

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

# REDISEÑO DE LA SUSPENSIÓN POSTERIOR DEL VEHÍCULO PROTOTIPO PARA COMPETENCIA EN LA FÓRMULA SAE

AUTORES: CRISTHIAN JOSÉ ÁLAVA CÁRDENAS  
JHOE ALEXANDER ARAUJO CASTRO  
DIRECTOR: ING. GUIDO TORRES  
LATACUNGA 2018



# OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Determinar las fuerzas que actúan sobre el sistema de suspensión trasera al momento de acelerar y curvar; a demás, realizar la distribución de esfuerzos para el diseño mediante el método de topología de optimización.
- Dibujar el sistema de suspensión trasera y colocar los parámetros de diseño mediante el software CAD/CAE.
- Simular el sistema de suspensión trasera bajo diferentes parámetros de funcionamiento en distintos materiales software CAD/CAE.



# OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar resultados de la simulación y determinar el material de los componentes ideales para la construcción del sistema de suspensión trasera.
- Realizar las pruebas de funcionamiento, establecer las conclusiones y recomendaciones del sistema de suspensión



**ESPE**

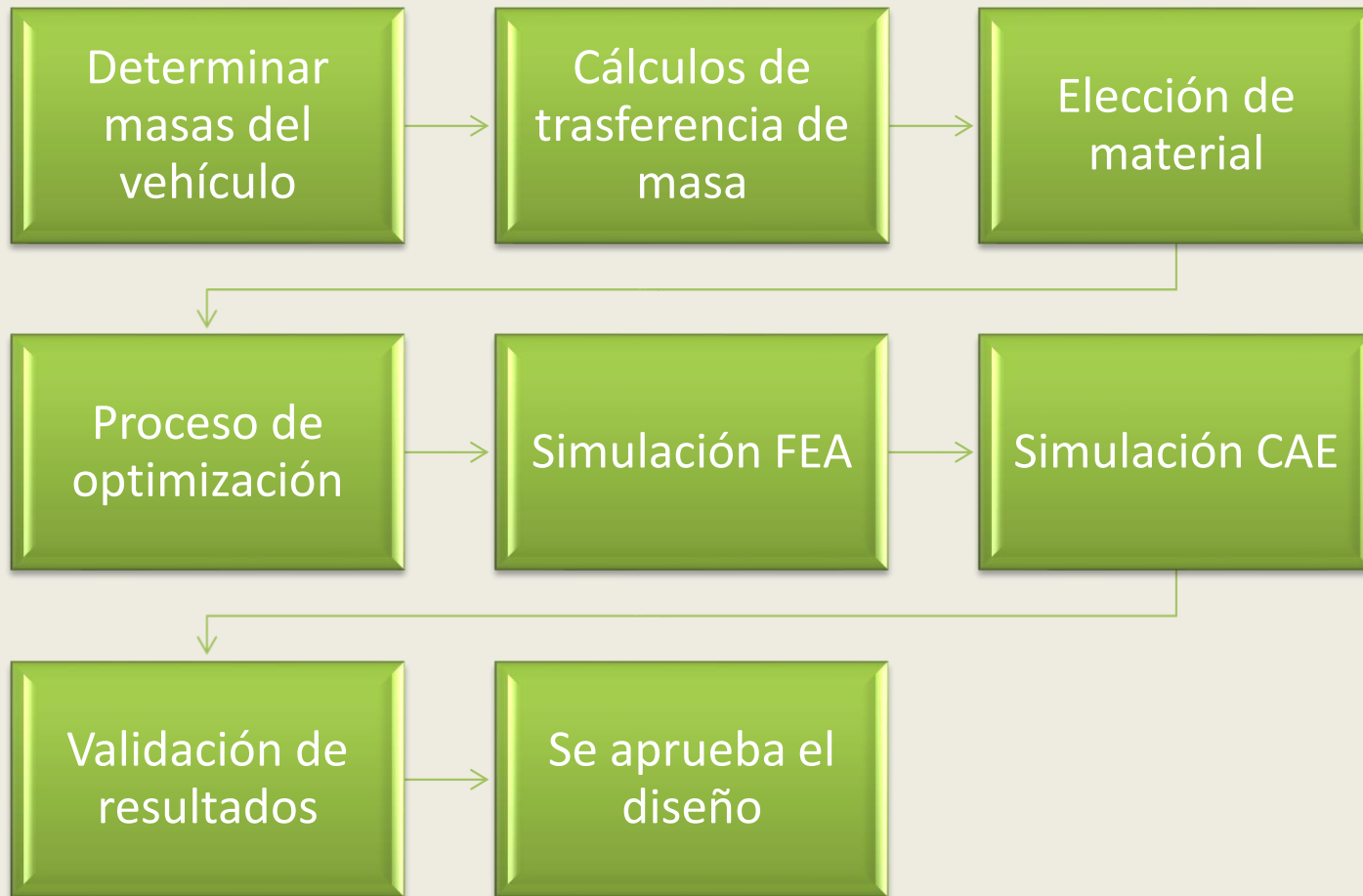
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# HIPÓTESIS

- El análisis de los esfuerzos generados en el sistema de suspensión trasera de un vehículo tipo fórmula SAE a través software CAD/CAE, podrá optimizar el diseño de sus elementos considerando su geometría y materiales



# PROCESO DISEÑO SISTEMA DE SUSPESIÓN



# CÁLCULOS FUERZAS APLICADAS EN SISTEMA DE SUSPENSIÓN

Las fuerzas que actúan en el sistema de suspensión se producen durante el movimiento del prototipo FESPE en aceleración, frenado y curva.



# Peso del vehículo

- El peso de cada rueda es uno de los parámetros principales a considerar en los cálculos posteriores.





# Trasferencia de fuerzas

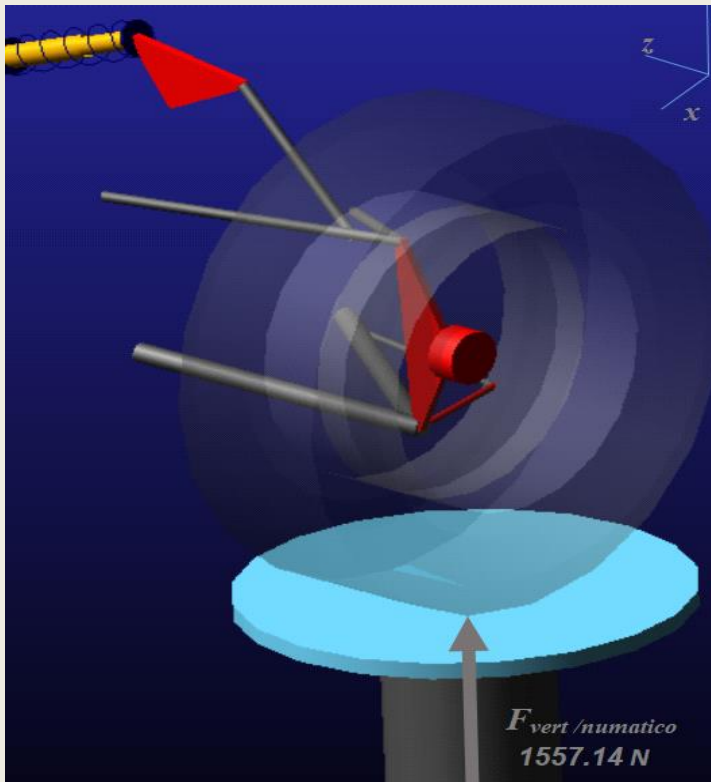
Distribución de fuerzas en el eje trasero

$$F_{st} = m_{tt} * g$$

**Ecuación 11. Ecuación de fuerza en el tren trasero.**

$$F_{vert} = F_{st} * 1.5$$

**Ecuación 50. Fuerza vertical máxima.**





# Trasferencia de fuerzas

Transferencia de carga en aceleración.

$$\Delta W_{XA} = \frac{f_t * hm}{l}$$

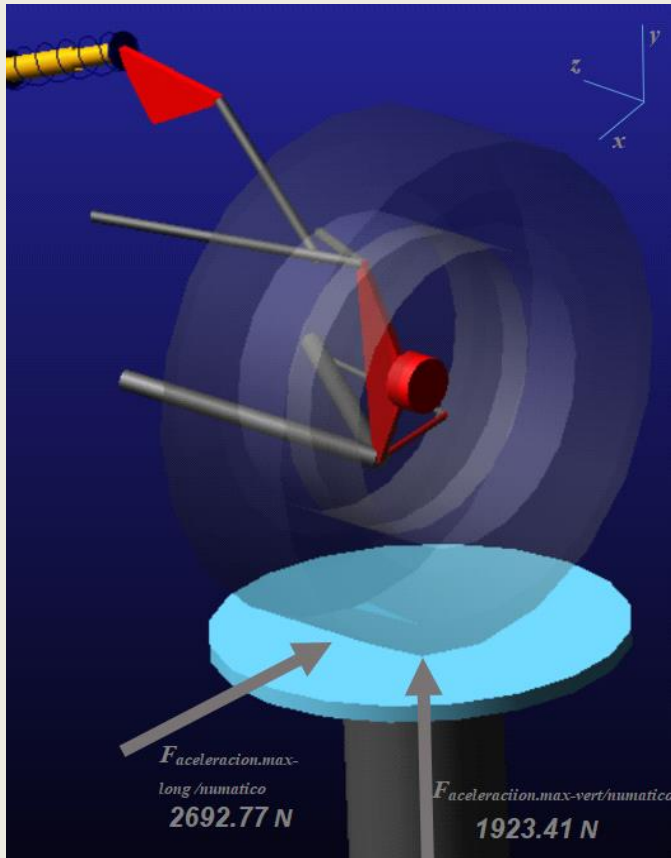
Ecuación 12. Ecuación de Transferencia de carga en aceleración.

$$f_t = \frac{F_{st} * u}{1 - \left(\frac{hm * u}{l}\right)}$$

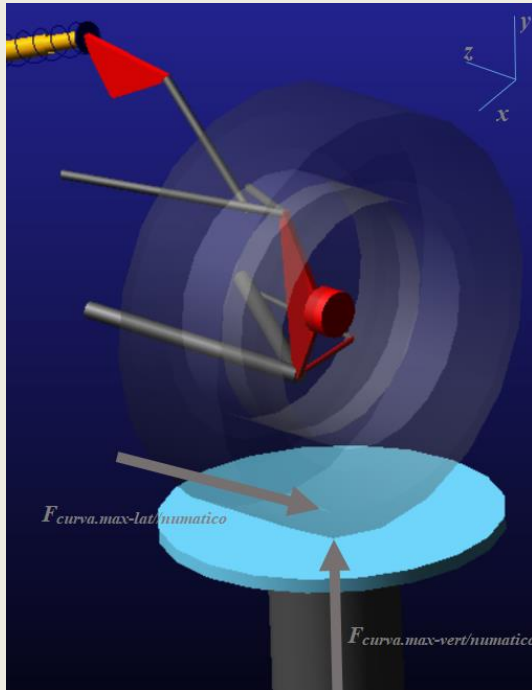
Ecuación 18. Ecuación de Fuerza de tracción.

$$F_{ac-vert} = F_{aceleración} * 1.3$$

$$F_{ac-long} = F_{ac-vert} * u$$



# Trasferencia de fuerzas



$$F_{\text{cur-vert}} = F_{\text{curva}} * 1.3$$

$$F_{\text{cur-lat}} = F_{\text{cur-vert}} * u$$

## Trasferencia de Fuerzas en curvas

- Transferencia de carga resultado de la aceleración
- Transferencia de carga debido al eje de accionamiento posterior
- Transferencia de cargas aerodinámicas en curva
- Transferencia lateral de peso en curva
- Transferencia de peso debido a la inclinación lateral

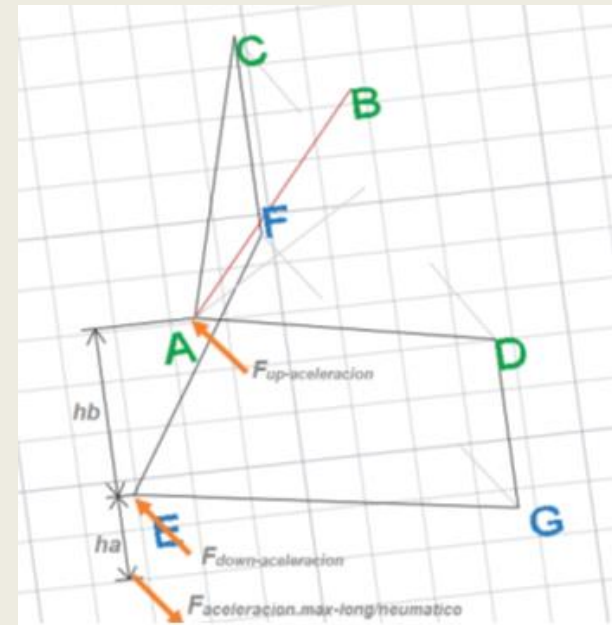
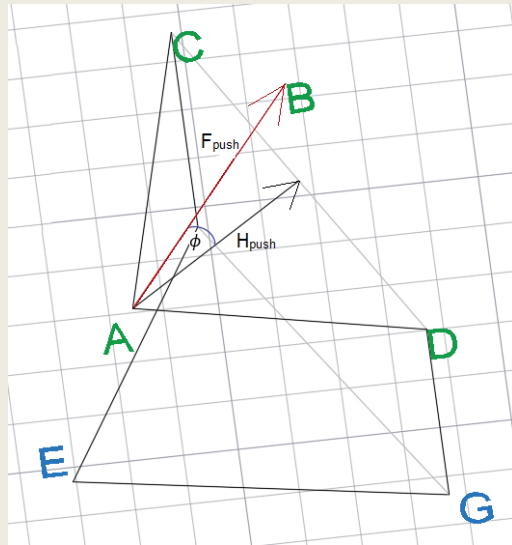
# Distribución de fuerzas en el sistema de suspensión

$$F_{\text{push-vert}} = F_{\text{vert}} / \text{Sin}[\phi]$$

$$F_{\text{up-cur}} = (h_a/h_b) * F_{\text{cur-lat}}$$

$$H_{\text{push-vert}} = F_{\text{push-vert}} * \text{Cos}[\phi]$$

$$F_{\text{down-cur}} = ((h_a + h_b)/h_b) * F_{\text{cur-lat}}$$



# FUERZAS RESULTANTES CALCULADAS

En la tabla se muestra las fuerzas resultantes que se utilizará para el proceso de simulación esfuerzos en el software FEA.

Curva					
Componentes	Fuerza en máxima lateral en curva	Fuerza en máxima vertical en curva	Fuerza en brazos con carga de curva lateral	Fuerza en brazos con carga de curva vertical	Fuerza en barra push con máxima carga curva
Fuerza FAC			1646	-311,94	
Fuerza FAD	3784,78	2703,42	-1646	-311,94	-2745
Fuerza FEG			-3378	-	
Fuerza FEF			-3378	-	
Aceleración					
Componentes	Fuerza en barra push con máxima carga aceleración	Fuerza en brazos con carga de aceleración vertical	Fuerza en brazos con carga de aceleración longitudinal	Fuerza en máxima longitudinal en aceleración	Fuerza en máxima vertical en aceleración
Fuerza FAC		221,364	1171,72		
Fuerza FAD	-1953	-221,364	-1171,72	2692,77	1923,41
Fuerza FEG		-	-2550		
Fuerza FEF		-	-2550		



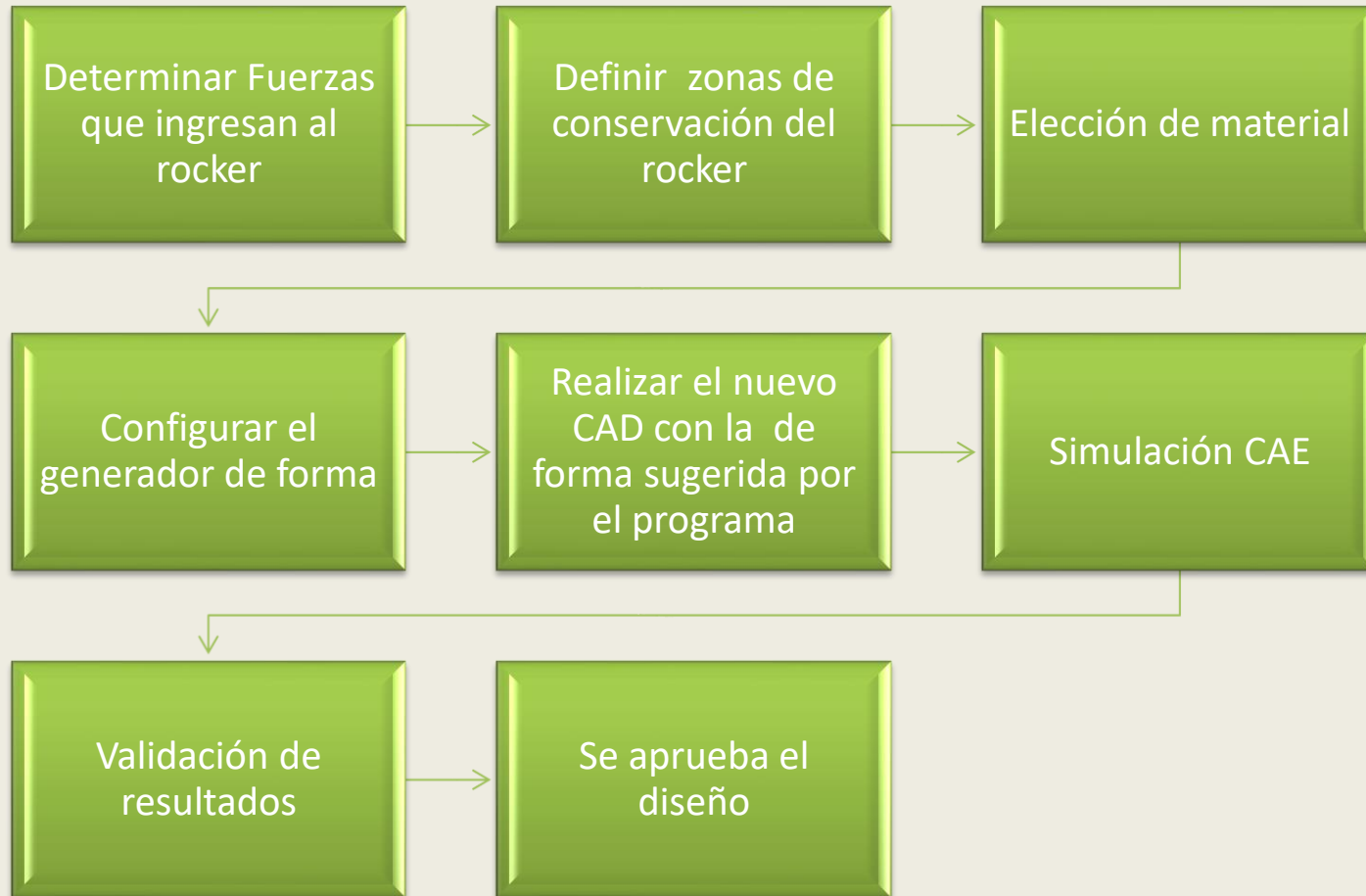
# ELECCIÓN DE MATERIAL

Matriz de decisión

Alternativa	Costos (25%)	Soldabilidad (30%)	Densidad (30%)	Disponibilidad (15%)	Resultado 100%
6061 T6	17	29	29	10	85
7075 T6	17	24	29	10	80
7021	17	29	29	10	85
A36	22	29	14	13	78

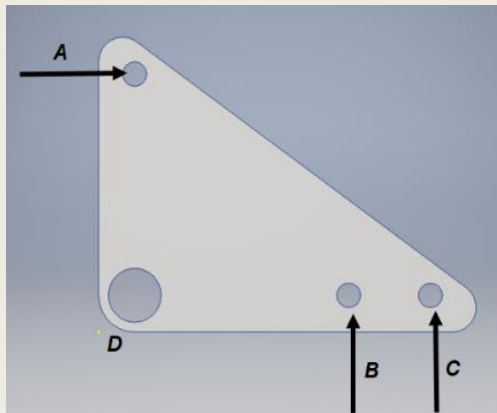


# PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

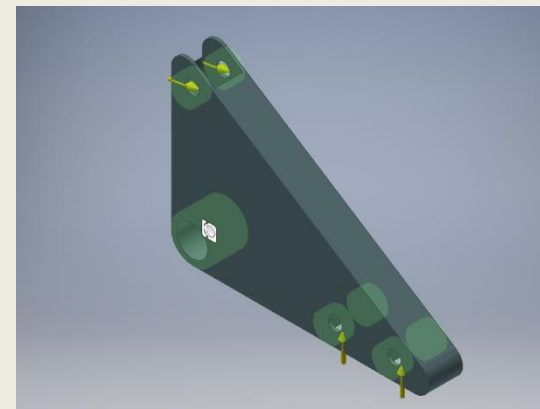


# PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Componente	Valor
Barra Push (C)	2745N
Conjunto resorte-amortiguador (A)	1321 N
Barra de torsión (B)	700N
Punto de pivote (D)	Fijo



Fuerzas aplicadas en el rocker



Zonas de conservación del Rocker.



# PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Configuración del generador de forma

Objetivo  
Maximizar rigidez

Criterios  
Masa original = 0,866 kg

Masa de destino:

Reducir original en (%) 40

Masa de destino 0,52 kg

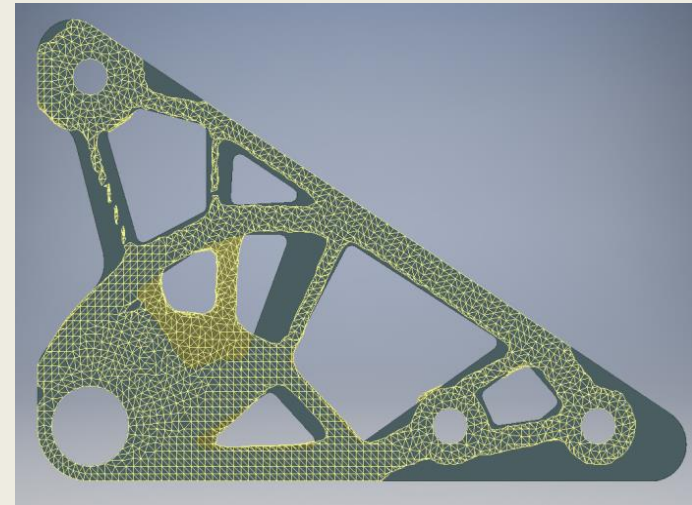
Tamaño mínimo del miembro 0 mm

Resolución de malla  
Espere un tiempo de resolución prolongado.

Baja  Alta

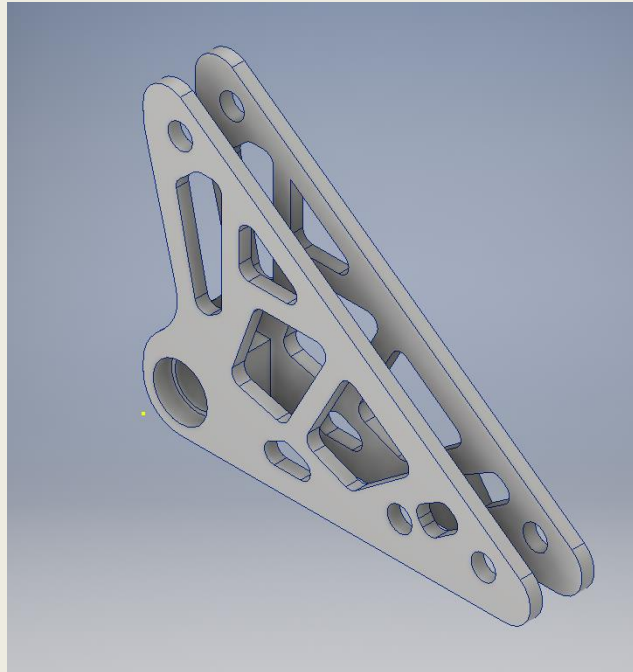
Valor 2,0

Aceptar Cancelar



Configuración de generador de forma

# PROCESO DE OPTIMIZACIÓN



**Rocker optimizado terminado**

# SIMULACIÓN SOFTWARE FEA



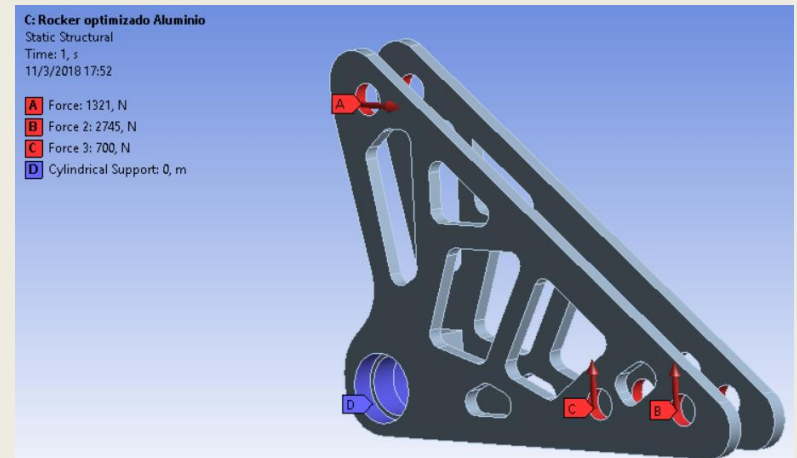
Se modifica el mallado para un valor del Jacobiano cercano a uno, generando un mallado de tipo tetraédrico, con proximidad a las curvaturas.

Mesh Metric	Jacobian Ratio (MAPDL)
<input type="checkbox"/> Min	1,
<input type="checkbox"/> Max	1,7953
<input type="checkbox"/> Average	1,0066

**Mallado de Rocker**

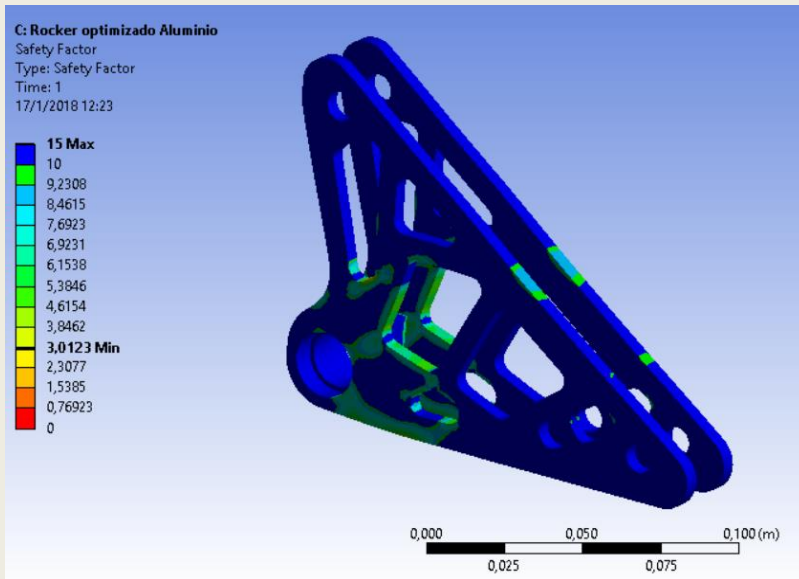
# SIMULACIÓN SOFTWARE FEA

Componente	Valor
Barra Push (C)	2745 N
Conjunto resorte-amortiguador (A)	1321 N
Barra de torsión (B)	700N
Punto de pivote (D)	Fijo

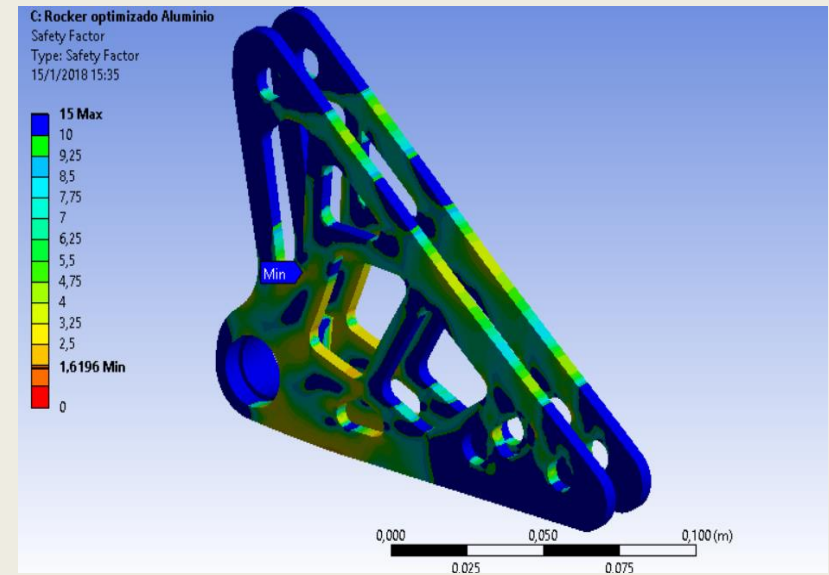


Fuerzas aplicadas en el rocker

# SIMULACIÓN SOFTWARE FEA

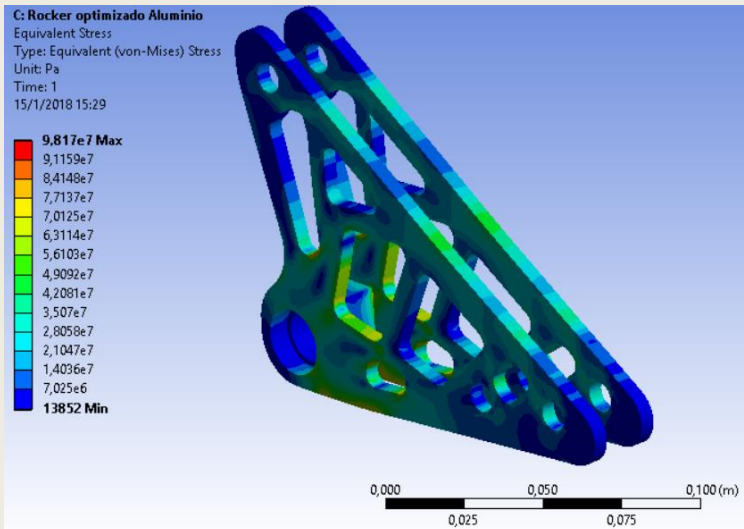


**Factor de seguridad estático Rocker**

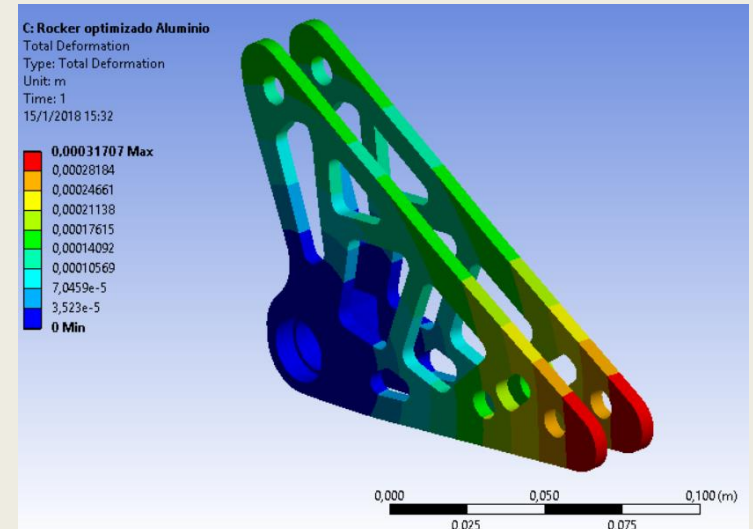


**Factor de seguridad dinámico Rocker**

# SIMULACIÓN SOFTWARE FEA



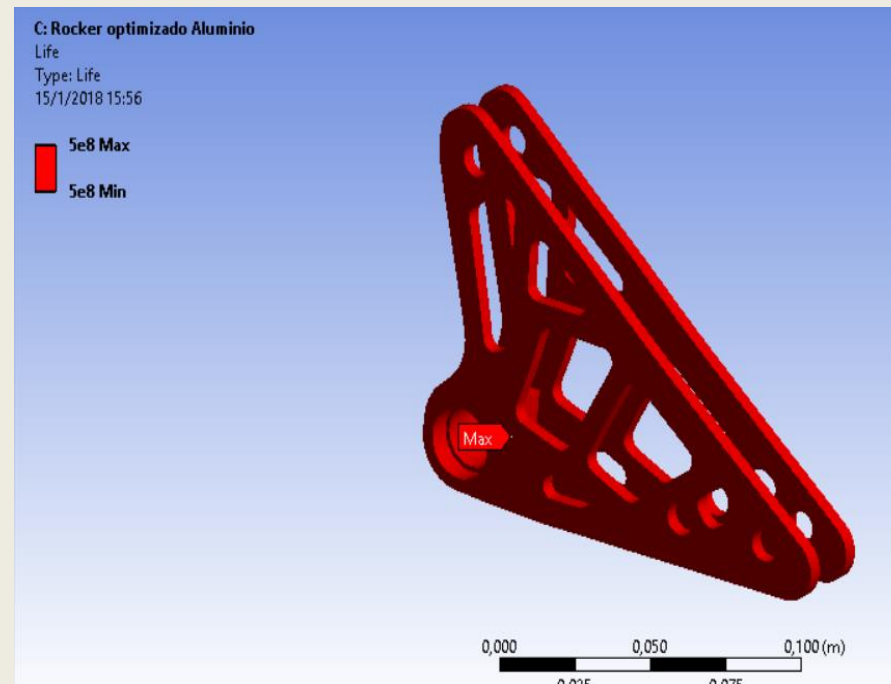
Esfuerzo equivalente en el rocker



Total deformación en el rocker



# SIMULACIÓN SOFTWARE FEA

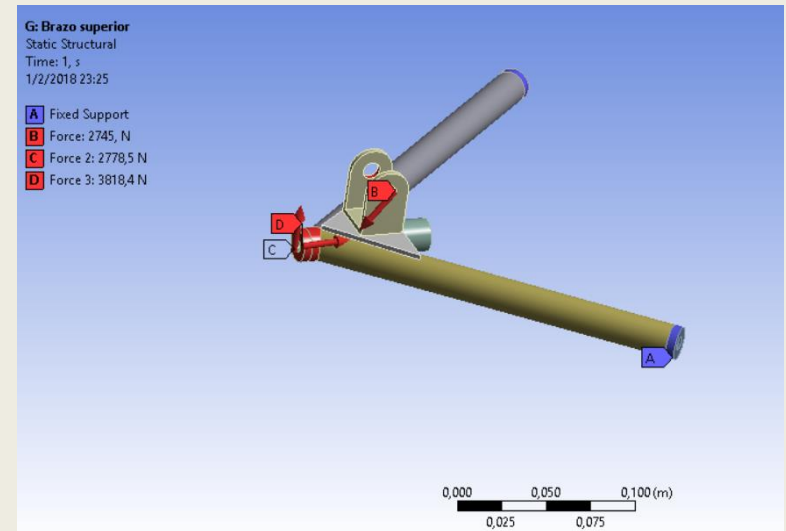


Ciclos de vida del rocker



# SIMULACIÓN SOFTWARE FEA

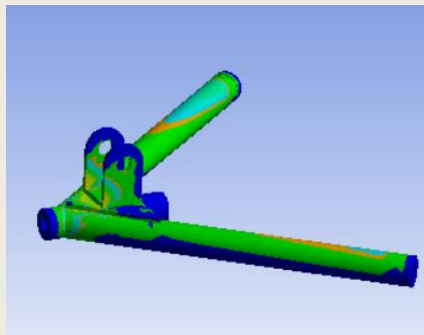
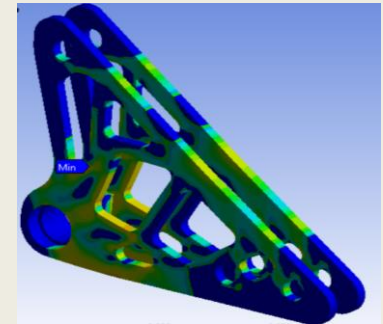
Componente	Valor
Fuerza barra Push(B)	2745 N
Fuerza lateral (D)	3318,5
Fuerza que genera la rueda (C)	2778,5
Punto de anclaje (A)	Fijo



**Fuerzas aplicadas en el brazo superior**

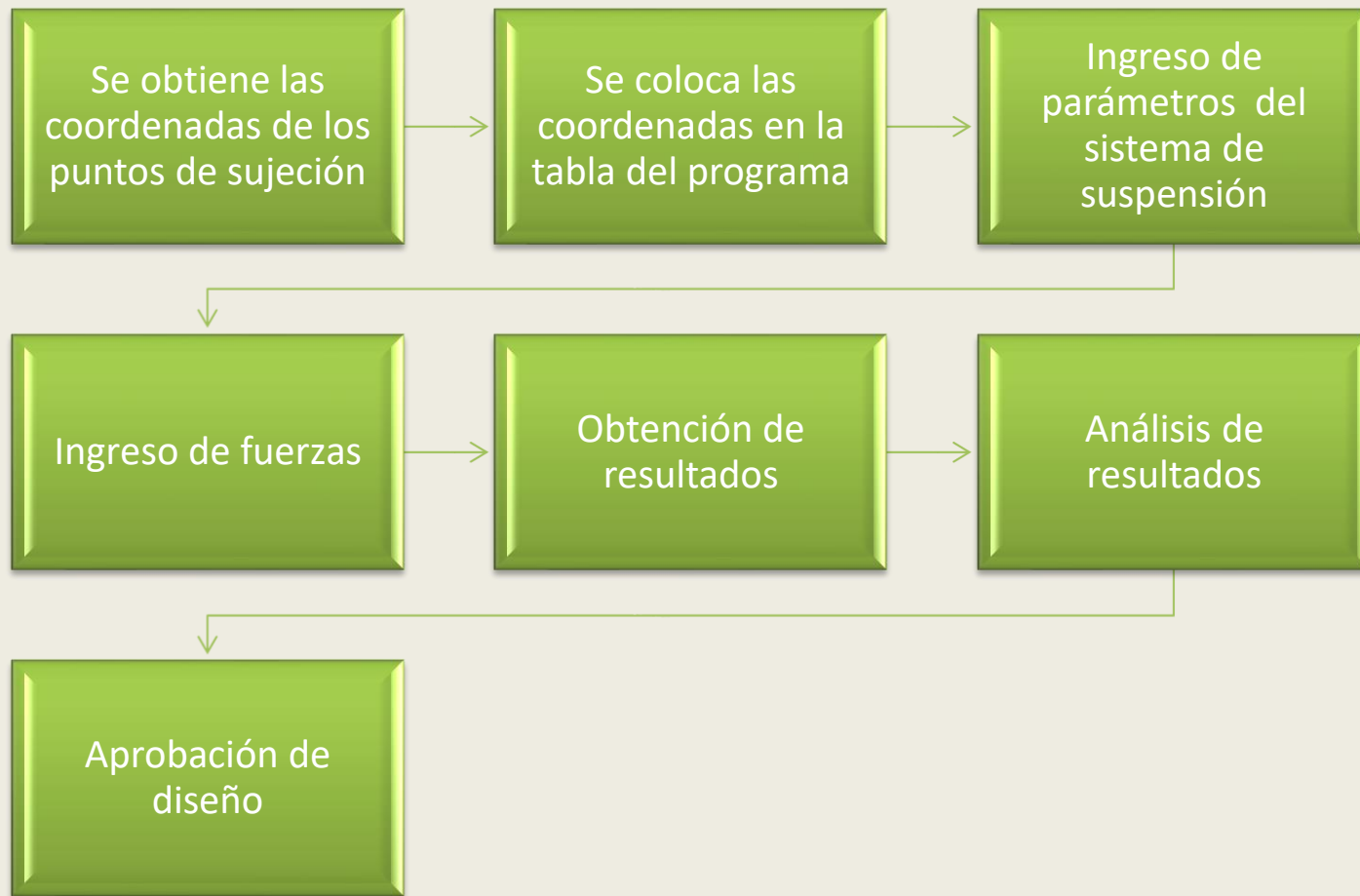
# Resultados del análisis FEA

Resultados Rocker					
Material	Estático			Fatiga	
	Deformación (m)	Equivalente Stress Von Mises(Pa)	Factor de seguridad estático	Factor de seguridad fatiga	Vida Ciclos
Aluminio 7575	0.000463	$1.58 \cdot 10^8$	3.01	1.61	$5 \cdot 10^8$
Acero A36	0.000210	$1.66 \cdot 10^8$	2.76	2.19	$1.08 \cdot 10^{11}$

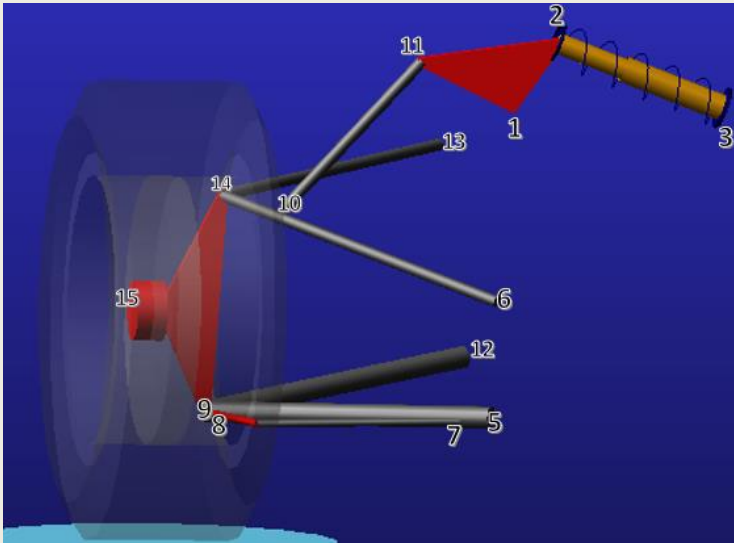


Resultados Brazo Superior					
Material	Estático			Fatiga	
	Deformación (m)	Equivalente Stress Von Mises(Pa)	Factor de seguridad estático	Factor de seguridad fatiga	Vida Ciclos
Aluminio 7575	0.000893	$2.10 \cdot 10^8$	2,042	1,182	$5 \cdot 10^8$
Acero A36	0.000427	$2.24 \cdot 10^8$	1,27	1,53	$1.08 \cdot 10^9$

# PROCESO DE SIMULACIÓN SOFTWARE CAE



# PROCESO DE SIMULACIÓN SOFTWARE CAE



Visualización de los puntos para  
obtener las coordenadas .

Hardpoint Modification Table

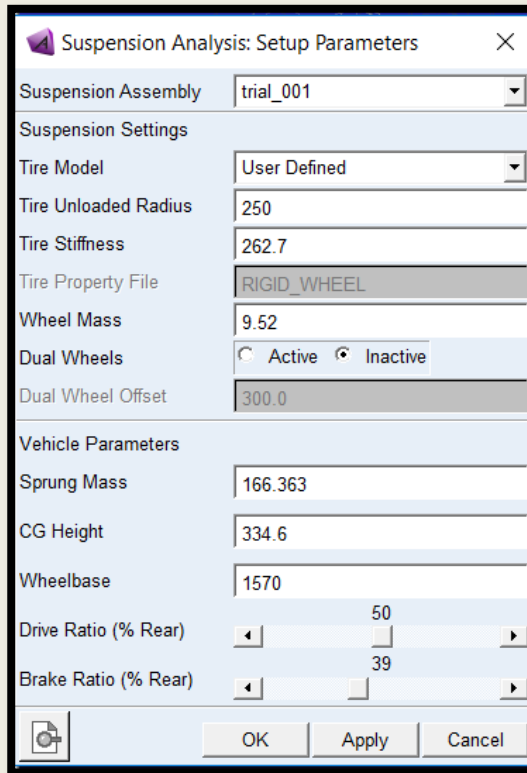
Assembly Subsystem trial\_001.sus\_espe\_001

	loc_x	loc_y	loc_z	
hpl_BC	641.0	-250	480	"1"
hpl_BS	641.0	-200	550	"2"
hpl_DC	641	-20.0	480	"3"
hpl_DC2	691.0	-20.0	563.0	"4"
hpl_FLIBJ	460	-300	160	"5"
hpl_FUIBJ	440	-300	288.0	"6"
hpl_ITRJ	470	-320	155	"7"
hpl_LBJ	640.0	-582.0	150.0	"8"
hpl_OTRJ	500	-550	150	"9"
hpl_PROJ	639.0	-500	370	"10"
hpl_PRU	641	-350	530	"11"
hpl_RLIBJ	740	-280	200	"12"
hpl_RUBJ	800	-300	425	"13"
hpl_UBJ	640	-567.0	385.0	"14"
hpl_WC	640.0	-631.0	260.0	"15"

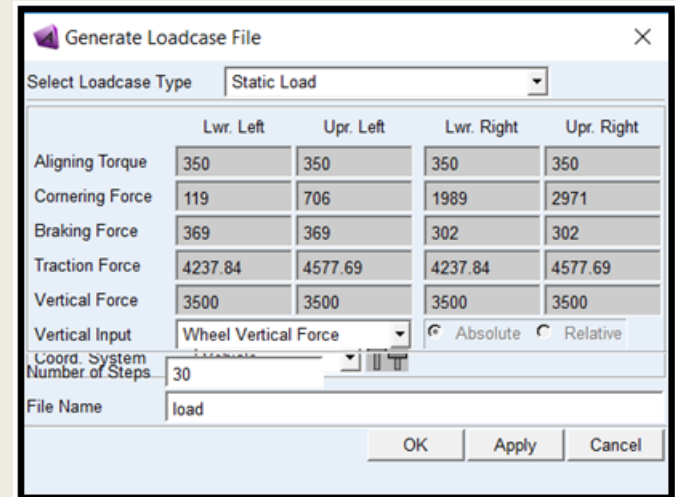
Display: Single and  Left  Right  Bot

Tabla de coordenadas del sistema de  
suspensión

# PROCESO DE SIMULACIÓN SOFTWARE CAE

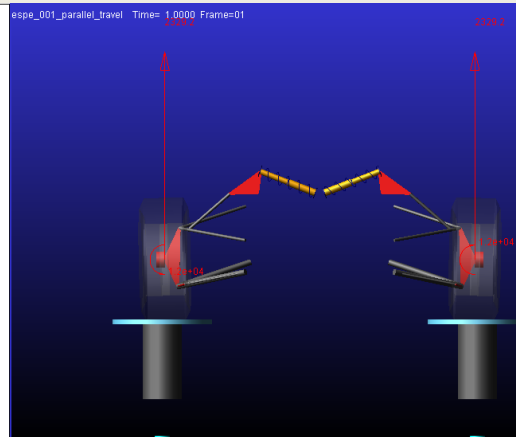
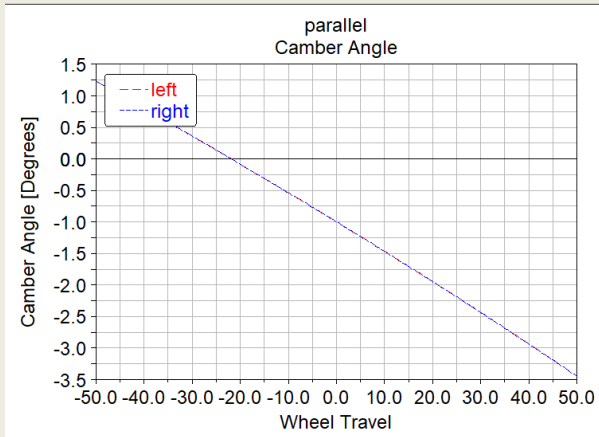


Ingreso de parámetros del sistema de suspensión .

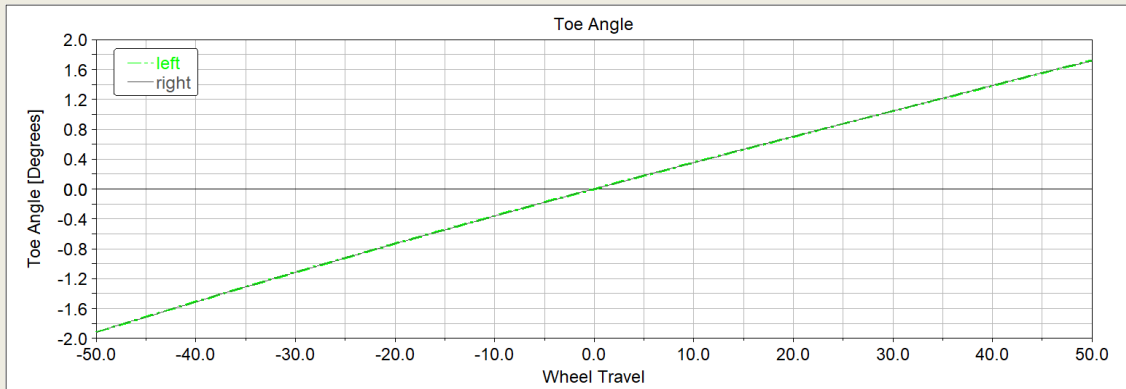


Ingreso de fuerzas

# SIMULACIÓN SOFTWARE CAE

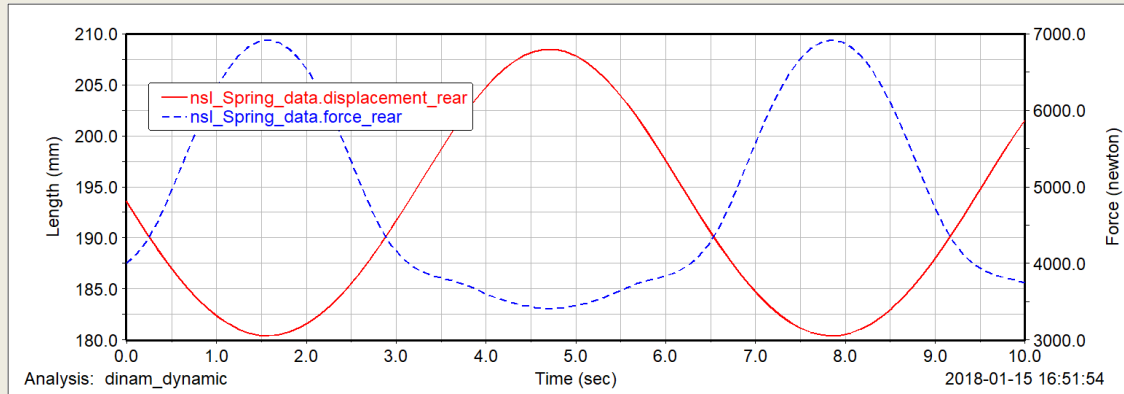


Ángulo camber  
Vs  
Desplazamiento de la rueda.



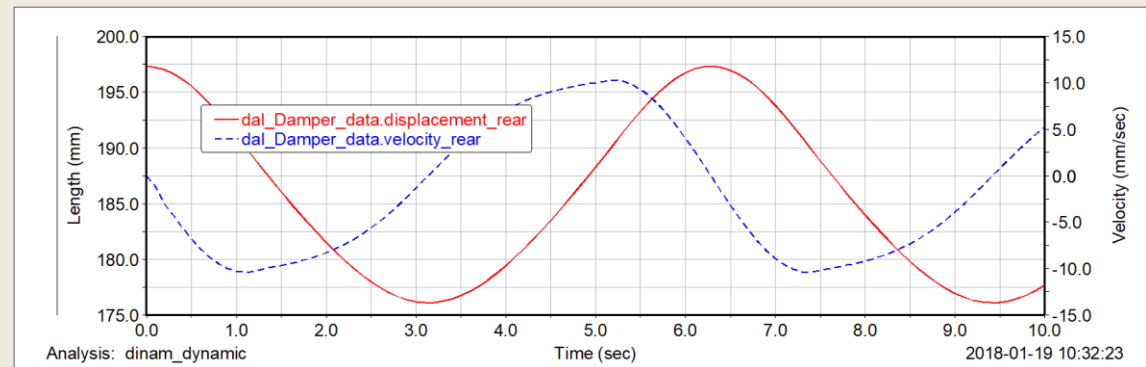
Ángulo TOE  
VS  
trayectoria de la rueda.

# SIMULACIÓN SOFTWARE CAE



Desplazamiento  
Vs  
tiempo.

Longitud del Amortiguador  
Vs  
tiempo.





## Comparación de pesos del sistema de suspensión trasera



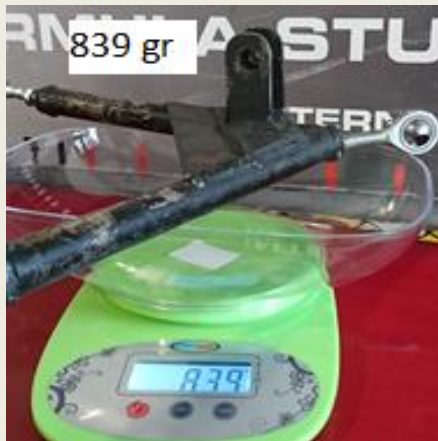
**Acero A36**

**Rocker**

**Porcentaje de reducción de peso = 48.04%**

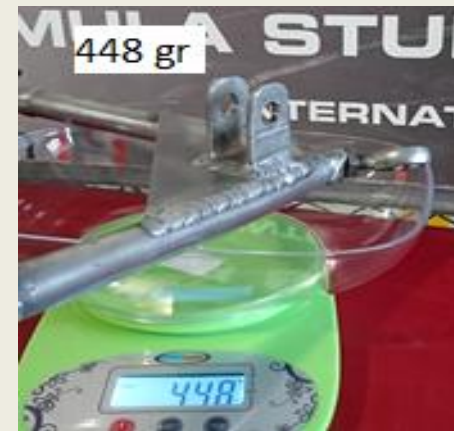


**Aluminio 6061 T6**



**Brazo superior**

**Porcentaje de reducción de peso = 46.6%**



## Tabla de comparación de pesos del sistema de suspensión trasera

Elemento	Masa Anterior (gr)	Masa Actual (gr)	Cantidad
Triángulo superior	839	448	2
Triángulo inferior	712	555	2
Barra push rod	195	41	2
Rocker	487	253	2
Sumatoria	2233	1297	

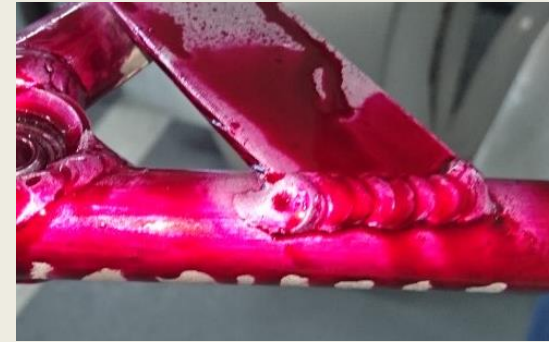
Las más importantes en el análisis de resultados ya que la optimización de pesos es el objetivo primordial de la investigación. El porcentaje que se logró reducir en pesos es del 41.92% (936gr) en todo el sistema de suspensión posterior; el mismo, es un número representativo para que el vehículo pueda desarrollar de mejor manera en la competencia de fórmula SAE.



# Ensayo de soldadura



Limpieza e inspección visual



Aplicación de tinta Penetrante



Aplicación de tinta reveladora



Inspección de puntos rojos

# PRUEBAS FSAE

Las pruebas dinámicas que se realizan para verificar el correcto desempeño del sistema de suspensión trasera optimizada de acuerdo al reglamento de la competencia. A continuación se detalla cada una:

## Resistencia:

Se la realizó en el anillo vial en campus Gral. Guillermo Rodríguez Lara en un circuito de 1.32 km con un tiempo en pista de 38 minutos y un total 22 vueltas



Circuito prueba de resistencia.

# PRUEBAS FSAE

## Autocross:

Se realizó 5 vueltas en un circuito de 550m aproximadamente registrando los tiempo que se muestran el la tabla.



Circuito Prueba Autocross

# Prueba	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Cumplió la prueba
Uno	51,15	14,08	✓
Dos	48,32	14,9	✓
Tres	46,89	15,36	✓

$$V_{prom} = 14,78 \frac{m}{s}$$



# PRUEBAS FSAE

## Aceleración:

La prueba el vehículo FESPE debe recorrer 75 metros en el menor tiempo posible con un máximo de dos intentos.

Los tiempos obtenidos en aceleración fueron entre 5.8 - 6.2 segundos ingresando en el



# Prueba	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Cumplió la prueba
Uno	6,7	14,19	✓
Dos	6,5	14,53	✓
Tres	6,2	15,09	✓
Cuatro	5,8	15,93	✓

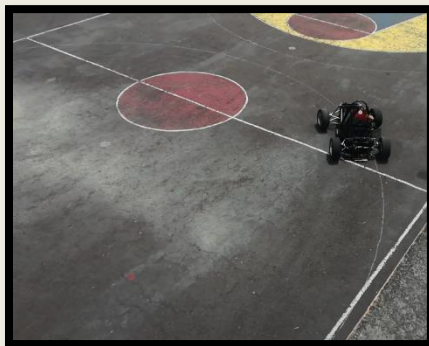
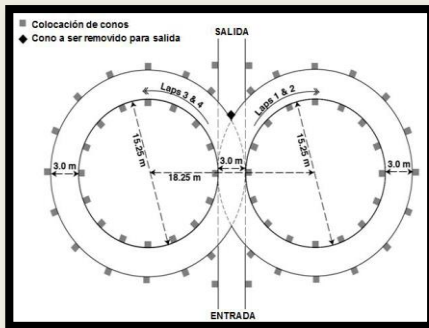
Circuito prueba aceleración

$$V_{prom} = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_n}{n}$$
$$V_{prom} = 11,94 \frac{m}{s}$$

# PRUEBAS FSAE

## Skydpad:

Esta prueba se la realizo en las canchas del campus Latacunga , el circuito tiene dos círculos de 15,25 m de diámetro,



# Prueba	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Cumplió la prueba
Uno	26,42	3,63	✓
Dos	21,85	4,39	✓
Tres	19,15	5,01	✓
Cuatro	17,36	5,51	✓
Cinco	16,76	5,74	✓
Seis	14,41	6,65	✓

$$V_{prom} = 5,16 \frac{m}{s}$$

# VIDEO PRUEBAS FSAE



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



# Análisis financiero

N°	Ítem	Cantidad	Precio Unitario	Total
1	Mecanizado CNC	2	300.00	600.00
2	Carcasas de rótulas.	2	15.00	30.00
3	Separadores o bocines	16	4.00	64.00
4	Suelda	5h	\$20/h	100.00
5	Corte por agua	2	45.00	90.00
6	Resortes	2	35	70
<b>Total</b>				<b>\$954</b>

Los gastos de construcción tuvieron un costo de \$954; en la tabla superior se puede observar que el mayor gasto se presenta en la construcción del rocker por mecanizado CNC, por el tiempo que toma construir todo el elemento.



# Análisis financiero

El material que se utilizó en general es aluminio, para cumplir el objetivo principal del trabajo de investigación; la adquisición de este se encuentra detallado en la siguiente tabla.

Gastos adquisición del material					
N°	Ítem	Cantidad	Precio Unitario	Precio de importación	Total
1	Tubería de aluminio 6061 T6 (1m)	2	30.00	120	150.00
2	Eje de aluminio 6061 T6 (1m)	2	50.00	100	150.00
3	Placa de aluminio 7075 (30x30cm)	1	20.00	-	20.00
4	Bloque de aluminio 7075	1	200.00	-	200.00
5	Eje de aluminio 7075 (50cm)	1	40.00	-	40.00
<b>TOTAL</b>					<b>\$560.00</b>



# CONCLUSIONES

- Se comprobó que la relación de peso del sistema de suspensión fabricado en aluminio con respecto al acero es menor en un 41.92% (936gr); además, el aluminio 6061-T6 es 2.2% mayor en resistencia que el acero A36; por lo que nos permite reducir pesos y cumplir con uno de los objetivos del presente trabajo de titulación.
- Las pruebas dinámicas y estáticas de los componentes del sistema de suspensión no existió ningún tipo de variaciones de los elementos o desgaste a la fatiga del material comprobando de forma experimental lo que se observó en simulación de esfuerzos y pruebas de ruta.



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# RECOMENDACIONES

- Para trabajos posteriores se recomienda realizar un estudio más específico en los materiales que dispone el mercado local y así reducir costos de importación que son significativos en este proyecto.
- Para que los resultados sean más cercanos a la realidad se recomienda realizar ensayos destructivos en las partes que componen el sistema de suspensión posterior del prototipo para competencia en fórmula SAE.



**ESPE**

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA