



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS SOPORTES CON  
ACCIÓN RÁPIDA EN LA HORQUILLA, PARA OPTIMIZAR EL  
RECAMBIO DEL NEUMÁTICO DE UNA MOTOCICLETA DE  
COMPETICIÓN MOTOSTUDENT”**

**AUTORES: CASTRO GUILCAPI, JUAN CARLOS  
HERRERA PAREDES, CARLOS ANDRÉS**

**ING. TORRES MUÑOZ, GUIDO RAFAEL  
DIRECTOR DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**



# CONTENIDO

Planteamiento del problema

Objetivos

Hipótesis

Suspensión delantera

Propiedades del material

Calculo de fuerzas máximas

Análisis de los componentes

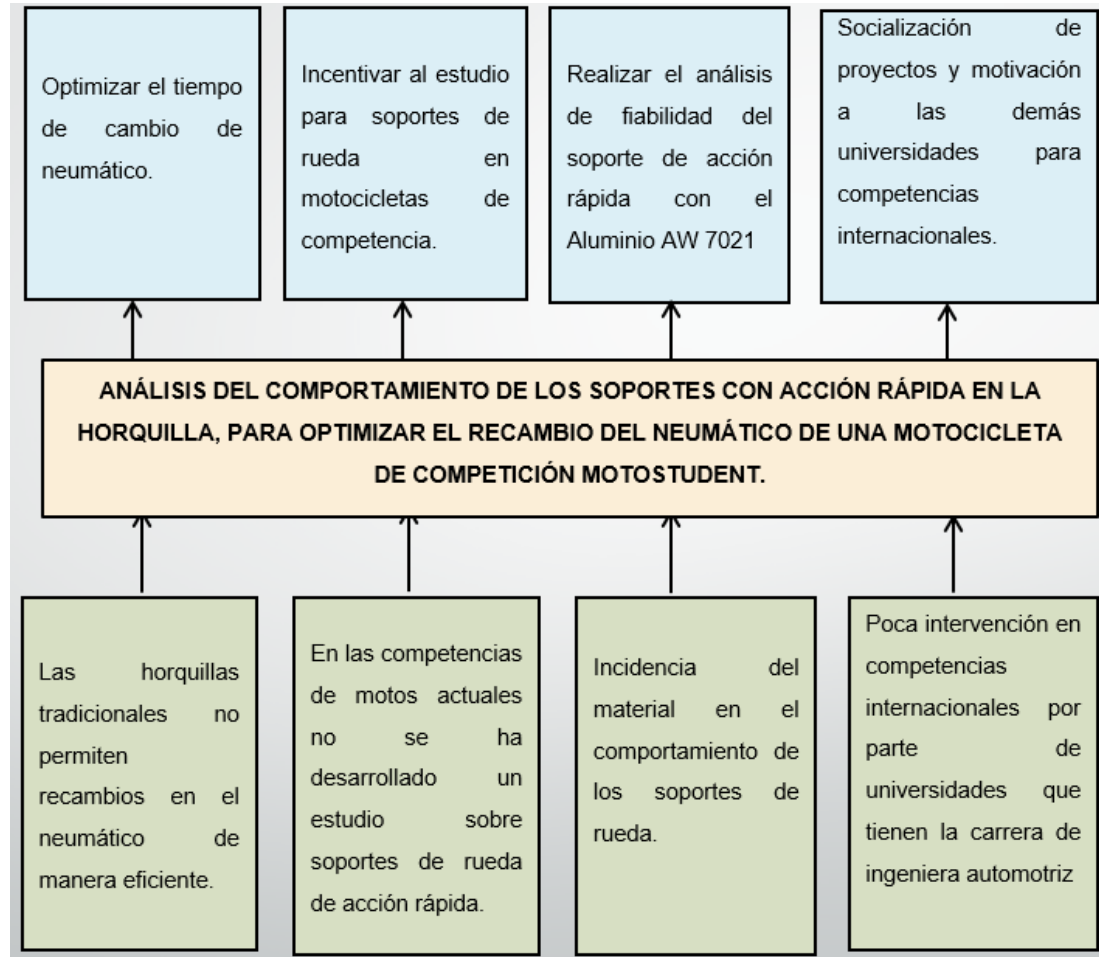
Pruebas y verificaciones

Conclusiones

Recomendaciones



# PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



# OBJETIVOS

## Objetivo General:

- Analizar el comportamiento de los soportes con acción rápida en la horquilla, para optimizar el recambio del neumático de una motocicleta de competición MotoStudent.



## *Objetivos Específicos:*

- Investigar tipos de suspensiones delanteras para motocicletas, en bases digitales para generar un rendimiento óptimo.
- Análisis de selección para la suspensión delantera, que permita el reglamento de la “Competencia Internacional MotoStudent”.
- Determinar los criterios de selección del Material utilizado el soporte de acción rápida para la “Competencia Internacional MotoStudent”.
- Analizar el modelado del soporte de acción rápida, mediante cálculos y modelos matemáticos que cumplan funciones estructurales de diseño.



- Analizar el soporte de acción rápida, con pruebas estáticas en software dedicado (CAE) que validen el comportamiento.
- Validar el prototipo con pruebas en pista como aceleración, gynkhana y frenado, para verificación de resistencia del soporte de acción rápida.
- Validar el desempeño del soporte de acción rápida, mediante método experimental, establecido por la competencia MotoStudent.

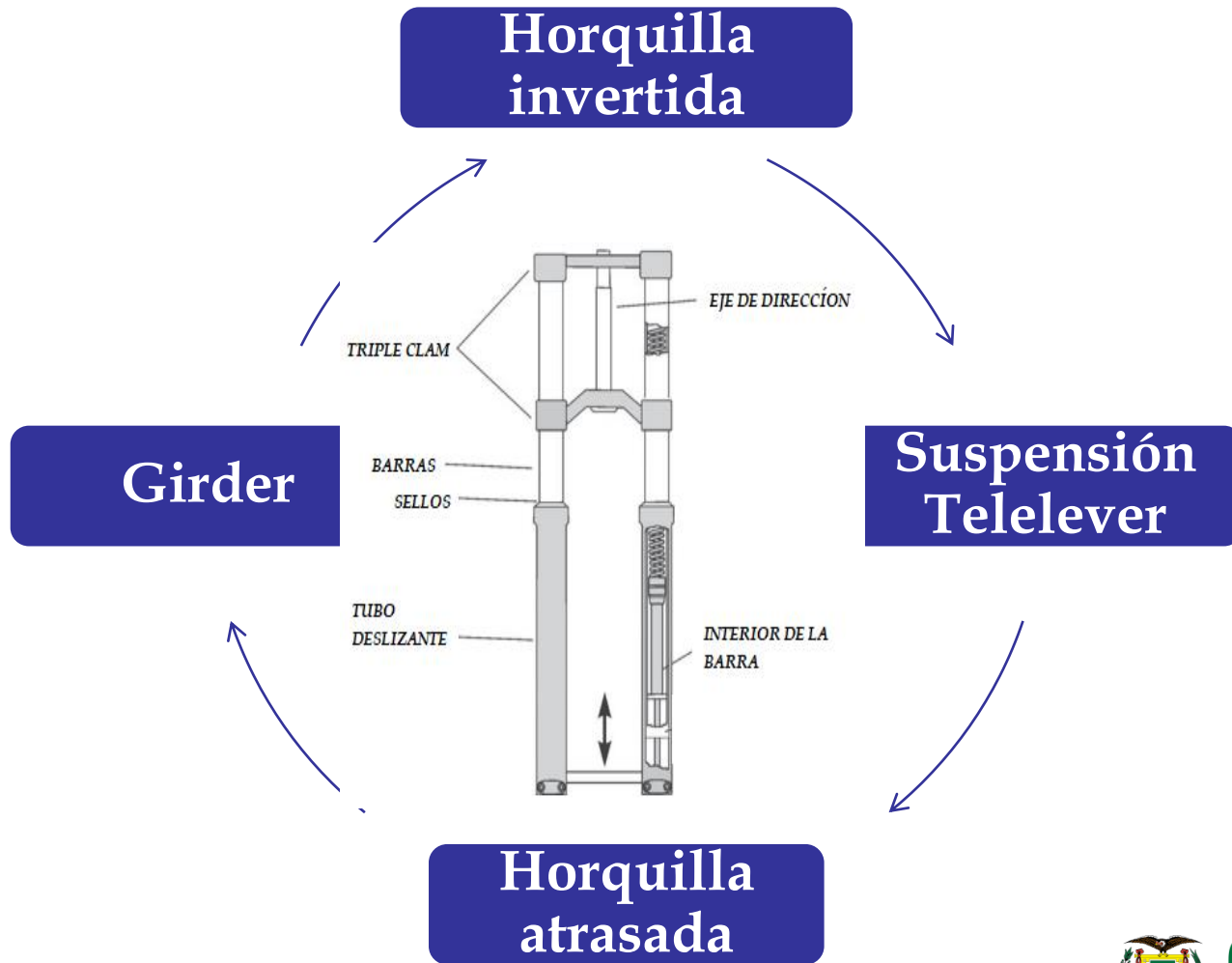


# *HIPÓTESIS*

Los soportes con acción rápida en la horquilla, permitirán optimizar el recambio del neumático para la motocicleta de competición MotoStudent



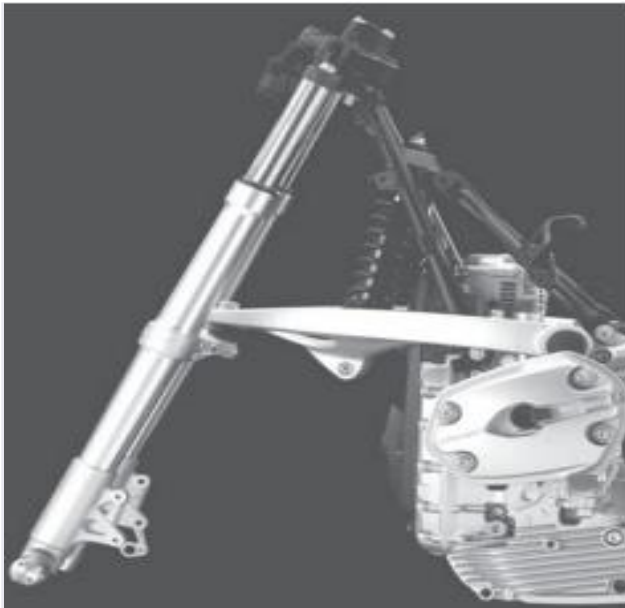
- SUSPENSIÓN DELANTERA





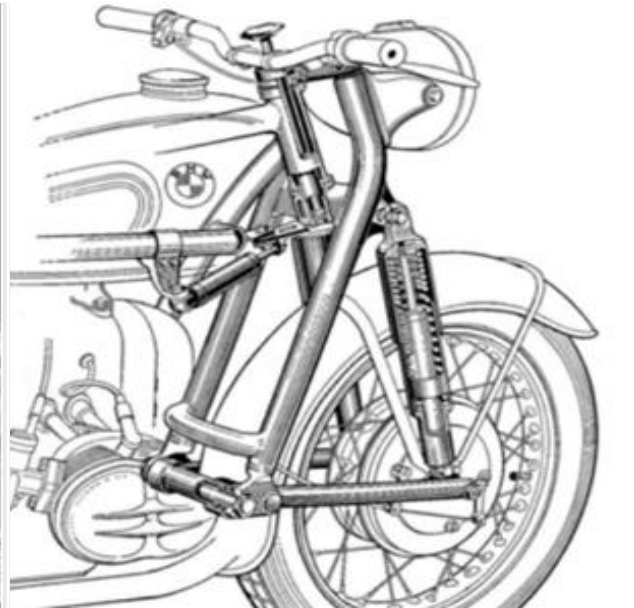
### Suspensión Telelever

Mejora el confort a la hora de conducir debido a que separa la función de dirección de la suspensión.



### Horquilla atrasada

Se caracteriza principalmente por proporcionar mayor estabilidad y manejo.



## Girder

Consiste en un par de montajes fijados a una abrazadera triple, mediante un resorte colocado generalmente entre los basculantes superior e inferior.



## Horquilla Invertida

Fácil respuesta y baja fricción se logran solo con el paralelismo absoluto de las patas de la horquilla.



## Valoración de las opciones para suspensión delantera

Opción	Fabricación	Peso	Rigidez	Costo	Deformación	Estética	Diseño	Puntaje
Horquilla invertida	3	2	2	3	3	3	3	19
Telelever	2	3	3	2	3	2	2	17
Horquilla atrasada	2	3	3	2	3	2	2	17
Girder	1	3	3	1	2	3	3	16



## Elección del material

Características	Acero	Aluminio AW 7021	Fibra de Carbono
Accesibilidad	3	2	1
Punto de fluencia	2	2	3
Costo	3	1	1
Peso	1	2	3
Facilidad e Manufactura	3	3	1
Capacidad de reciclado	2	3	1
Estética	1	3	2
Valoración	15	16	12

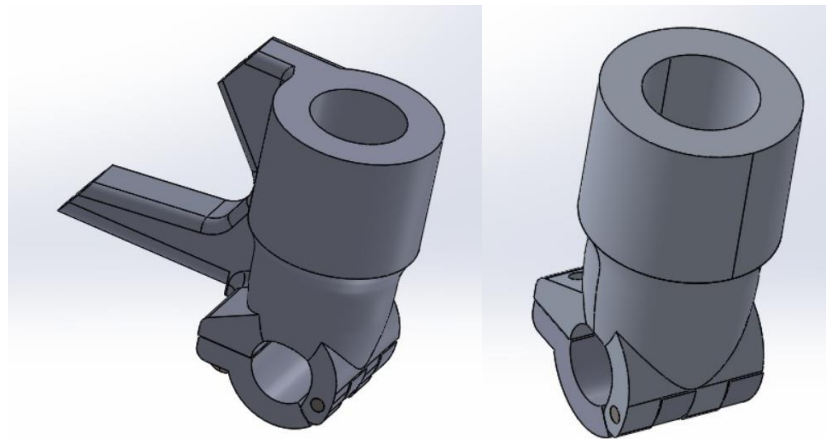
3 Excelente – 2 Bueno – 1 Regular



# Características físicas y químicas del material

Descripción	Valores
Dureza (HBW)	110-120 HB
Límite de tracción (TS)	460 MPa
Resistencia máxima a la tensión (Sut)	350 - 380 MPa
Elongación %	2.5 – 4.5
Coefficiente de Poisson	0.34
Módulo de elasticidad	70 GPa
Resistencia a la fluencia	310

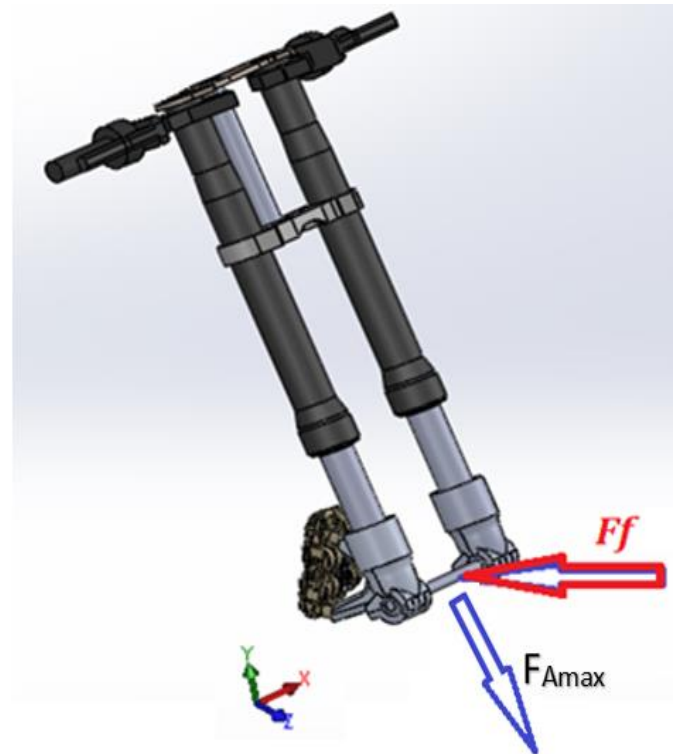
Elementos	Porcentaje
Zinc (Zn)	5.45% Máximo
Magnesio (Mg)	1.67%
Hierro (Fe)	0.17%
Cobre (Cu)	0.11%
Silicio (Si)	0.08%
Manganeso (Mn)	0.05%
Cromo (Cr)	0.02%
Titanio (Ti)	2% Mínimo



# ANÁLISIS DE CARGAS MÁXIMAS

FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO

FUERZA DE FRENADO



# FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO

## Masas suspendidas

Descripción	Valor
Bastidor	37 kg
Basculante	21 kg
Carenado	6 kg
Motor	35 kg
Suspensión posterior	5 kg
Suspensión delantera	25 kg
Tanque de Combustible	2 kg
Accesorios	9 kg
Piloto	70 kg
Total, de la Motocicleta y piloto	210 kg

## Masas no suspendidas

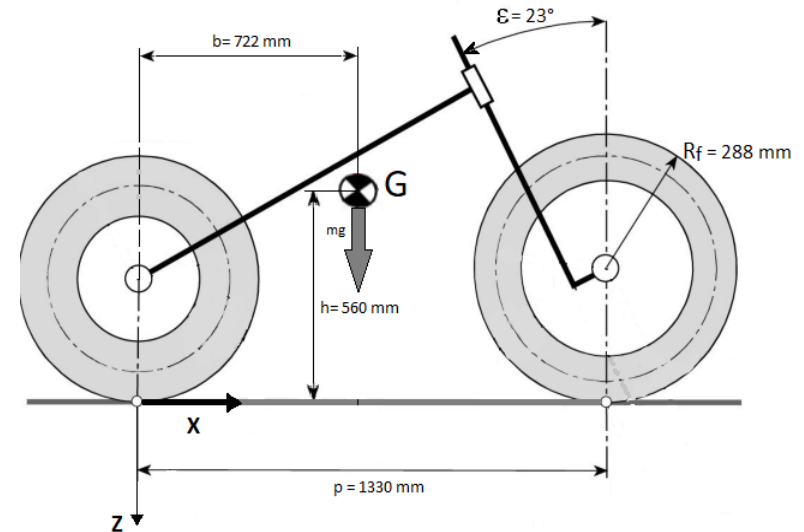
Descripción	Valor
Neumático, Aro delantero, Eje de Rueda y Disco de Freno	7 kg
Sujetador de eje de rueda izquierdo	0.83 kg
Sujetador de eje de rueda derecho	1.25 kg
Mordaza de Freno delantero	1.05 kg
Total	10.1 kg



# FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO

## Parámetros geométricos

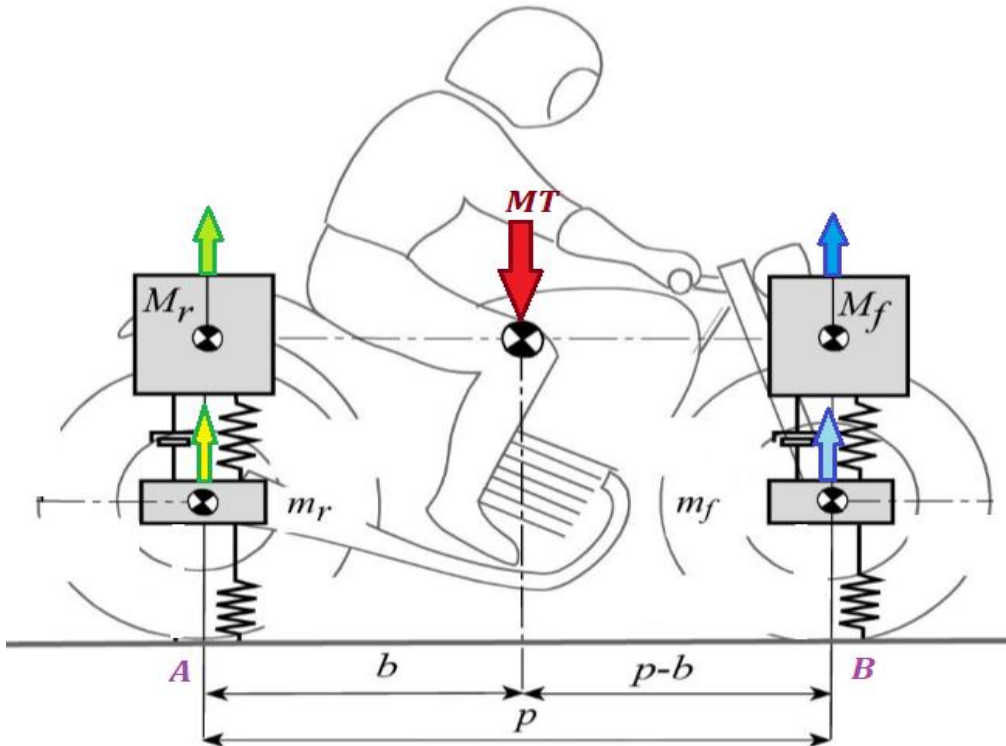
Descripción	Variable	Magnitud
Ángulo de lanzamiento	$\varepsilon$	23°
Distancia entre centros	$p$	1330 mm
Distancia entre el punto de contacto de la rueda posterior y el centro de gravedad	$b$	722 mm
Radio de la rueda delantera	$R_f$	288 mm
Altura al centro de gravedad	$h$	560 mm





# FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO

## Masa Suspendida Delantera



Distribución de las masas en la motocicleta

$$\sum M_A \cup = 0$$

$$(MT * b) - (M_f * p) - (m_f * p) = 0$$

$$M_f = MT * \frac{b}{p} - m_f$$

$$M_f = 210 \text{ kg} * \frac{722 \text{ mm}}{1330 \text{ mm}} - 10.1 \text{ kg}$$

$$M_f = 103.9 \text{ kg}$$



# FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO

## ***Rigidez equivalente delantera***

$$K_f = 4 * \pi^2 * M_f$$

$$K_f = 4 * \pi^2 * 103.9 \text{ Kg}$$

$$K_f = 4.1 \text{ KN/m}$$

## **Amortiguamiento del sistema de suspensión**

Frecuencia fundamental de  $\omega_n = 1\text{Hz}$ , y el amortiguamiento  $\xi$  del orden de 0,25.

$$C_f = \xi * 2 * \sqrt{K_f * M_f}$$

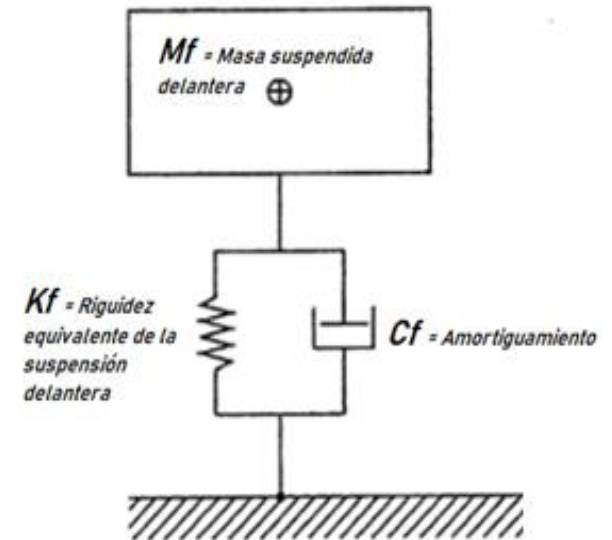
$$C_f = 2 * 2.25 \sqrt{4 \text{ kN/m} * 103.9 \text{ kg}}$$

$$C_f = 10.32 \text{ kNs/m}$$



# FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO

$$M_f * x'' + C_f x' + K_f * x = F(t)$$



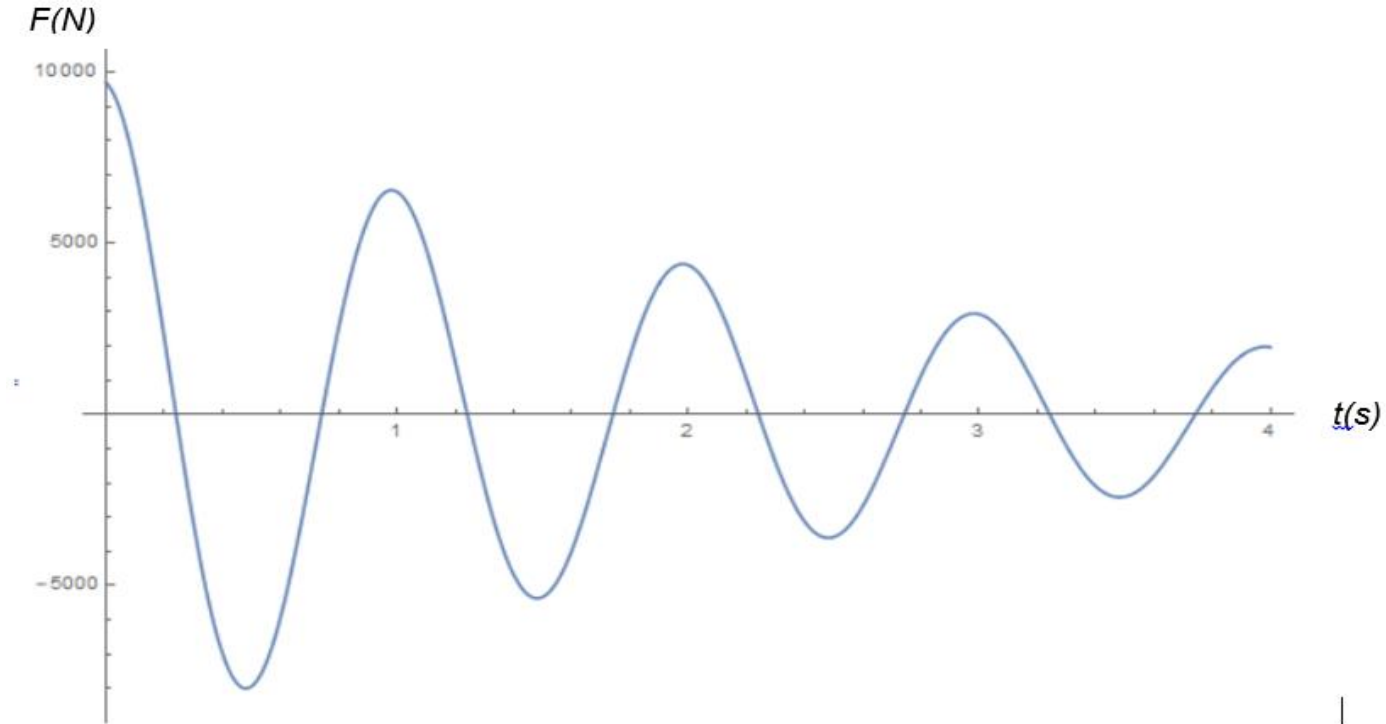
## Función desplazamiento

$$\text{exp} = \text{DSolve}[\{103.9 * x''[t] + 10320 * x'[t] + 4100 * x[t] = 0\}]$$

$$X[t] == 0.150e^{-99.326t}(-0.004e^{0.398t}\text{Cos}[6.28t] + 1. e^{98.927t}\text{Sin}[6.28t])$$



# FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO



$$103.9 * x''[t] + 10320 * x'[t] + 4100 * x[t] = F[t]$$

# FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO

Fuerza máxima sobre la suspensión delantera

Cuando  $t = 0s$

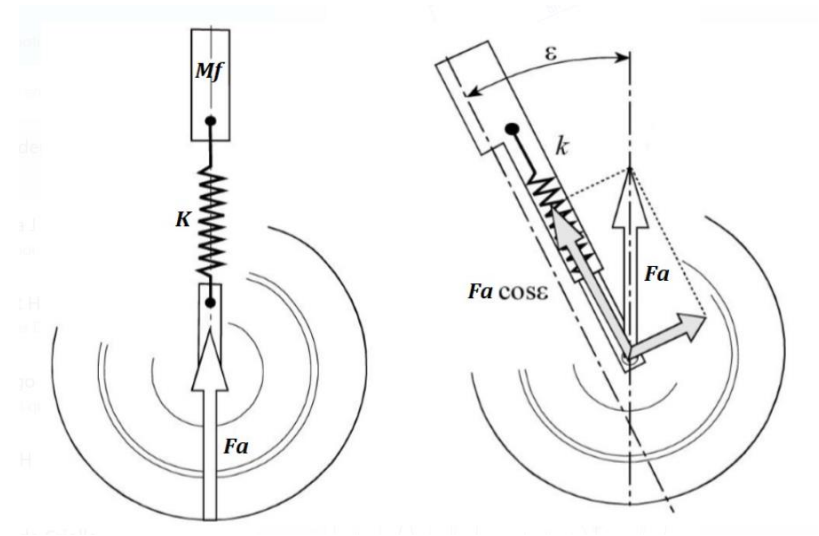
$$F_{amax} = 9684,89 \text{ N}$$

Descomposición de la fuerza máxima

$$F_{Amax} = \frac{F_{amax} * \cos \varepsilon}{2}$$

$$F_{Amax} = \frac{9684,89 \text{ N} * \cos 23^\circ}{2}$$

$$F_{Amax} = 4457,49 \text{ N}$$



# FUERZA DE FRENADO

## Datos técnicos del sistema de freno delantero

Sistema de freno delantero	
Marca	J Juan Racing
Diámetro de cilindro maestro ( $d_{mf}$ )	12.7 mm
Dimensiones de pedal de freno ( $P_1/P_2$ )	184 / 25 mm
Diámetros de cilindro en el caliper ( $d_{sf1}$ y $d_{sf2}$ )	30 y 34 mm
Presión del sistema ( $P_{bf}$ )	70 bar (7N/mm <sup>2</sup> )



# FUERZA DE FRENADO

Área total de cilindros en el caliper

$$A_{sf} = \frac{\pi * (d_{sf1}^2 + d_{sf2}^2)}{4}$$

$$A_{sf} = \frac{\pi * (30^2 + 34^4)}{4}$$

$$A_{mf} = 1614.77 \text{ mm}^2$$

Fuerza máxima de frenado

$$F_{cf} = P_{bf} * A_{sf}$$

$$F_{cf} = 7 \frac{N}{\text{mm}^2} * 1614.77 \text{ mm}^2$$

$$F_{cf} = 11303.39 \text{ N}$$



# ***ANÁLISIS DE LOS COMPONENTES***

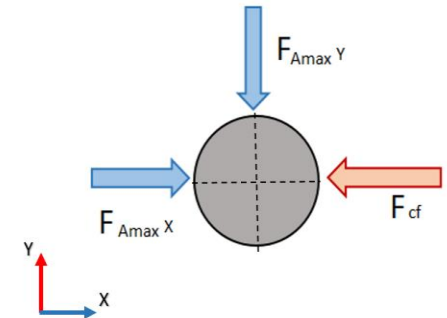
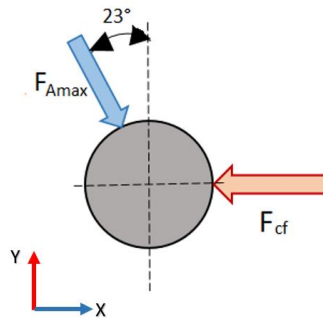
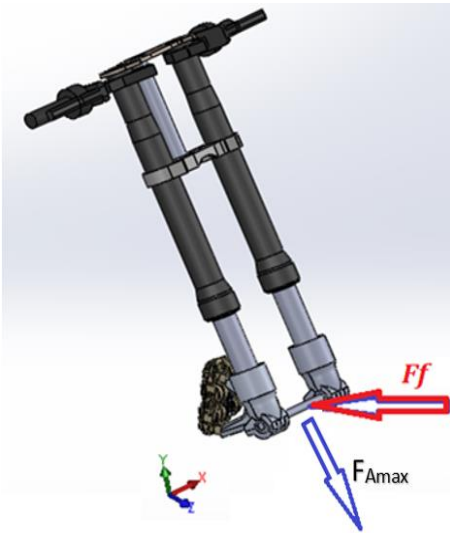
- Análisis del eje.
- Análisis del pasador.
- Análisis de los pernos del caliper.
- Análisis del perno en la tapa del soporte.
- Análisis del soporte.
- Análisis en la tapa del soporte.





# Análisis de fuerzas del eje en la rueda delantera

Diagrama de cuerpo libre del eje



$$F_{Amax X} = F_{Amax} * \sin 23^\circ$$

$$F_{Amax X} = 1741,68 \text{ N}$$

$$F_{Amax Y} = F_{Amax} * \cos 23^\circ$$

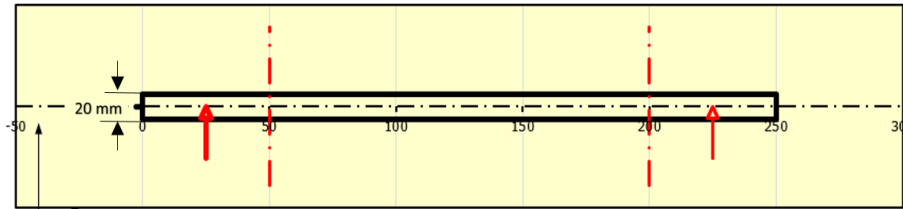
$$F_{Amax Y} = 4103,14 \text{ N}$$

$$\sum F_x = F_{Amax X} - F_{cf}$$

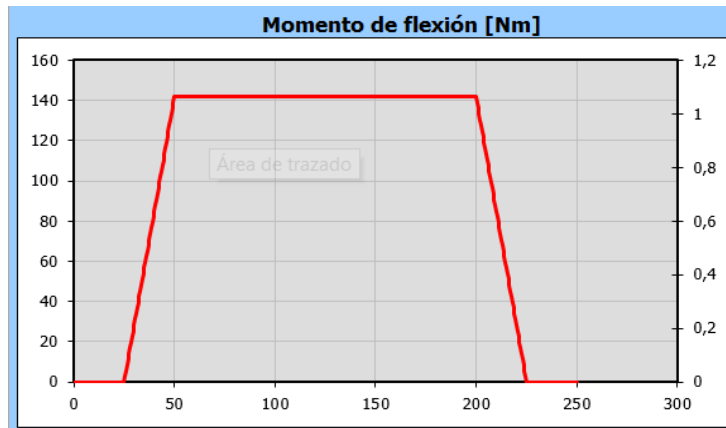
$$\sum F_x = -3910,02 \text{ N}$$



# Análisis de momentos en el eje delantero



Momento total en el eje



$$M_{aT} = 141695,12 \text{ Nmm}$$

Esfuerzos en el eje

Esfuerzo por Flexión

$$\sigma_f = 180,41 \text{ MPa}$$

Esfuerzo por Corte

$$\tau_{max} = 24,05 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de Von Mises

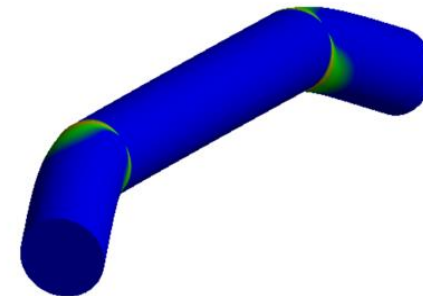
$$\sigma_{vON} = 185,15 \text{ MPa}$$

# Análisis del eje

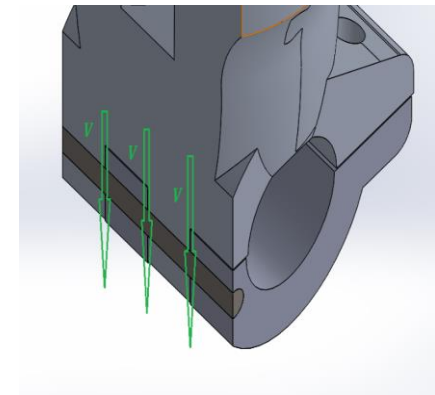
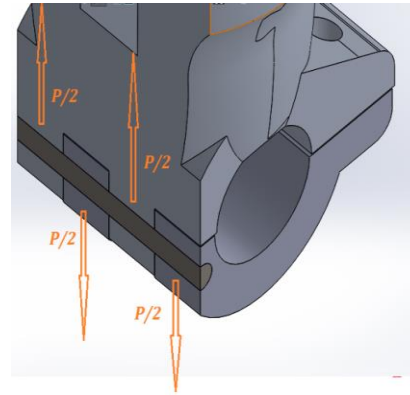
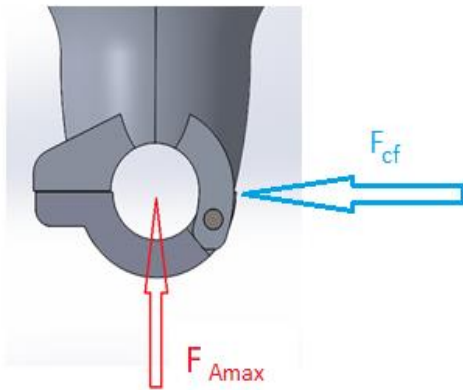
## Resultados obtenidos en el análisis

Deformación direccional en el eje X	$1,46 * 10^{-2}$ mm
Máximo esfuerzo principal	187,64 (MPa)
Esfuerzos de Von Mises	187,78 (MPa)
Factor de diseño	1,33
Factor de diseño calculado	1,35

**B: Static Structural**  
FACTOR DE SEGURIDAD  
Type: Safety Factor  
Time: 1  
20/1/2020 11:55



# Análisis de esfuerzos en el pasador de los soportes



$$F_{ep} = \sqrt{(F_{Amax})^2 + (F_{cf})^2}$$

$$F_{ep} = \sqrt{(4457,49 \text{ N})^2 + (5651,7 \text{ N})^2}$$

$$F_{ep} = 7197,98 \text{ N}$$

$$\sigma = \frac{F_{ep}}{d * t}$$

$$\sigma = 4,43 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{16 * \frac{F_{ep}}{3}}{3 * (\pi * d^2)}$$

$$\tau = 113,15 \text{ MPa}$$

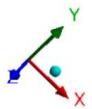
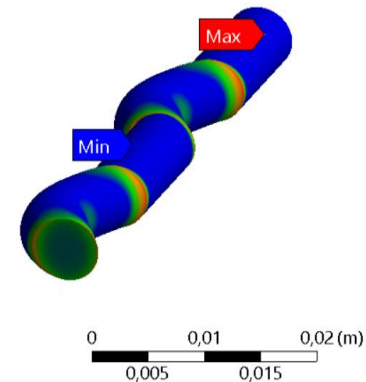
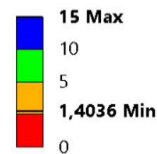


# Análisis del pasador

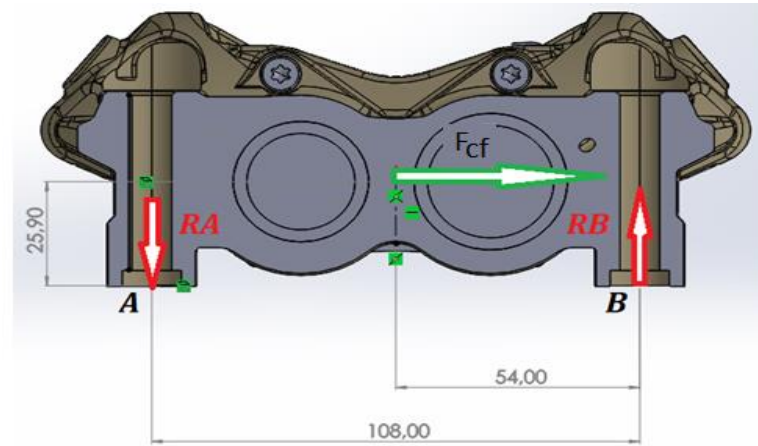
## Resultados obtenidos en el análisis

Deformación direccional en el eje X	0,15 (mm)
Máximo esfuerzo principal	239,73 (MPa)
Esfuerzos de Von Mises	214,13 (MPa)
Factor de diseño	1,40
Factor de diseño calculado	1,24

**B: Static Structural**  
FACTOR DE SEGURIDAD  
Type: Safety Factor  
Time: 1  
20/1/2020 13:55



## Análisis de esfuerzos en el caliper



$$\sum MB = 0$$

$$RA * 54mm - F_{cf} * 25.9 mm = 0$$

$$RA = F_{cf} * \frac{25.9mm}{54mm}$$

$$RA = 5651,69 N * \frac{25.9mm}{54mm}$$

$$RA = 2710,72 N$$

$$\sum MB = 0$$

$$RB * 54mm - F_{cf} * 25.9 mm = 0$$

$$RB = F_{cf} * \frac{25.9mm}{54mm}$$

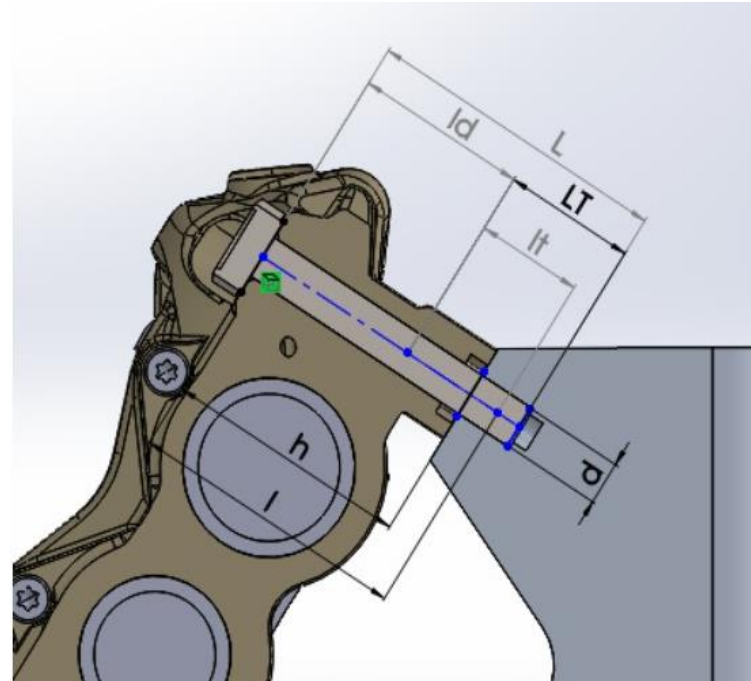
$$RB = 5651,69 N * \frac{25.9mm}{54mm}$$

$$RB = 2710,72 N$$



# Características de pernos en el caliper

Descripción	Valores
Longitud (L)	60 (mm)
Altura de perforación en el caliper (h)	50 (mm)
Diámetro mayor nominal (d)	10 (mm)
Área de esfuerzo de tensión (At)	<b>58 (mm<sup>2</sup>)</b>
Resistencia de prueba mínima Sp	600 (MPa)
Condición del perno, acabado negro	K =0.3



# Análisis de los pernos del caliper

$$N = \frac{S_p * A_t - F_i}{C * R_A}$$

Donde:

$S_p$  = Resistencia de prueba mínima (600 MPa)

$A_t$  = Área transversal (58 mm<sup>2</sup>)

$F_i$  = Fuerza de sujecion (31320 N)

$C$  = Rijidez del sistema (0.29)

$R_A$  = Fuerza de sujecion (2710,72 N)

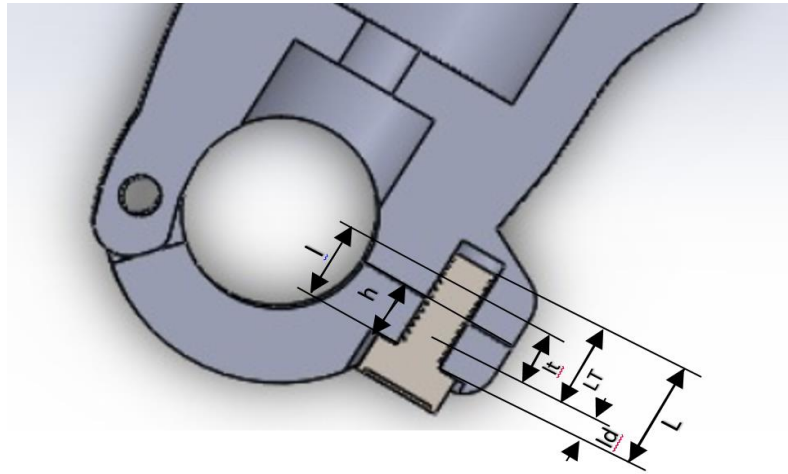
$$N = 4,42$$





## Características de pernos en la tapa del soporte

Descripción	Valores
Longitud (L)	25,4 (mm)
Altura de la tapa (h)	10 (mm)
Diámetro mayor nominal (d)	8 (mm)
Área de esfuerzo de tensión ( $A_t$ )	36,6 (mm <sup>2</sup> )
Resistencia de prueba mínima $S_p$	600 (MPa)
Condición del perno, acabado negro	K =0.3



# Análisis del perno en la tapa del soporte

$$N = \frac{S_p * A_t - F_i}{C * \frac{F_{Amax}}{n_{pernos}}}$$

Donde:

$S_p$  = Resistencia de prueba mínima (600 MPa)

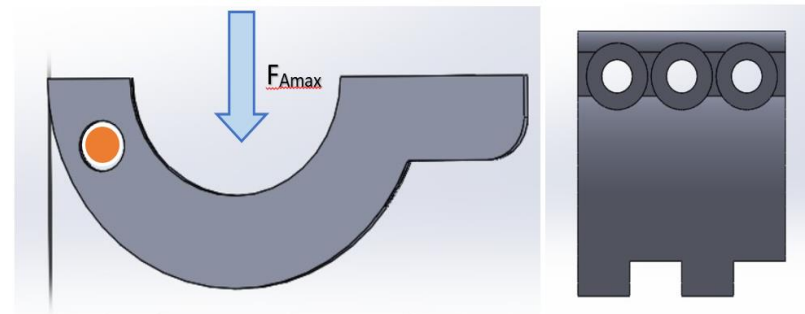
$A_t$  = Área transversal (36,6 mm<sup>2</sup>)

$F_i$  = Fuerza de sujecion (19764 N)

$C$  = Rijidez del sistema (0,537)

$F_{Amax}$  = Fuerza en el perno (4103,14N)

$n_{pernos}$  = Numero de pernos empleados en el sistema (3 pernos)



$$N = 2,99$$



# Cargas en el soporte

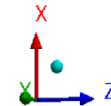
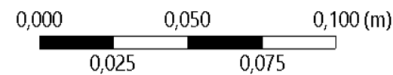
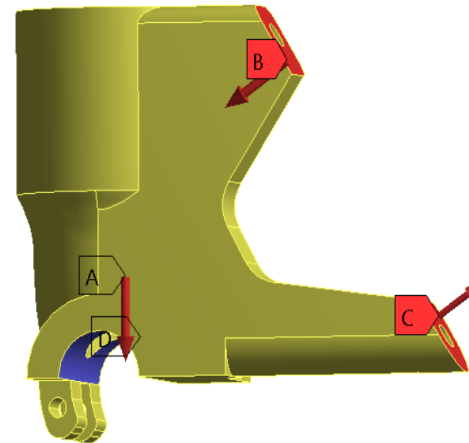
## C: Static Structural

ESTUDIO ESTÁTICO SOPORTE DERECHO

Time: 1, s

18/1/2020 13:00

- A** F. Amortiguamiento: 4457,5 N
- B** F. Compresion Freno: 2710,7 N
- C** F. Tension Freno: 2710,7 N
- D** Apoyo en el eje



Fuerza de amortiguamiento  $F_{A_{max}} = 4457,5$  (N) colocada en dirección del eje del amortiguador y las reacciones en los puntos de apoyo del caliper generadas por el sistema de freno, las cuales producen esfuerzos de compresión y tensión  $R_A = R_B = 2710,7$  (N).



# Análisis del soporte

## Resultados obtenidos en el análisis

Deformación direccional  
en el eje Z

$0.054 * 10^{-6}$  (mm)

Máximo esfuerzo  
principal

146,32 (MPa)

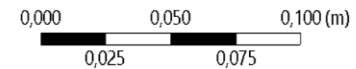
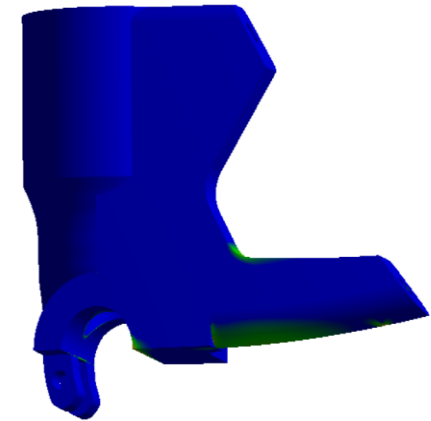
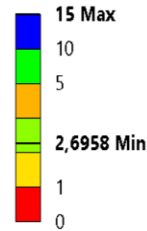
Esfuerzos de Von Mises

118,7 (MPa)

Factor de diseño

2,69

C: Static Structural  
Safety Factor  
Type: Safety Factor  
Time: 1  
18/1/2020 13:55



# Cargas en la tapa del soporte

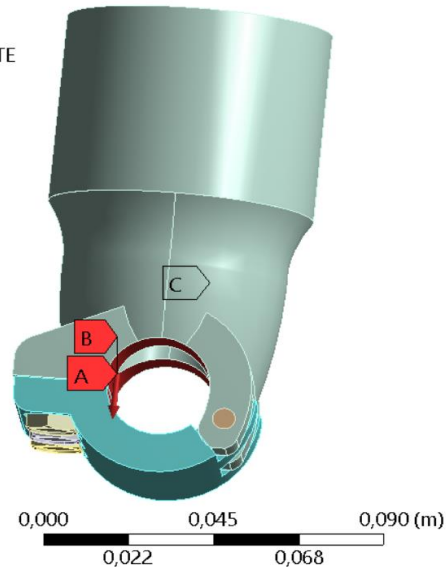
**C: Static Structural**

ESTUDIO ESTATICO TAPA SOPORTE

Time: 1, s

18/1/2020 18:51

- A** F. Freno: 5651,7 N
- B** F. Amortiguamiento: 4457,5 N
- C** Apoyo base del amortiguador



El análisis se realiza colocando como punto de apoyo el alojamiento de la barra de suspensión, con la fuerza de frenado  $F_{\text{freno}} = 5651,7$  (N) y de amortiguamiento  $F_{\text{Amax}} = 4457,5$  (N).

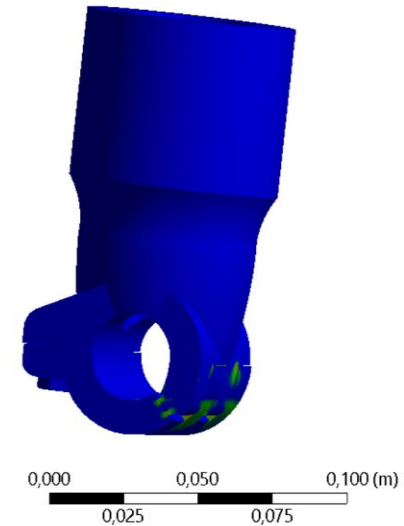
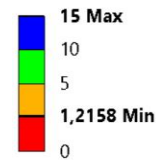


# Análisis en la tapa del soporte

## Resultados obtenidos en el análisis

Deformación direccional en el eje Y	$0.094 * 10^{-6}$ (mm)
Máximo esfuerzo principal	292,74 (MPa)
Esfuerzos de Von Mises	287,87 (MPa)
Factor de diseño	1,216

**C: Static Structural**  
FACTOR DE SEGURIDAD  
Type: Safety Factor  
Time: 1  
18/1/2020 19:15



# PRUEBAS Y VERIFICACIONES

## Pruebas y verificaciones estáticas

- Verificación de la suspensión delantera en banco de pruebas.
- Verificación de frenos.

## Pruebas y verificaciones dinámicas

- Prueba de frenado.
- Verificación dinámica de seguridad en pista.

## Pruebas de recambio de neumático



# Pruebas y verificaciones estáticas

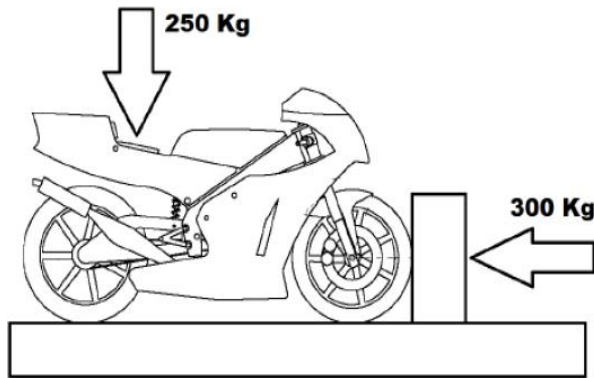


Adhesivo de validación de pruebas estáticas





# Verificación de la suspensión delantera en banco de pruebas



Carga Aplicada	Observación
Vertical 250 kg.	Sin deformación estructural
Frontal 300 Kg.	Sin deformación estructural



# Verificación de frenos

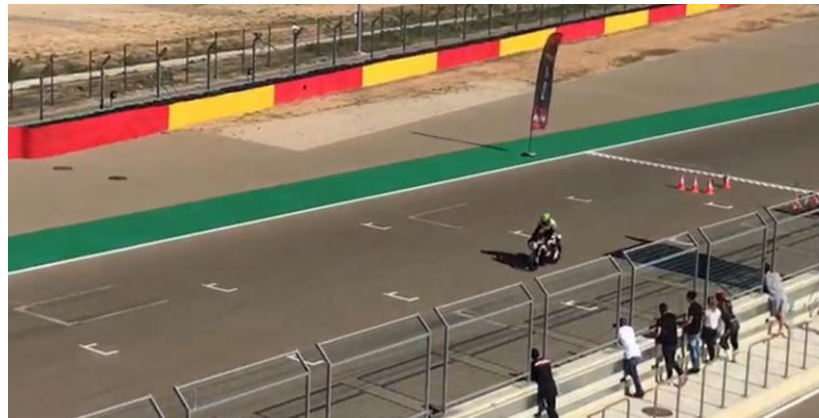
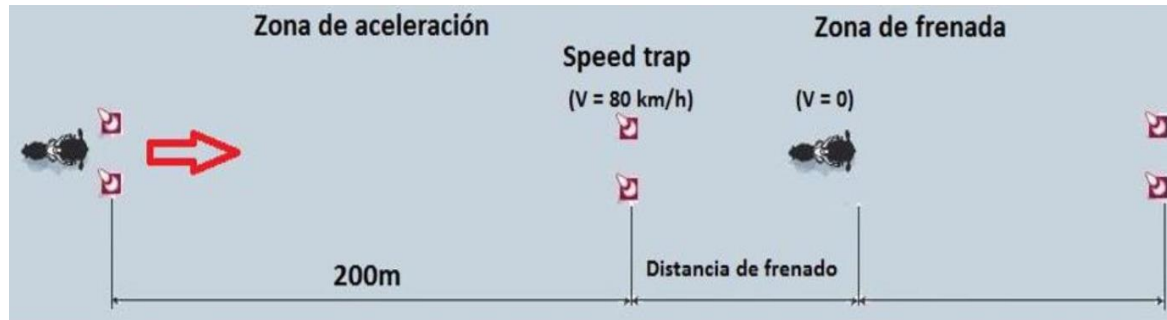
Freno	Valor
Delantero	0.38 KN
Posterior	0.32 KN



# Pruebas y verificaciones dinámicas



# Prueba de frenado



# Resultados de la prueba de frenado

Medición	Velocidad Teórica	Velocidad Registrada en el Velocímetro	Distancia de Frenado	Tiempo de Frenado
1	80 km/h	89 km/h	25 m	2.37 s
2	80 km/h	91 km/h	23 m	2.22 s
3	80 km/h	87 km/h	21.6 m	2.2 s
4	80 km/h	88 km/h	21.4 m	2.1 s
5	80 km/h	89 km/h	21.5 m	2.2 s
<b>Promedio</b>	80 km/h	89 km/h	22.5 m	2.218 s

$$\frac{M_F - D}{M_F - P_F} = \frac{60 - P}{59}$$

Donde:

$M_F$  = Distancia de la frenada mas eficiente (21.4 m)

$P_F$  = Distancia de la frenada menos eficiente (25 m)

$D$  = Distancia de la frenada a evaluar (22.5 m)

$P$  = Puntuacion de la frenada a evaluar

$$\frac{21.4 - 22.5}{21.4 - 25} = \frac{60 - P}{59}$$

$$P = 42$$



# Verificación dinámica de seguridad en pista



Posterior a las verificaciones realizadas el piloto deberá dar una vuelta completa al circuito MotorLand-España



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

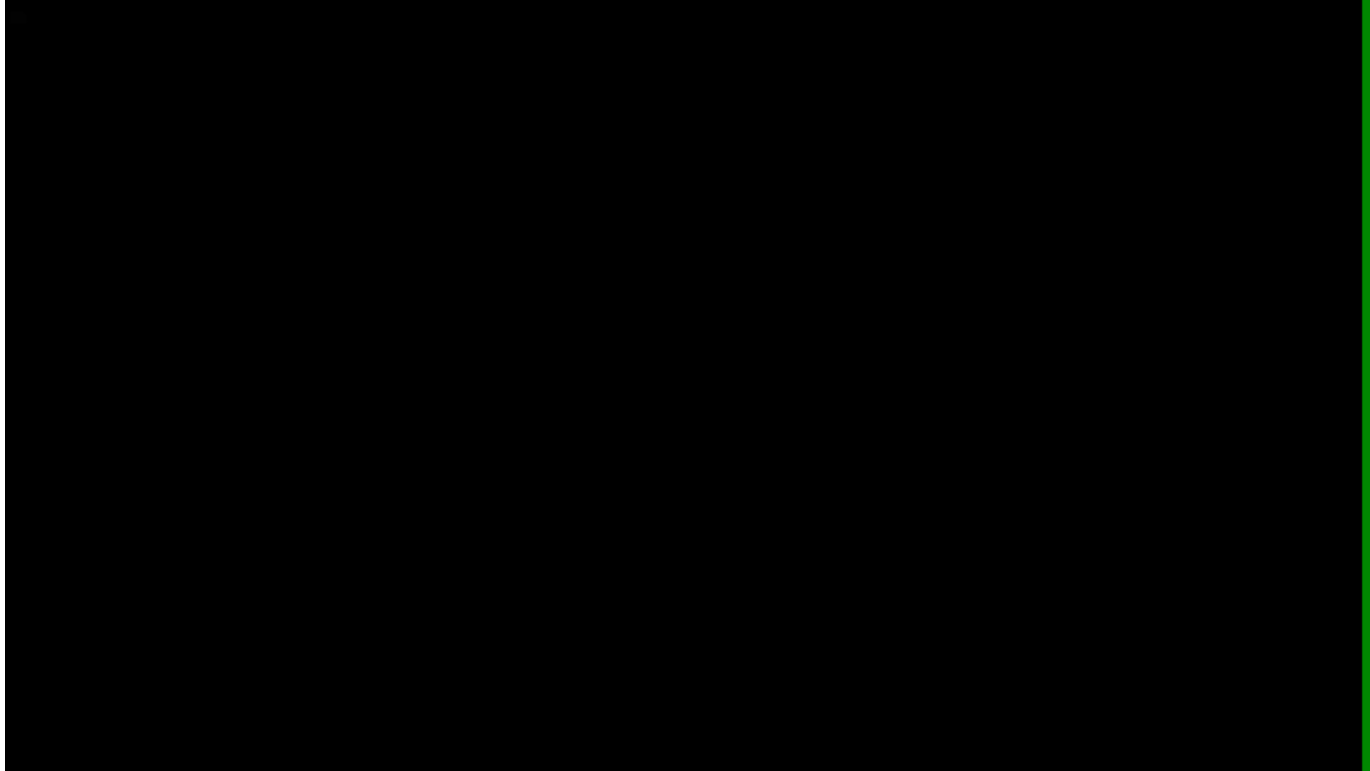
# *Pruebas de recambio de neumático*

## **Proceso de Prueba para el recambio del neumático delantero**

El proceso se realiza bajo los mismos pasos determinados en la competencia.

1. La motocicleta deberá estar debidamente embancada para realizar la prueba.
2. Los participantes deberán colocarse de pie junto a la motocicleta, al iniciar el cronometraje de la prueba.
3. Retirar el neumático delantero por completo y ubicarlo frente a la motocicleta para posteriormente levantar las manos.
4. Volver a colocar el neumático asegurándose que el ajuste sea el adecuado y ponerse de pie.
5. Se detiene el cronometro y se coloca el resultado en tablas para su posterior análisis.

# Video recambio de neumático

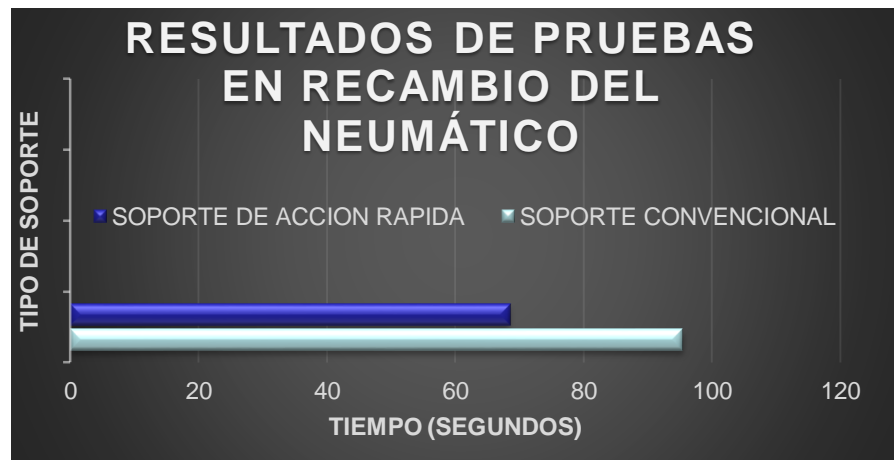


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# RESULTADOS OBTENIDOS

Medición	Tiempo de Recambio (Convencional)	Tiempo de Recambio (Acción Rápida)	Diferencia de tiempos
1	98 s	70 s	28 s
2	96 s	67 s	29 s
3	94 s	69 s	25 s
4	96 s	67 s	29 s
5	93 s	69 s	24 s
Promedio	95,4 s	68,4 s	26,1 s



# CONCLUSIONES

- Se obtuvo 19 puntos sobre 21 en el cuadro valorativo, destacándose en: fabricación, costo y estética, razones por las cuales se implementó en el prototipo.
- El aluminio AW 7021 es seleccionado con 16 puntos de 21 en la valoración, presentando una resistencia a la tensión de 350-380 (MPa), límite elástico de 310 (MPa) y con 5,45% de Zinc en su composición química.
- Las cargas máximas que se aplican en el soporte son la del sistema de amortiguación 4457,49 (N), con una frecuencia de 0,036 (Hz) y la fuerza de frenado de 5651,78 (N), son una presión en el sistema de 70 (Bar).
- El esfuerzo de Von-Mises producido por las cargas es de 118,7 (MPa), siendo menor al límite elástico del material con 310 (MPa) y un factor de seguridad 2,69 el cual valida la confiabilidad del componente.



- Para la fijación de la tapa al soporte se utilizan tres pernos M8 de grado 8.8 los cuales garantizan un desempeño óptimo del sistema con un factor de seguridad calculado de 2,99.
- La motocicleta supero las pruebas estáticas en banco al aplicarse una fuerza vertical de 250 (kg) y horizontal de 300 (kg) sin presentar deformaciones estructurales así como dinámicas: aceleración, gynkhana y frenado obteniendo una valoración de 42 puntos sobre 60 propuestas por la organización MotoStudent, validando la resistencia del soporte de acción rápida. Alcanzando la posición #13 en la evaluación general, entre un total de 45 equipos participantes a nivel internacional.
- El recambio del neumático se optimizo en 28,3% con los soportes de acción rápida, al tener un solo componentes ante seis que presentan los sistemas convencionales, por lo cual este prototipo será un referente en la implementación de nuevos sistemas de automotrices en competencias MotoGP.



# RECOMENDACIONES

- Para diseñar el soporte con acción rápida, se recomienda realizar un estudio topológico o estudio de optimización, para reducir el peso del componente considerando las cargas máximas a las cuales estará expuesto.
- Investigar alternativas de materiales como: fibra de carbono y aluminio 6061 T6 con una resistencia a la fluencia de 270 (MPa), considerando su costo, proceso de manufactura y disponibilidad en el país.
- Para optimizar el sistema de acción rápida se puede disminuir la cantidad de pernos utilizados en la sujeción de la tapa del soporte.
- Implementar un sistema de asistencia para elevar la suspensión delantera y realizar el recambio de neumático de una manera más cómoda y eficiente.
- Utilizar una suspensión de alta gama como WP, para tener un mejor rendimiento en el comportamiento de la motocicleta para las próximas competencias organizadas en MotoStudent.



**“AQUELLOS QUE ESTÁN LO  
SUFICIENTEMENTE LOCOS PARA  
CREENER QUE PUEDEN CAMBIAR  
EL MUNDO, SON QUIENES  
LO CAMBIAN.”**

**-STEVE JOBS-**



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