

Diseño y construcción de un prototipo de amortiguador para un vehículo fórmula SAE

Design and construction of a shock absorber prototype for a SAE formula vehicle

Romero, Juan y Díaz, Sergio

Laboratorio de Dinámica de Máquinas, Universidad Simón Bolívar

Caracas 1080-A, Venezuela

juanromero@usb.ve

Recibido: 17-04-2007

Revisado: 23-02-2008

Resumen

Motivado por el continuamente creciente reto de la competencia Formula SAE®, el objetivo del presente trabajo es diseñar y construir un prototipo de amortiguador que se adapte a las necesidades de un vehículo Fórmula SAE en cuanto a su desempeño, ajustabilidad, confiabilidad, costo y peso. Primero se realiza una investigación del funcionamiento de distintos tipos de amortiguadores disponibles. Luego de definir algunas características generales del prototipo, se definen la curva característica (fuerza Vs. velocidad), el coeficiente de amortiguación y la relación compresión/extensión objetivos de diseño. Para esto se analizan curvas características de amortiguadores comerciales y también, haciendo uso del modelo de ¼ de carro, se analiza el efecto de la rugosidad de la carretera y la amortiguación sobre la manejabilidad y maniobrabilidad del vehículo. Después de determinar las cargas que se generan sobre el amortiguador, se dimensionan los detalles y se verifica la resistencia mecánica de cada pieza. Culminado esto, se procede a la fabricación, ensamblaje y prueba del prototipo. Con este proyecto se demuestra que es posible diseñar y construir en Venezuela amortiguadores especializados para un Fórmula SAE. Además, aunque hay que hacer más pruebas para definir optimizaciones a las válvulas, se obtiene un prototipo que cumple con los requerimientos, resultando en una opción favorable para su uso en un Fórmula SAE frente a las disponibles comercialmente de autos o bicicletas.

Palabras clave: Diseño, amortiguador, suspensión, vehículo, Fórmula SAE.

Abstract

Motivated by the continually growing challenge of the SAE® Formula competition, the primary goal of the present study is to design and fabricate a prototype of shock absorber adapted to the requirements of performance, adjustability, reliability, cost and weight of a Formula SAE vehicle, which are not fully satisfied by commercially available dampers. After defining some general characteristics of the prototype, the desired characteristic curve (Force vs. Velocity), effective damping coefficient, and compression/extension ratio are established. To achieve this, characteristic curves of commercial shock absorbers are analyzed and the quarter car model is used to study the road roughness effect on the ride and handling of the vehicle. Detailed dimensioning and mechanical strength verification is performed after an analysis of the loads on the prototype. Finally, the prototype is mounted on a dynamometer to determine its characteristic curve and verify the requirements fulfillment. This project shows that it is possible to design and fabricate specialized Formula SAE shock absorbers in Venezuela. Also, even though more testing is necessary to define valve optimization, the prototype meets the requirements and results into a feasible option to be used in an F-SAE against the available race car or bike dampers options.

Key words: Design, shock absorber, suspension, vehicle, SAE Formula.

1 Introducción

La competencia Formula SAE® es un reto para estudiantes que deben concebir, diseñar y construir cada año un vehículo de carreras cada vez más competitivo. El objetivo del presente trabajo es diseñar y construir un prototipo de amortiguador para un vehículo Fórmula SAE (F-SAE), que tenga un desempeño acorde con las exigencias del vehículo y la competencia (Romero, 2005).

En un vehículo de carreras se necesita maximizar la maniobrabilidad y el agarre de los cauchos al suelo. Para esto, el amortiguador es parte esencial ya que influye tanto en los movimientos de cabeceo y roldo asociados con la maniobrabilidad del vehículo como en el movimiento relativo entre la Masa No Soportada (MNS) y el perfil de carretera, es decir, en el agarre del caucho a la carretera (Dixon, 1999). Comercialmente, la opción más cercana a cumplir los requerimientos de costo, peso y desempeño de un F-SAE corresponde a amortiguadores de bicicleta. Sin embargo, éstos presentan problemas de confiabilidad. Los amortiguadores que cumplen los requerimientos de desempeño y confiabilidad resultan muy pesados y costosos. Esto hace evidente la necesidad de diseñar y construir un prototipo de amortiguador que cumpla efectivamente los requerimientos de un F-SAE.

Se busca entonces que el prototipo tenga: Una curva característica (Fuerza Vs. Velocidad) apropiada para este tipo de vehículo de carrera; ajustabilidad para poder realizar una adecuada puesta a punto del vehículo durante sus pruebas en pista; confiabilidad para garantizar un buen desempeño durante las exigentes pruebas a las que se somete el vehículo; economía y disponibilidad tanto para bajar el costo del vehículo, como para significar menos dependencia en el diseño y la procura de las partes para el desarrollo de futuros vehículos Fórmula SAE.

Además del diseño y construcción del prototipo, también se desarrollan modelos para: Estimar las condiciones de trabajo del amortiguador en un Fórmula SAE; estimar un rango apropiado para el coeficiente de amortiguación necesario para maximizar la maniobrabilidad del fórmula y; calcular los diferentes casos de cargas a los que se somete el amortiguador montado en el fórmula.

2 Funcionamiento de un amortiguador hidráulico

Antes de exponer la metodología del diseño, es conveniente hacer una reseña sobre el funcionamiento del amortiguador. La Fig. 1 muestra la configuración general de un amortiguador hidráulico telescópico. Allí se identifican las diferentes cámaras y los caudales de aceite que fluyen a través del pistón y la cabeza de compresión durante los movimientos de compresión y extensión del amortiguador.

La fuerza de amortiguación (disipación de energía) se genera por las diferencias de presiones generadas al hacer pasar el aceite a través de los cuerpos de válvulas. En general, se aplica la ecuación:

$$\Delta P = k \cdot Q \quad (1)$$

donde, ΔP : Diferencia de presión, Q : Caudal a través de la válvula, k : Coeficiente de pérdida lineal de la válvula.

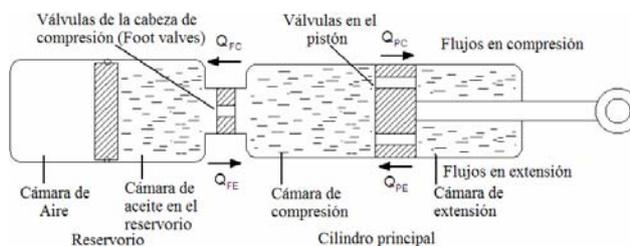


Fig. 1. Configuración de un amortiguador telescópico. (Dixon, 1999)

3 Desarrollo del diseño del prototipo

3.1 Metodología del trabajo

Para el diseño del prototipo se aplica ingeniería en reversa, la cual consiste en analizar exhaustivamente lo que ya existe, para luego proponer un diseño con las mejoras pertinentes según las necesidades. Para esto se analizaron varios tipos de amortiguadores, entre los cuales están un amortiguador para bicicleta y otro para vehículos de carrera. Ambos han sido usados en los vehículos F-SAE fabricados en la Universidad Simón Bolívar (USB).

Luego de definir las características básicas para el prototipo, se desarrollan modelos teóricos para determinar las características de funcionamiento deseadas (curva característica: Fuerza Vs. Velocidad del eje, coeficiente de amortiguación y relación compresión-extensión) y las condiciones de trabajo (cargas que recibe el amortiguador montado en el F-SAE). Con los resultados de estos análisis se procede al desarrollo definitivo del diseño del prototipo, que luego se fabrica y se prueba. Finalmente se analizan los resultados y se proponen cambios para mejorar el desempeño del prototipo.

3.2 Análisis de un amortiguador de bicicleta

La Fig. 2 muestra el amortiguador de bicicleta. La mayoría de sus piezas son maquinadas por CNC en aluminio. La Fig.3 es un diagrama con el cual se puede entender el funcionamiento de este amortiguador.

Tanto en compresión como en extensión el fluido tiene dos caminos para atravesar al pistón y la cabeza de compresión. Uno de los caminos es a través de las válvulas de aguja y el otro es haciendo flectar a los discos que tapan los orificios de los cuerpos de válvulas. El primer camino define el comportamiento (curva característica) a baja velocidad. A alta velocidad del eje se generan diferencias de presiones tales que hacen flectar a los discos y por tanto se abre el segundo paso de fluido. Luego, este amortiguador tiene un comportamiento a baja velocidad definido por las

válvulas de aguja y, el comportamiento a alta velocidad lo define la configuración de los discos de flexión.

Se hicieron análisis similares con amortiguadores de vehículos de carreras y vehículos comerciales.

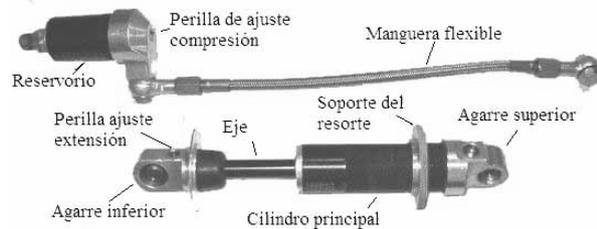


Fig. 2. Amortiguador de bicicleta armado.

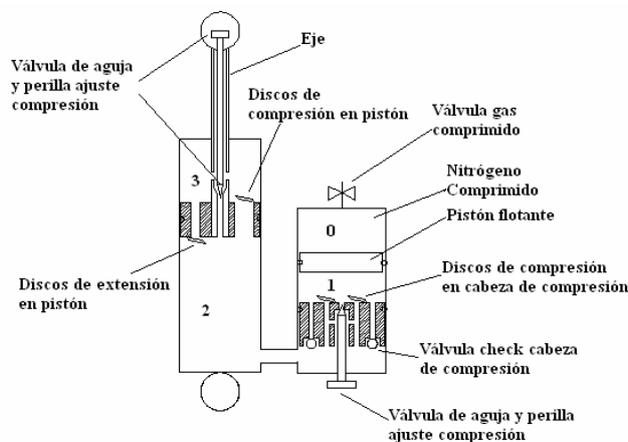


Fig. 3. Diagrama de flujo del amortiguador de bicicleta.

3.3 Características generales del prototipo

A continuación se presentan y discuten algunas de las características deseadas en el prototipo:

- **Proceso de fabricación:** Piezas maquinadas en aluminio 6261 T6. Este aluminio disponible en Venezuela tiene buenas propiedades (Nalco, 2002), por lo tanto permitirá realizar un diseño liviano. Por otra parte, la geometría de todas las piezas debe ser lo más sencilla posible, de forma tal que el tiempo de maquinado y por tanto los costos de fabricación sean menores.
- **Configuración:** Reservorio remoto con acople rígido y pistón flotante. Se prefiere esta configuración ya que se tiene una buena referencia para su dimensionamiento (amortiguador de bicicleta). Además, usar un pistón flotante para separar el gas presurizado del aceite permite instalar el amortiguador con cualquier posición en el FSAE, lo cual da mayor libertad en el diseño del vehículo.
- **Ajustabilidad:** Se considera apropiado el mismo sistema de ajustabilidad del amortiguador de bicicleta (válvulas de aguja).
- **Montaje del resorte:** Axial, ya que permite ahorrar espacio y ajustar fácilmente la precompresión del resorte.

- **Topes de compresión y extensión:** El amortiguador también puede actuar como tope de movimiento de la suspensión (a compresión y extensión). Esto ayuda al diseño del fórmula ya que implica no agregar peso en otro lugar para colocar tales topes. Por esto se diseña el prototipo con las longitudes máxima y mínima necesarias para esto.
- **Acoples al vehículo:** Articulación esférica. Los carros comerciales usan gomas, sin embargo en carros de carrera no se busca comodidad sino maniobrabilidad. En el prototipo se usa la misma articulación que el amortiguador de bicicleta por su bajo peso y buen desempeño.
- **Cuerpos de válvulas:** Se adaptan los cuerpos de válvulas de un amortiguador comercial al prototipo. Se decide esta opción debido a la disponibilidad de estos cuerpos de válvulas y a la similitud de funcionamiento y dimensiones de estos cuerpos con los del amortiguador de bicicleta. Sin embargo, queda claro que es necesario probar el prototipo final en un dinamómetro para definir modificaciones necesarias en las válvulas

4 Análisis de condiciones de funcionamiento

Para continuar con el diseño del prototipo, es necesario definir las características de funcionamiento deseadas (Curva característica, coeficiente de amortiguación y relación compresión-extensión). Para esto, primero se analizan tales características en distintos amortiguadores y luego se realiza un análisis teórico del comportamiento dinámico del FSAE. También se toman en cuenta las recomendaciones de la literatura para definir las características de funcionamiento deseadas (Dixon, 1999; Milliken y Milliken, 1995)

4.1 Curvas características de otros amortiguadores

Tres amortiguadores, uno de bicicleta, uno de vehículo de carrera y otro de vehículo comercial son montados en un banco de pruebas para obtener sus curvas características. Ver Fig. 4. El banco realiza ciclos a las frecuencias que el operador le indique y al final se obtiene la curva característica del amortiguador. La Fig. 5 muestra parte de los resultados de las pruebas y los compara con otras curvas características obtenidas.

En la leyenda de la Fig.5, por ejemplo, "carre-ra_catalog_e" significa curva a extensión obtenida del catálogo de amortiguador de vehículo de carrera (Koni, 2004). Por otro lado, "carrera_c" representa la curva a compresión de la prueba del amortiguador de carrera en el banco. Las últimas dos curvas son resultados de pruebas realizadas con un amortiguador de vehículo comercial. Se trabaja con una velocidad máxima del eje de 0.25m/s, siguiendo lo sugerido por la literatura para vehículos de carrera (Dixon, 1999; Koni, 2004; Penske, 2004). Analizando la Fig.5 se observa que el amortiguador de vehículo comercial es mucho más suave. La curva "bicicleta_e" también está muy por debajo de las demás. Se interpreta que este amortiguador tiene una falla en su desempeño a extensión. El resto de las curvas se

parecen en cuanto a que presentan una pendiente mayor a baja velocidad y una menor a alta velocidad. El cambio de pendiente lo hacen entre 0,02m/s y 0.055m/s. Finalmente se observa buena similitud entre la curva característica experimental del amortiguador de carrera y la que ofrece su catálogo.



Fig. 4. Prueba en el banco del amortiguador de vehículo de carrera.

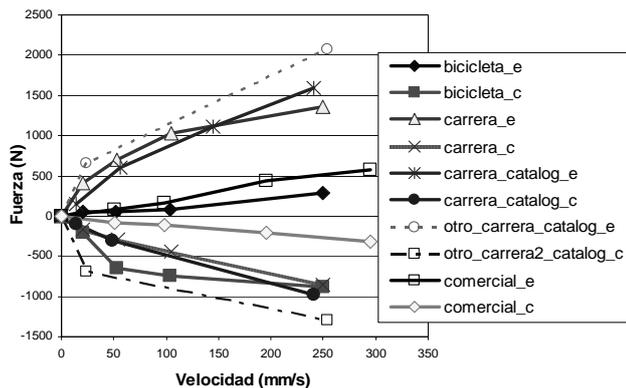


Fig. 5. Comparación de curvas características.

Para simplificar los modelos dinámicos, se suele considerar lineal al amortiguador (Dixon, 1999). Luego, para estimar un coeficiente de amortiguación es necesario aproximar la curva característica del amortiguador a una recta que pasa por el origen. La pendiente de esa recta representa el coeficiente de amortiguación. La tabla 1 muestra los valores de coeficientes promedios de amortiguación (Ca) y la relación compresión-extensión (Rce) de los amortiguadores arriba analizados. La relación compresión-extensión se obtiene al dividir el coeficiente de amortiguación a compresión entre el de extensión. Se observa que para amortiguadores de carrera la Rce es cercana a 40/60. En cuanto a la amortiguación se observa que los amortiguadores de carrera tienen un coeficiente mucho mayor al del amortiguador de vehículo comercial. Esto muestra que los vehículos de carrera necesitan mayor amortiguación para lograr un buen desempeño en pista.

Tabla 1. Parámetros básicos de amortiguadores de referencia.

Amortiguador	Ca(N*s/m)	Rce
Carrera	5030	36 / 64
Bicicleta	2740	80 / 20
Otro carrera (catálogo)	6805	39 / 61
Comercial	1340	38 / 62

4.2 Análisis de la respuesta dinámica del vehículo

Con la intención de determinar la influencia de las características del amortiguador en el comportamiento dinámico del vehículo, se desarrolla un modelo del F-SAE excitado por la rugosidad de la carretera. Se usa el modelo de 1/4 de carro y un perfil de rugosidad de una carretera real (Karamihas, 2004). Se utilizan como datos las características de diseño del F-SAE USB. La Fig. 6 muestra las variables tomadas en cuenta para el desarrollo de las ecuaciones del modelo.

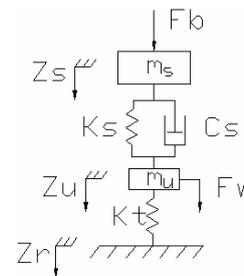


Fig. 6. Variables del modelo de 1/4 del automóvil.

Donde, m_s : Masa Soportada (MS), m_u : Masa No Soportada (MNS), C_s : Coeficiente de amortiguación equivalente de la suspensión, K_s : Rigidez equivalente de la suspensión, K_t : Rigidez del caucho, Z_s : Posición de la MS, Z_u : Posición de la MNS, F_b : Excitaciones internas en la MS, F_w : Excitaciones internas en la MNS, Z_r : Posición en el perfil de la carretera.

Al resolver el sistema de ecuaciones (Gillespie, 1992), se obtiene la respuesta de la MS y la MNS a la excitación de la rugosidad de la carretera. La Fig.7 muestra la respuesta de la MNS y la deformación del caucho. Esta última se calcula al restar la rugosidad de la carretera a la respuesta de la MNS. De este análisis también se calcula que la velocidad de trabajo del amortiguador está alrededor de 82.5mm/s, la cual corresponde al rango de alta velocidad según la Fig. 5.

Se puede calcular un valor RMS (Raiz cuadrático medio ó Root Mean Square) de las variaciones de la fuerza que ejerce el suelo sobre el caucho (ΔF_{v_i}) a partir del valor RMS de la respuesta de deformación del caucho (ΔZ_i). Ver Eq. 2.

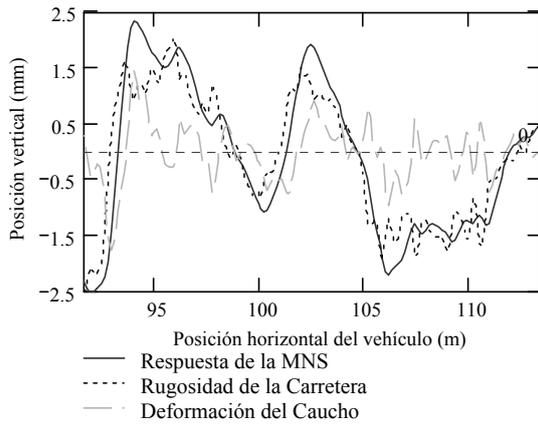


Fig. 7. Respuesta del modelo de 1/4 de carro.

$$(\Delta F_{VT})_{RMS} = K_t \cdot (\Delta Z_t)_{RMS} \tag{2}$$

Luego se puede calcular la incomodidad del caucho (D_i). Ver Eq.3 (Dixon, 1999). Si D_i es nula, entonces la fuerza vertical sobre el caucho es constante, lo que implica que el agarre del caucho al suelo es constante. Esto se traduce en mejor maniobrabilidad del vehículo.

$$D_T = \frac{(\Delta F_{VT})_{RMS}}{F_{VTmean}} \tag{3}$$

Se busca minimizar D_i . Para esto se calcula la respuesta del vehículo con diferentes factores de amortiguación (ζ). La Fig. 8 muestra que el rango óptimo para ζ está alrededor de 0.5. También se observa que si ζ aumenta, la incomodidad del caucho no aumenta en gran proporción, pero si ζ disminuye, la incomodidad del caucho sí aumenta rápidamente.

5 Definición de parámetros básicos del amortiguador

Para la relación compresión-extensión se tiene como objetivo de diseño el valor recomendado por la literatura

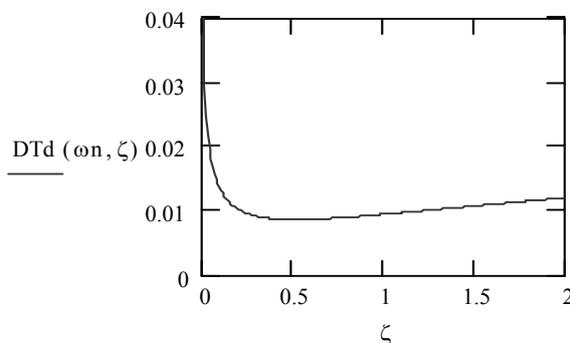


Fig. 8. Gráfica Incomodidad del caucho Vs. Factor de amortiguación

(Dixon, 1999) que también corresponde a lo mostrado en la tabla 1, es decir, $Rce = 40 / 60$.

Por otra parte, en concordancia con las curvas en la Fig.5, se quiere que la curva característica tenga una pendiente mayor a baja velocidad y una menor a alta velocidad. A baja velocidad (movimientos de cabeceo y rolido) conviene que el carro tenga una respuesta rápida a las órdenes del piloto. Para esto se necesita una alta amortiguación que permita una rápida transferencia de peso a las ruedas cargadas con mayor peso. A alta velocidad, la amortiguación es necesaria para disminuir las fuerzas transmitidas cerca de resonancia y por tanto mantener la estabilidad del vehículo (Dixon, 1999; Penske, 2004).

El análisis con el modelo de 1/4 de carro desarrollado muestra que existe un rango de amortiguación para el cual se maximiza el agarre del caucho al piso. Sin embargo, este análisis se limita a hallar la respuesta a la excitación de la carretera en régimen permanente. Para un análisis más profundo es necesario hallar la respuesta transitoria del vehículo en cabeceo y rolido. Para esto ya no se puede analizar sólo una de las ruedas del vehículo. Por otra parte, hay que tomar en cuenta que el proceso de creación de un vehículo no es sólo a partir de análisis dinámicos teóricos. Un prototipo de vehículo siempre es sometido a pruebas en pista para afinar su desempeño antes de llevarlo al mercado.

Tomando en cuenta lo anterior, se decide tomar como curva característica objetivo para el prototipo la misma determinada experimentalmente para el amortiguador de carrera. Esto considerando que el F-SAE tiene un buen desempeño en pista con esos amortiguadores. Además, con esa curva característica, el factor de amortiguación del vehículo queda dentro del rango recomendado para optimizar la maniobrabilidad. La Fig. 9 muestra cómo varían las calidades de manejabilidad (Q_R) y maniobrabilidad (Q_H) respecto al factor de amortiguación.

La Fig. 10 muestra la curva característica objetivo y las linealizaciones correspondientes para estimar el coeficiente promedio de amortiguación. Luego, el coeficiente promedio de amortiguación es:

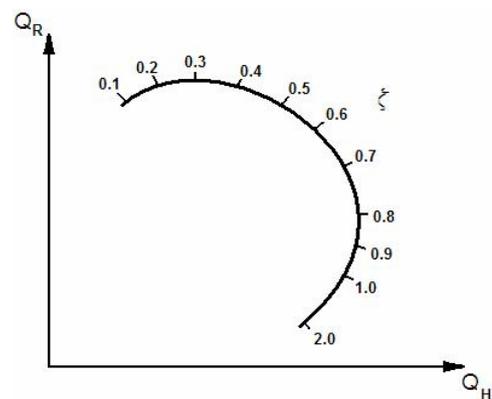


Fig 9. Curva calidades manejabilidad-maniobrabilidad variando amortiguación. (Dixon, 1999)

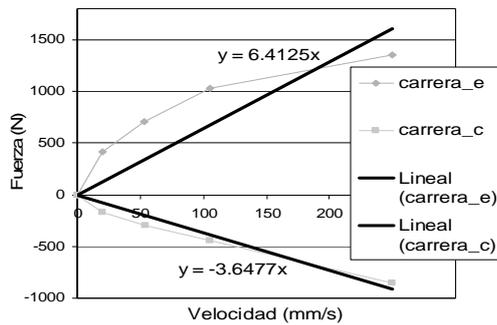


Fig. 10. Curva característica objetivo.

$C_a = 5030 \frac{N \cdot s}{m}$, y el factor de amortiguación es

6 Análisis de cargas y resistencia mecánica

Habiendo estimado una curva característica objetivo y la velocidad máxima (0.25m/s), se pueden estimar las cargas máximas que recibirán las piezas del prototipo en extensión y compresión. Por otra parte, como se quiere que el amortiguador sea también el tope de movimiento de la suspensión del vehículo, se calculan las cargas generadas en esos casos. Una vez definida una geometría tentativa de todas las partes del prototipo y las cargas generadas en el amortiguador, se procede a hacer un análisis para verificar la resistencia a fluencia y fatiga de cada una de las partes.

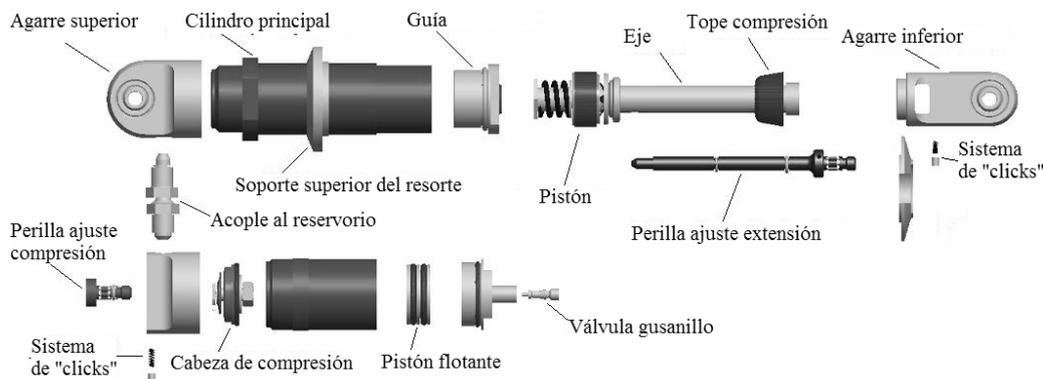


Fig. 12. Partes relevantes del prototipo

El coeficiente promedio de amortiguación del prototipo es $C_{a_{USB}} = 1456 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$. Este valor es menor que el objetivo (5030N·s/m). La relación compresión-extensión del prototipo es $R_{ce_{USB}} = 50/50$. Este valor es relativamente cercano al objetivo (40/60).

Los resultados anteriores sugieren que hay que hacer cambios en el prototipo para acercarlo a los parámetros objetivos de diseño. Es necesario modificar

Se usan herramientas computacionales debido a la complejidad en geometría de la mayoría de las piezas.

7 Prototipo final

La Fig. 11 muestra el prototipo final armado. Todas las piezas se hacen con el uso de torno y fresa convencionales. Para el ensamblado del prototipo se toma especial atención a que estén bien limpias todas las partes, ya que cualquier impureza dentro del cilindro puede afectar considerablemente el comportamiento característico del amortiguador. La Fig. 12 muestra e identifica las partes relevantes del prototipo final

8 Prueba

El prototipo se monta en un banco de pruebas para determinar su curva característica. La Fig. 13 muestra una comparación de la curva característica real del prototipo con la objetivo de diseño.

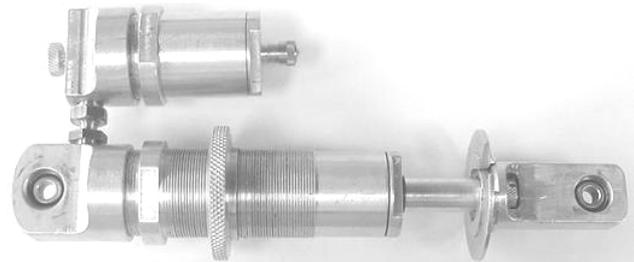


Fig. 11. Prototipo final armado.

la configuración de los cuerpos de válvulas tal que se aumenten las pérdidas del paso de fluido y por tanto se aumenta el coeficiente de amortiguación.

Por otra parte, hay que resaltar que la curva característica del prototipo tiene buena apariencia. De hecho es muy parecida a la de un amortiguador de carro comercial. Esto sugiere que luego de hacer las modificaciones antes mencionadas, el prototipo podrá usarse en el F-SAE

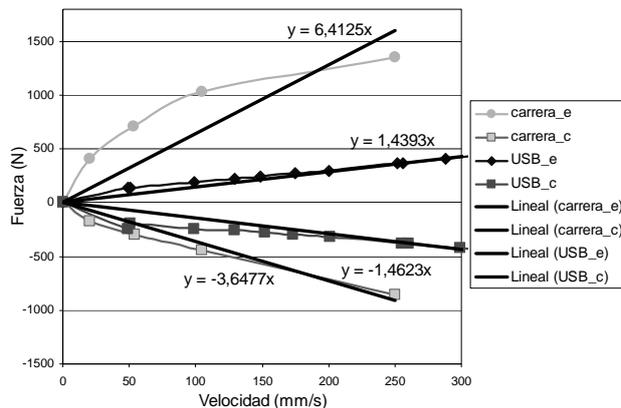


Fig. 13. Comparación curva característica real con la objetiva.

9 Resumen de características y ventajas del prototipo

- **Peso:** Todo el prototipo armado como en la Fig. 12 pesa 478g. Es más pesado que el amortiguador de bicicleta (338g) pero mucho más liviano que el de carrera (992g).
- **Longitud y recorrido:** Está diseñado especialmente para las especificaciones del F-SAE USB 2005 (El amortiguador incluye los topes de movimiento a compresión y extensión del FSAE). Su longitud de diseño es de 203.2mm. El recorrido total es de 42.8mm.
- **Curva característica:** El objetivo es una curva parecida a la correspondiente del amortiguador de carrera. Es necesario hacer algunos ajustes en los cuerpos de válvulas para aproximarse al desempeño deseado.
- **Agarres al vehículo:** Diseño esbelto para facilitar el diseño de las piezas a las que se acopla (e.g. balancín). Además facilitan el montaje en el vehículo.
- **Configuración:** Tipo telescópico con reservorio remoto. Dentro del reservorio está el pistón flotante que separa el aceite del gas. El gas está en un volumen aproximado de 7.7cm^3 y es presurizado a 7.8atm ó 115psi.
- **Diámetros:** Pistón: 25mm; Eje: 12.7mm; Interno del reservorio: 27.5mm.
- **Aceite:** Especial para amortiguadores automotrices, Viscosidad @ $40^\circ\text{C} = 0.11\text{Stokes}$.
- **Sellos:** O-rings de NITRILÓ para sellos entre las partes; Sello del eje: Sello tipo "U", especial para aplicaciones hidráulicas con vástagos; Sello del acople al reservorio: Ajuste cónico; Sello del gas presurizado: Válvula de gusanillo.
- **Resistencia a la corrosión:** Sí.
- **Ajustabilidad:** Una perilla para graduar amortiguación a compresión y otra para extensión. Sistema de "clicks" para ubicar la posición de las perillas. Regulación a través de válvulas de aguja. Es necesario hacer pruebas para verificar la ajustabilidad. El sistema de ajuste en extensión consta de una sola pieza (y no de dos como el amortiguador de bicicleta), lo que elimina el desgaste y aumenta la durabilidad.

- **Desarmabilidad:** Diseño que procura un fácil desarmado, de modo que facilita hacer cambios en las válvulas. Esta ventaja no la poseen los amortiguadores comerciales estudiados en este trabajo.
- **Confiabilidad y consistencia:** Hay consistencia de su curva característica. Sin embargo, es necesario hacer más pruebas en el banco y luego probarlo montado en el F-SAE para garantizar su confiabilidad. También consistencia implica que al fabricar otro amortiguador, éste tenga un comportamiento muy parecido al primero. Para esto es necesario maquinarse cuidadosamente las piezas del prototipo con CNC.
- **Disponibilidad:** Se puede construir en Venezuela. Sólo hay que importar las articulaciones esféricas para los agarres superior e inferior.
- **Costo:** Aproximadamente 400.000 Bs, incluyendo materiales y fabricación. Este precio es considerablemente mejor que las opciones para bicicleta y vehículos de carrera.

10 Conclusiones

- Es posible diseñar y construir amortiguadores especializados en cuanto a sus características y desempeño para un vehículo de carreras como el Fórmula SAE haciendo uso de recursos en su gran mayoría disponibles en Venezuela.
- Aunque es necesario llevar a cabo más pruebas, el prototipo diseñado cumple con los requerimientos de desempeño, ajustabilidad, confiabilidad, costo, disponibilidad y peso, resultando en una opción favorable para su uso en un Fórmula SAE frente a las opciones disponibles comercialmente de autos o bicicletas.
- Este prototipo fácilmente desarmable y modificable permitirá la realización de muchas pruebas con las cuales se podrá conocer más sobre el diseño y funcionamiento de amortiguadores automotrices.

11 Agradecimientos

Los autores agradecen a Gabriel de Venezuela C.A., ELECON C.A. y al Decanato de Estudios Profesionales de la USB por el apoyo para la realización de este proyecto.

Referencias

- Dixon JC, 1999, The Shock Absorber Handbook, SAE Internacional, Warrendale, PA, EEUU.
- Gillespie TD, 1992, Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, EEUU.
- Karamihas S, International Roughness Index (IRI), The University of Michigan Transportation Research Institute, EEUU, Recuperado el 17-11-2004 en el sitio web <http://www.umtri.umich.edu/erd/roughness/index.html>.
- Koni Shocks, Race Shocks 2812 Series, EEUU, Recuperado el 07-09-2004 en el sitio web http://www.koni.com/_racing.
- Milliken FW y Milliken DL, 1995, Race Car Vehicle Dynamics, SAE Internacional, EEUU.

National Aluminium Limited Company, 2002, Aluminium Products Catalog, disponible en el sitio web <http://www.nalco.co.nz>, p.67.
Penske Shocks, Adjustable Tech Manual Penske, EEUU, Recuperado el 07-09-2004 en el sitio web

<http://www.penskeshocks.com>.

Romero JC, 2005, Diseño y construcción de un prototipo de amortiguador para un vehículo Fórmula SAE, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.