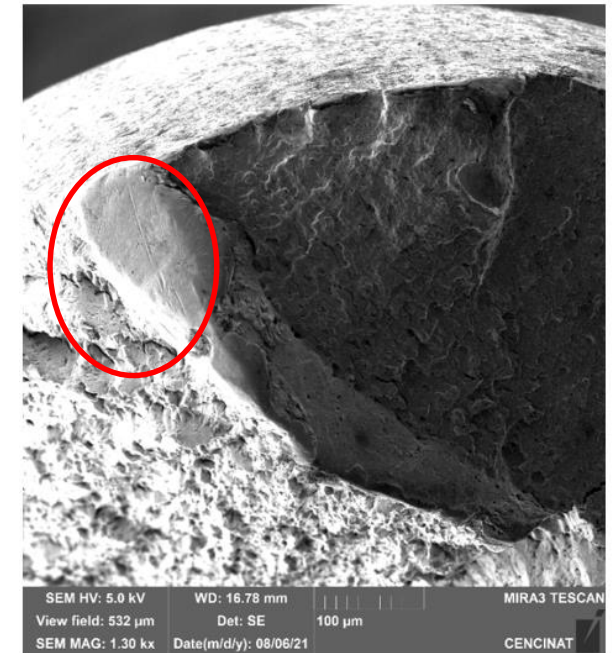
Fractura frágil

Gráfica 2



zona de grieta

Gráfica 3



zona de playa



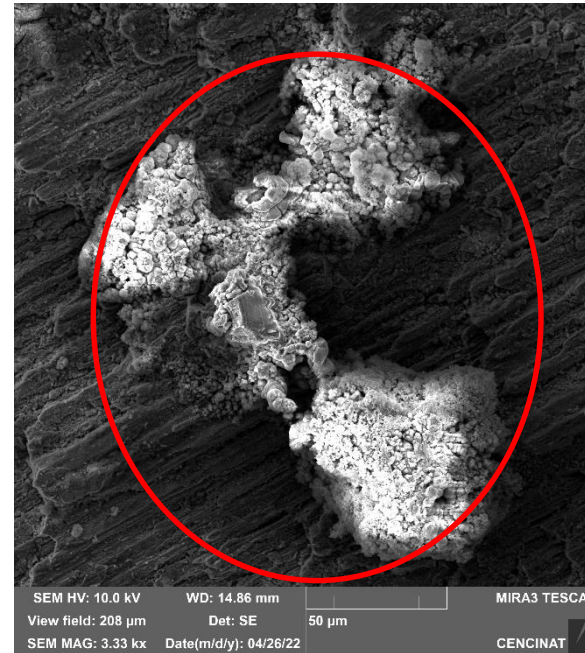


Gráfica 4

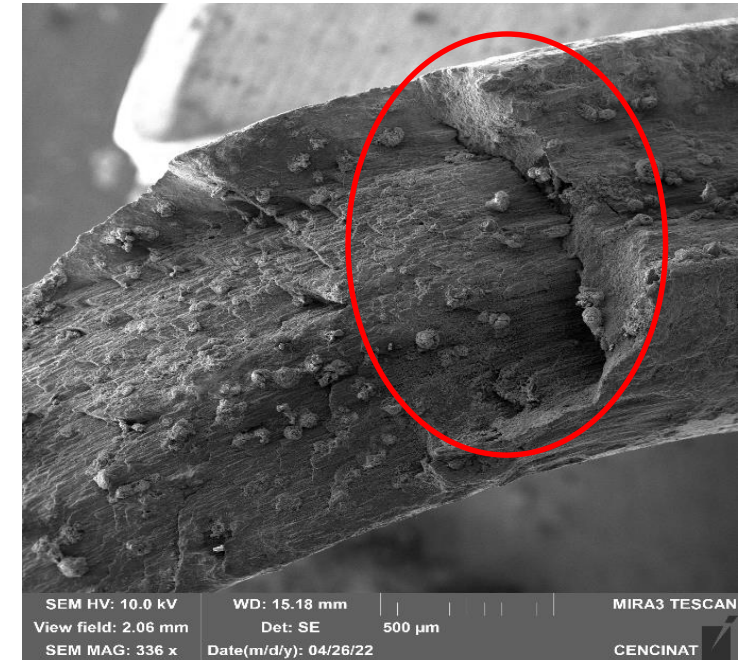


Presencia de Corrosión

Gráfica 5



Gráfica 6



zona de grieta

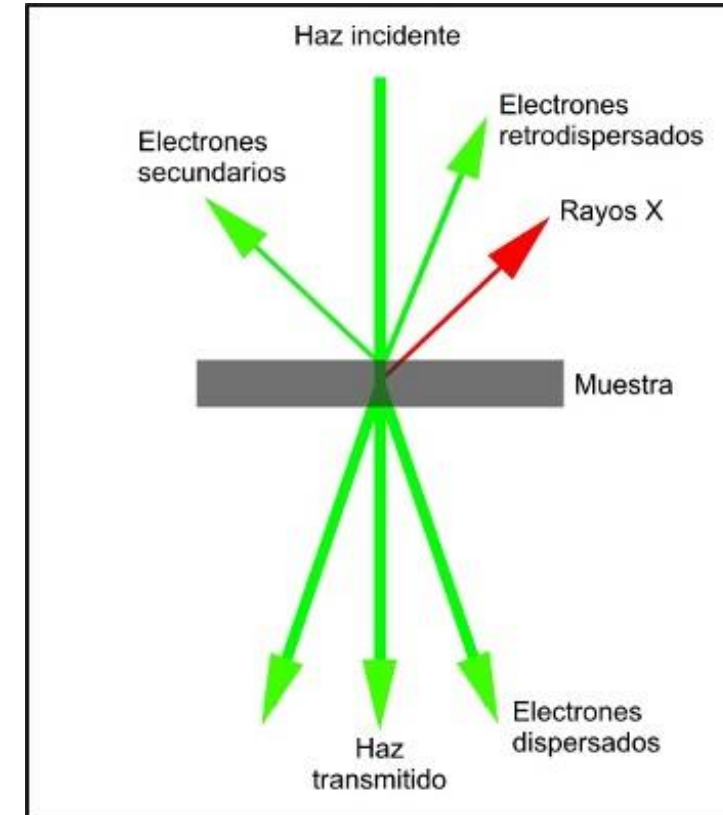






Ord	Elemento	Porcentaje (%)
1	Carbono	11,00
2	Oxígeno	8,48
3	Aluminio	1,28
4	Silicio	0,87
5	Calcio	0,90
6	<b>Cromo</b>	<b>12,08</b>
7	Manganeso	0,71
8	Hierro	58,79
9	<b>Níquel</b>	<b>5,88</b>
	<b>Suma</b>	<b>100</b>

## 1. Espectrometría de dispersión de energía EDS



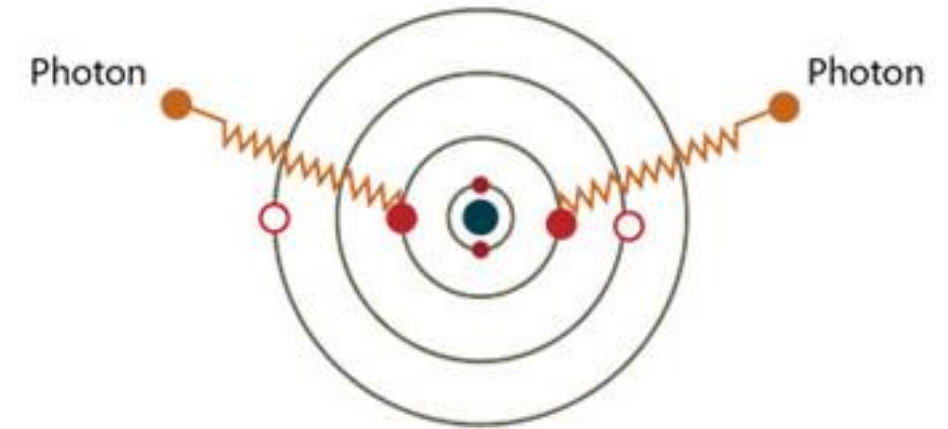
(Frecuencia de luz librada – Número atómico)





Ord	Metales	Alambre del resorte (%)
1	Carbono (C)	0,289
2	Silicio (Si)	0,148
3	Manganeso (Mn)	0,906
4	Fosforo (P)	0,01
5	Azufre (S)	0,002
6	<b>Cromo (Cr)</b>	15,94
7	Molibdeno (Mo)	0,11
8	<b>Níquel (Ni)</b>	8,197
9	Cobre (Cu)	0,328
10	Aluminio (Al)	0,054
11	Cobalto (Co)	0,183
12	Niobio (Nb)	0,018
13	Titanio (Ti)	0,022
14	Vanadio (V)	0,063
15	Hierro (Fe)	73,43
	suma	100

## 2. Espectrometría de emisión por chispa OES



Longitud de onda de los fotones emitidos





## Comparación entre ensayos para resorte original

ORD	Metal	Ensayo EOS	Ensayo EDS
		Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
1	Carbono (C)	0,289	11,002
2	Silicio (Si)	0,418	0,867
3	Manganeso (Mn)	0,906	0,713
4	Fosforo (P)	0,01	No Identificado
5	Azufre (S)	0,002	No Identificado
6	<b>Cromo (Cr)</b>	<b>15,94</b>	<b>12,082</b>
7	Molibdeno (Mo)	0,11	No Identificado
8	<b>Níquel (Ni)</b>	<b>8,197</b>	<b>5,880</b>
9	Cobre (Cu)	0,328	No Identificado
10	Aluminio (Al)	0,054	1,279
11	Cobalto (Co)	0,183	No Identificado
12	Niobio (Nb)	0,018	No Identificado
13	Titanio (Ti)	0,022	No Identificado
14	Vanadio (V)	0,063	No Identificado
15	Hierro (Fe)	73,43	58,794
16	Calcio (Ca)	No Identificado	0,901
17	Oxígeno (O)	No Identificado	8,482
	Total	99,97	100





# Comparación con algunos posibles aceros empleados en la fabricación de resortes

Ensayo EOS		Recomendados por Shigley			Posibles Aceros		
Elemento	Porcentaje(%)	ASTM A401 AISI 9254	ASTM A 234	ASTM A 232	ASTM A313 AISI 302 Clase 1	ASTM A313 AISI 304	ASTM A313 AISI 305
<b>Carbono (C)</b>	0,289	0,51-0,59	0,48-0,53	0,48-0,53	0.12	<0,08	< 0,12
<b>Silicio (Si)</b>	0,418	1,2-1,6	0,15-0,35	0.15-0.35	1	< 1	< 1
<b>Manganeso (Mn)</b>	0,906	0,6-0,9	0.70-0.90	0.70-0.90	2	<2	< 2
<b>Fósforo (P)</b>	0.010	<0,035	<0,04	<0.020	0.045	< 0,045	< 0,045
<b>Azufre (S)</b>	0.002	<0,04	<0,04	< 0.035	0.030	<0.03	< 0,03
<b>Cromo (Cr)</b>	15,94	0,6-0,8	0,8-1,1	0.8-1.1	17-19	18-20	17-19
<b>Molibdeno (Mo)</b>	0,11						
<b>Níquel (Ni)</b>	8,197				8-10	8 – 10.5	10.5-13
<b>Cobre (Cu)</b>	0,328						
<b>Aluminio (Al)</b>	0,054						
<b>Cobalto (Co)</b>	0,183						
<b>Niobio (Nb)</b>	0,018						
<b>Titanio (Ti)</b>	0,022						
<b>Vanadio (V)</b>	0,063		>0,15	>0.15			
<b>Hierro (Fe)</b>	73,43						
<b>Nitrógeno (N)</b>					<0.1	<0.1	





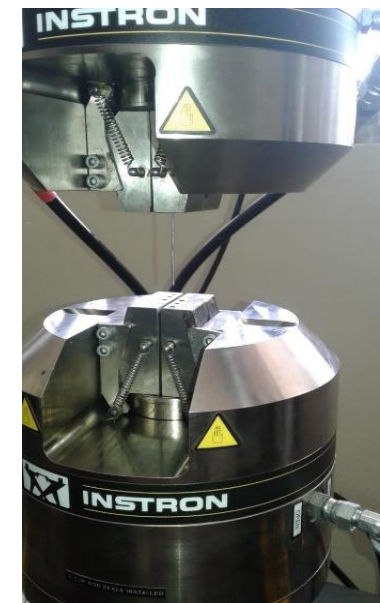
Alambre de resorte disponible			
Ord	Denominación del resorte	Diámetro del alambre (mm)	Longitud inicial (mm)
1	Original	1.35	100
2	Alterno	1.50	41.75
3	Nuevo	1.50	15

Máquina de Tracción AMSLER



Resortes ensayados: **Original, Nuevo**

Máquina de ensayo universal INSTRON



Resorte ensayado: **Alterno**



## Ejemplo de Cálculo para el esfuerzo último de tensión en el resorte original

Ord	Fuerza[Kgf]	Desplazamiento[mm]	Esfuerzo [MPa]
276	295,7459897	14,17290085	2026,9
277	296,7909715	14,48557477	2034,1
278	243,198736	14,79824868	1666,8

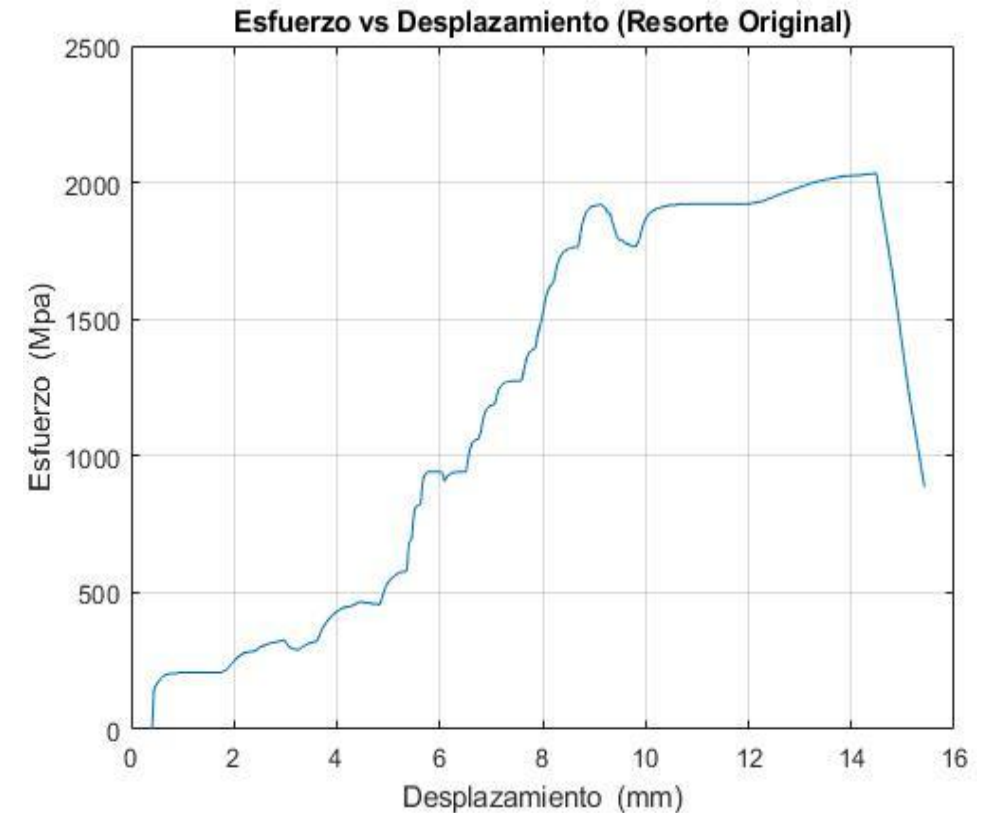
$$S_{ut} = \frac{F}{A}$$

Donde:

S<sub>ut</sub>: Esfuerzo último de tensión (Mpa)

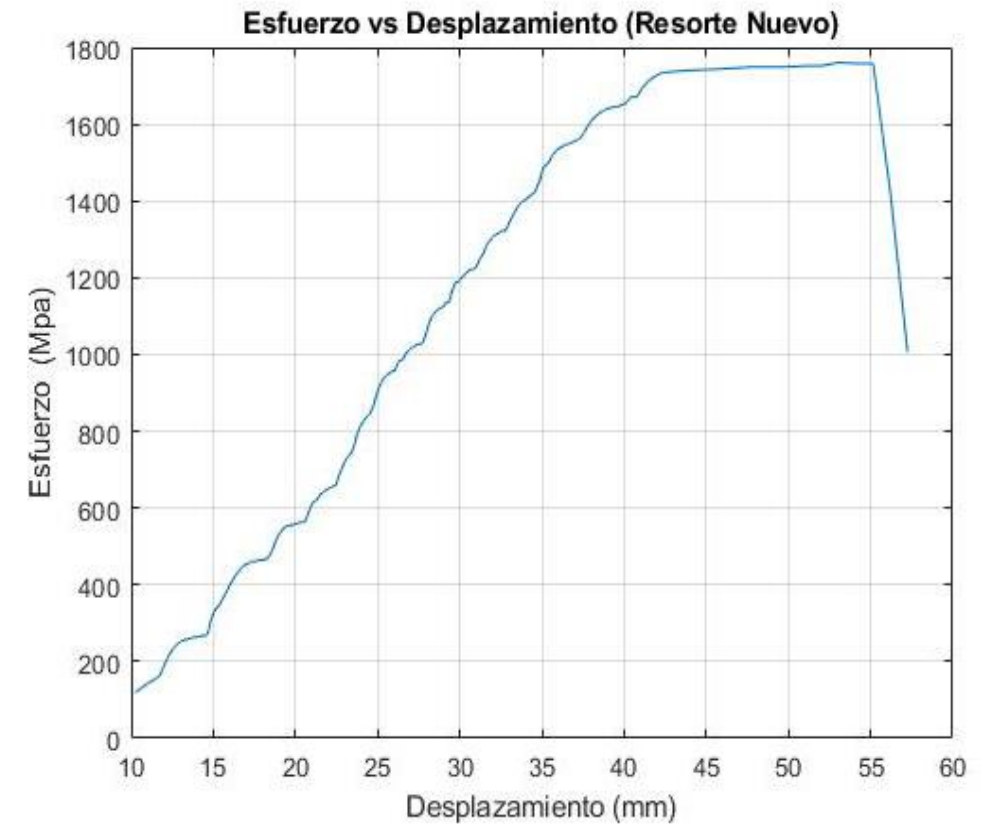
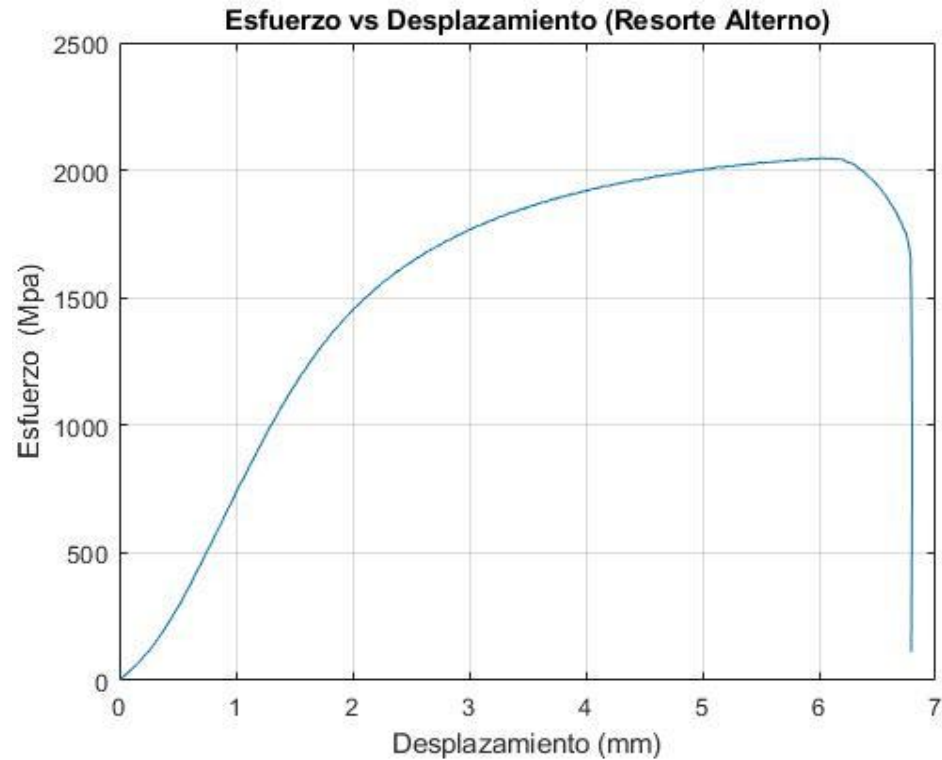
F: Fuerza máxima aplicada (N)

A: Área (mm<sup>2</sup>)





# Resultados de ensayo a tracción para resortes



Denominación	Fuerza máxima aplicada (kgf)	Esfuerzo último de tensión (Mpa)
Resorte Alterno	368.81	2047.39
Resorte Nuevo	317.16	1760.70





# CÁLCULO TEÓRICO PARA EL RESORTE







## Datos:

$$E = 195000 \text{ Mpa}$$

$$\theta_{\text{grados}} = 118^\circ$$

$$D_{\text{ext}} = 12,839 \text{ mm}$$

$$d = 1.5 \text{ mm}$$

$$L_1 = 21,55 \text{ mm}$$

$$L_2 = 17.7 \text{ mm}$$

$$N_b = 5$$

$$S_{ew'} = 310$$

$$N_a = 5.358$$

$$M = 493,148 \text{ mm}$$

$$k_t = 4,179 \frac{\text{N mm}}{\text{grado}}$$

$$D_{i_{\text{min}}} = 9,141 \text{ mm}$$

$$C = 7.559$$

$$K_{b_i} = 1.109$$

$$K_{b_o} = 0.909$$

## Máxima tensión en el interior del resorte

$$\sigma_{i_{\text{max}}} = 1651 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{o_{\text{min}}} = 0$$

$$\sigma_{o_{\text{max}}} = 1.352 \times 10^3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{o_{\text{mean}}} = 676 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{o_{\text{alt}}} = 676 \text{ Mpa}$$

## Factor de seguridad a carga estática

$$N_y = 0,967$$

$$S_{ew'_b} = 537.262 \text{ MPa}$$

$$S_e = 309.2 \text{ MPa}$$

## Factor de seguridad a fatiga

$$N_{fb} = 0.379$$

## Duración del resorte

$$S = aN^b$$

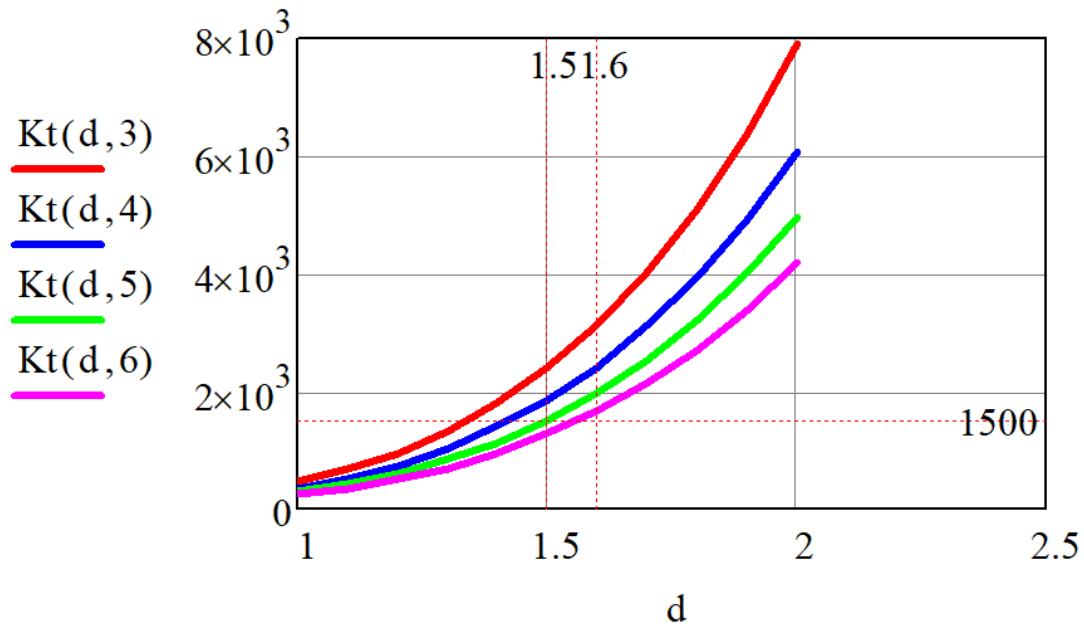
$$N = \sqrt[b]{\frac{S}{a}}$$

$$N = 5666.798 \text{ ciclos}$$

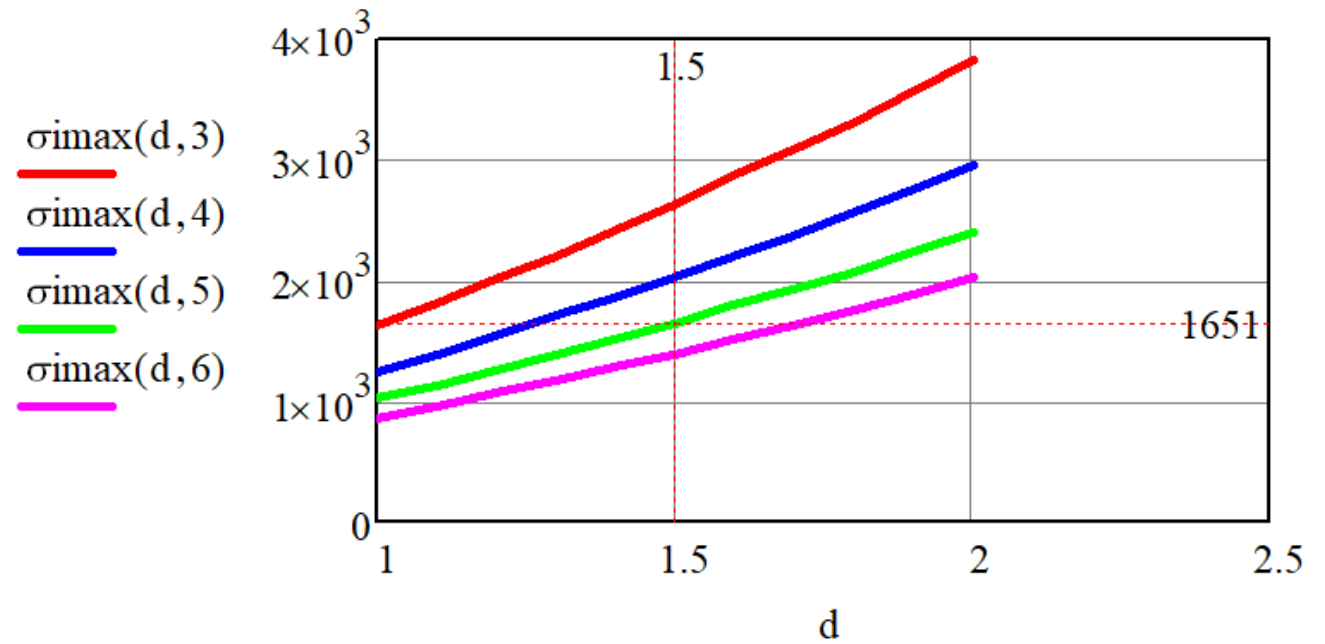




# Análisis de Sensibilidad bajo el (Modelo de Norton)



Módulo de elasticidad a torsión

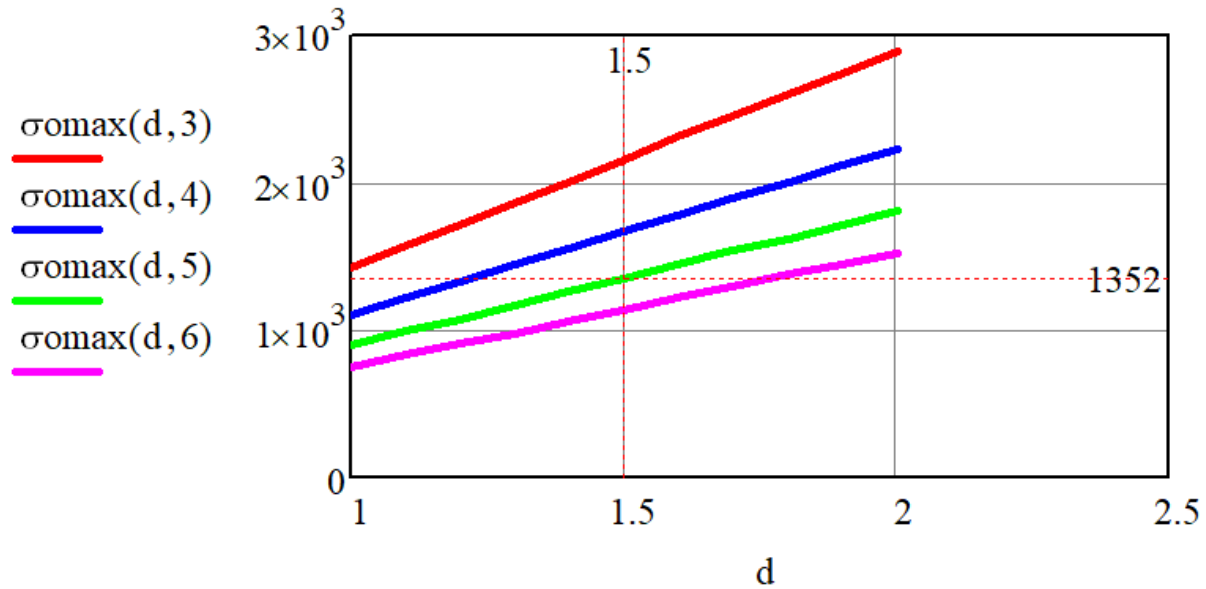


Tensión en la superficie interna

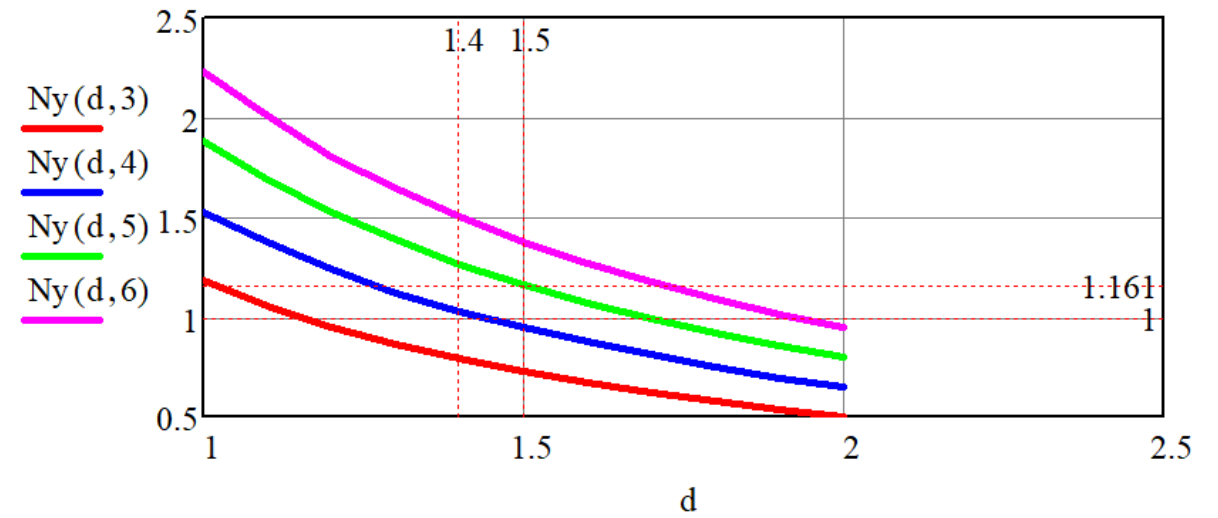




# Análisis de Sensibilidad bajo el (Modelo de Norton)



Tensión en la superficie externa

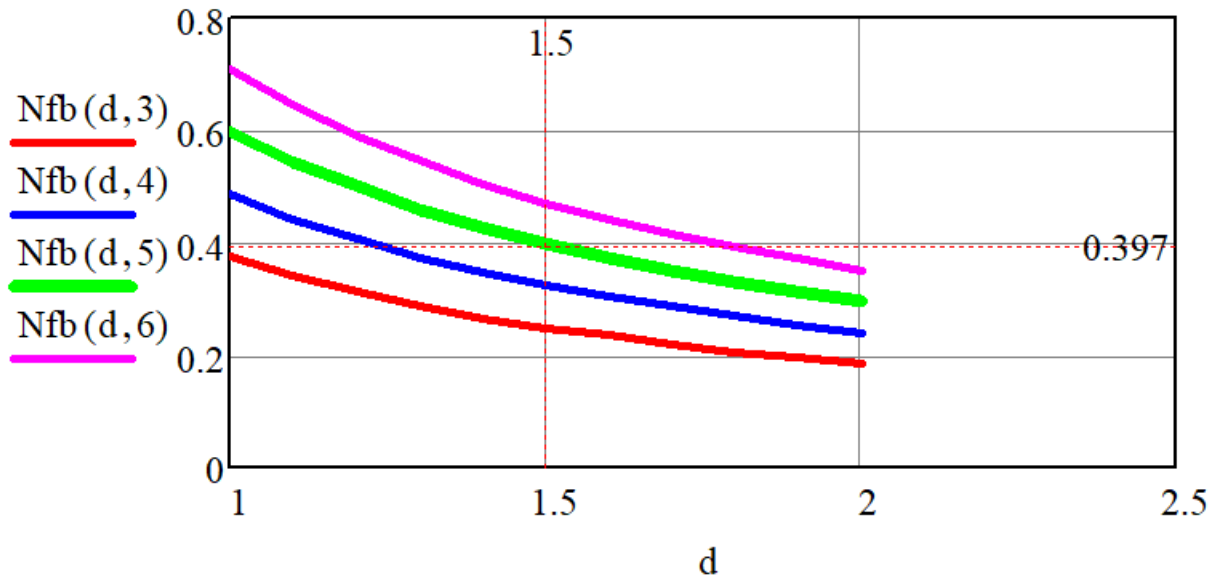


Factor de seguridad a carga estática

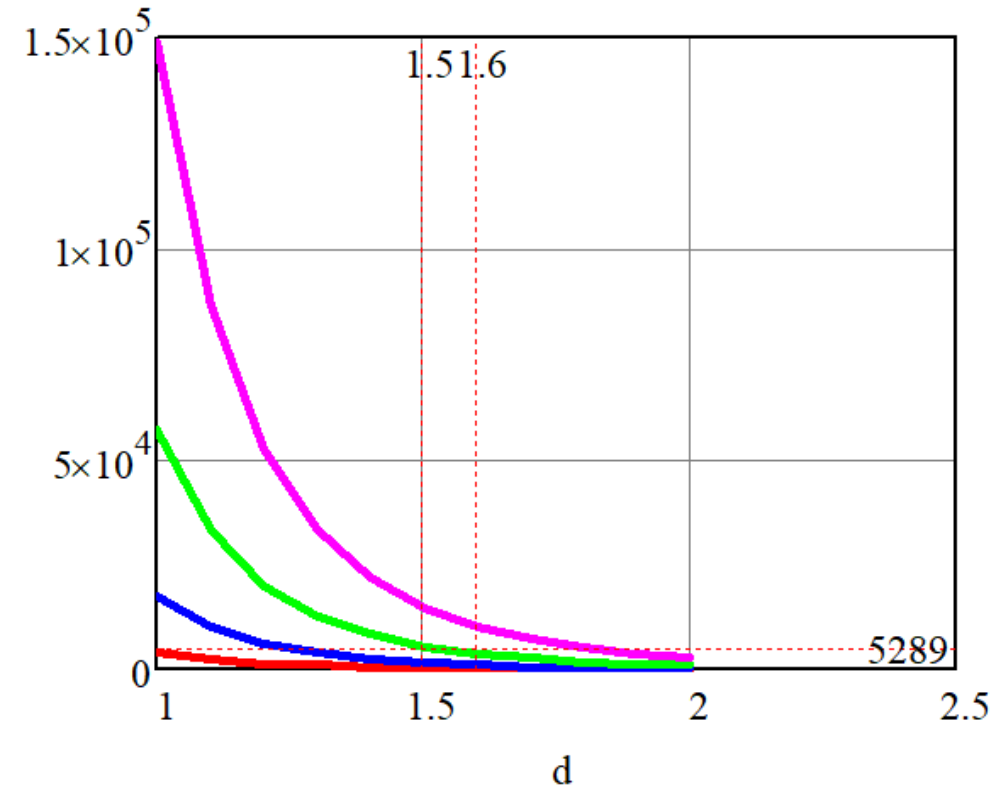




# Análisis de Sensibilidad bajo el (Modelo de Norton)



- Nciclos(d,3)
- Nciclos(d,4)
- Nciclos(d,5)
- Nciclos(d,6)



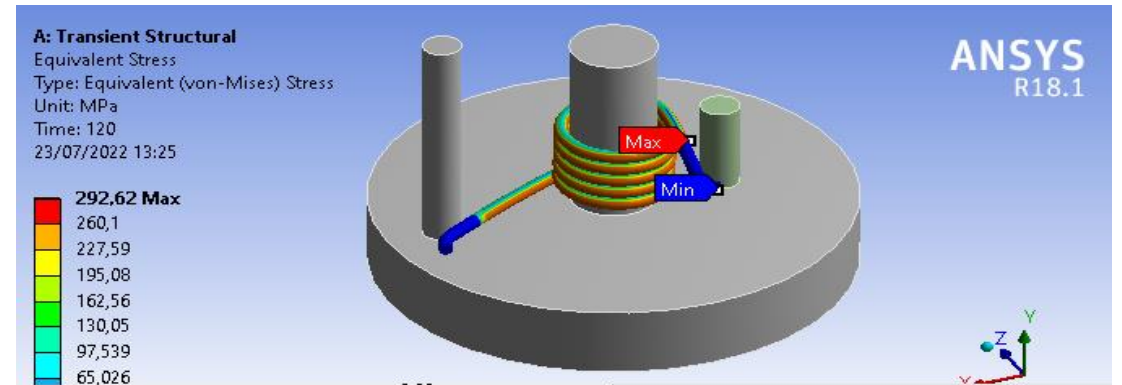
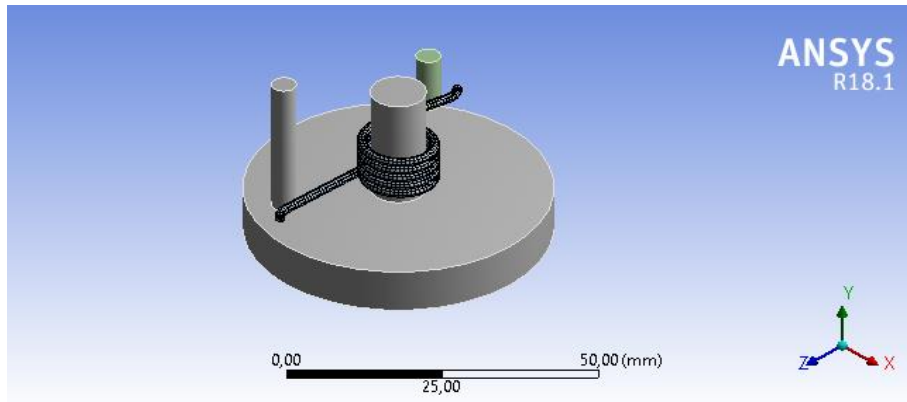
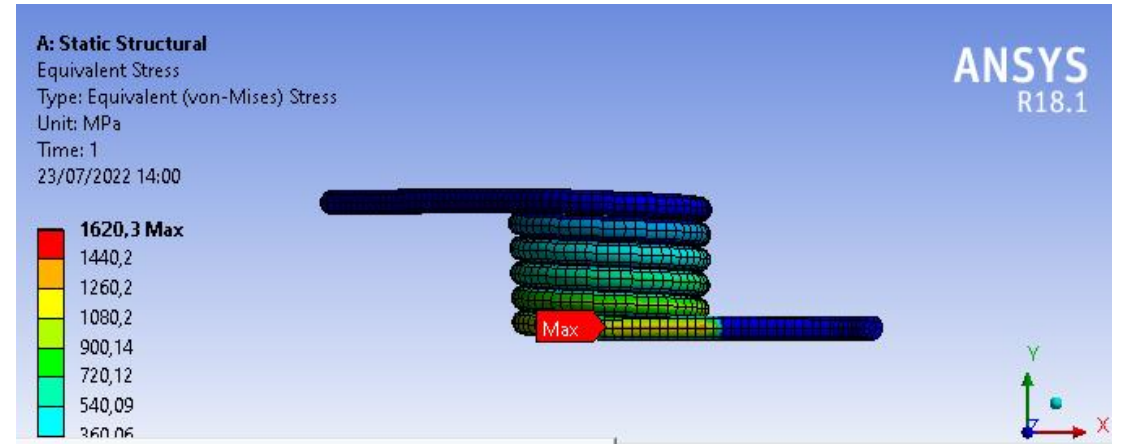
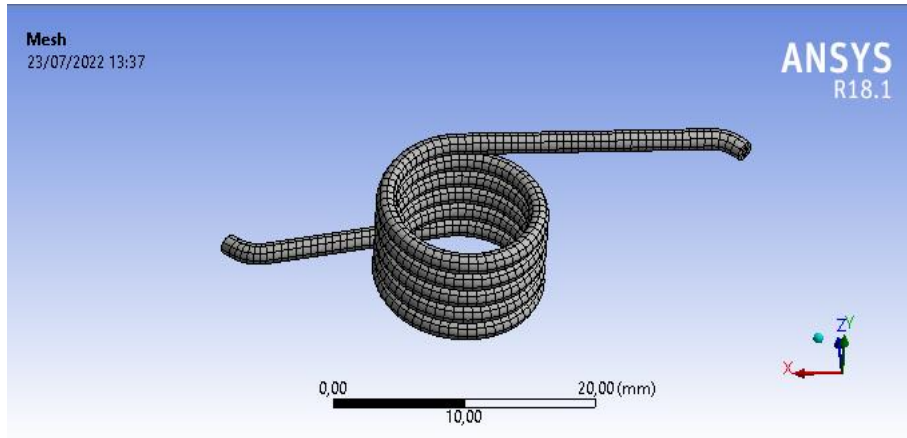
Número de Ciclos





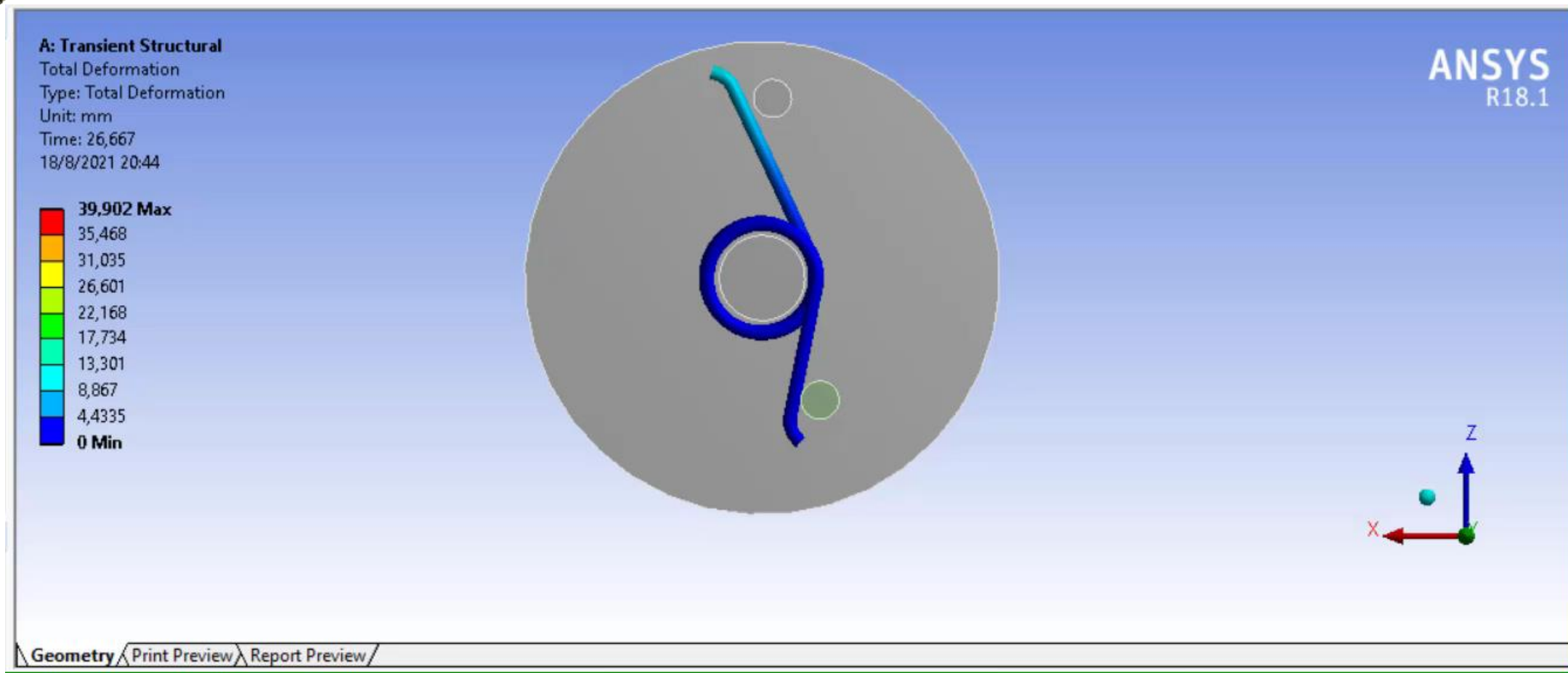
# MODELAMIENTO DEL RESORTE







# Resultados de simulación del componente aeronáutico





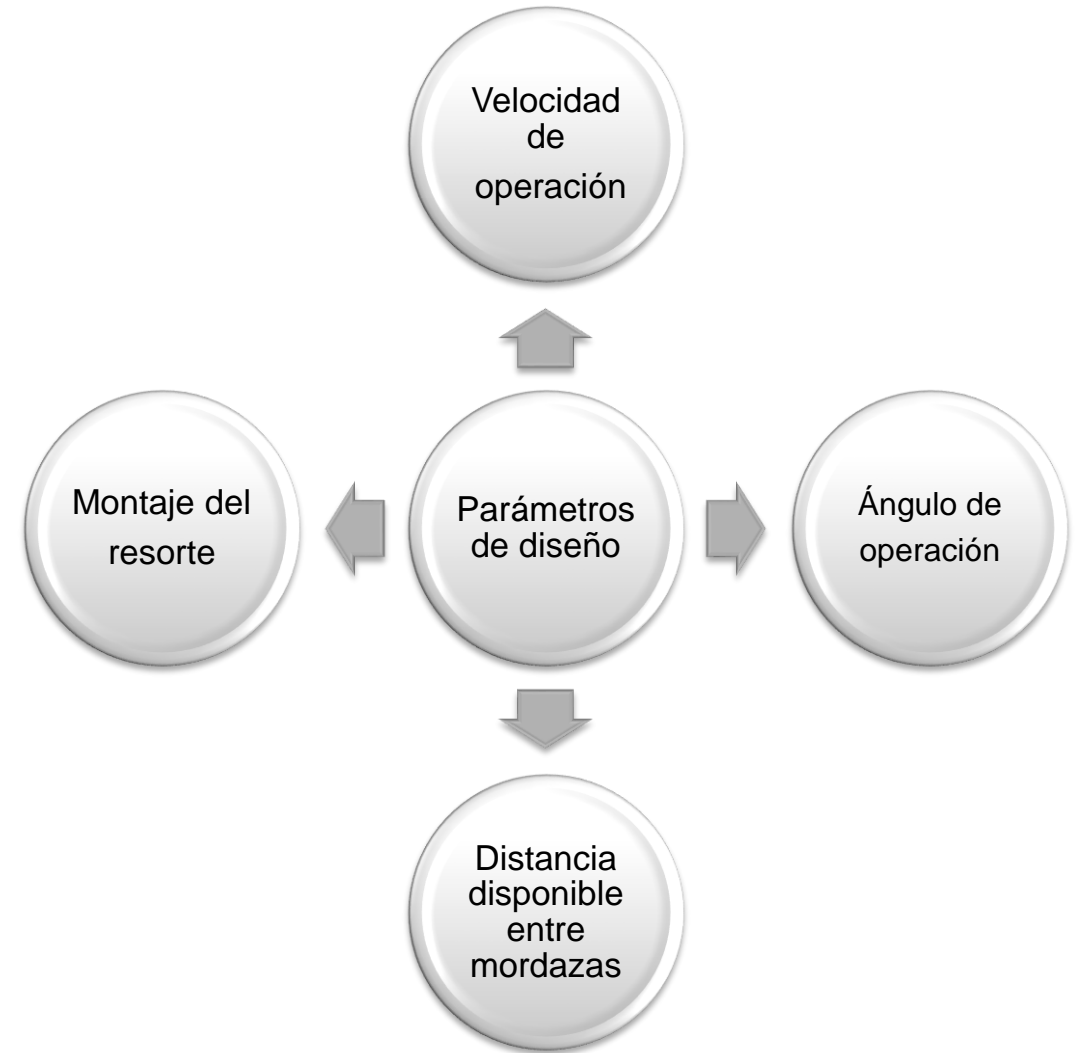
# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MECANISMO BIELA - MANIVELA







# Requerimientos y parámetros de diseño

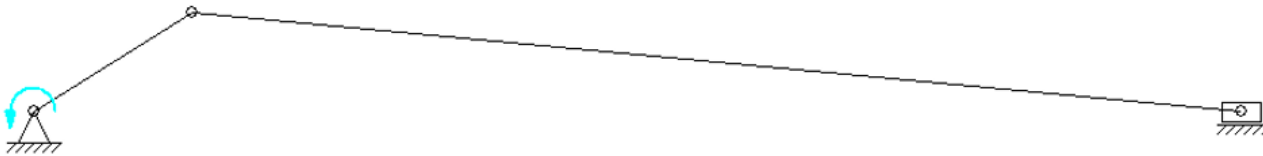




## Datos de Entrada

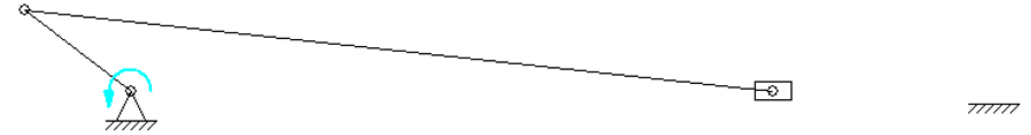
Longitud Inicial entre mordazas  
carrera de la corredera = 50 mm  
ángulo inicial : 30°  
ángulo de apertura: 120°

### Gráfica 7. Posición Inicial



$$r_3^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\theta_1)$$

### Gráfica 8. Posición Final



$$r_3^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\theta_2)$$

## Resultados de dimensionamiento

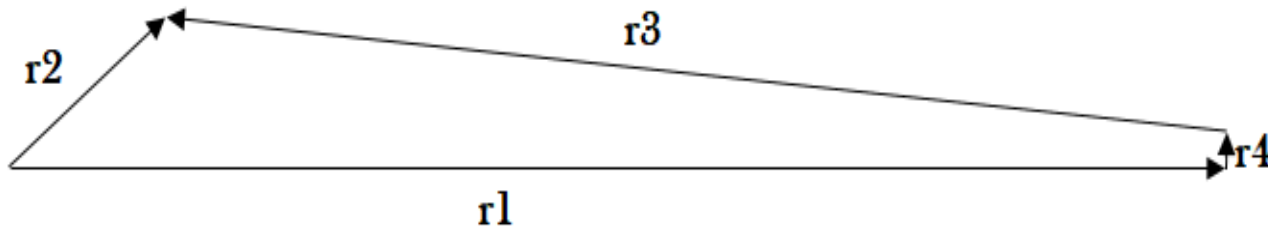
Biela:  $r_3 = 176\text{mm}$

Manivela:  $r_2 = 29\text{mm}$





## Lazo vectorial



## Ecuaciones de velocidad

$$v_1 = -r_2 \omega_2 \sin(\theta_2) - r_3 \omega_3 \sin(\theta_3)$$

$$0 = r_2 \omega_2 \cos(\theta_2) + r_3 \omega_3 \cos(\theta_3)$$

## Ecuaciones de Posición

$$r_1 - r_2 \cos(\theta_2) = r_3 \cos(\theta_3)$$

$$r_4 - r_2 \sin(\theta_2) = r_3 \sin(\theta_3)$$

## Ecuaciones de aceleración

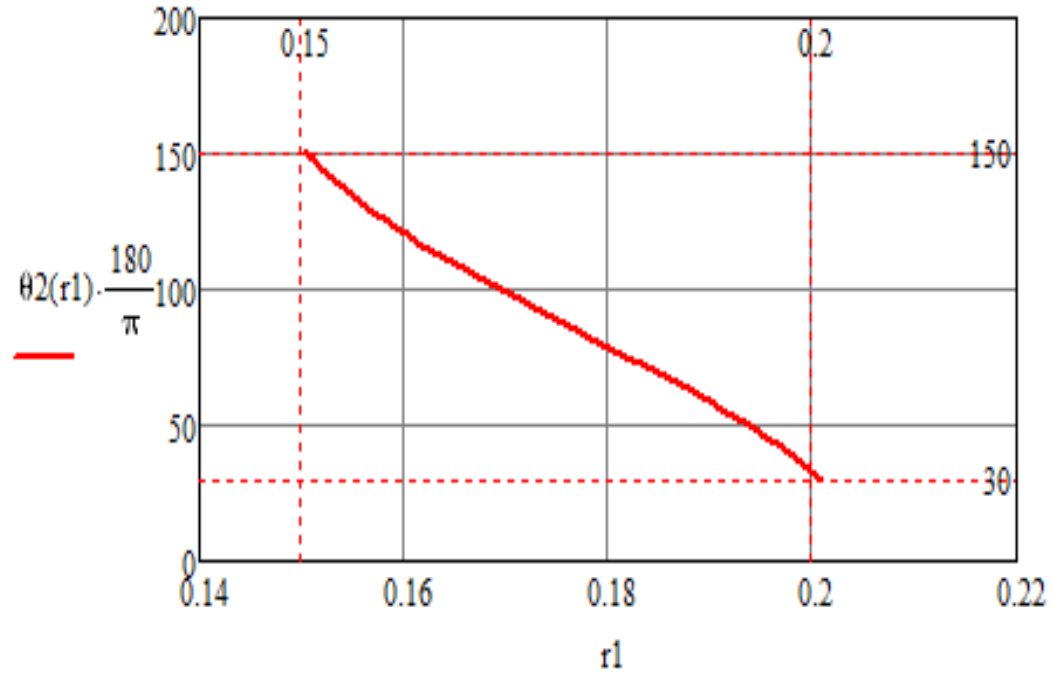
$$a_1 = -r_2 \omega_2^2 \cos(\theta_2) - r_2 \alpha_2 \sin(\theta_2) - r_3 \omega_3^2 \cos(\theta_3) - r_3 \alpha_3 \sin(\theta_3)$$

$$0 = -r_2 \omega_2^2 \sin(\theta_2) + r_2 \alpha_2 \cos(\theta_2) - r_3 \omega_3^2 \sin(\theta_3) + r_3 \alpha_3 \cos(\theta_3)$$

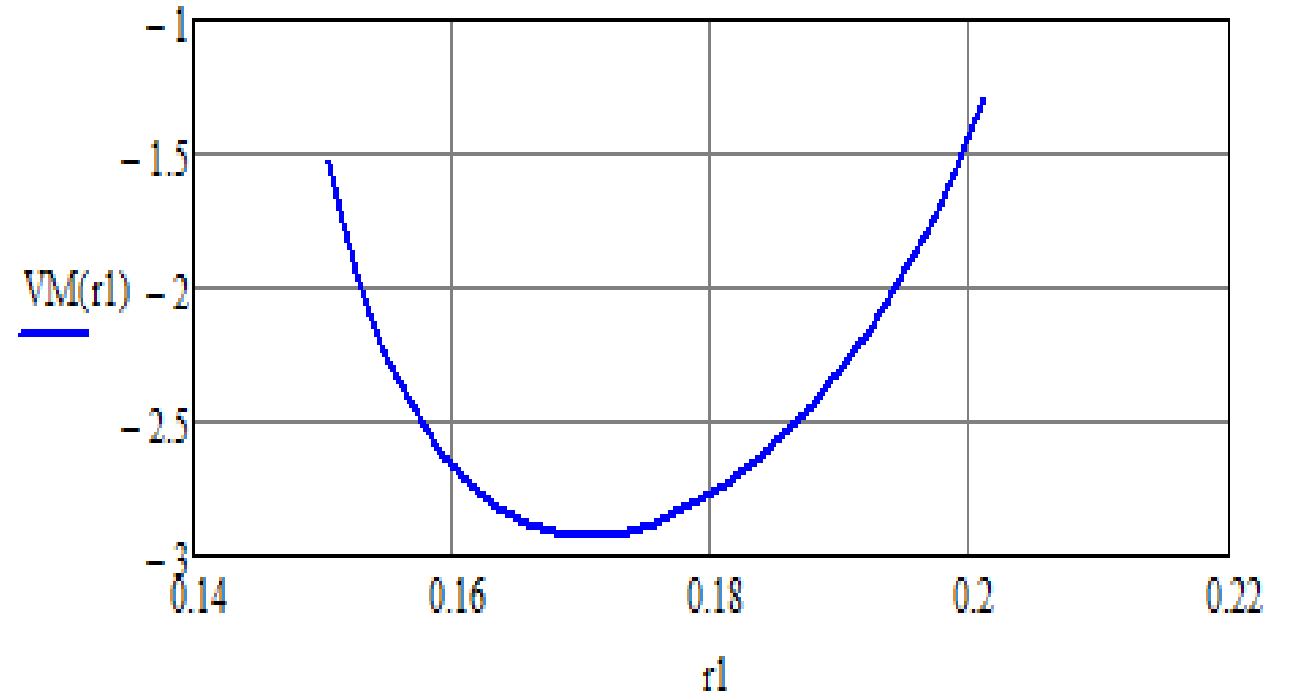




### Posición del eslabón 2 (Manivela)



### Ventaja Mecánica



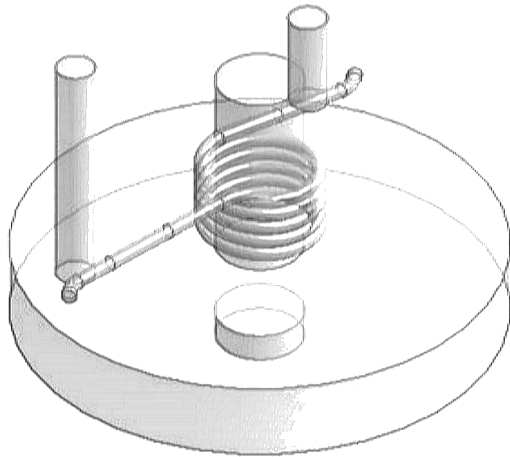


## Datos de entrada

Momento=493.148 Nmm

Longitud de pierna de resorte=21,55mm

Distancia al pin=20 mm

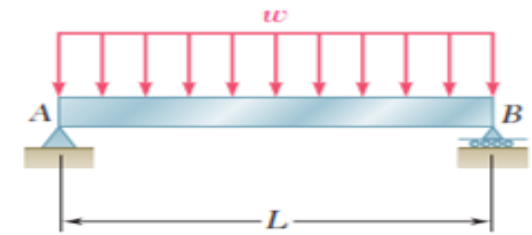
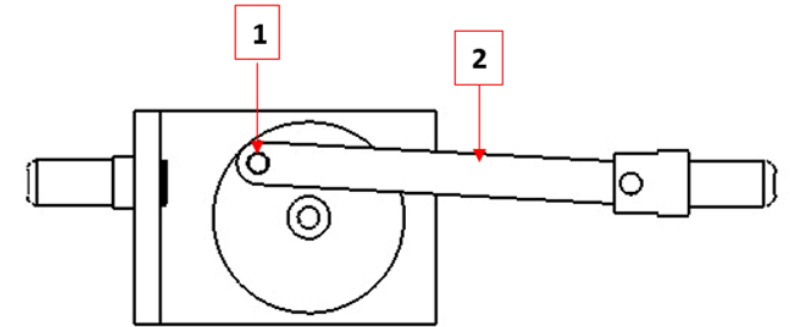


- ✓ Por esfuerzo de Von Mises
- ✓ Por teoría de energía de distorsión

$$D = 2.364 \text{ mm}$$

- ✓ Criterio de Soderberg

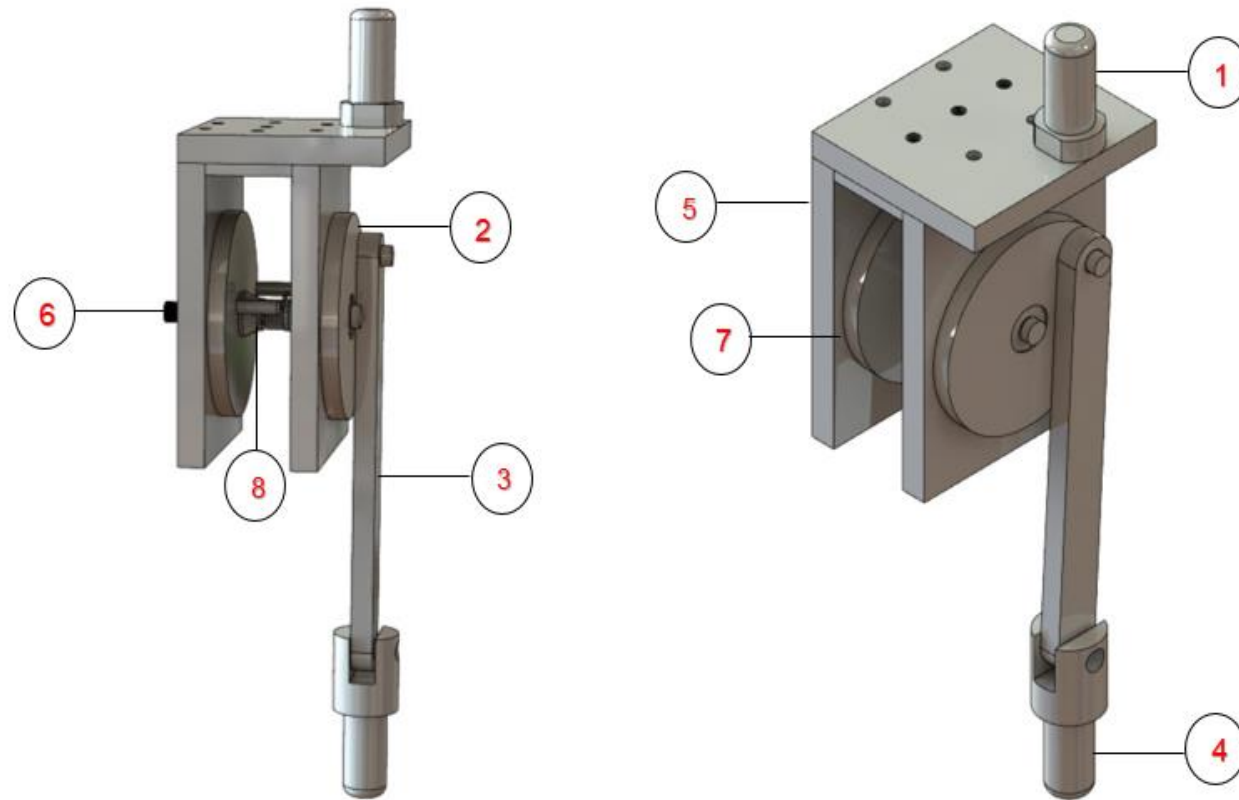
$$\eta = 16.52$$



- ✓ Que la tensión normal no supere la tensión admisible del material.
- ✓ La carga aplicada no supere la carga crítica de Euler.



# Descripción general del mecanismo



ORD	DESCRIPCIÓN
1	Eje de Sujeción
2	Manivela
3	Biela
4	Corredera
5	Bastidor
6	Guía del resorte
7	Disco de alojamiento del pin estático
8	Resorte de Pruebas

Peso obtenido a través del software de diseño solidworks

Masa = 0.75 kilogramos

Peso Aproximado

$$0.75 * 7.87 = 5.9025kg \approx 6kg$$





# Matriz de decisión para posibles aceros

Características	Ponderación	Material		
		Acero A36	AISI 1018	AISI 1045
Costo	30	30	20	10
Mecanizado	30	20	30	30
Aplicación (Ensayo a Fatiga)	25	10	30	20
Adquisición	15	15	15	15
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>75</b>	<b>95</b>	<b>75</b>

## Acero AISI 1018

Propiedades Mecánicas	Valor
Resistencia Mecánica	(410 – 520) $N/mm^2$
Punto de Fluencia	235 $N/mm^2$
Elongación (% MIN)	20
Dureza _Rockwell B	143

densidad o peso específico es de  $7.87 \text{ g/cm}^3$

## Acero DF-2

Propiedades mecánicas	Valor
Temperatura de Temple	800°C
Dureza Rc	25
Resistencia a la tracción	85 $kg/mm^2$
Limite elástico	72 $Kg/mm^2$





# IMPLEMENTACIÓN DEL MECANISMO BIELA – MANIVELA

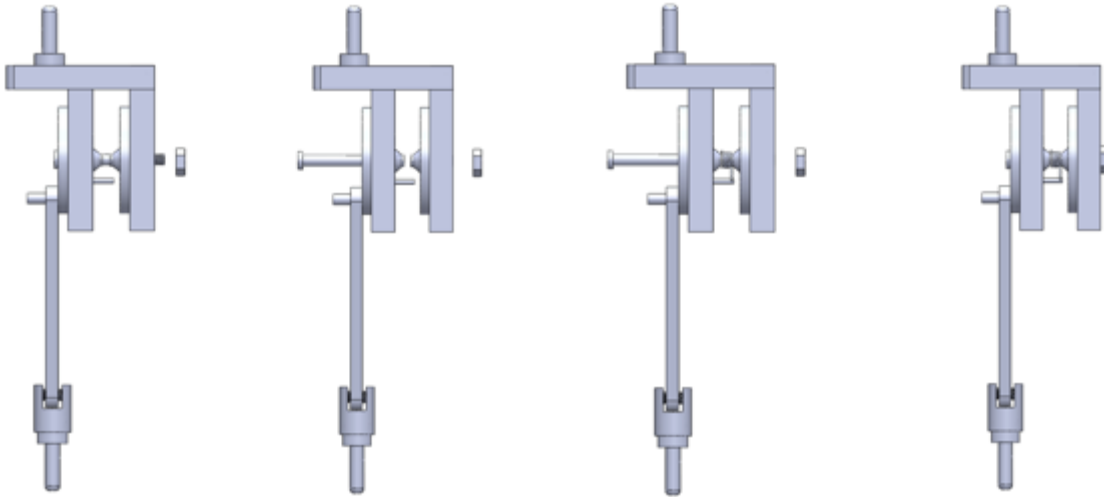
A LA

# MÁQUINA DE ENSAYO UNIVERSAL INSTRON



**E S P E**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA





Montaje del resorte en el mecanismo



## Características Principales

- Capacidad de Fuerza axial hasta  $\pm 100$  kN (22.500 lbf)
- Pruebas de fatiga a diferente ciclo y variación de frecuencia hasta 30 Hz
- Pruebas cuasi estáticas con carga de  $\pm 100$  kN y velocidad entre 0.1 mm/min a 240mm/s





# Ensayo de Fatiga





# Comparación de ciclo de vida para resorte alterno



Ensayo a fatiga: 5,562 ciclos

Calibri 11

General

Formato condicional

Insertar

Eliminar

Formato

Ordenar y filtrar

Buscar y seleccionar

Modificar

$$K22 = \frac{(((4 * ((E13 + (E13 - 2 * E12)) / 2) / E12)^2 + (((E13 + (E13 - 2 * E12)) / 2) / E12) - 1) / (4 * ((E13 + (E13 - 2 * E12)) / 2) / E12) * (((E13 + (E13 - 2 * E12)) / 2) / E12) - 1))}{...}$$

ESPE  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

COMPONENTE AERONÁUTICO ENGINE COWLING DOOR LATCH ASSY P/N314-12781-401 DE LA AERONAVE A-29B SUPER TUCANO

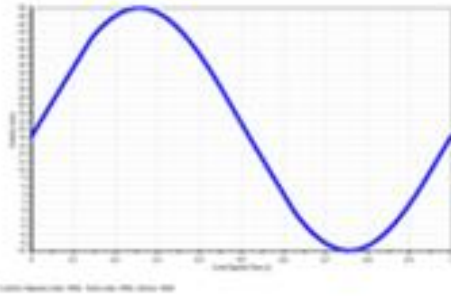
Datos		Factor de Seguridad a Carga Estática	
Sut=	2.047 Mpa	Número de espiras	
E=	195000 Mpa	Na=	5,358013236
d=	1,5 mm	Modelo de Norton	Ny= 0,96726035
Dext=	12,839 mm	Modelo de Shigley	Ny= 0,96726035
L1=	21,55 mm	Factor de Seguridad a Fatiga	
L2=	16,71 mm	Modelo de Norton	Nfb= 0,39733037
Nb=	5	Modelo de Shigley	Nf= 0,75707075
Ángulo=	118 °	Deflexión angular	
Sew=	310 Mpa	Θ rev=	0,327777778
Mmin=	0 Nmm	Momento generado	
		M=	493,1475289 Nmm
		Duración del Resorte	
		Cierre de la espira	N= 5666,736 ciclos
		Dimin=	9,141397289 mm
		Lmax=	9,491666667 mm

Cálculo teórico: 5666,6 ciclos





# Comparación de ciclo de vida para resorte nuevo



Data Processor	Ciclo(2)
Total Cycles	4,591,0 Cycle
PC Frequency	1,0 Hz
Force Maximum	25,4 lbf
Displacement Maximum	30,0 mm

Ensayo a fatiga: 4,591 ciclos

7	COMPONENTE AERONÁUTICO ENGINE COWLING DOOR LATCH ASSY P/N314-12781-401 DE LA AERONAVE A-29B SUPER TUCANO					
9	COMPORTAMIENTO DE PARAMETROS EN FUNCIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL RESORTE					
11	Datos					
12	Sut=	1.761 Mpa	Número de espiras		Factor de Seguridad a Carga Estática	
13	E=	195000 Mpa	Na=	5,360751204		
14	d=	1,5 mm			Modelo de Norton	Ny= 0,91453439
15	Dext=	13,85 mm	Constante de elasticidad		Modelo de Shigley	Ny= 0,91453439
16	L1=	18,35 mm	kt=	3,835136111 Nmm/Vuelta		
17	L2=	23,64 mm			Factor de Seguridad a Fatiga	
18	Nb=	5	Deflexion angular			
19	Ángulo=	118 °	θ rev=	0,327777778	Modelo de Norton	Nfb= 0,42968085
20	Sew=	310			Modelo de Shigley	Nf= 0,70406943
21	Mmin=	0	Momento generado			
22			M=	452,5460611 Nmm	Duración del Resorte	
24			Cierre de la espira		N=	4540,384 ciclos
25			Dimin=	10,09019812 mm		
26			lmax=	9,491666667 mm		
27						
28						
29						
30						

Cálculo teórico: 4,540 ciclos





# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES





- Las tablas referentes a esfuerzo último y composición química, permiten descartar algunos materiales empleados en la fabricación de resortes apuntando a que el material con el cual fue construido el resorte es un acero AISI 302
- El estudio realizado sobre la zona de fractura en resorte original y alterno revelan que el mecanismo de falla del elemento crítico (resorte), es la fatiga de bajos ciclos.
- Con el modelo de cálculo teórico se determina que la geometría del resorte tiene relación directa con la duración que este adquiere, no así con la composición del material. De tal manera que para incrementar el tiempo de vida, se podría aumentar el número de espiras sin embargo el espacio donde este se aloja impide tomar esa medida





- El modelamiento desarrollado a través del software de investigación Ansys posibilita la comparación de esfuerzo máximo que el resorte puede soportar, teniendo como resultado un valor de 1620 Mpa mediante el software y 1651 Mpa a través del cálculo teórico valores que se asemejan entre sí.
- La implementación de nuestro mecanismo a la maquina universal de ensayos a fatiga exigen de alto control y diseño del mismo, por lo que su robustez de material y construcción se respaldan bajo las fuerzas y aplicación que tendrá este.
- Los resultados de análisis experimental corroboran valores teóricos empleados bajo el modelo de Norton, tras el ensayo de fatiga realizado a los resortes alterno y nuevo se obtiene el ciclo de vida para cada uno (5562 y 4591) respectivamente los cuales se encuentran dentro del rango calculado





- Previo a un ensayo de fatiga del resorte, realizar el cálculo preestablecido bajo el modelo de Norton con el objetivo de poder comparar el tiempo de vida del resorte
- Antes de cada prueba calibrar la máquina universal de ensayos, con una frecuencia no mayor a 1.25 Hz y desplazamiento de 50 mm de esta manera lograremos una integración óptima de trabajo entre el mecanismo y la máquina.







- Realizar ensayos a fatiga con resortes de diferente material y que cumplan con la geometría del componente aeronáutico.
- Nuestro mecanismo cumple con la funcionalidad para el cual fue diseñado, proporcionar un giro de 120 grados mediante una carrera de 50 mm. Sin embargo puede adaptarse al estudio de nuevos resortes sometidos a torsión, por lo que se recomienda que estos no superen una altura de 16 mm





- En la tabla de comparación entre posibles aceros, se demuestra que el resorte elemento ENGINE COWLING DOOR LATCH ASSY P/N 314-12781-401 puede estar fabricado posiblemente de acero inoxidable de tipo austenítico AISI 302.
- La resistencia última se halla dentro de los rangos que corresponden a los aceros ASTM A 401, AISI 9254, ASTM A 231, ASTM A 232, AISI 302 Clase 1, AISI 304 y cercana al AISI 305
- En el análisis de fractura se aprecian líneas con dirección específica por lo que se estima, que el resorte fue sometido a fatiga
- A través del ensayo de fatiga realizado se puede contrastar la duración del resorte teóricamente calculado, y el real con un valor aproximado de 5500 ciclos



# GRACIAS



**E S P E**  
ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA