



**ANÁLISIS ESTÁTICO DE LOS
ELEMENTOS DE SUSPENSIÓN DE
UN MONOPLAZA TIPO FORMULA
ELÉCTRICO**

**STATIC ANALYSIS OF THE ELEMENTS
OF THE SUSPENSION OF AN
ELECTRIC FORMULA TYPE
SINGLE-SEATER CAR**

**ANÁLISE ESTÁTICA DOS ELEMENTOS
DE SUSPENSÃO DE UM MONOPÓLIO
DO TIPO DE FORMATO ELETRÔNICO**

Carlos León Medina

Magíster en Ingeniería Mecánica, Facultad Ingeniería
Mecánica, Universidad Santo Tomás (Seccional Tunja)
Boyacá, Colombia
carlos.leon@usantoto.edu.co

Carlos A. Aguirre Rodríguez

Magíster en Ingeniería Mecánica, Facultad Ingeniería
Mecánica, Universidad Santo Tomás (Seccional Tunja)
Boyacá, Colombia
carlos.aguirre@usantoto.edu.co

David Esteban Castellanos

Ingeniero mecánico, Universidad Santo Tomás
(Seccional Tunja) Boyacá, Colombia
ingesteban001@gmail.com

Fecha de recepción: 02 de mayo 2018

Fecha de aprobación: 24 de julio 2018

Resumen

En la actualidad es esencial que los elementos de suspensión de los autos de competencia soporten una gran cantidad de esfuerzos, también que el material cumpla con los requerimientos físicos y mecánicos para tener un desempeño óptimo. Este documento muestra la aplicación de estudios ingenieriles de nivel universitario, tales como el análisis de elementos finitos, rediseño y soluciones a problemas, para validar los elementos de suspensión de un monoplaza utilizado en competencia. Se analizaron los balancines y las tijeras de la suspensión por elementos finitos usando el software ANSYS, para evaluar y optimizar su desempeño en el monoplaza, esperando darle un control estable, reducción del peso y validar su diseño. Este estudio busca un avance tecnológico desde la academia, aplicando métodos de elementos finitos (FEM) a problemas automotrices que puedan aplicarse posteriormente en la industria, como se ve en las grandes escuderías de la fórmula 1 durante el desarrollo de nuevos elementos para sus vehículos de competencia que posteriormente se usan en los vehículos de calle. Esta metodología para el desarrollo de nuevos componentes demostró ser segura y eficiente ya que los diseños generados se pusieron a prueba en el monoplaza generando un excelente desempeño.

Palabras clave: Automotriz, Diseño, Elementos finitos, Ingeniería, Monoplaza, Suspensión.

Summary

Nowadays, it is essential that the suspension elements of the emulation cars have the capacity to withstand a great amount of effort to which they will be submitted and have an optimal performance for competitions, being indispensable that the material used meets physical requirements and / or resistant mechanical properties. Method: In the first instance, an electric formula type car was designed, being manufactured with university-level engineering studies such as: finite element analysis, redesign and solutions to problems; to give validation of the elements of suspension that can be used in competition, where the evaluation and optimization of the parts of the car are important for its performance, such as the suspension to which a finite element analysis process was carried out in ANSYS used to perfect the vehicle, hoping to give it a stable control by reducing its weight, validating the resistance of the material and the piece designed. It showed a technological breakthrough that proposes advances in engineering studies to feed the ambition of the automotive sector and design engineering, as seen in the big teams of formula 1 in creating suspension elements for their competition vehicles. This example of a single-seater fulfills the objectives of having a rocker as a solid lightweight structure and scissors as a vital element of connection between the frame and chassis, representing benefits to the automotive sector, with the ability of the material to withstand applied loads.

Key Words: Automotive, Design, Finite Elements, Engineering, Single-seater, Suspension
Introducción

Resumo

Atualmente, é essencial que os elementos de suspensão dos carros de emulação tenham a capacidade de suportar uma grande quantidade de esforço ao qual serão submetidos e tenham um ótimo desempenho para competições, sendo indispensável que o material usado atenda aos requisitos físicos e / ou ou propriedades mecânicas resistentes. Método: Na primeira estadia, um carro tipo fórmula elétrica foi projetado, sendo fabricado com estudos de engenharia de nível universitário, tais como: análise de elementos finitos, redesenho e soluções para problemas; para dar a validação dos elementos de suspensão que podem ser usados na competição. Onde a avaliação e otimização das partes do monoposto são importantes para o seu desempenho, como a suspensão para a qual um processo de análise de elementos finitos foi realizado no ANSYS usado para aperfeiçoar o veículo, na esperança de dar a ele um controle estável reduzindo seu peso, validando a resistência do material e da peça projetada. Mostrou um avanço tecnológico que propõe avanços em estudos de engenharia para alimentar a ambição do setor automotivo e de engenharia em desenho, como visto nas grandes equipes da fórmula 1 na criação de elementos de suspensões para seus veículos de competição. Este exemplo de um monoposto cumpre os objetivos de ter um balancim como uma estrutura sólida, de fôrma leve e umas tesouras como um elemento vital de conexão entre o chassi e o montante de cubo de roda, representando benefícios para o setor automotivo, tendo a capacidade que o material resiste antes das cargas aplicadas.

Palavras-chave: Automotivo, Desenho, Elementos finitos, Engenharia, Monoposto, Suspensã.

I. INTRODUCCIÓN

Los monoplazas son vehículos con unas dimensiones alrededor de 2,5 m de largo por 1,5 m de ancho y un peso entorno a los 250 Kg. Están cubiertos por una carrocería que debe dejar al descubierto las ruedas y propulsados por motores de hasta 610cc de cuatro tiempos los cuales tienen la sección de la admisión restringida por reglamento. Estas características hacen que se trate de monoplazas con un comportamiento dinámico muy deportivo por lo que se extreman las medidas de seguridad. Larrayoz Arano, I. (2010).

Desde el punto de vista en que el automóvil cambió la vida del ser humano, se buscó como mejorar continuamente para llevarlo a ser más acorde a las necesidades diarias, por esta razón se considera una de las partes importantes de análisis la suspensión de los mismos siendo esto vital para la estabilidad, adherencia y maniobrabilidad de los mismos, es oportuna la aplicación de ingeniería para evaluar y regenerar los elementos de la suspensión de un monoplaza impulsado por medio de motores eléctricos y lograr un desempeño óptimo para competencias como se observa en la figura 1.



Figura 1. Mono plaza autódromo Tocancipá.

Aplicando estudios de nivel universitario como análisis de elementos finitos, diseño y soluciones de tipo ingenieril, se realiza el estudio de los componentes del sistema de suspensión para que puedan ser utilizados en competencia. Se evalúan los balancines y las tijeras del sistema de suspensión de un monoplaza, aplicando un análisis de elementos finitos y rediseño para darle ventajas de control, tracción, estabilidad y reducción de peso al vehículo. Estas ventajas conllevan un avance tecnológico y de ingeniería, para fomentar los intereses del sector automotriz.

Este estudio busca apoyar iniciativas de entidades como el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), que propone una competencia nacional donde se creó un vehículo tipo fórmula, el cual debe cumplir los parámetros y reglas impuestas por las directivas y un equipo de ingenieros especializados en el área automotriz, para entregar innovación y compromiso de parte de los colaboradores.

Para competir en cualquiera de las competencias automovilísticas existentes, es necesario crear un monoplaza. Este desarrollo implica un desafío que impacta en el desarrollo tecnológico, la investigación y la innovación en

Colombia. Con monoplazas 100% eléctricos se busca aportar al sector industrial que requiere personal que conozca este tipo de motores, no sólo en vehículos o transporte sino en otras maquinarias, donde se refleja la interdisciplinariedad que desarrollan los estudiantes de ingeniería mecánica. Un claro ejemplo es la evaluación, desarrollo y optimización que realizan los estudiantes a los sistemas y mecanismos que van a estar dentro del monoplaza. Mi Putumayo (2013)

Para cumplir a cabalidad con cada uno de los ítems necesarios para el desarrollo del monoplaza son necesarios planes de gestión, calidad y planeación, así mismo como creatividad y efectividad del diseño para una rápida evaluación y validación del mismo. Los componentes presentados anteriormente son inevitables para poder llevar al automovilismo a una constante evolución, como se observa en los desarrollos, monoplazas y competencias de la Fórmula 1, que es posiblemente la categoría que más cambios ha sufrido durante la última década, desde 1998 hasta los modelos del 2017. Fernischumi (2013)

Guiados por los parámetros de entidades como la Federación Internacional de Automovilismo (FIA), que controla y regula las normas para todas las competencias automovilísticas a nivel mundial, y por lo tanto se tiene un tipo de normativa para la construcción y diseño del automóvil dependiendo el campeonato en el que se vaya a participar. Es el caso de la norma 10.5.3 del reglamento técnico de la FIA, donde se establece que la suspensión delantera debe conectar hasta con un máximo de tres componentes. En total, se permiten seis puntos de contacto, tres anclajes por rueda, inclusive si se articulan o combinan desde un punto de pivote MelangeX3 (2013).

El reglamento de la FIA contiene un listado de piezas que no son permitidas en este tipo de carreras por razones de seguridad o por parámetros de estandarización, que es la base principal para evaluar la suspensión del monoplaza. La evaluación del sistema de suspensión para los monoplazas de la fórmula 1 es muy rigurosa, ya que según los parámetros de competencia, el sistema siempre debe mantener el monoplaza a la misma altura, sin importar cual fuera la situación frenando, acelerando o en pleno apoyo. Sergio Barranco (2013).

Teniendo en cuenta las restricciones y parámetros establecidos por la FIA, se analizaron los primeros diseños para obtener una suspensión más eficaz y que cumpla con las expectativas necesarias en la competencia. Se planteó inicialmente el ejemplo de la suspensión interactiva que dispone de un circuito hidráulico que conecta la suspensión de las cuatro ruedas y optimiza la aerodinámica con distintos niveles de carga. Franco Manuel (2013).

Finalmente se seleccionó la suspensión de muelles convencionales ya que después de observar que en carreras de alta velocidad y de reacción, con minúsculos lapsos de tiempo ante cualquier eventualidad, los monoplazas presentan un mejor comportamiento este tipo de suspensión. De tal forma que se tiene en cuenta una restricción normativa para la suspensión del monoplaza, la cual limita la geometría de los miembros que la componen, ya que estos deben tener un perfil simétrico en la mayor parte de su longitud, con el fin de evitar que los diseñadores puedan usarlos como dispositivos aerodinámicos. Formula One (2013). Indica Buitrago (2011) p. 30, "La fibra de carbono, es un material que posee

excelentes propiedades de rigidez y resistencia, siendo un material sumamente liviano lo cual lo hace un material idóneo para el uso en suspensiones.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Utilizando el análisis por elementos finitos se obtiene una idea del comportamiento de los elementos de la suspensión (balancín y las tijeras); cuando se les aplican las cargas previamente calculadas en el diseño y aplicación de las piezas, se garantiza con esta herramienta que la geometría a fabricar tiene un diseño óptimo y que cuente con la posibilidad de modificarse para hacerlo más eficiente. El material con el que se diseñaron los elementos de la suspensión es acero estructural, ya que resiste los esfuerzos aplicados en las piezas durante el uso real, así se garantiza el comportamiento ideal de la suspensión.

El análisis por elementos finitos se realizó con el software de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE por sus siglas en inglés) ANSYS, para simular la capacidad del balancín y las tijeras en el sistema de suspensión del monoplaza. Esta herramienta informática permite mejorar los diseños de productos, ayudar en la resolución de problemas de ingeniería, realizar simulaciones, optimizaciones y validaciones de diseños, productos, procesos y herramientas de fabricación.

Para las escuderías son vitales estos análisis por que permiten visualizar los efectos que tienen sobre las piezas las fuerzas generadas en una carrera, reduciendo la necesidad de realizar ensayos destructivos sobre todos los nuevos diseños. Escuderías como Red Bull Racing utilizan el módulo de dinámica de fluidos de esta herramienta para el mejoramiento de

la aerodinámica de sus vehículos. El software ANSYS trabaja como una combinación de software que incluye diversos módulos informáticos y hardware de alto rendimiento, que permite obtener datos precisos y confiables sobre el desempeño de los vehículos, permitiendo ajustar de manera óptima cada aspecto del diseño de los prototipos antes de salir a pista, donde se realiza la puesta a punto. Diario de León (2013).

El modelamiento y posterior análisis por elementos finitos permitió la validación de los elementos de la suspensión del monoplaza tipo formula SENA Eco, la investigación se dividió en dos etapas:

En la primera etapa se realizó un análisis de los diseños iniciales con los que estaba ensamblada la suspensión del monoplaza, para evaluar el diseño, buscar opciones de mejora y así iniciar un proceso de optimización. Este proceso estuvo enfocado en la reducción del peso conservando su capacidad de soportar cargas e incrementar la eficiencia de la suspensión

El segundo análisis es un proceso verificación donde se evaluaron las piezas comprobando que no presentaran fallas en su diseño y que la optimización de las piezas fuera la mejor posible para el monoplaza. Es importante resaltar que el balancín soporta y transmite la carga del amortiguador a las ruedas y viceversa, mientras las tijeras le dan estabilidad a la suspensión. La optimización no debe interferir con la función de cada componente.

El software ANSYS proporciona todas las herramientas para el análisis del balancín y tijeras del monoplaza eléctrico. Usando las visualizaciones de contornos de superficie es posible detectar los puntos críticos o visualizar los

fenómenos como deformaciones que pueden sufrir cada una de las partes de la suspensión y poderlos corregir de manera oportuna.

En la suspensión del monoplaza tipo formula eléctrico, se aplicaron una serie de cargas obtenidas gracias a la información suministrada por el equipo SENA Eco. Estas cargas tienen en cuenta la suma total de la masas de estructura, piezas, piloto y demás componentes, estáticamente su masa es igual 600 Kg , el cual permite calcular el peso total que el sistema de suspensión soporta aplicando la ecuación 1.

$$F = m * g \quad (1)$$

$$600 \text{ kg} * 9,8 \text{ m/s}^2 = 5880 \text{ N}$$

Dónde F es la fuerza que soportara el sistema de amortiguación, m es la masa conjunta del monoplaza y g es la aceleración dada por la gravedad.

En la figura 2 es posible observar los 4 puntos de apoyo (llantas) que están en contacto con la superficie de la pista, es por esta razón que se divide la fuerza aplicada entre la parte trasera y delantera de tal forma que el 46% (2704,8 N) ira hacia la parte delantera y 54% (3292,8 N) a la parte trasera donde se encuentra la mayor cantidad de elementos distribuidos

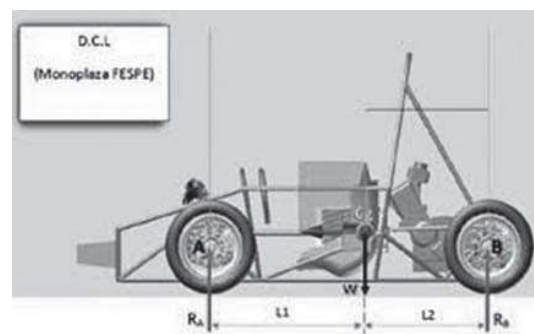


Figura 2. Normativa de distribución de peso
Fuente: Tuttillo J. 2015.

La distribución de fuerzas es dividida en el número de apoyos que intervienen, obteniéndose una fuerza de 1352.4 N para cada apoyo delantero y 1646,4 N para los apoyos traseros. Teniendo las fuerzas que estarán aplicadas sobre los balancines es posible calcular el momento que efectúan sobre los pivotes de montaje dando como resultado 54.58 Nm para adelante y 65.85 Nm para atrás.

Análisis del Balancín

Para empezar el análisis de balancín se examinó la geometría proporcionada por el equipo SENA Eco (ver figura 3), en el software de diseño asistido por computador (CAD) Inventor. Posteriormente se cargaron las geometrías al programa ANSYS para evaluar los diseños, dando prioridad a los análisis estructurales, resaltando los esfuerzos dentro de la zona elástica y la deformación que presentan las piezas.

Gracias a la información suministrada por el equipo SENA Eco y aplicando algunos cálculos se obtuvieron las magnitudes de las cargas a las que se va a someter el diseño. Luego de importar la geometría al programa ANSYS se selecciona el material que contiene el volumen de la pieza, para este caso es acero estructural, material que posteriormente será usado en el proceso de manufactura. Posteriormente se selecciona un análisis estructural estático en el Workbench.

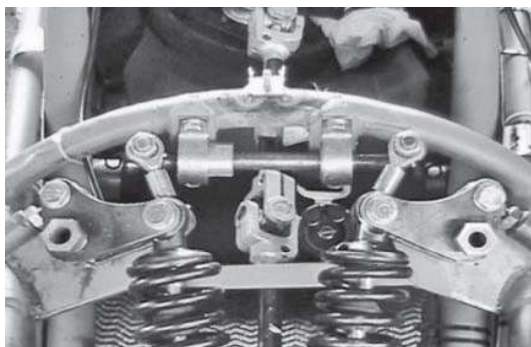


Figura 3. Geometría de los balancines delanteros

Luego de determinar los análisis a realizar se procede a enmallar la pieza con elementos que se adapten a las necesidades y geometrías del volumen discreto. Se refina la malla hasta evidenciar que la precisión de los resultados es independiente de las condiciones del enmallado y según las restricciones de la capacidad de procesamiento con las que se cuenta. La pieza enmallada se observa en la figura 4.

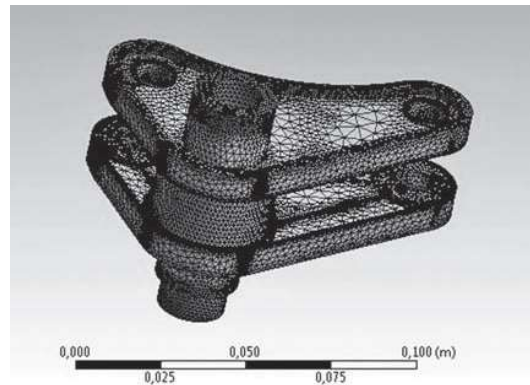


Figura 4. Enmallado de balancín

El siguiente paso es aplicar las cargas con magnitudes equivalentes a 1352,4 N a los 4 émbolos u orificios del balancín según los cálculos realizados para la distribución del peso del carro y un factor de seguridad de 2, como se muestra en la figura 5.

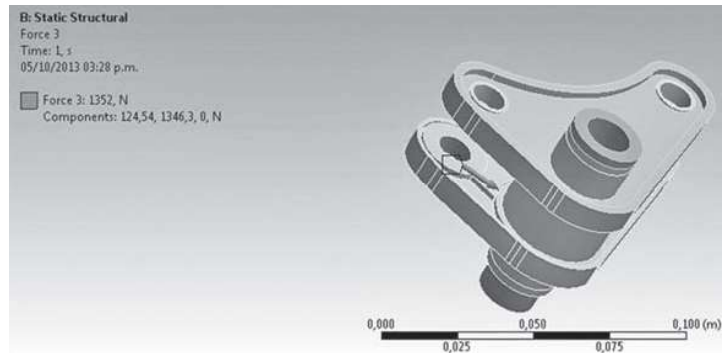


Figura 5. Carga sobre los orificios del balancín.

Luego de ubicar las cargas sobre los émbolos se selecciona el área donde esta aplicado el momento de 54,58 Nm en el buje central del eje de rotación del balancín, esta carga se distribuye como se muestra en la figura 6. Luego

de montar las condiciones del análisis se determinan los valores de convergencia y se inicia el *solver* del programa para obtener los resultados de deformación total y deformación.

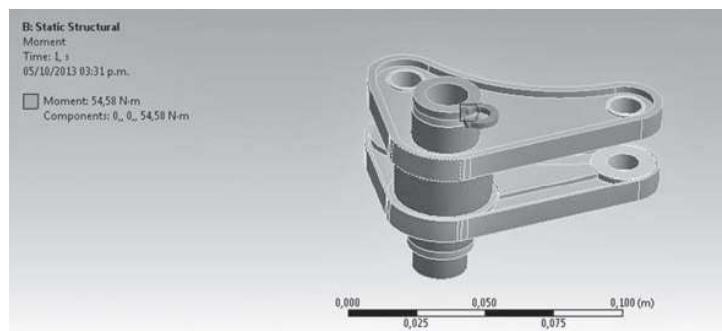


Figura 6. Momento aplicado sobre eje central del balancín

Finalmente el programa ANSYS genera un reporte donde es posible ver la deformación que pueda presentar el balancín y verificar en que puntos pueda superar el esfuerzo de fluencia del material. La optimización del diseño inicia en aquellos puntos críticos donde pueda fallar la pieza y posteriormente se concentra en otros requerimientos como la reducción del peso. De esta forma podemos llegar a un diseño más confiable y eficiente que posteriormente se validará a través de un análisis semejante, reduciendo así los costos

de pruebas destructivas o fabricación de modelos poco confiables.

Análisis de las tijeras

Para el análisis de las tijeras se desarrolló el mismo procedimiento que se usó para el balancín, las cargas que soportarán son las mismas que el balancín y se distribuirá en dos puntos de apoyo.

Se importó entonces la geometría de las tijeras al Workbench de ANSYS para un análisis estructural estático, también se seleccionó

el acero estructural para estas piezas. El siguiente paso es el enmallado del volumen del cuerpo, teniendo en cuenta que el refinamiento de la malla sigue las mismas condiciones y restricciones del generado para el balancín, el resultado se ve en la figura 7.

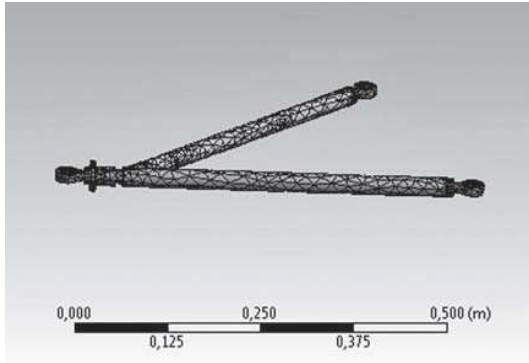


Figura 7. Enmallado de las Tijeras

Se aplican cargas de 1352,4 N a las tijeras, es importante resaltar que el monoplaza cuenta para cada lado dos conjuntos de tijeras, siendo necesario dividir la masa soportada en dos obteniendo una magnitud de 676.2 N para cada conjunto de tijeras. Cada uno de los conjuntos cuenta con dos puntos de soporte al chasis donde aplicaran las cargas con un factor de seguridad de 2, también tienen un porta masa que conecta con la llanta, este punto será el anclaje o el punto fijo. La figura 8 muestra esta disposición de las cargas.

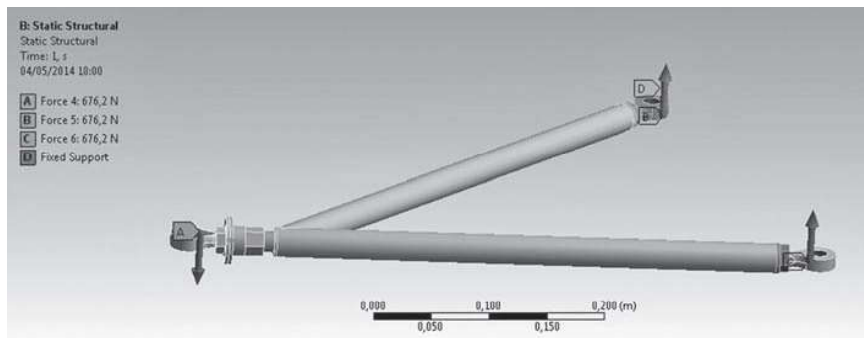


Figura 8. Cargas sobre los soportes de las Tijeras

Al igual que en el análisis del balancín se busca evaluar la deformación total y los esfuerzos que sufre la geometría de la tijera, buscando evitar que supere la zona elástica. Para esto se debe analizar e interpretar los gráficos de contornos y los datos tabulados de puntos máximos y mínimos que ofrece el programa para cada uno de los fenómenos evaluados.

Dado a ver que el análisis del resultado es parte vital de los diseños para poder corregir u optimizar los modelamientos, y que puedan

cumplir a cabalidad con el trabajo al que tiene que responder, todas estas pruebas sirven para evitar incidentes y dar una solución rápida a problemas, como es el caso de la escudería McLaren en el 2010, la cual tuvo una temporada arruinada por la falta de verificaciones en las pruebas de pretemporada, que interrumpieron las pruebas de invierno por problemas de escape, como la conocida prueba escape en forma de pulpo que se rompió después de un par de vueltas a la pista.



Importancia del análisis y el rediseño

El análisis y el rediseño son procesos vitales para generar la suspensión más recomendable de un vehículo de competencia, estos procesos son complejos y requieren de una minuciosa investigación. Entre las variables que se deben analizar están los tipos de esfuerzos y su asociación con los fenómenos físicos a los que está expuesto el monoplaza, como estos esfuerzos afectan las piezas diseñadas, selección de materiales según el ambiente y requerimientos mecánicos sin olvidar su fácil fabricación y claro está la funcionalidad óptima de cada componente del sistema de suspensión. Existen dos tipos de suspensiones comúnmente utilizadas en los vehículos de competencia que presentan gran efectividad y respuesta ante los eventos que se presenten, como el del tren trasero que trata de adelantar el eje delantero (sobre-viraje), generando una pérdida total del control, con un giro de más de 90° sobre sí mismo (trompo).

En el sobre-viraje el coche se va de atrás, mientras en el sub-viraje el monoplaza se ira del frente. Un comportamiento neutro implica que el coche no tiende a irse de ningún lado. Fran López (2013).

Al tener en cuenta esta clase de fenómenos y las restricciones normativas y aerodinámicas, se puede elegir entre los sistemas de suspensión más usados en este tipo de vehículos Pull-Rod o Push-Rod. Tal y como lo dicen sus nombres, la diferencia básica entre los dos es que en uno la barra trabaja a tracción y en el otro a compresión (ver figura 9). Podríamos decir que a nivel de suspensión no hay diferencia entre uno u otro, dejando de lado los puntos de anclaje que evidentemente

influirán en la dinámica del monoplaza, J. Sabaté (2007).

La suspensión debe incorporar un buen diseño cinemático para mantener el neumático lo más perpendicular posible al pavimento, una amortiguación óptima y tasas de elasticidad adecuadas para mantener el neumático en el suelo en todo momento. Arévalo, C., Medina, A., & Valladolid, J. (2018).

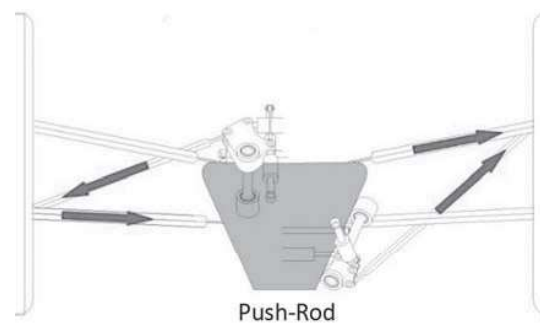


Figura 9. Diferencias entre los sistemas de suspensión Push-Rod y Pull-Rod.

Fuente: scarbsf1.com

Esta es la base para elaborar el diseño y el modelamiento del sistema de suspensión, el cual hoy en día es facilitado por los distintos programas de diseño CAD, los cuales permiten crear representaciones gráficas de objetos físicos ya sea en dos o tres dimensiones. A continuación, se usan otros programas de ingeniería asistida por computador (CAE), que permiten evaluar las condiciones físicas en las que funcionarán los componentes diseñados. Un ejemplo de esto son los ensayos en el túnel de viento, que pueden avanzar inicialmente con análisis de dinámica de fluidos para aproximar el diseño con la aplicación de modelos matemáticos. A pesar de la tecnología con la que se cuenta hoy en día, no es posible simular la realidad con total exactitud por esta razón es necesario validar experimentalmente las piezas fabricadas, para este caso en un

túnel de viento o en la pista. Este proceso reduce los costos de ensayos físicos reales y el de modificaciones o reprocesamiento de las piezas.

Suspensión Push-rod y pull-rod

Las geometrías de la suspensión utilizadas actualmente en los autos monoplazas son la push-rod y la pull-rod, cada una de ellas tiene sus pros y sus contras. En términos de efectividad en el control de las ruedas ambos son iguales, aerodinámicamente presentan diferencias que dependen del diseño general y requerimientos de cargas propios de cada monoplaza, la diferencia más clara está en los requerimientos de anclaje al chasis el diseño push-rod requiere más espacio para su montaje pero facilita las actividades de mantenimiento y despeja la parte interna para ubicar los motores eléctricos. Fueron estos los puntos a evaluar en el momento de seleccionar el tipo de sistema de suspensión a usar en el monoplaza que cuenta con un sistema de suspensión push-rod atrás y adelante como se puede ver en las figura 10 y 11 respectivamente.

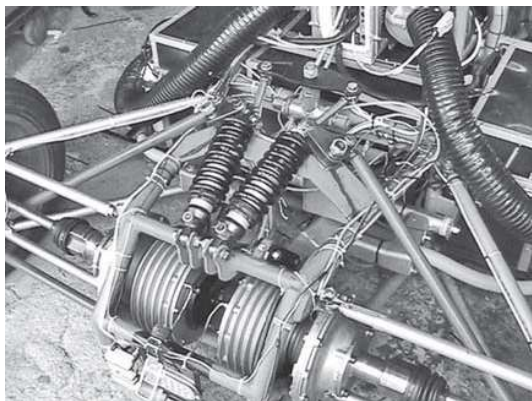


Figura 10. Suspensión trasera del monoplaza.

Las piezas de la suspensión que se evalúan son las tijeras que unen el chasis a la rueda

permitiendo la movilidad en el extremo de la rueda y el balancín que transmite las vibraciones causadas por la pista conectando los brazos al del monoplaza.

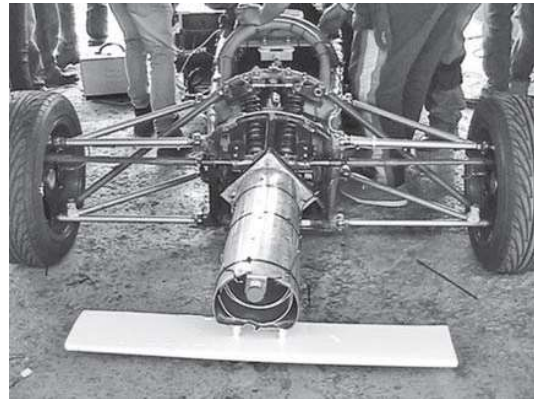


Figura 11. Suspensión delantera.

III. RESULTADOS

Al tener en cuenta que el análisis de los resultados son parte esencial para validar el diseño de los elementos de suspensión, se tomaron tablas donde se presentan las deformaciones y los esfuerzos que sufren las piezas, para facilitar su lectura y verificar que el material con el que se proyectó su manufactura tiene la capacidad de soportar las cargas sin sufrir deformaciones permanentes o daños que puedan afectar el sistema y finalmente el monoplaza.

Evaluación del balancín (geometría original)

Los primeros resultados a analizar son las deformaciones y dirección de deformación que presentaron las piezas en según los modelos programados en ANSYS. Para iniciar con el análisis de los resultados es necesario conocer las características del material con el que fue diseñado y manufacturado el balancín, como se especifica en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del acero estructural

Densidad	7850, kg/m ³
Coefficiente de dilatación térmica	1,2 e-005 C ⁻¹
Calor específico	434, J/kg C
Conductividad térmica	60,5 W/m C
Esfuerzo de fluencia	250 MPa

Límite de rotura	400 MPa
Resistividad	1,7-e 007 Ω m

Observando los resultados se puede evidenciar que la deformación ocurre en el área más delgada y larga del balancín, justo donde se ancla el amortiguador y genera más palanca la pieza como se visualiza en la figura 12.

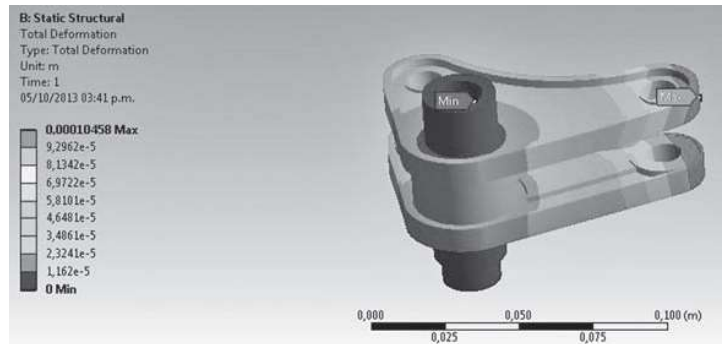


Figura 12. Deformación total del balancín.

Los valores extremos son presentados en la tabla 2, donde se aprecia que el material y el diseño soportan perfectamente las cargas a las que fue sometido, sin presentar roturas, ni grandes deformaciones.

Tabla 2. Deformación máxima y mínima del Balancín

Mínimo	1,9438 e-005 m
Máximo	4,9892 e-002 m

La punta de la parte delgada y larga del balancín puede sufrir mayor deformación, lo cual implica que es posible generar un rediseño que refuerce esta zona. Se logra una reducción del 20% del peso con de la pieza generando un adelgazamiento de la geometría en la parte central, pero dejando el mismo espesor en el contorno.

La dirección de la deformación inicia en el eje punto donde gira el balancín, se enfoca en área más larga, exactamente hacia la cara lateral con de formaciones pequeñas y su magnitud la observamos en la tabla 3. Con base en estos resultados es recomendable un rediseño para reforzar el área donde se focaliza la deformación.

Tabla 3. Punto máximo y mínimo de la dirección de la deformación

Mínimo	-3,9799 e-005 m
Máximo	2,0515 e-005 m

Evaluación del balancín (Geometría rediseñada).

Se elaboró el rediseño del balancín en Inventor y se transfirió a ANSYS, se le hizo el

proceso de enmallado y la ubicación de cargas exactamente igual a la versión original, reforzando la parte con más deformación y se observa una nueva serie de resultados para validar el uso del balancín rediseñado.

El resultado de deformación muestra que ocurre en la misma región de la anterior

geometría, donde existe una mayor palanca y esta ensamblado el amortiguador, aunque se presenta menor proporción a las presentadas en la geometría original del balancín y se ve afectada una menor área del balancín como se observa en la figura 13.

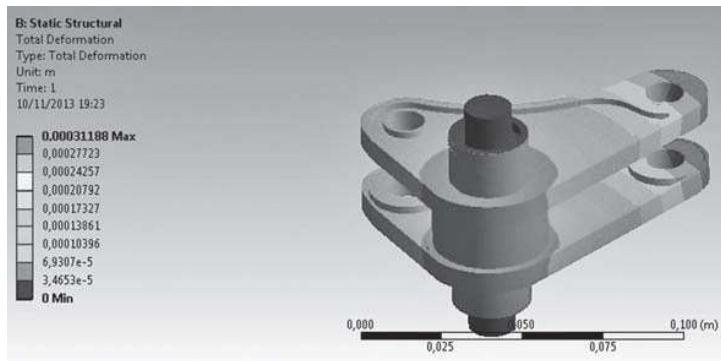


Figura 13. Deformación total del balancín rediseñado

Al igual que la geometría anterior se hace una reducción de la sección transversal para reducir el material, de tal forma que soporta perfectamente las cargas para las que fue diseñado, reduciendo la magnitud de las deformaciones, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Deformación máxima y mínima del balancín

Mínimo	0,000 m
Máximo	9,6866 e-005 m

La zona elástica del material no pasa su límite, lo que indica que la pieza es resistente a las cargas a las que fue sometido y no genera deformaciones como se observa en la figura 14.

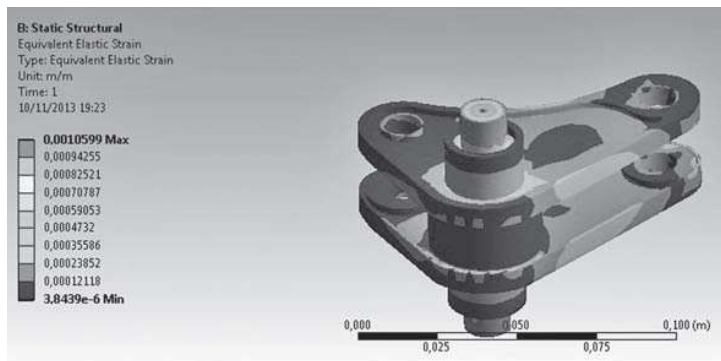


Figura 14. Zona elástica del balancín

El acero estructural es un material capaz de resistir las cargas a las que fue sometido el balancín. La geometría mantiene su reducción de peso y mejora su efectividad para elaborar su trabajo como se observa en la tabla 5.

Tabla 5. Punto máximo y mínimo de la zona elástica

Mínimo	-4,2734 e-004 m / m
Máximo	4,8531 e-004 m / m

Existe un cambio en cuanto a la dirección en la que deformación se propaga, ya que va desde el brazo más corto del balancín y se enfoca en el brazo más largo hacia la cara lateral como se observa en la figura 15.

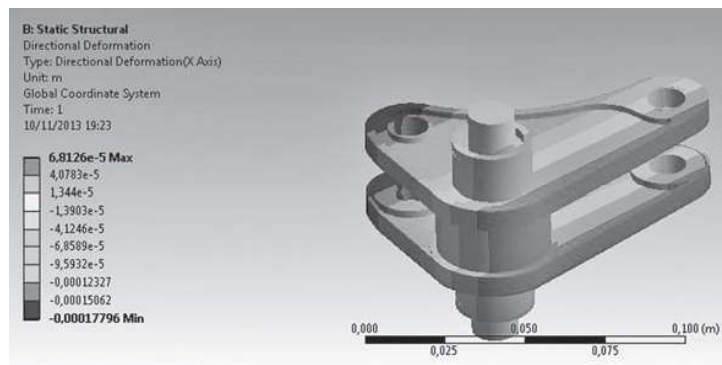


Figura 15. Dirección de la deformación del segundo balancín.

Con esto se certifica que el balancín y el material con el que fue diseñado y manufacturado cumplen todas las condiciones de resistencia, seguridad y diseño, necesarias para hacer parte de la suspensión de un vehículo de competencia (ver tabla 6).

Tabla 6. Punto máximo y mínimo de la dirección de la deformación

Mínimo	-3,9799 e-005 m
Máximo	2,0515 e-005 m

Resultados del análisis de las tijeras

La evaluación de los resultados de las pruebas de deformación y la dirección en que se

presenta generados por ANSYS. Estos datos son consecuencia de la distribución de cargas que le fueron aplicadas, la geometría y las propiedades del material de la tubería con el que fueron diseñadas y manufacturadas las tijeras, las propiedades del material fueron especificadas en la tabla 1.

Se tiene que la deformación total esta situada en la parte de anclaje donde va ir acoplada el porta masas de la rueda, siendo capaz de soportar las distintas cargas a las que se somete, este comportamiento se observa en la figura16.

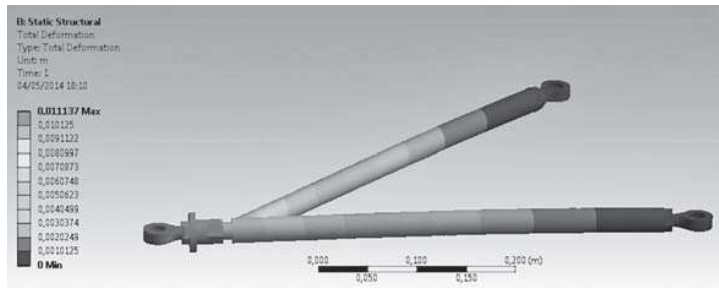


Figura 16. Deformación máxima y mínima de las tijeras.

Se aprecia que el material de las tijeras resiste las cargas aplicadas, y que no presenta deformaciones permanentes. Las puntas que van al chasis sufren menos deformación ya que se divide la varga en dos puntos, mientras que la reacción queda en el punto de acopla a la rueda, este punto sufre grandes esfuerzos, pero no lo suficiente para fracturar o dañar la pieza. En la tabla 8 se pueden evidenciar las magnitudes máximas de desplazamiento que se presentan en la unión de las tijeras.

Tabla 8. Deformación máxima y mínima de las tijeras

Mínimo	1,9438 e-005 m
Máximo	4,9892 e-002 m

El material de las tijeras y las dimensiones de la tubería hacen que las tijeras sean muy livianas. La dirección de la deformación es axial en dirección a las puntas que se unen al chasis como se observa en figura 17.

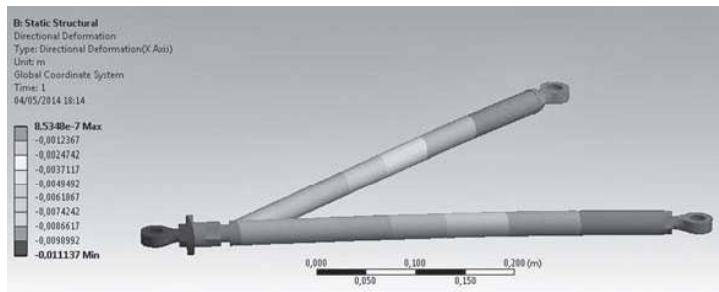


Figura 17. Dirección de la deformación de las tijeras.

Resultados de suspensión en la pista

Luego del estudio realizado se fabricaron las piezas con las geometrías optimizadas y se analizan los resultados de las pruebas en pista atribuyendo premios como mejor diseño estructural y de suspensión, garantizando una alta facilidad de maniobra y mostrando también que es uno de los autos más livianos y veloces en la competencia, y durante

la clasificación. Estos resultados en la pista muestran que todo el trabajo realizado por el equipo durante meses proporcionó frutos favorables y una gran capacidad de innovación, logrando una gran confianza por medio de esta metodología para el desarrollo de nuevos componentes donde se aplicaron cálculos, análisis en el software de elementos finitos y verificación en las pruebas en pista.

Está investigación deja abierta la puerta a nuevas aplicaciones donde se desee generar innovación utilizando y creando teorías de suspensiones como la interconexión de suspensión trasera y delantera (FRIC), que fue la principal innovación en la Formula 1 durante el 2013. Mercedes y Lotus que han investigado esta interconexión desde el 2011 con un novedoso sistema hidráulico. El beneficio que tiene este sistema de suspensión es hacer que el coche sea más estable en momentos donde la suspensión está bajo carga, F1 ciencia (2013).

Por último es importante resaltar que aparte de las nuevas tecnologías al mundo automovilístico es vital este tipo de metodologías para reducir el impacto sobre el medioambiente creando una conciencia ecologista.

IV. CONCLUSIONES

El análisis de elementos finitos fue esencial para la validación y optimización de las piezas de la suspensión como lo fueron las tijeras y el balancín, los cuales presentaron excelentes resultados, superando las expectativas que se tenían del material y de la nueva geometría.

Se cumple el objetivo de tener un balancín de estructura maciza pero liviano gracias a la optimización geométrica que se propuso para reducir su peso, los efectos de deformación no afectan de manera considerable el funcionamiento del balancín.

Para el análisis de las tijeras como elemento vital de conexión y soporte de cargas entre porta masa de la rueda y el chasis, el material y geometría que se diseño fue muy eficiente, de tal forma que soporta las cargas sin afectar su funcionamiento mecánico y manteniendo la estabilidad del monoplaza, validando este

elemento como seguro para ser montado en la suspensión.

Se tiene que la capacidad que el material que se usó durante este estudio, resiste las cargas aplicadas pero deja abierta la puerta para trabajar con nuevos materiales como el aluminio que se puedan utilizar para reducir peso y tener una capacidad semejante a la del acero para soportar cargas, dependiendo de la geometría que se diseñe.

Se entregó la evaluación y los resultados favorables del análisis en ANSYS, de la capacidad de soporte de los elementos de suspensión del monoplaza, para obtener una excelente puntuación en el concurso general del proyecto SENA Eco.

V. REFERENCIAS

Arévalo, C., Medina, A., & Valladolid, J. (2018). Estudio cinemático y dinámico del sistema de suspensión de un monoplaza de competencia eléctrico Formula Student. Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, (20), 96-101.

Buitrago, E. (2011). Diseño del sistema de suspensión de un vehículo monoplazatipo Fórmula SENA. Trabajo presentado para obtener el título de ingeniero mecánico, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Programa de Ingeniería Mecánica, Medellín.

Diario de León, ANSYS está detrás de los campeones de Fórmula 1, 25- diciembre-2012. (<http://blogingenieria.com/software-ingenieria/ansys-campeones-formula-1/>), fecha de consulta 19-09-2013.

Fernischumi, Sauber nos muestra 20 años de evolución de la Fórmula 1, 14 de agosto de 2013. (<http://www.motorpasionf1.com/>)

formula-1/sauber-nos-muestra-20-anos-de-evolucion-de-formula-1). 18-08-2013.

Formula One World Championship Limited, Sistemas de suspensión y dirección, 2003-2013. (http://www.formula1.com/inside_f1/rules_and_regulations/technical_regulations/8708/), fecha de consulta 17-09-2013.

Franco Manuel, Suspensión interactiva: la clave del éxito de Sebastian Vettel, 2-noviembre-2013 (http://motor.as.com/motor/2013/11/02/formula_1/1383360218_366235.html), fecha de consulta 14-09-2013.

Fran López, el tirón Rod Suspensión, Reglas F1 2011 Mercedes W02, 2011. (<http://www.diariomotor.com/2011/02/02/f1-williams-fw33-y-mercedes-gp-w02-2011/>), fecha de consulta 26-09-2013.

F1 ciencia, las suspensiones, ([HTTP://CAMAROONSF1.COM/TECNICAS/F1-CIENCIA-LAS-SUSPENSIONES/](http://CAMAROONSF1.COM/TECNICAS/F1-CIENCIA-LAS-SUSPENSIONES/)), fecha de consulta 03-10-2013.

J. Sabaté, Suspensiones en la F1, cronicasf1, 2005-2007, (<http://www.cronicasf1.com/Contenido/Tecnica/Las%20Suspensiones%20en%20la%20f1/Las%20suspensiones%20en%20la%20f1.htm>), fecha de consulta 28-09-2013.

Larrayoz Arano, I. (2010). Diseño de un sistema de suspensión en materiales compuestos para un formula SAE.

MelangeX3, Humberto Editor, CET La suspensión delantera de Lotus E21 es ilegal, en Motorpasion F1, 30-de junio de 2013. (<http://www.motorpasionf1.com/formula-1/la-suspension-delantera-de-lotus-e21-es-ilegal>), fecha de consulta 22-08-2013.

Mi Putumayo, Terminó Fórmula SENA Eco, "compromiso con el medio ambiente, Diciembre-13- 2013. (<http://miputumayo.com.co/2013/11/18/termino-formula-sena-eco-compromiso-con-el-medio-ambiente/>).12-09-2013.

Naranjo Torres, D. (2015). Análisis de la relación velocidad-densidad vehicular de la avenida calle 26 en Bogotá. Ingenio Magno, 6, pp. 76-88.

Nicolás Talarico, Como Funciona la Formula 1 FRIC, 6-abril-2013, (<http://wikif1.blogspot.com/2013/04/como-funciona-la-formula-1-fric.html>), fecha de consulta 06-12-2011

Sergio Barranco, Piezas prohibidas en la Fórmula 1 Parte I: La Suspensión Activa, octubre-31-2013. (<http://compartirpasion.com/2013/10/31/piezas-prohibidas-en-la-formula-1-parte-la-suspension-activa/#>), fecha de consulta 5-09-2013.

Tutillo, Cumba, and Jonathan David. Diseño y construcción de balanzas electrónicas portátiles para vehículos cuyo peso no exceda los 800 kg. BS thesis. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería Automotriz. 2015.