

DESENVOLVIMENTO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE SUSPENSÃO AUTOMOTIVA PARA BANCADA DE LABORATÓRIO

Jean Carlos Campos Rezende

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2160 – Campus Santa Mônica
jccrezende@mecanica.ufu.br

José Antônio Ferreira Borges

Universidade Federal de Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2160 – Campus Santa Mônica
zeborges@mecanica.ufu.br

Resumo: Atualmente a indústria automotiva conta com ferramentas computacionais para simular as condições reais de uso de seus produtos proporcionando uma maior dinâmica no desenvolvimento dos mesmos. Entretanto apesar dos benefícios proporcionados por tais ferramentas a construção de modelos ainda que em escala reduzida se faz necessário para obtenção de informações do comportamento do sistema em estudo nas suas condições reais de operação. Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivos o projeto e a construção de um sistema de suspensão automotiva em escala reduzida para bancada automotiva, assim como a elaboração de um modelo de multi corpos que represente com a maior fidelidade possível o comportamento dinâmico do sistema. A principal característica exigida no projeto do protótipo da suspensão para $\frac{1}{4}$ de veículo foi a flexibilidade da geometria do sistema para proporcionar a possibilidade de se estudar o comportamento dinâmico do mesmo em diversas configurações geométricas. Para atender a este requisito foi escolhido dentre os vários sistemas de suspensão existentes o sistema de suspensão duplo triângulo (SLA). Utilizando técnicas de similitude tomou-se como referência para o modelo reduzido medidas de alguns componentes da suspensão de um automóvel que utiliza o sistema de suspensão escolhido. A escala de redução adotada foi estabelecida de acordo com o pneu escolhido para o protótipo, que no caso foi um pneu para Kart, por ser este o pneu de menor tamanho que traz semelhança com um pneu real de automóvel. Para construção de um modelo computacional que represente o sistema foi utilizado o software de simulação de multi corpos ADAMS®. Após a construção do protótipo, serão realizados ensaios experimentais para a validação do modelo computacional.

Palavras-chave: Suspensão, similitude, multi corpos, simulação, ensaios experimentais.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas os avanços tecnológicos dos computadores, juntamente com o desenvolvimento de softwares de simulação proporcionaram à indústria automobilística uma maior dinâmica no desenvolvimento de seus novos produtos. Convencionalmente durante o desenvolvimento de um veículo, vários protótipos eram construídos e testados antes que se chegasse à sua versão final. A construção dos protótipos e a realização de vários ensaios experimentais para a avaliação dos mesmos demandavam elevados recursos financeiros e períodos de tempo. Com o surgimento de ferramentas computacionais como, por exemplo, os programas para modelagem multi corpos, a indústria automobilística conseguiu reduzir consideravelmente o tempo de desenvolvimento de seus produtos. Utilizando estes programas é possível a elaboração de modelos computacionais que permitem executar rapidamente quaisquer modificações de projeto e simular os veículos em diversas condições de operação, diminuindo assim o número de protótipos a serem construídos e ensaios experimentais necessários durante o desenvolvimento do veículo.

Entretanto como dito no parágrafo anterior, o uso destas ferramentas computacionais apenas reduziu o número mas não eliminou a necessidade da construção de protótipos. Por mais bem elaborado que seja o modelo computacional de um sistema, este não é capaz de englobar alguns aspectos particulares do sistema real tais como as folgas, imperfeições nos materiais e defeitos de fabricação dos componentes mecânicos que constituem o sistema estudado. Assim, a construção de um protótipo, mesmo que em escala reduzida, e a realização de ensaios experimentais é inevitável. Um protótipo viabiliza a complementação e validação do modelo computacional uma vez que este prevê com maior confiança os aspectos cinemáticos e dinâmicos do veículo.

Dentro deste contexto este trabalho aborda os procedimentos efetuados no projeto de um protótipo em escala reduzida de um modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo equipado com um sistema de suspensão duplo triângulo (SLA) para bancada de laboratório, assim como a elaboração de um modelo mutli corpos que represente com maior fidelidade possível o comportamento cinemático e dinâmico deste sistema.

O protótipo a ser construído dará suporte a projetos de pesquisa relacionados ao controle de suspensões automotivas, podendo ser empregado como aparato experimental para o desenvolvimento e testes de dispositivos de controle ativos ou semi-ativos. Além disto, o protótipo também poderá ser utilizado em ensaios experimentais para investigar a influência de parâmetros geométricos ou físicos de um sistema de suspensão sobre o comportamento cinemático e dinâmico do modelo de $\frac{1}{4}$ de veículo.

2. ROTEIRO ANALÍTICO

2.1 Características Gerais do Sistema de Suspensão Escolhido para o Protótipo

A principal característica exigida no projeto do protótipo da suspensão para $\frac{1}{4}$ de veículo foi a flexibilidade da geometria do sistema para proporcionar a possibilidade de se estudar o comportamento dinâmico do mesmo em diversas configurações geométricas. Para atender a este requisito foi escolhido dentre os vários sistemas de suspensão existentes o sistema de suspensão duplo triângulo (SLA). Antes de descrever os procedimentos de projeto do protótipo e caracterizar todos os ajustes possíveis para sua geometria de suspensão, faz-se aqui uma descrição de como o sistema de suspensão escolhido trabalha em um veículo real.

O sistema de suspensão SLA é o mais utilizado em veículos de competição, uma vez que suas características de projeto lhe conferem a possibilidade de se obter o máximo desempenho dos pneus e conseqüentemente do veículo. Porém o uso deste sistema não é restrito a veículos de competição, podendo ser verificada a sua utilização em alguns veículos de rua, principalmente nos Estados Unidos. A sua configuração apresenta dois braços de controle, um superior e outro inferior sendo o superior mais curto que o inferior. Nos Estados Unidos os braços são chamados de A-arms e na Inglaterra de Wishbones (Gillespie, 1992). Um exemplo deste sistema pode ser visto na Fig (1).



Figura 1: Suspensão duplo triângulo (SLA).

O alto nível de desempenho conseguido por este sistema de suspensão é atribuído à capacidade de sua geometria conseguir um maior ganho negativo de cambagem das rodas quando a suspensão é

comprimida, comparada aos demais sistemas. Isto acontece porque o braço superior curto faz com que a parte superior do cubo seja puxada para dentro mais intensamente que o braço inferior mais longo move a parte inferior também nesta direção. Este comportamento dos braços de controle faz com que em uma curva, onde o veículo rola, as rodas e os pneus externos permaneçam quase sempre perpendiculares à pista, tornando máxima a potência disponível para o veículo executar a curva (Adams, 1993).

Uma variação deste sistema é a utilização de braços de controle paralelos e de mesmo comprimento. Esta configuração evita as deflexões que aparecem durante a execução de curvas mais agressivas, mantendo o alinhamento das rodas e da direção. A desvantagem do uso desta configuração é que ela não proporciona um ganho de cambagem significativo comparado ao sistema com braços desiguais.

2.2. Metodologia de Projeto

Uma vez escolhido o sistema de suspensão duplo triângulo como base para o projeto da suspensão do protótipo de ¼ de veículo, o próximo passo foi estabelecer um layout para o sistema e definir os mecanismos que permitissem, quando possível, a variação de um parâmetro geométrico ou físico do sistema de suspensão de forma independente em relação a outros parâmetros quaisquer, tornando o protótipo o mais flexível possível. Após a avaliação de algumas idéias para o projeto foi obtida uma configuração final do protótipo para ser montado na bancada automotiva do Laboratório de Sistemas Mecânicos. Sendo definida a idéia geral para o protótipo a etapa seguinte foi estabelecer as dimensões dos componentes mecânicos como braços de controle, os pesos para representar a massa suspensa do veículo e a escolha de componentes mecânicos como rótulas esféricas, rolamentos, conjunto mola/amortecedor, pneus e roda. Para o dimensionamento dos elementos a serem fabricados, o primeiro procedimento a ser realizado foi obter informações a respeito do sistema de suspensão de um veículo real que utiliza o sistema de suspensão escolhido para servir de referência para o projeto. Foram coletadas informações como dimensões dos braços de controle, dimensões do cubo, massa total do veículo, massa não suspensa e distância entre as rodas no eixo dianteiro. De posse destas informações o próximo procedimento foi estabelecer um fator de escala que reproduzisse a geometria de suspensão do veículo de referência e permitisse ao protótipo ocupar o maior volume possível no espaço disponível para sua montagem na bancada. Entretanto o fator que determinou a escolha da escala de redução para protótipo foi o pneu a ser utilizado por ele. O pneu escolhido foi um pneu de Kart, por ser este o pneu de menor tamanho que guarda semelhança funcional com o pneu de um veículo real. Ao se confrontar as duas dimensões básicas dos pneus de Kart e do veículo de referência, ou seja, as larguras de suas bandas de rodagem e seus diâmetros foram obtidos dois fatores de escala, 1,5 e 2,5 respectivamente. Dentre estes fatores o valor de 1,5 se mostrou mais adequado para ser aplicado na determinação das dimensões dos elementos da geometria do sistema, enquanto que o valor de 2,5 se verificou como melhor fator para ser utilizado na determinação da massa suspensa do protótipo. Definidos os fatores de escala, os comprimentos dos elementos da geometria de suspensão foram estabelecidos simplesmente dividindo os valores dos elementos da geometria do veículo de referência por 1,5. Porém a determinação da massa suspensa do protótipo não foi feita desta forma uma vez que a massa não é uma grandeza geométrica.

Para a determinação da massa suspensa do protótipo, primeiramente imaginou-se um bloco retangular de aço cujas dimensões lhe conferiam o valor da massa suspensa de ¼ do veículo de referência, aproximadamente 265 Kg. Como é sabido que a densidade de um prisma retangular pode ser expressa em função de sua massa e de seu volume, a massa do mesmo pode então ser calculada pela Eq. (1).

$$M = d \times V = d \times a \times b \times c \quad (1)$$

Onde M designa sua massa, d a densidade do material do bloco retangular, V o seu volume e a , b e c as dimensões de suas arestas. A massa suspensa do protótipo foi então determinada dividindo-se os valores das dimensões das arestas deste bloco retangular pelo fator de escala 2,5 e aplicando os valores resultantes na Eq. 1, juntamente com a densidade do aço. O resultado final foi um bloco de aço maciço com massa de aproximadamente 17,5 Kg. Porém na configuração final do protótipo esta massa não foi apenas concentrada em um bloco retangular, mas sim distribuída em dois blocos retangulares, nos suportes para os braços de controle e no suporte para o conjunto mola/amortecedor.

Os elementos da geometria de suspensão do protótipo em sua configuração final divergiram um pouco da escala adotada para sua determinação, em virtude de tais elementos terem incorporado ao seu projeto modificações para que atendessem a exigência de flexibilidade permitindo alguns ajustes para modificar a geometria do sistema.

Um problema encontrado após se chegar às dimensões definitivas para a geometria da suspensão foi escolher um amortecedor que se enquadrasse ao sistema. Porém após algumas pesquisas, a solução mais simples e economicamente viável encontrada para o problema foi a utilização de um amortecedor de automóvel convencional “customizado”, que nada mais é que um amortecedor com suas dimensões principais modificadas. Como o amortecedor a ser utilizado não possui um suporte para mola, foi pensado um aparato que permitisse a montagem da mola vestindo o amortecedor e o ajuste da pré-carga da mesma.

O protótipo em sua configuração final pode ser visto na Fig. (2a), enquanto que a Fig. (2b) mostra o protótipo já montado na bancada.

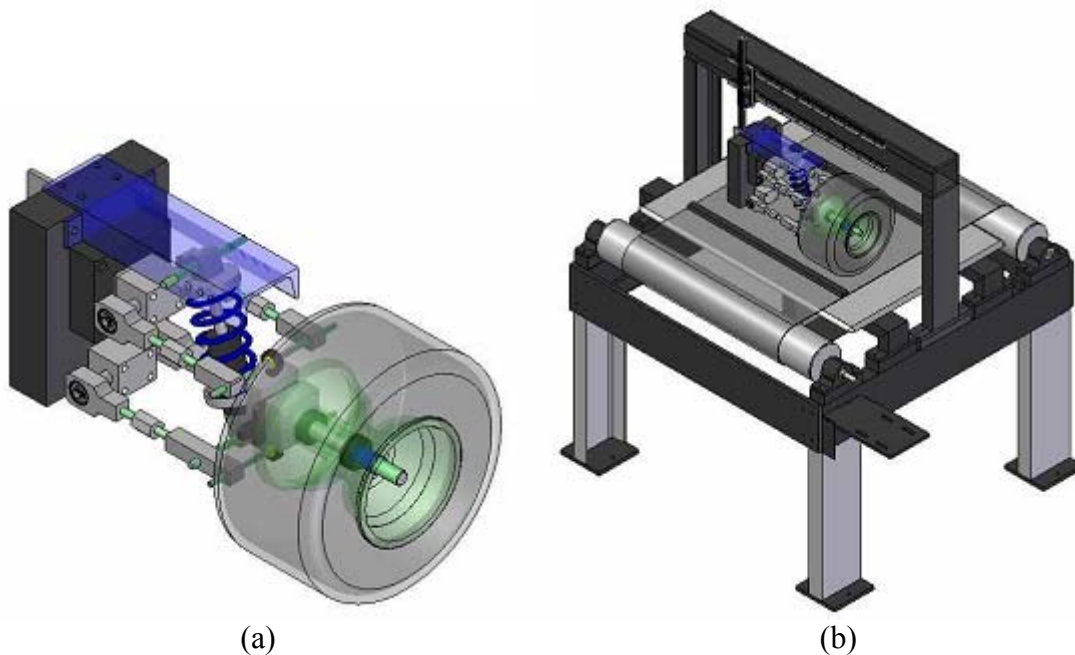


Figura 2: (a) Protótipo e (b) Protótipo montado na bancada.

O sistema de acionamento e excitação do protótipo pode ser visto na Fig. (2b). Este sistema consiste basicamente de dois cilindros sendo um deles acionado por um motor elétrico e outro por meio de uma correia plana. A correia é montada de tal forma que seu lado tencionado passe por cima da chapa plana posicionada no centro da bancada. O protótipo é então montado sobre a correia de forma que quando esta for acionada pelos cilindros transmite movimento à roda do protótipo. O sistema será excitado quando a roda do protótipo passar sobre saliências fixadas no lado tencionado da correia. Esta excitação dará origem a dois movimentos distintos, o movimento vertical da massa suspensa e o movimento da roda, caracterizando-se então o sistema como tendo 2 graus de liberdade.

2.3. Particularidades do Protótipo

Um dos parâmetros físicos que podem ser ajustados no protótipo é a massa suspensa do mesmo que é formada por todos os elementos que são sustentados pela mola da suspensão. Constituem estes elementos o suporte para montagem do protótipo na guia linear da bancada, suporte para montagem do amortecedor, suporte das balanças e dois blocos retangulares de dimensões $0,2 \times 0,16 \times 0,048$ m e $0,1 \times 0,094 \times 0,034$ m. Juntos todos estes elementos contabilizam a massa suspensa de 17,5 Kg, a qual pode ser modificada fixando-se blocos metálicos de massa conhecida à lateral do bloco metálico de maiores dimensões. Ao modificar a massa suspensa do sistema estarão sendo modificadas suas frequências naturais.

Outro parâmetro físico que pode ser ajustado é a força de amortecimento do sistema. Este parâmetro pode ser modificado alterando-se o ângulo de montagem do conjunto mola/amortecedor com relação à vertical. Para isto basta mudar o ponto de fixação da extremidade superior do amortecedor, escolhendo qualquer uma das quatro posições definidas no suporte em forma de perfil C solidário ao bloco de aço retangular de maior dimensão. Os ângulos possíveis para a montagem do amortecedor são aproximadamente 10° , 15° , 20° e 25° . Não foram previstas posições de montagem para ângulos superiores a 30° , pois a partir deste valor de inclinação os amortecedores convencionais trabalham de forma ineficiente (Adams, 1993). Quanto à mola o único ajuste permitido será a pré-carga aplicada.

Os braços de controle inferior e superior apresentam grande semelhança, tendo como principais diferenças o fato de que os braços inferiores são mais compridos que os braços superiores e apresentarem uma posição para o posicionamento de uma barra onde é fixada a extremidade inferior do amortecedor. Porém apesar das diferenças, tanto os pares de braços inferiores e superiores possuem o mesmo mecanismo de ajuste que permite a variação de seu comprimento em até 0,02 m. Tal mecanismo influenciou o projeto destes braços de controle, que são constituídos por três peças distintas. Basicamente tem-se as duas peças das extremidades com roscas internas, e entre elas uma peça intermediária com a parte central sextavada e as suas extremidades cilíndricas com roscas externas. O sistema de ajuste funciona de forma semelhante a um esticador para cabo de aço, apertando ou despertando a peça intermediária consegue-se mudar o comprimento dos braços. Com este sistema é possível realizar ajustes de cambagem e de divergência ou convergência das rodas. Além disto o comprimento dos braços influencia a posição do centro instantâneo da suspensão, que é o ponto em torno do qual os braços de controle da suspensão giram em um dado instante (Milliken and Milliken, 1995). A posição do centro instantâneo na vista frontal é responsável pelo controle das forças e dos movimentos devido às acelerações laterais. Os braços de controle inferior e superior podem ser vistos nas Figs. (3a) e (3b).

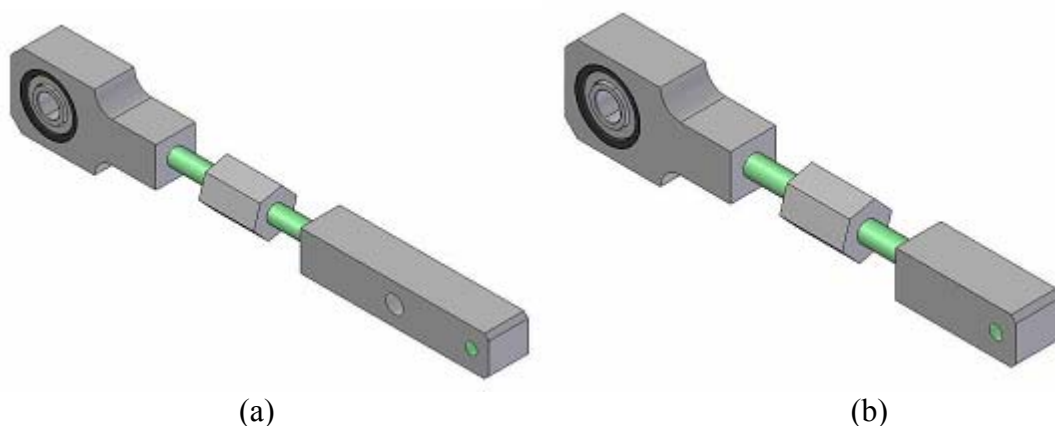


Figura 3: (a) Braço de controle inferior e (b) Braço de controle superior.

Ainda com relação aos braços de controle existe a possibilidade de se ter o sistema completamente modificando montando-se dois pares de braços de controle paralelos e de mesmo

comprimento. Para isto, porém é necessária a retirada do bloco retangular de menor dimensão e a montagem do suporte dos braços diretamente no bloco retangular de maior tamanho. Além disto o par de braços de controle superior deve ser substituído por um par de braços de controle idêntico ao conjunto inferior.

Outro ajuste que pode ser realizado com os braços de controle é a mudança do plano em que são montados. Estes podem ser montados com os braços superiores e inferiores paralelos, ou inclinados. Para isto foram previstas três posições diferentes de montagem para os braços de controle da balança superior.

O cubo do protótipo pode ser visto na Fig. (4). Este elemento do sistema de suspensão do protótipo é constituído por três peças montadas uma adjacente à outra. Na primeira peça estão montadas duas rótulas esféricas que conectam o cubo aos braços de controle das balanças superior e inferior. Estas rótulas juntamente com a peça intermediária posicionada entre a primeira e a terceira peça, permite que a roda do protótipo seja esterçada. O ângulo máximo de esterçamento permitido é de 13° para direita e 13° para esquerda. A terceira peça que integra o conjunto é um eixo onde é montada a roda do protótipo. As três peças são unidas por quatro parafusos. A razão para que o cubo do protótipo seja formado por três peças distintas é atribuída ao fato de que desta forma existe a possibilidade de se inserir pequenas cunhas para o ajuste da cambagem e convergência ou divergência das rodas sem, contudo alterar o comprimento dos braços de controle.

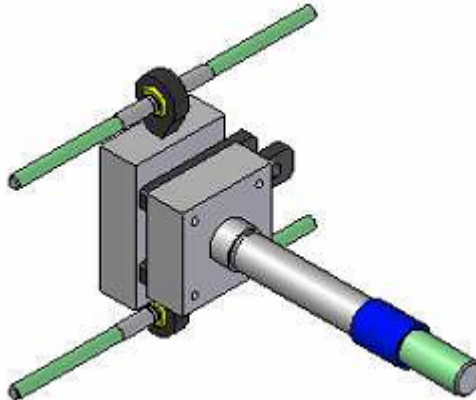


Figura 4: Cubo do protótipo.

2.4. Modelo computacional

Uma das etapas previstas neste trabalho é a elaboração de um modelo computacional do protótipo que represente com a maior fidelidade possível seu comportamento em diversas condições de operação. Para executar esta tarefa foi utilizado o software comercial de simulação multi corpos ADAMS®.

A primeira etapa cumprida na modelagem foi a execução, por meio de uma ferramenta de CAD, dos desenhos tridimensionais dos principais corpos rígidos que compõem o sistema. Estes desenhos foram então incorporados ao programa de simulação, onde cada corpo rígido do modelo foi associado a seus parâmetros de massa e inércia. A etapa seguinte foi estabelecer os vínculos cinemáticos entre cada um destes corpos rígidos definindo-se então as juntas de revolução, juntas esféricas e juntas de translação do modelo.

Para finalizar o modelo devem ser atribuídas suas propriedades de rigidez e amortecimento. As propriedades de rigidez compreendem a rigidez da mola e a rigidez radial do pneu. O amortecimento do sistema é proporcionado pelo amortecedor viscoso. Devem, portanto ser incorporados ao modelo os valores da constante de rigidez da mola, rigidez radial do pneu e coeficiente de amortecimento do amortecedor.

2.5. Etapas Futuras

As etapas futuras para o trabalho compreendem:

- O projeto e a construção de uma mola com rigidez adequada para o protótipo.
- Construção do amortecedor e suporte da mola.
- Realização de ensaios experimentais para determinação da rigidez radial do pneu, uma vez que este parâmetro é conhecido apenas de valores citados na literatura.
- Realização de ensaios experimentais para o levantamento da curva de amortecimento do amortecedor e conseqüentemente extração de seu coeficiente de amortecimento.
- Ajustar o modelo multi corpos com as informações de rigidez da mola, pneu e coeficiente de amortecimento do sistema.
- Realização de ensaios experimentais com o protótipo após sua construção.
- Reproduzir os ensaios experimentais com o modelo computacional.
- Confrontar os resultados das simulações com os resultados dos ensaios experimentais, validando então o modelo computacional.

2.6. Conclusões

Como conclusões até este momento pode-se dizer que a metodologia adotada para o projeto do protótipo em escala reduzida mostrou-se válida, uma vez que se conseguiu um modelo de suspensão com um nível considerável de flexibilidade geométrica e que se adaptou perfeitamente à bancada automotiva.

3. AGRADECIMENTOS

Nesta seção gostaria de agradecer a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por disponibilizar os recursos financeiros necessários para a execução do projeto.

4. REFERÊNCIAS

Adams, H., 1993, “Chassis Engineering”, Hp Books.
Gillespie, T.D., 1992, “Fundamentals of Vehicle Dynamics”, Society of Automotive Engineers, Inc.
Milliken, W.F. and Milliken, 1995, D.L., “Race Car Vehicle Dynamics”.

5. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

DEVELOPMENT, PROJECT AND CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE AUTOMOTIVE SUSPENSION FOR LABORATORY BENCHES

Jean Carlos Campos Rezende

Federal University of Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2160 – Campus Santa Mônica
jccrezende@mecanica.ufu.br

José Antônio Ferreira Borges

Federal University of Uberlândia, Av. João Naves de Ávila 2160 – Campus Santa Mônica
zeborges@mecanica.ufu.br

Abstract: *Currently the automotive industry accounts with computational tools to simulate their vehicles, making product development faster. Despite the benefits obtained by these tools, reduced scale modeling is still necessary for real system behavior information attainment. In this context, this work has as objective the project and construction of a reduced scale automotive suspension system to be used in an automotive test bench, and the multi body model that can represent the system dynamic behavior with high accuracy. The main characteristic of the quarter car suspension prototype was the system geometry flexibility to provide the possibility of studying the dynamic behavior in various geometric configurations. To accomplish this requirement the short long arm suspension system (SLA) was chosen. As a reference for the reduced model dimensions, a real SLA suspension were used by means of similitude techniques. The scaling factor was established in accordance with the chosen tire for the prototype, being this one the smallest to bring similarity with an automobile real tire. A representative multi-body model was built in a commercial software. After the prototype construction, experimental tests will be performed for model validation.*

Keywords: *Suspension, similitude, multi bodies, simulation, experimental tests.*