



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

UNIVERSIDAD DEL AZUAY
DEPARTAMENTO DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN SISTEMAS VEHICULARES

***Validación de metodologías empleadas en simulaciones CAE
utilizadas para el desarrollo del prototipo SHELL ECO-MARATHON de
la Universidad del Azuay.***

**Trabajo de graduación previo a
la obtención del título de Magister en Sistemas Vehiculares.**

AUTOR:

Ing. Felipe Gonzalo Muñoz Arévalo

DOCENTE:

Mgtr. Ing. Robert Esteban Rockwood Iglesias

CUENCA – ECUADOR

2020

Dedicatoria.

El presente trabajo de investigación va dedicado para mi mamá Isabel la cual siempre me ha apoyado en todas mis aventuras, por todas sus enseñanzas, consejos y paciencia ya que gracias a su apoyo incondicional me ha permitido alcanzar logros importantes en mi vida tanto personal como profesional, a la memoria de mi papá Gonzalo que desde el cielo siempre nos cuida, guía y protege, gracias por enseñarme a no rendirme y alcanzar mis metas, dedico el presente trabajo de investigación mis hermanos Catalina y Patricio que siempre han estado pendientes de mi, incondicionales en todo momento y me han acompañado siempre, a mis sobrinos Martín, Jonnathan, Renato, Mateo y David, a mis cuñados Juan y María y sin olvidarme de mi abuelita Ines los cuales siempre me han impulsado a ser cada día mejor, para ustedes mi eterno agradecimiento siempre serán la gasolina que impulsa el motor de mis sueños.

Agradecimientos.

Quiero agradecer con todo mi corazón en primer lugar a Dios por permitirme tener a una familia que siempre ha estado apoyandome, por la vida y por todas las bendiciones que me brinda día tras día, a mi mamá Isabel a mis hermanos Catalina y Patricio, a mi papá Gonzalo por todas las enseñanzas y dedicación que nos supo brindar mientras estaba con nosotros en la tierra, a mis cuñados Juan y María, a mis sobrinos Martín, Jonnathan, Renato, Mateo y David los cuales son un pilar fundamental en mi vida, mil gracias por todo su apoyo que siempre me han dado.

Un agradecimiento muy especial al Mgtr. Ing. Robert Rockwood por toda su paciencia, dedicación y ayuda incondicional en la dirección de este trabajo de investigación, por el apoyo brindado en mi participación en el III Congreso Internacional de Ingenierías desarrollado en la ESPOCH, de todo corazón mil gracias, de igual manera gracias infinitas por todo el apoyo al Mgtr. Ing. Francisco Torres por haberme permitido realizar el trabajo en el prototipo Shell Eco-Marathon y a todo el equipo por el apoyo, al Mgtr. Ing. Gabriel Delgado por su ayuda incondicional en el desarrollo de la investigación, un agradecimiento enorme al Ing. Fabian Romero un amigo incondicional desde las épocas de la Universidad gracias por toda la ayuda, por su amistad y a todas las personas que pusieron lo mejor de sí para el desarrollo del presente trabajo.

Felipe Gonzalo Muñoz Arévalo.

Resumen:

En el presente estudio se analiza el desempeño estructural del prototipo manufacturado por el equipo de la universidad del Azuay, que participó en la competencia Shell Eco-marathon en el año 2019; se presentan los resultados obtenidos a través de simulaciones computacionales CAE y luego los obtenidos al instrumentar algunos puntos de interés con galgas extensiométricas, los resultados muestran que existen condiciones de operación que no han sido caracterizados correctamente durante el estudio CAE, como: cargas generadas durante el ingreso y salida del piloto al habitáculo, por otro lado se logró entender el nivel de correlación que existe entre las técnicas de instrumentación para la medición, adquisición y presentación de los valores de esfuerzos y deformaciones que se están generando en la barra de pruebas, y posteriormente en el chasis del prototipo. La instrumentación se realizó considerando las recomendaciones realizadas por los fabricantes de galgas extensométricas Omega Engineering, HBM y la norma ASTM E251-1999 (2014), “Métodos de prueba estándar para las características de rendimiento de galgas extensométricas de resistencia unidas a componentes metálicos”.

Palabras clave:

Diseño mecánico, ingeniería asistida por computador, instrumentación con galgas extensiométricas.

ABSTRACT

This study analyzed the structural performance of the prototype manufactured by the team of the University of Azuay that participated in the 2019 Shell Eco-marathon competition. The results obtained through CAE computational simulations and those obtained by implementing some points of interest with strain gauges were shown. The results confirm that there are operating conditions that have not been correctly characterized during the CAE study, such as loads generated during the entry and exit of the pilot to the passenger compartment. It was possible to determine the level of correlation between the instrumentation techniques for the measurement, acquisition and presentation of the stress and strain values that are being generated in the test bar and in the prototype chassis. The instrumentation was carried out considering the recommendations of the manufacturers of strain gauges Omega Engineering, HBM, ASTM E251-1999 (2014) and "Standard test methods for performance characteristics of resistance strain gauges bonded to metal components".



Translated by
Ing. Paúl Arpi

ÍNDICE DE CONTENIDOS.

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
INTRODUCCIÓN.....	1
METODOLOGÍA Y MÉTODOS.....	2
2.1 Selección de galgas extensiométricas, instrumentación del sistema y adquisición de datos.....	2
2.2 Prueba experimental para convalidar la metodología.....	7
2.3 Definición de zonas de estudio en el bastidor del prototipo “Shell eco-marathon”.....	10
2.4 Descripción y pruebas en el prototipo.....	12
RESULTADOS.....	13
CONCLUSIONES.....	16
BIBLIOGRAFÍA.....	17

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de esfuerzo y deformación obtenidos.....	8
Tabla 2. Comparación de resultados de esfuerzo y flexionante.....	9
Tabla 3. Comparación de resultados de deflaexión.....	9
Tabla 4. Estimación del error relativo porcentual al comparar el esfuerzo medido en relación al esfuerzo obtenido en la simulación CAE.....	10
Tabla 5. Valores máximos en las pruebas realizadas de manera estática con el piloto de pie.....	14
Tabla 6. Comparación de resultados.....	14

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Galga extensométrica.....	3
Figura 2. Funcionamiento de la galga extensométrica dentro de la zona elástica.....	3
Figura 3. Tipos de galgas extensométricas en base a su geometría.....	4
Figura 4. Características de galgas uniaxiales.....	5
Figura 5. Etapas de procesamiento de señales.....	6
Figura 6. Software para presentación de datos de datos en la pantalla de la PC y tarjeta de adquisición de datos.....	7
Figura 7. Puente de Whwatstone.....	7
Figura 8. Pruebas de flexión en el perfil.....	8
Figura 9. Dominio computacional discretizado.....	10
Figura 10. Distribución del peso del piloto sobre el bastidor.....	10
Figura 11. Esfuerzos en el soporte inferior de la rueda posterior.....	11
Figura 12. Esfuerzos en el soporte superior de la rueda posterior.....	11
Figura 13. Zona de soporte de la mangueta de rueda.....	12
Figura 14. Colocación de galgas y designación de cada una para el análisis.....	12
Figura 15. Prueba estática y dinámica.....	13
Figura 16. Pruebas estáticas donde el piloto se encuentra de pie en el centro del prototipo.....	13
Figura 17. Pruebas estáticas con el piloto en posición de competencia.....	15
Figura 18. Pruebas dinámicas de aceleración y frenado.....	15

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, dentro del proceso de diseño de elementos mecánicos se viene utilizando herramientas computacionales de diseño asistido por ordenador (CAD) y de Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE), las cuales mejoran significativamente la productividad del proceso de diseño; así también han demostrado su idoneidad al simular con precisión la respuesta de elementos mecánicos de acuerdo a las condiciones de operación programadas en cada uno de los análisis. Así fabricantes y personas que se encuentran vinculados en el campo del diseño han acortado los tiempos de estudio y han logrado concepciones geométricas diferentes, nuevas aplicaciones de materiales, reducir espesores de elementos, reducir peso y un sin número de mejoras.

Sin embargo, para lograr la expectativa de diseño es indispensable caracterizar correctamente las cargas, las propiedades de los apoyos, las propiedades de los materiales, discretizar adecuadamente el entorno, utilizar correctamente las técnicas con las que se estructuran los diferentes análisis CAE, etc. Caso contrario la propuesta esbozada en los programas no cumplirán con la expectativa de diseño. El presente proyecto de investigación nos permitirá conocer la correlación entre el pronóstico de desempeño y la respuesta física del bastidor del vehículo prototipo denominado “*morlaco*”, el cual participó en la competencia “*Shell eco-marathon Américas, 2019*”, representando al equipo de la Universidad del Azuay. Para ello se compararán los resultados de las simulaciones CAE y de los resultados obtenidos a partir del análisis de la deformación de galgas extensiométricas instaladas en puntos de interés del bastidor. La comparación de estos escenarios permitirá comprender de mejor manera aspectos relevantes al llevar a cabo en una simulación computacional. Al revisar experiencias previas, vale la pena analizar el caso de estudio presentado por V. Deulgaonkar, A. Mantani [1] quienes convalidaron el diseño CAE de una plataforma montante para el sector del transporte, analizando las deformaciones en la estructura, establecen que la correlación entre el método CAE y el experimental es estrecho, mencionan que el uso de galgas extensiométricas en puntos críticos de la estructura les permitió comprender el comportamiento de la misma con el uso de cargas específicas a lo largo de la plataforma. En la publicación presentada por William B. Riley Y Albert R. George [2] convalidan un análisis torsional del chasis de un prototipo Fórmula SAE utilizando una herramienta CAE y un método experimental, en los experimentos y en los análisis CAE que desarrollan establecen tanto la deformación como el esfuerzo torsional, con diferencias de un máximo de 51% en la deformación y un 30% en el esfuerzo torsional; exponen que estas diferencias se deben a las derivas de las galgas extensiométricas y los puntos donde son colocados los relojes de carátula, como conclusiones establecen que es importante conocer los factores que influyen en el vehículo en carretera, la importancia de la rigidez de la suspensión y su influencia para el diseño del bastidor incluyendo su propia rigidez, además mencionan que el uso de un modelado matemático, junto con análisis mediante herramientas CAE y un modelo experimental son indispensables para entender las rutas de carga y con ello mejorar el diseño del bastidor y las contribuciones de la suspensión en la estabilidad del mismo. En la publicación presentada por Kouichi MIYAGAWA; Yoshiyuki MARUYAMA; Masataka

NASADA; Paolo DI CARLO; Giancarlo CONTI; Valerio CIBRARIO [3] realizan pruebas para la obtención de esfuerzos y deformaciones en la estructura de un vehículo, las pruebas que realizan son basadas en la normativa existente donde toman en cuenta el peso del piloto y su acompañante, la cantidad de combustible, velocidades de prueba, presión de inflado de los neumáticos y radio de giro del vehículo, se realiza un análisis con una herramienta CAE para establecer los puntos de interés donde se colocarán las galgas extensiométricas, mencionan que la correlación entre los valores obtenidos de manera estática y dinámica son cercanos a los calculados, la experimentación se lo realiza en un vehículo con todos sus componentes, como conclusión por parte de los autores establecen que el punto crítico de la estructura es en los soportes de la suspensión y que los métodos utilizados son los correctos para la obtención de la información requerida

Es así, que actualmente se vienen utilizando las galgas extensiométricas, junto con los sistemas de adquisición y procesamiento de datos y señales, para evaluar el desempeño estructural de componentes mecánicos en pruebas físicas, y monitoreo en línea, con precisión estable de acuerdo a la naturaleza de los componentes estudiados y las características funcionales.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para realizar la convalidación del prototipo SHELL ECO-MARATHON de la Universidad de Azuay se ha tomado como plataforma de estudio el chasis diseñado por los estudiantes de Ingeniería Mecánica Automotriz que es propulsado por un motor de gasolina, el cual fue diseñado utilizando herramientas CAE y actualmente se encuentra construido. Para la convalidación del diseño se optó por:

- Seleccionar las galgas extensiométricas.
- Validar el proceso de estimación de esfuerzos a través de una prueba preliminar.
- Estudio y caracterización del diseño del bastidor construido por el equipo de estudiantes de la Universidad del Azuay.
- Análisis de resultados CAE en las zonas de interés.
- Evaluación de prestaciones del bastidor a partir de la medición con galgas extensométricas.
- Descripción y análisis de pruebas físicas.

2.1 Selección de galgas extensiométricas, instrumentación del sistema y adquisición de datos.

El uso de las galgas extensométricas en el estudio del comportamiento de elementos mecánicos es muy utilizado en distintos ámbitos de la Ingeniería por lo que es necesario comprender su funcionamiento.

galgas extensiométricas

Las Galgas extensiométricas, como menciona en su publicación Alzate, Montes, Silva [4] es un sensor basado en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, lo que indica que un esfuerzo que sea aplicado a un elemento en el que se encuentre adherido, deforma a la galga por lo que producirá una variación en su resistencia eléctrica, ver figura 1.

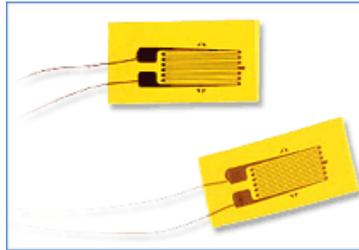


Figura 1. Galga extensiométrica.[5]

Como menciona en su página oficial en la sección de transductores OMEGA ENGINEERING [5] las galgas extensiométricas deben de trabajar dentro de la zona de deformación plástica ya que si sobrepasa su límite, la galga puede presentar valores erróneos de medición y daño del elemento de medición , ver **figura 2**.

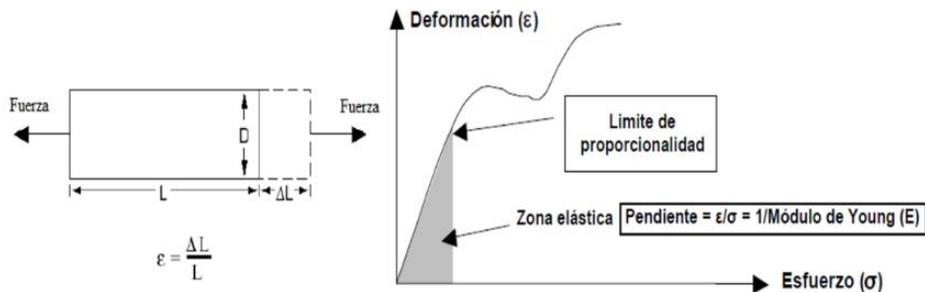


Figura 2. Funcionamiento de la galga es dentro de la zona elástica. [6]

Como se expone en el texto presentado por OMEGA ENGINEERING [7] las magnitudes de medidas de las galgas extensiométricas son tan pequeñas que estas se les cuantifica en micro deformaciones ($\mu\epsilon$) por lo que la variación del voltaje que se obtendrá debido a la deformación del elemento es pequeña, para realizar la medición de la galga extensiométrica y obtener las deformaciones (ϵ) producidas se debe de cumplir la siguiente condición expresada en la ecuación (1) donde se requiere el cambio del valor de la resistencia (ΔR), el valor de la resistencia de la galga (R) y el valor del factor de la galga (GF):

$$\epsilon = \frac{R}{\Delta R} * GF$$

Ecuación 1: Obtención de micro deformaciones en una galga extensiométrica

Para someter un elemento a una deformación longitudinal se debe de aplicar una fuerza, Mott, Robert [8] indica que el esfuerzo axial es la resistencia interna ofrecida por una unidad de área del material del cual está hecho un miembro a la acción de una carga externa aplicada, en el libro de Shigley, J [9] se presenta la ecuación del esfuerzo axial (σ) que está relacionado con la carga (P) y la geometría de la sección transversal (A), (ecuación 2)

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Ecuación 2: Esfuerzo axial en función de la carga y la sección transversal.

El cambio de longitud obtenido al aplicar una fuerza a una pieza unidimensional que no sobrepase el límite de la zona elástica está dado por la Ley de Hooke por lo que se obtiene la relación entre el esfuerzo con el módulo de elasticidad (E) o también llamado módulo de Young y la deformación unitaria (ϵ), ver ecuación 3.

$$\sigma = \frac{P}{A} = E * \epsilon$$

Ecuación 3: Esfuerzo axial en función del módulo de elasticidad y la deformación unitaria

Para determinar el esfuerzo a través de una galga extensiométrica se debe de realizar la correlación entre el valor de voltaje obtenido en base a una carga aplicada sobre el material y transformarla en deformación.

Selección de galgas extensiométricas.

En el mercado existe un sin número de tipos de galgas extensiométricas para diversas aplicaciones, como menciona Hoffman, K [10], las más comunes se pueden clasificar en base al material constructivo del elemento sensible y según su geometría.

Según el tipo de material de la base sensible como expone en una presentación web Loaiza, Luis [11] existen galgas de hilo metálico o de película metálica, por otra parte las galgas extensiométricas según su forma en base a la tesis presentada por Sandoval, Claudio [12] se clasifican en galgas uniaxiales, biaxiales y de tipo roseta, ver **figura 3**.

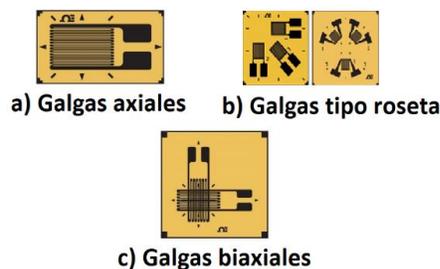


Figura 3. Tipos de Galgas extensiométricas en base a su geometría. [13]

Los parámetros de selección de las galgas, en base a la página oficial de HBM [14] recomienda seguir los siguientes pasos:

- Definir en que se utilizarán las galgas.
- Su geometría.
- Tipo de construcción de la galga.
- Tipo de conexionado.
- Adaptación a la incidencia de la temperatura.
- Largo de la rejilla de medición.
- Resistencia de la galga.

Las galgas seleccionadas para realizar las pruebas de convalidación son de la casa OMEGA, la selección se basa en el estudio de los esfuerzos que se realizó en la simulación CAE, uno de los parámetros importantes es el tipo de material el cual se encuentra fabricado el chasis, además se eligió las galgas en base a la disponibilidad en el mercado, las galgas que se adquirieron son uniaxiales, las mismas fueron seleccionadas a través del catálogo oficial de OMEGA ENGINEERING [15] en donde se pueden ver las características dimensionales y demás parámetros, ver **figura 4**.

Se muestra en su tamaño real: 11,4 mm  No se muestran los conductores	SGD-7/350-LY11	350	8,50 3,10 11,40 5,10 (0,256) (0,122) (0,449) (0,201) Patrón lineal de pequeño tamaño de 120 Ω	15	Conductores planos	ST
	SGD-7/350-LY13	350		20	Conductores planos	AL
	SGD-7/350-LY41	350		15	Zapatillas soldadas	ST
	SGD-7/350-LY43	350		20	Zapatillas soldadas	AL

Figura 4. Características de galgas uniaxiales. [16]

Por ello las galgas seleccionadas son de la serie: SGD-7/350-LY13

Adquisición de datos emitidos por las galgas extensiométricas.

Para las pruebas de convalidación se requiere realizar una instrumentación al chasis, la adquisición de datos como mencionan en su tesis Guailacela, Guachún, Muñoz [17] se requiere de un sensor que transforme el fenómeno en una señal eléctrica para poder cuantificarla, además se requiere adquirir los datos que se encuentran siendo emitidos por el sensor y transformarlo para la su almacenamiento en la PC, ver **figura 5**, además los mismos deben ser entendibles para el ser humano y así comprender el estado funcional del sistema.

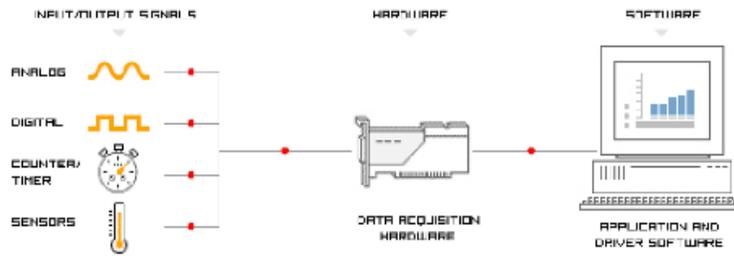


Figura 5. Etapas de procesamiento de señales. [17]

Para la adquisición de datos según como se menciona en la página web oficial de la National Instruments [18] se puede utilizar una interface (tarjeta) que permita el acondicionamiento de las señales que recaba la galga extensiométrica y procesarla para enviar los datos requeridos hacia una PC, para este estudio se utilizó una tarjeta denominada MyDaq (National Instruments®), para obtener el valor de voltaje emitido por las galgas extensométricas y se utilizó el programa LabView para procesar los voltajes emitidos por las galgas, en la página web de la National Instruments [19] expresa que este software de aplicación proporciona flujos de trabajo basados en configuración para probar, monitorear, controlar y analizar sistemas físicos medidos, ver **figura 6**.

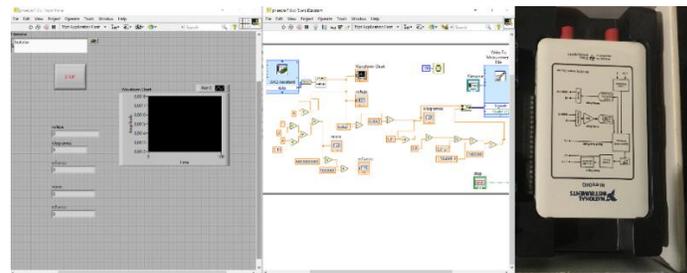


Figura 6. Software para presentación de datos en la pantalla de la PC y tarjeta de adquisición de datos

Para cualquier tipo de medición de elementos de precisión como menciona en su publicación Mayné, Jordi [20] requiere de una tensión de excitación estable, por lo que se utiliza un puente de Wheatstone, la constitución del puente está formado por un grupo de cuatro elementos conectados mediante ramales los cuales son excitados mediante una voltaje externo, la característica principales del Puente de Wheatstone es que cuando el puente se encuentra balanceado el valor del voltaje de salida en las terminales b-d es igual a cero, ver **figura 7**,

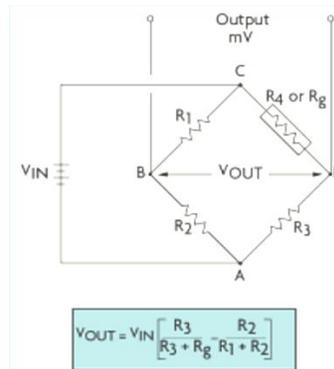


Figura 7. Puente de Wheatstone. [5]

Las galgas extensiométricas pueden estar colocadas en una, en dos o en todas las ramificaciones del puente, así es posible establecer diferentes configuraciones, en su tesis Idrovo & Quintanilla [13] exponen las configuraciones de $\frac{1}{4}$ de puente, $\frac{1}{2}$ puente y puente completo, en la publicación del libro de Forero, Alejandro [21] menciona que si se tiene un mayor número de galgas la medición es mucho más sensible. Para realizar las mediciones de salida del puente en la tesis que presenta Alonso, Anna [22] se menciona que la salida idealmente sea cero, pero esto no se cumple debido a las tolerancias de las resistencias y el comportamiento térmico, por lo que se debe de realizar el equilibrio del puente, existen algunos métodos como menciona en la publicación de NATIONAL INSTRUMENTS [23] en donde la puesta a cero se la puede realizar mediante software o hardware.

2.2 Prueba experimental para convalidar la metodología.

Para realizar la convalidación del prototipo es necesario realizar las pruebas en el bastidor utilizando las galgas extensiométricas en puntos seleccionados en un análisis previo mediante metodología CAE, antes de realizar las pruebas en el prototipo se realiza un ensayo para convalidar el método que se utilizará en las pruebas de evaluación del prototipo. Se utilizó un perfil cuadrado de aluminio estructural 6005 T6 de 25,4x750x1.8 mm, el método de preparación y pegado de las galgas se la realiza utilizando el procedimiento presentado por HBM [24], los materiales utilizados son:

- Alcohol etílico
- Galgas extensiométricas SGD-7/350-LY13
- Terminales BTP-5
- Acetona
- Lija de grano 260 y 360
- Adhesivo conformado a base de cianocrilato de metilo

Además del procedimiento recomendado por parte de HBM se revisaron las recomendaciones establecidas en la norma ASTM E251-1999 (2014) [25] para las pruebas en galgas extensiométricas, la normativa establece el procedimiento estandarizado para la obtención de las características de

galgas extensiométricas, en la norma recomienda que el ambiente en donde se realicen las pruebas debe mantener una temperatura ambiente de 23° C y una humedad relativa de 50 %, la prueba que se realizó, fue someter al perfil a un proceso de flexión con distintas cargas para así obtener los valores de variación de voltaje de las galgas extensométricas, en las pruebas para obtener los valores de esfuerzo se utilizaron pesas de 1, 2, 3 y 4 kg, además se utilizó un reloj de carátula con el cual se midió la deformación en el lugar en donde se colocó la masa, como se mencionó se utiliza el software de LabView y la forma de conexión del Puente de Wheatstone fue de ½ puente lo que indica que se colocó dos galgas activas una se colocó a compresión y la otra a flexión, ver **figura 8**.



Figura 8. Pruebas de flexión en el perfil.

Para transformar la variación de voltaje debida a la deformación de la galga, en deformación lineal se utilizó la ecuación 4 HBM [26]

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{4 * V_0}{k * V_s}\right)$$

Ecuación 4: Micro deformaciones unitarias en función del voltaje y factor de galga.

Resultados obtenidos en las pruebas de flexión en la barra de pruebas.

Los valores de esfuerzo y deformación obtenidos en los ensayos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de esfuerzo y deformación obtenidos.

	Esfuerzo Medido	Deflexión Medida
	Esfuerzo [MPa]	Deflexión [mm]
0 [kg]	0	0
1 [kg]	6,370	-1,59
2 [kg]	14,710	-3,17
3 [kg]	20,910	-4,76
4 [kg]	25,320	-6,35

Para validar el ensayo, se calculó la deflexión en la barra a partir de la ecuación (5), y el esfuerzo flexionante a partir de la ecuación (6) y adicionalmente se llevó a cabo la simulación CAE, los resultados se muestran en las tablas 2 y 3. Para el cálculo de la deformación se relaciona el peso de la carga (P), la longitud de la barra de ensayos (L), el módulo de elasticidad (E) y el segundo momento de área transversal (I).

$$y = \frac{P * L^3}{3 * E * I}$$

Ecuación 5: Deflexión en una viga simplemente empotrada

Para obtener el esfuerzo flexionante se relaciona el momento (M) ejercido por la carga en la distancia establecida, el segundo momento de área transversal (I) inercia del centro de masa (Ix) y la distancia del centroide a la fibra más lejana (y).

$$\sigma = \frac{M * y}{I_x}$$

Ecuación 6: Esfuerzo flexionante

Los resultados de las pruebas, valores calculados y simulaciones CAE se presentan a continuación en la tabla 2 y tabla 3.

Tabla 2. Comparación de resultados de esfuerzo flexionante.

	Esfuerzo Medido	Esfuerzo Calculado	Esfuerzo simulación CAE	
	Esfuerzo [MPa]	Esfuerzo [MPa]	Esfuerzo [MPa] min.	Esfuerzo [MPa] max.
0 [kg]	0	0	0	0
1 [kg]	6,370	5,890	4,570	7,6212
2 [kg]	14,710	11,780	8,440	14,072
3 [kg]	20,910	17,669	12,310	20,25
4 [kg]	25,320	23,559	16,160	26,97

Tabla 3. Comparación de resultados de deflexión

	Deflexión calculada	Deflexión medida	Deflexión en simulación CAE	
	Deflexión [mm]	Deflexión [mm]	Deflexión [mm] min.	Deflexión [mm] max.
0 [kg]	0	0	0	0
1 [kg]	-1,26022	-1,59	-1,2479	-1,4039
2 [kg]	-2,52044	-3,17	-2,3479	2,6413
3 [kg]	-3,78066	-4,76	-3,447	-3,878
4 [kg]	-5,04088	-6,35	-4,577	-5,116

Una vez obtenidos los valores se realiza la estimación del valor de error relativo porcentual entre los valores obtenidos en la simulación CAE y los valores de esfuerzo medidos los cuales se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Estimación del error relativo porcentual al comparar el esfuerzo medido, en relación al esfuerzo obtenido en la simulación CAE.

	Esfuerzo Medido	Esfuerzo simulación CAE	Error %
	Esfuerzo [MPa]	Esfuerzo [MPa]	Promedio de rango
0 [kg]	0	0	0
1 [kg]	6,370	6,096	4,31
2 [kg]	14,710	11,256	23,48
3 [kg]	20,910	16,280	22,14
4 [kg]	25,320	21,580	14,77

2.3 Definición de zonas de estudio en el bastidor del prototipo “Shell eco-marathon”

El chasis del prototipo fue diseñado en base a tres casos de carga: análisis estático, análisis cuasi estático durante aceleración, y análisis cuasi estático durante frenado. El modelo se concibió en base a la utilización de algoritmos de optimización topológica estructural enfocados a disminuir el peso y mantener la rigidez estructural. La **figura 9**, muestra el dominio computacional discretizado del espécimen de estudio, la **figura 10**, muestra junto al modelo discretizado las restricciones y cargas aplicadas, para la aplicación de la carga que ejerce el piloto, se utilizó la ecuación 7 basado en el estudio realizado por Chandler [27], a través de la cual se distribuye a lo largo del chasis el peso del piloto. El peso del piloto tomado para las pruebas y análisis es de 57 kg.

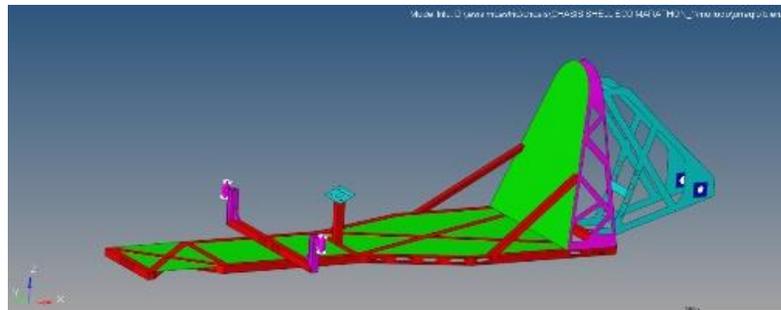


Figura 9. Dominio computacional discretizado

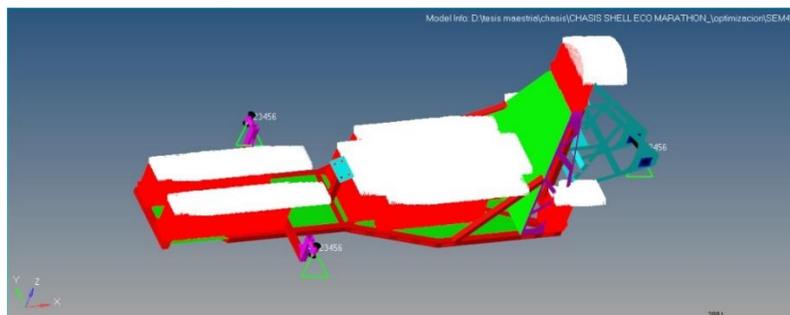


Figura 10. Distribución del peso del piloto sobre el bastidor.

$$Y = -767.67x^2 + 1405.5x - 95.66$$

Ecuación 7: Aplicación del modelo de Chandler (1975) para la distribución del peso del piloto a lo largo del chasis.

El dominio computacional se compone de un total de 539100 elementos los cuales se encuentran combinados entre elementos tipo QUADS y TRIAS (elementos tipo cascarón -2D-).

Del estudio del diseño CAE se determinaron las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las cuales son: soporte inferior de la rueda posterior, zona superior de la rueda posterior y en el soporte de la mangueta de las ruedas delanteras.

Las figuras 11, 12 y 13, muestran el esfuerzo axial en el soporte inferior de la rueda posterior, soporte superior de la rueda posterior, y acople de la mangueta delantera así como el lugar seleccionado para la ubicación de las galgas extensiométricas uniaxiales (A) (B) (C) y (D), se puede apreciar que los esfuerzos máximos (visualizados de color rojo) oscilan entre 5 y 104,9 MPa, en la zona de color naranja se encuentra en un valor entre -0.674 y 5 MPa. Las zonas escogidas para la colocación de la galga extensiométrica responden a la imposibilidad de ubicarlos en la zona de alta concentración de esfuerzos, por restricciones geométricas.

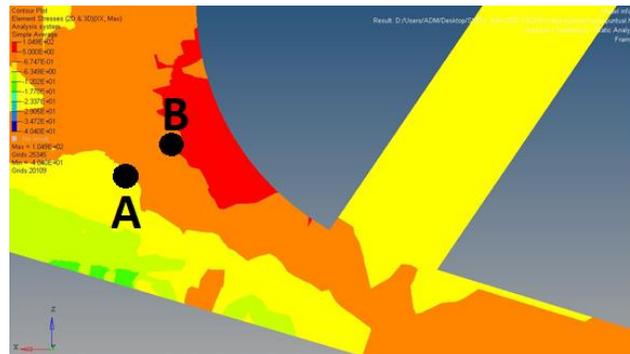


Figura 11. Esfuerzos en el soporte inferior de la rueda posterior.

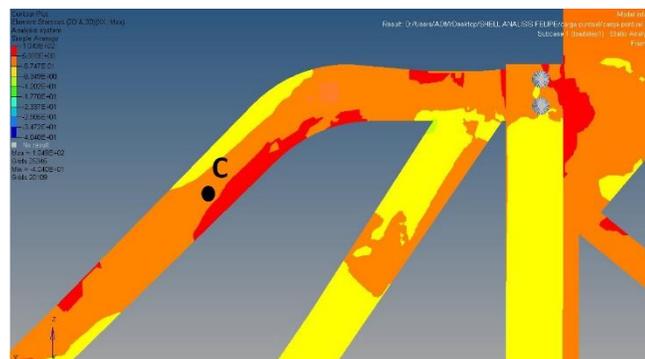


Figura 12. Esfuerzos en el soporte superior de la rueda posterior.

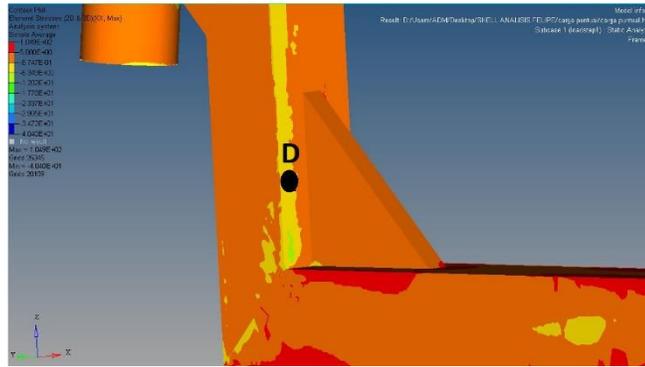


Figura 13. Zona de soporte de la mangueta de rueda.

2.4 Descripción y pruebas en el prototipo.

Tomando en cuenta la correlación de los valores obtenidos en las pruebas de la barra a flexión se procede a realizar el pegado de las galgas en los puntos establecidos, y se designó una numeración para poder identificar los valores de las deformaciones normales que estarán sometidas cada una de las galgas colocadas en el bastidor para realizar las pruebas, ver **figura 14**

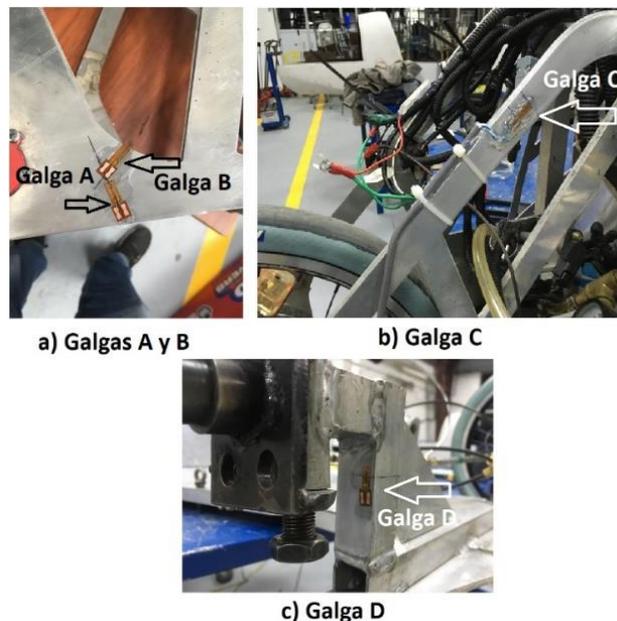


Figura 14. Colocación de galgas y designación de cada una para el análisis.

Una vez colocadas las galgas extensiométricas se realizaron las pruebas estáticas del prototipo con el peso del piloto, en las pruebas estáticas se desarrollarán de dos maneras una en el cual el piloto se encuentra de pie en el centro del prototipo y otra en donde el piloto se encuentra en la posición casi horizontal la cual es la posición en la que se coloca al momento de la carrera, y las pruebas dinámicas que se realizan al prototipo consisten en hacer que acelere a su velocidad máxima y luego se accione el freno a su máxima capacidad ver **figura 15**.



Figura 15. Prueba estática y dinámicas.

3. RESULTADOS.

Los resultados de la deformación de las galgas extensiométricas instrumentadas en el prototipo, durante las pruebas estáticas se muestran en la figura 16.

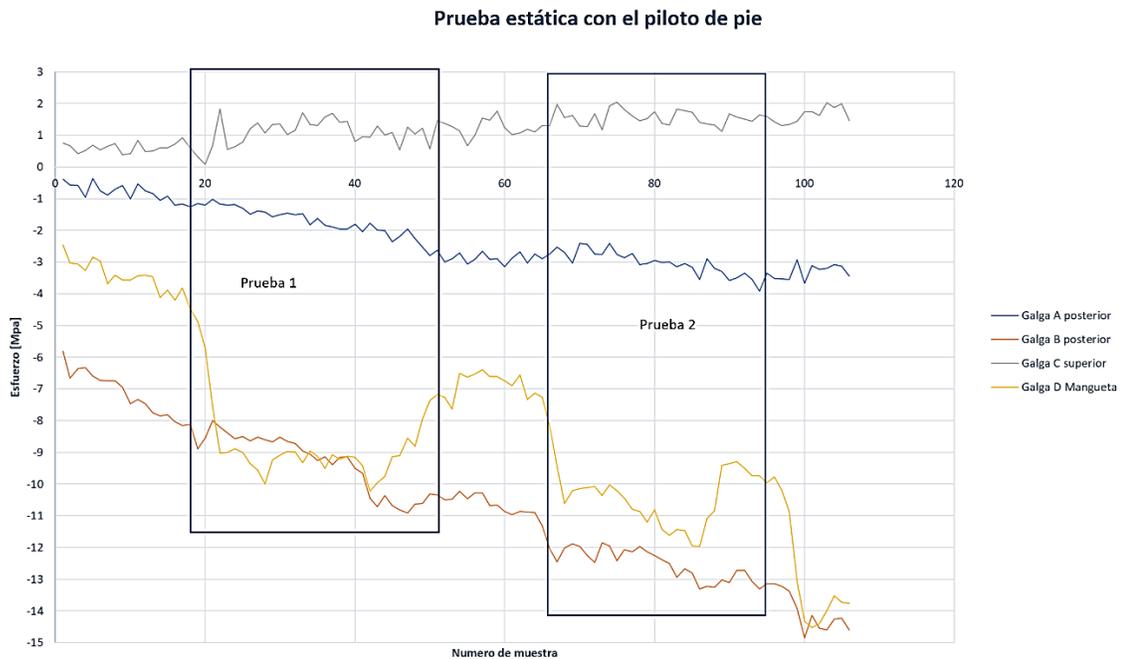


Figura 16. Pruebas estáticas donde el piloto se encuentra de pie en el centro del prototipo.

Los resultados indican que la mayor cantidad de esfuerzo se encuentra concentrado en la mangueta de la rueda delantera y en la zona posterior las variaciones de esfuerzo en la Galga (A) y Galga (C) son valores menores y de poca variación, las zonas donde existen una variación más significativa son los lugares donde se encuentran la Galga (B) y Galga (D), ver tabla 5.

Tabla 5. Valores máximos en las pruebas realizadas de manera estática con el piloto de pie.

	Galga A	Galga B	Galga C	Galga D
	Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]
Prueba 1	-2,904121	-10,906032	1,826325	-10,231569
Prueba 2	-3,585488	-13,299127	2,033862	-11,974879

Los valores negativos que se presentan en la tabla 5 indican que el elemento se encuentra a compresión, ahora los valores que se obtuvieron en la simulación en las zonas en las que se encuentran las galgas extensiométricas son delimitadas por colores, la galga extensométrica (A) se encuentra entre las zonas de color naranja y la zona de color amarillo cuyo valor mínimo de -6.349 MPa y un máximo de 5 MPa, para la galga extensométrica (B) está situada entre la zona de color naranja y la zona de crítica de color rojo con un valor mínimo de -0.6747 MPa y un máximo de 104.9 MPa, para la galga extensométrica (C) está en la zona de color naranja está entre el valor mínimo de -0.6747 MPa y un valor máximo de 5 MPa y la galga extensométrica (D) que se encuentra entre las zonas amarilla y naranja está en un valor mínimo de -6.349 MPa y un valor máximo de 5 MPa, los valores comparativos se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Comparación de resultados.

	Valores simulación CAE		Galga
	Esfuerzo [Mpa]		extensométrica A
	Val. Min	Val. Max	Esfuerzo [Mpa]
Prueba 1	-6,349	5	-2,904121
Prueba 2	-6,349	5	-3,585488
	Valores simulación CAE		Galga
	Esfuerzo [Mpa]		extensométrica B
	Val. Min	Val. Max	Esfuerzo [Mpa]
Prueba 1	-0,6747	104,9	-10,906032
Prueba 2	-0,6747	104,9	-13,299127
	Valores simulación CAE		Galga
	Esfuerzo [Mpa]		extensométrica C
	Val. Min	Val. Max	Esfuerzo [Mpa]
Prueba 1	-0,6747	5	1,826325
Prueba 2	-0,6747	5	2,033862
	Valores simulación CAE		Galga
	Esfuerzo [Mpa]		extensométrica D
	Val. Min	Val. Max	Esfuerzo [Mpa]
Prueba 1	-6,349	5	-10,231569
Prueba 2	-6,349	5	-11,974879

La segunda prueba que se realiza es cuando el piloto se encuentra en posición casi horizontal como se encontraría listo para la competencia, los valores obtenidos son los siguientes, ver **figura 17**.

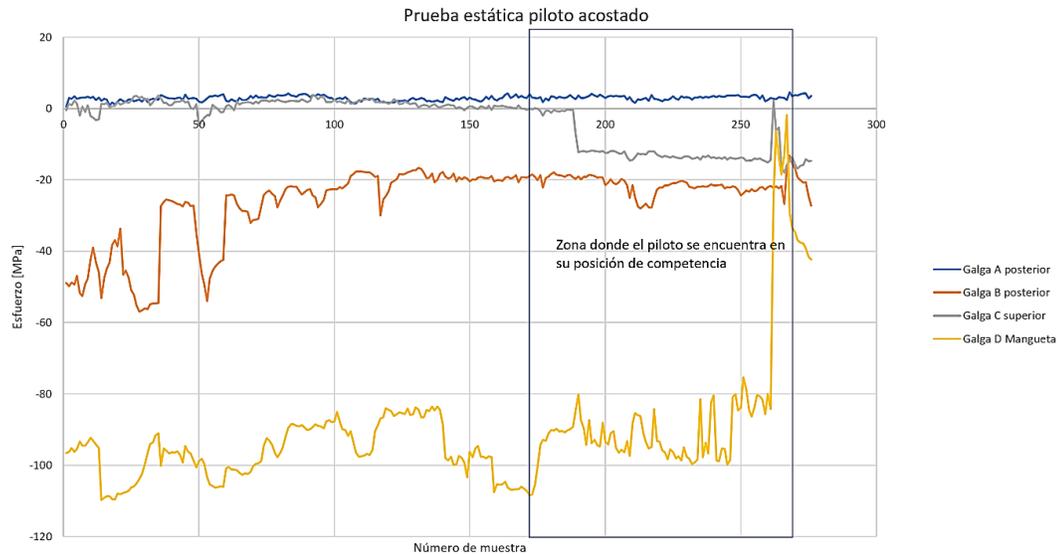


Figura 17. Pruebas estáticas con el piloto en posición de competencia.

La gráfica presentada muestra el comportamiento en la que el piloto se encuentra en posición de competencia, en esta prueba se pudo apreciar que la distribución de esfuerzos se encuentra entre los puntos donde se encuentran la Galga (B) con un valor máximo de esfuerzo de $-13,141249$ MPa, lo que me indica que el elemento se encuentra a compresión, en la Galga (C) con un valor de $-18,022504$ MPa que en el mismo caso anterior se encuentra en compresión, el valor de la Galga (A) se mantiene sin variaciones significativas, en el caso de la Galga (D) que se encuentra en la mangueta los valores comienzan a descender desde valores altos hasta que el piloto comienza a acomodarse en la posición de competencia. Por última prueba se procede a realizar de manera dinámica en donde se le da una aceleración al prototipo y se frena para ver el comportamiento del mismo a lo que hace referencia a los esfuerzos que sufren cada una de las zonas que se están analizando, ver **figura 18**.

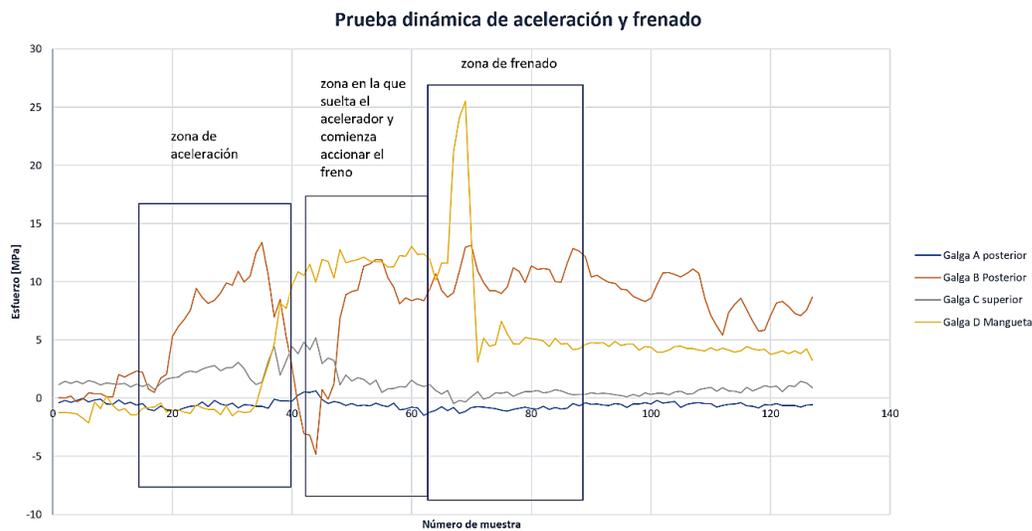


Figura 18. Pruebas dinámicas de aceleración y frenado.

La grafica presenta el comportamiento del chasis en el momento de realizar la prueba dinámica, se puede apreciar que al momento de realizar la aceleración del prototipo la Galga (B) es la que sufre un mayor aumento de esfuerzo de 13,365602 MPa lo que me indica que la zona está en flexión se puede apreciar que la Galga (A) mantiene sus valores constantes, en la parte superior podemos ver que la Galga (C) que se encuentra en el elemento de soporte también comienza a subir su valor de esfuerzo hasta 4,802404 MPa lo que por el signo me indica que el elemento se encuentra en flexión y por último tenemos los valores de la Galga (D) la cual se encuentra en la mangueta, este sensor alcanza su valor máximo en la zona de frenado alcanzando un pico de 25,497993 MPa.

4. CONCLUSIONES.

En las pruebas estáticas que se realizaron tanto a la viga de prueba como al chasis del prototipo se obtuvieron valores de esfuerzo que se encuentran dentro de los rangos asimilables que se obtuvieron a través de las simulaciones CAE, evidenciándose correlación con el desempeño esperado, por lo que se puede establecer que las condiciones asumidas para la definición de cargas, características de apoyos, tamaño y distribución del dominio computacional, simplificaciones asumidas, así como el método de resolución planeado para el diseño del chasis, junto con el proceso de análisis de acumulación de esfuerzo, tiene correlación cercana en el comportamiento físico del bastidor. De esta manera los estudios subsecuentes podrán llevarse a cabo con mayor seguridad, procurando la reducción paulatina de factores de seguridad a contemplar y así reducir al máximo el peso del bastidor, sin limitar la capacidad de este elemento.

En la parte de instrumentación, la selección de las galgas extensométricas fue un factor importante ya que la geometría de las zonas de interés para el estudio resultan de difícil instrumentación, no obstante a través del análisis de correspondencia de valores de esfuerzo axial llevado a cabo en las zonas adyacentes permite comprender de mejor manera el desempeño de los puntos críticos, así se ha podido observar variaciones importantes en los esfuerzos debido a la naturaleza de las cargas (transitorias y de aplicación progresiva), aplicadas en el estudio experimental. Los resultados obtenidos permitirán en un futuro considerar la fluctuación de los esfuerzos en estudio de vida a fatiga de la estructura y así un mejor diseño de las zonas de máximo esfuerzo.

Como parte del análisis de los resultados se determinaron factores que inicialmente se pensaba tendrían una muy baja repercusión sobre el estudio del estado de carga, esto al analizar la influencia de las vibraciones que produce el motor en fase de funcionamiento, sobre la respuesta de las galgas extensométricas, las cuales, debido a su alta sensibilidad, presentan variaciones como parte del ruido ambiente de la prueba. Una mejor comprensión de este fenómeno se podría estudiar en estudios posteriores en base a la implementación de filtros durante la fase de procesamiento de datos.

5. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] V. R. Deulgaonkar and A. G. Matani, "Development and validation of chassis mounted platform design for heavy vehicles," 2014.
- [2] W. B. Riley and A. R. George, "Design , Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis," *Proc. 2002 SAE Mot. Eng. Conf. Exhib.*, no. 724, p. 382, 2002.
- [3] K. Miyagawa, Y. Maruyama, M. Nasada, P. Di Carlo, G. Conti, and V. Cibrario, "Advanced testing and simulation techniques in handling body deformation," *Int. Mech. Eng. Congr. Expo.*, pp. 1–10, 2008.
- [4] E. J. A. Rodríguez, J. W. M. Ocampo, and C. A. S. Ortega, "Medidores de deformacion por resistencia: galgas extensiométricas," *Rev. Sci. Tech.*, vol. 1, no. 34, pp. 7–11, 2007.
- [5] OMEGA, "¿Qué son las galgas extensiométricas? ¿Cómo se usan?" [Online]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensiometricas.html>. [Accessed: 12-Feb-2019].
- [6] D. González Peralta and E. Nivicela Patiño, "Análisis de las cargas en el sistema de suspensión de un vehículo formula SAE mediante extensometría eléctrica," Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [7] Omega Engineering Inc., "Force-Related Measurements," *Trans. Meas. Control*, vol. 3, 1998.
- [8] R. L. Mott, *Resistencia de Materiales*. PEARSON Educación, 2009.
- [9] J. E. Shigley and C. R. Mischke, "Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley - 8va," pp. 250–280, 2001.
- [10] K. Hoffmann, "Una introducción a la medición mediante bandas extensométricas," pp. 1–272, 1989.
- [11] L. Loaiza, "Galgas." [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/luisalfonsoloaiza/galgas>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [12] C. A. S. Rodríguez, "Clasificación Y Selección De Strain Gages Y Su Aplicación En La Industria Mecánica," p. 166, 2013.
- [13] P. X. Idrovo Urgiles and L. M. Quintanilla Molina, "Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas - UPS-CT001920.pdf," 2010.
- [14] HBM, "Cómo seleccionar la galga extensométrica correcta | HBM." [Online]. Available: <https://www.hbm.com/es/7164/como-seleccionar-la-galga-extensometrica-correcta/>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [15] Omega Engineering Inc., "Calibrador de tensión de precisión," pp. 16–19.
- [16] O. ENGINEERING, "New Horizons @ in Strain Gages : OME ion BASICS."

- [17] M. S. Guilacela Guaraca, M. V. Guachun Sánchez, and F. G. Muñoz Arévalo, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DIDACTICO PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE SISTEMA DE SUSPENSION SEMI-ACTIVA," 2010.
- [18] National Instruments, "¿Qué es Adquisición de Datos? - National Instruments," 2016. [Online]. Available: <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [19] National Instruments, "Software de Aplicación para Adquisición de Datos y Control - Adquisición de Datos y Control - National Instruments." [Online]. Available: <http://www.ni.com/es-cr/shop/select/application-software-for-data-acquisition-and-control-category>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [20] J. Mayné, "Sensores Acondicionadores y Procesadores de señal."
- [21] J. Forero, "Strain gages. Fundamentos Y Aplicaciones en resistencia de materiales," 2010.
- [22] A. Alonso Pastor, "Diseño de un sistema de posturografía portátil," Universidad Politécnica de Catalunya, 2009.
- [23] National Instruments, "Serie de Fundamentos de Mediciones con Sensores."
- [24] K. Hoffmann, "Practical hints for the installation of strain gages," *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*, p. 56, 1996.
- [25] W. Morton, "Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages," vol. i, no. August, pp. 1–3, 2008.
- [26] HBM, "El puente de Wheatstone | Galgas extensométricas | HBM." [Online]. Available: <https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [27] J. Chandler, RF, Clauser, CE, McConville, JT, Reynolds, HM, Young, "Investigation of Inertial Properties of the Human Body," *US Dep. Transp.*, vol. 53, no. 9, pp. 1–155, 1975.
-