

XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UMA SUSPENSÃO SEMI TRAILING ARM DE UM VEÍCULO SUV

Arthur Kouyomdjian Neme

Rita de Cássia Silva

Universidade de Brasília - UnB

Área Especial de Indústria Projeção A – UnB, Setor Leste

CEP: 72444-240 Gama, Brasil

arthurkn@hotmail.com

ritasilva@unb.br

Abstract. *O presente trabalho apresenta o processo de modelagem e simulação da suspensão traseira de um veículo da categoria SUV. Será apresentado também todo o processo de obtenção de dados para a modelagem completa do veículo obtido em elementos finitos até sua simulação em multicorpos. O estudo será feito sobre a dinâmica transversal de uma suspensão do tipo semi trailing arm em um software de multicorpos. Preliminarmente será feito o estudo do comportamento da suspensão traseira experimentando deslocamento vertical variando em bound e rebound. O estudo visa futuramente à modelagem e à análise do veículo completo considerando seu comportamento em curvas.*

Keywords: *simulação multicorpos, suspensão veicular, semi trailing arm, comportamento em curvas, dinâmica transversal*

1 INTRODUÇÃO

O uso de veículos automotivos aumentou exponencialmente desde sua criação. Por isso, a busca por melhorias referentes a conforto, desempenho, economia, segurança, entre outros, também cresceu. Visando ao conforto e à segurança dos passageiros, foram inventadas as suspensões automotivas. A principal função desse sistema é evitar que as forças transmitidas pelas imperfeições da pista sejam transmitidas diretamente para o chassi, causando o desconforto dos passageiros e redução da vida útil de componentes do veículo. Além disso, o sistema de suspensão ajuda no comportamento dinâmico do veículo, auxiliando em curvas, aceleração, frenagem, além de suportar a carga suspensa (Gillespie, 1992).

Segundo Gillespie (1992), o sistema de suspensão tem as funções de: permitir movimentação vertical para que as rodas possam acompanhar o perfil do pavimento, isolando o chassi das irregularidades da pista; manter as rodas com esterçamento e ângulo de câmber desejados; reagir às forças produzidas pelos pneumáticos durante aceleração, frenagem (forças longitudinais), e esterçamento (forças laterais); resistir ao rolamento do chassi; manter os pneus em contato com o solo com o mínimo de variação de carga.

Atualmente, existem diversos tipos de suspensão que são projetadas para atender as características dos diferentes tipos de veículos que existem no mercado. A distinção mais básica é separá-las em suspensões dependentes e independentes. As suspensões dependentes têm como principal característica a transferência de movimento de uma roda para a outra, pelo fato delas serem conectadas por um eixo rígido. As suspensões independentes, diferente das dependentes permitem que cada roda se movimente verticalmente sem alterar o comportamento da roda oposta (Gillespie, 1992). Além disso, as suspensões independentes possuem uma capacidade muito maior de se adaptar ao rolamento do veículo tornando-o assim menos suscetível a capotamentos.

Embora as suspensões independentes pareçam oferecer mais vantagens para os veículos, elas não são encontradas em todos eles. Na maioria dos automóveis, principalmente nos de passeio, as suspensões são independentes na parte dianteira e em muitos casos dependentes na parte traseira. Veículos que têm características de transporte, por exemplo, caminhões, apresentam em ambas as partes suspensões dependentes. Por outro lado, em carros de luxo, alto desempenho e *off roads*, é muito comum encontrar tanto a suspensão dianteira quanto a traseira do tipo independentes. Cabe ressaltar que esta concepção acarreta um custo mais elevado e características dinâmicas bem peculiares para a proposta desse segmento.

No caso de veículos de passeio do tipo SUV encontrados no mercado atual, não existe um padrão de suspensões estabelecido. Na grande maioria deles as suspensões dianteira e traseira são independentes, mas existem modelos que apresentam suspensões dependentes na parte traseira do veículo. Tomando como exemplo os SUVs mais conhecidos do mercado, o *Jeep Renegade* do ano de 2015 apresenta uma suspensão traseira do tipo multilink, uma suspensão independente. Já outro veículo da mesma categoria, o *Ford Ecosport* 2015 apresenta um sistema de suspensão traseira dependente com um eixo de torção.

Nesse contexto, o presente trabalho será dedicado, preliminarmente, ao estudo do comportamento da suspensão traseira variando verticalmente em bound (suspensão comprimida) e rebound (suspensão tracionada) de um veículo da categoria SUV, o Toyota Rav4 do ano de 1997. A justificativa da escolha do modelo de veículo será discutida na metodologia do trabalho. O referido veículo possui as suspensões dianteira e traseira independentes.

A suspensão dianteira do veículo é a *Macpherson* que é uma das mais utilizadas em veículos de passeio. Esse tipo de suspensão utiliza pouco espaço, o que permite que motores transversais sejam utilizados, além de ajudar no esterçamento do volante pelo fato de o comportamento de uma roda não afetar a outra. Outras vantagens deste tipo de suspensão são: massa reduzida, maior curso para a mola, e maior gama de opção de designs para a parte dianteira do veículo uma vez que se possui mais espaço. (Reimpell, 2001). Pelo fato de existirem diversos trabalhos sobre esse tipo de suspensão, como os apresentados por Luís Mauro (2006) e Leandro Ribeiro (2012), ela não será estudada neste documento.

Já a suspensão traseira do modelo escolhido consiste em uma *semi trailing arm*. Encontrada principalmente na parte traseira de veículos com tração traseira ou nas quatro rodas, este tipo de suspensão deriva da *trailing arm*. A principal diferença das duas é que enquanto uma bloqueia qualquer variação de *câmbor* (*trailing arm*), a outra permite uma pequena variação deste ângulo, ajudando a manter o veículo estável em curvas. Além disso, este tipo de suspensão deve suportar forças vindas de todas as direções de modo a evitar qualquer variação em sua geometria. (Gillespie, 1992).

A temática do trabalho justifica-se diante de uma problemática que existe em veículos desta categoria. Essa categoria de carros geralmente apresenta um centro de massa mais alto que os outros encontrados no mercado. Tal característica pode afetar o desempenho do automóvel ao realizar curvas, aumentando o risco de capotamentos. O fato desse tipo de automóvel apresentar um centro de gravidade (CG) mais alto faz (Fig. 1.b) com que o momento de rolagem ou de rolamento seja maior, acarretando em maior inclinação do veículo (Fig. 1.b). Por essa razão, as suspensões presentes nessa categoria de automóveis devem ser capazes de suportar todo o momento gerado em uma curva.

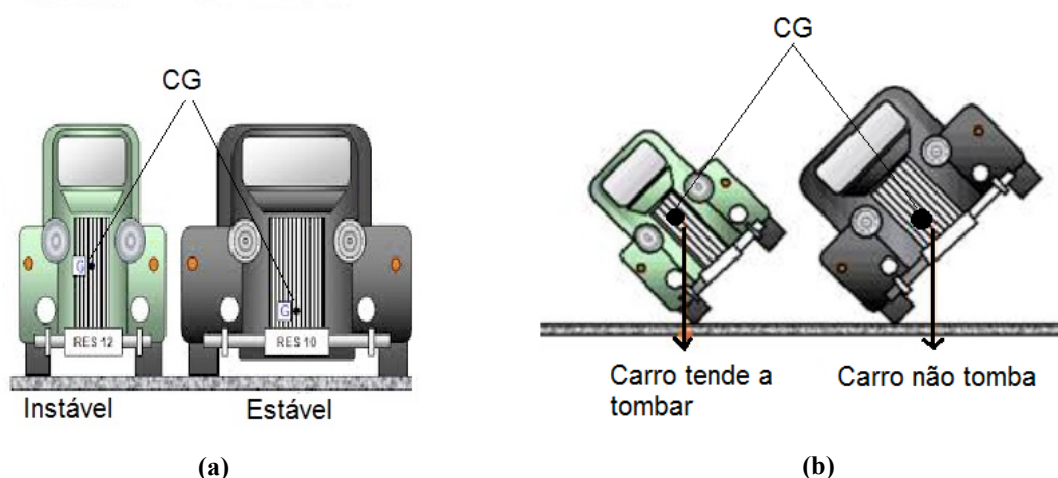


Figura 1. (a) O Carro com CG mais baixo é mais estável. (b) O carro com CG mais alto tende a tombar devido ao seu centro de rolamento. Adaptado de (www.schoolphysics.co.uk/)

Este artigo está dividido em 3 partes principais. Na primeira parte será feita uma breve explicação teórica sobre alguns conceitos que cujo entendimento é necessário para compreender os outros itens. Na segunda parte do documento, a metodologia, serão apresentados todos os aspectos importantes no processo de modelagem da suspensão até a simulação. Na última parte do estudo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos com a simulação da suspensão modelada. Por fim, uma breve conclusão comparando os resultados obtidos com a teoria inicialmente descrita será apresentada.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta parte será exposta uma breve revisão teórica sobre os conceitos que foram necessários para estabelecer as conclusões preliminares ao final do documento. Esta parte englobará os conceitos referentes à dinâmica do veículo e seu comportamento em curvas. Também serão abordados os conceitos que foram analisados na simulação, tais como a variação do ângulo de câmbor e a variação do ângulo de convergência dos pneus do veículo. O conhecimento destes conceitos é fundamental a fim de estabelecer uma análise consistente relativamente ao comportamento da suspensão traseira nesse segmento de veículo.

2.1 Dinâmica do Veículo

Por mais que o veículo seja composto por diversas peças, ele se move como um único corpo deformável. Segundo Gillespie (1992), durante uma frenagem, todo o veículo desacelera como uma unidade. Portanto, para as análises de dinâmica do veículo, toda a sua massa pode ser concentrada em um ponto específico, o centro de gravidade (CG). Com as informações corretas de centro de gravidade e os momentos de inércia do veículo é possível fazer um estudo aprofundado sobre sua dinâmica utilizando a massa concentrada.

Existem dois conceitos de massa em veículos que são chamados de massa suspensa e massa não suspensa. O conceito de massa suspensa se refere a toda massa do veículo que está sendo suspensa pelos pneus e suspensão, portanto o motor, chassi, carroceria, entre outros. Já a massa não suspensa de um veículo corresponde aos componentes que dão suporte a ele, como os sistemas de suspensão, os pneus e rodas.

A dinâmica veicular corresponde ao estudo do comportamento de um veículo de acordo com as forças que atuam sobre ele. Essas forças são provenientes dos pneus, gravidade e aerodinâmica. O estudo consiste em analisar as forças e como elas influenciam no comportamento do veículo como um todo, ou em parte dele (Gillespie, 1992). Por isso, é importante que exista uma convenção que deve ser usada para descrever os movimentos do veículo e as forças que atuam sobre ele.

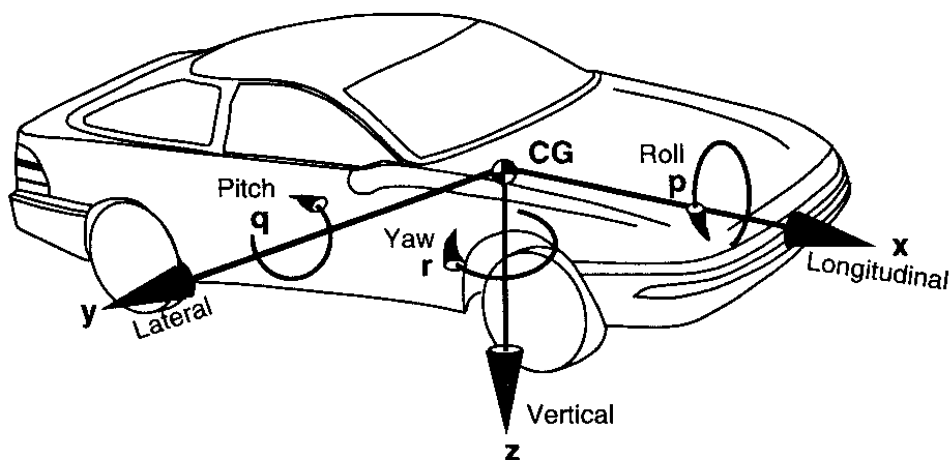


Figura 2. Sistema de coordenadas de um veículo (Gillespie, 1992)

Os movimentos do veículo, tratado como um corpo rígido, são representados por um sistema de coordenadas ortogonais localizado no CG dele. Pela convenção estipulada pela “*Society of Automotive Engineers*” (SAE) o modelo do veículo e suas forças podem ser observados na Fig. 2

Conforme apresentado na Fig.2 a dinâmica do veículo pode ser estudada em três partes. A dinâmica vertical consiste em estudos com base no conforto dos passageiros, como quando o veículo passa por uma lombada por exemplo. A dinâmica longitudinal pode ser representada pelo estudo das forças de frenagem e aceleração que atuam no veículo. Já a dinâmica lateral ou transversal do automóvel pode ser entendida como as forças que atuam no veículo, enquanto ele experimenta movimentos de curvas, por exemplo.

O foco deste estudo, conforme dito é o estudo da dinâmica transversal do veículo em curvas. No entanto, uma forma preliminar de avaliar o comportamento do subsistema suspensão em ambientes multicorpos é submetê-la a um teste denominado *parallel wheel travel*, que será melhor tratado no item (3.3.2).

2.2 Parâmetros de alinhamento das rodas

Preliminarmente, serão estudados dois parâmetros que são julgados importantes no comportamento da suspensão traseira do Rav4, o câmbor e o ângulo de convergência ou *toe*. Existem outros parâmetros que devem ser considerados em um sistema de suspensão, porém, eles apresentam uma maior aplicação nos sistemas de suspensão dianteira. Como o foco principal é o estudo somente da suspensão traseira do veículo, apenas estes dois parâmetros serão verificados.

2.2.1 Câmbor

O câmbor corresponde à inclinação da roda do veículo em relação a um plano vertical, que passa pelo centro da superfície de contato do pneu com a pista. A Fig.3 mostra como este ângulo pode ser observado em um veículo (Nicolazzi, 2012). O ângulo de cambagem é considerado positivo, quando a parte superior da roda se inclina para fora e negativo, quando inclinada para dentro.

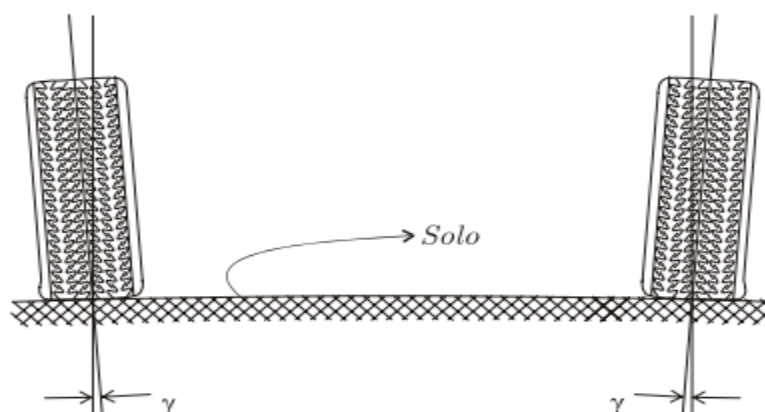


Figura 3. Representação do ângulo de câmbor, no caso positivo (Nicolazzi, 2012)

Segundo Reimpell (2001), antigamente os veículos utilizavam um ângulo de cambagem neutro e para veículos que suportavam mais de três pessoas era recomendado um ângulo positivo, de modo que quando a massa dos ocupantes carregasse as suspensões este ângulo se aproximaria de zero. Atualmente, a maioria dos veículos saem de fábrica com um valor de câmber negativo. Segundo o autor, isso é feito porque com essa configuração melhora a aderência lateral do pneu com a pista.

Outro fator a ser considerado ao estabelecer o ângulo de câmber de um veículo é o desgaste dos pneus, uma vez que quando este ângulo é diferente de zero uma menor parte do pneu está em contato com a superfície da pista, provocando um desgaste maior nessa região. A Fig. 3 mostra que para ângulos de cambagem positivos a parte de fora do pneu é a que sofre maior desgaste, e para ângulos negativos é a parte de dentro a mais prejudicada. É possível observar também que o desgaste do pneu é uniforme quando o ângulo é zero e a durabilidade do pneu é maior.

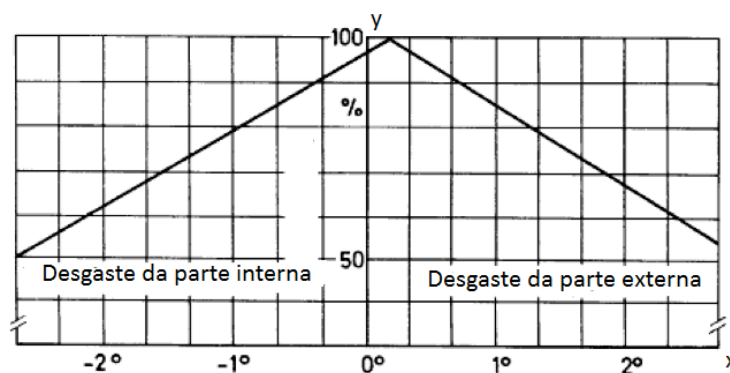


Figura 3. Desgaste do pneu devido ao câmber. Adaptado de (Reimpell, 2012)

2.2.2 Convergência

O ângulo de convergência, segundo o padrão alemão estabelecido pela DIN 70 020, é a diferença em *mm* das dimensões “*b*” e “*c*” (Fig. 5), as quais são medidas entre os aros na altura dos centros das rodas. Quando as frentes das rodas estiverem direcionadas para dentro é dito que a convergência é positiva (*toe in*), já quando as frentes estiverem apontando para fora é dito que há convergência negativa (*toe out*) (Reimpell, 2001).

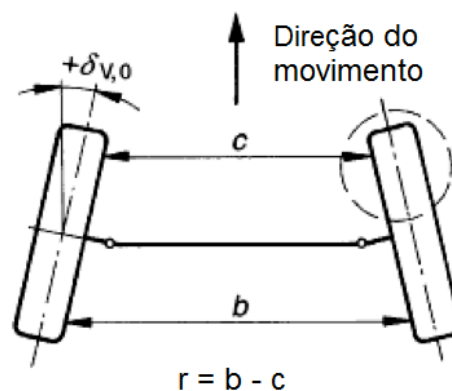


Figura 5. Obtenção do valor de convergência do eixo dianteiro do veículo. Adaptado de (Reimpell, 2001)

Com relação ao desgaste dos pneus, é possível perceber que o desgaste mais uniforme e a maior vida útil do pneu ocorrem quando o ângulo de convergência é configurado neutro. A maioria dos veículos de passeio vem de fábrica com a configuração deste ângulo neutra. Em alguns tipos de carros de competição geralmente usa-se este ângulo positivo (Reimpell, 2001). Suspensões como a do tipo *trailing arm* ou sua variante *semi trailing arm*, apresentam uma variação do ângulo de convergência praticamente nula em curvas ou em deslocamentos verticais.

3 METODOLOGIA

Nessa seção, será apresentado o processo de modelagem da suspensão traseira do veículo do presente estudo. Para a modelagem deste sistema foram usados alguns softwares que serviram de apoio na obtenção dos dados necessários, confirmação de valores e criação da geometria do sistema.

Ainda nesta seção será justificado o motivo de escolha do modelo de veículo, assim como as análises que deverão ser realizadas para obtenção dos resultados ao final do estudo. Este documento terá o foco somente nas simulações realizadas para a suspensão traseira. Salienta-se que não há grande disponibilidade de literatura técnica sobre o estudo de comportamento de suspensões do tipo *trailing arm*.

A construção do modelo multicorpos e simulação do modelo foram realizadas no MSC Adams®, um software de análise cinemática e de dinâmica multicorpos utilizado na Engenharia. O software tem a função de auxiliar no estudo da cinemática e dinâmica de mecanismos complexos e na determinação de esforços gerados, devido às forças sob determinadas condições de funcionamento (Nunes Silva, 2014). O módulo Adams/Car® do software é capaz de simular suspensões individualmente, ou em um veículo completo. É possível analisar o comportamento do veículo em curvas, aceleração, frenagem, passando em lombadas, ou simulando-o em um perfil de pista inserido pelo próprio usuário.

3.1 Projeto do veículo

Fundada em 1992, a NCAC (*National Crash Analysis Center*) na George Washington University no campus da Virginia é uma das autoridades no quesito de pesquisas e simulações na área de segurança automotiva nos Estados Unidos. A associação trabalha em parceria com as entidades reguladoras do governo americano.

O veículo utilizado neste estudo, conforme mencionado na seção 1, trata-se de um Rav4 do ano de 1997 e seu modelo em elementos finitos foi publicado no dia 12 de maio de 2008 no site da NCAC e pode ser visto na Fig. 6. Utilizando-se do software Hypermesh® foi possível retirar as informações necessárias para modelar os sistemas de suspensões, chassi e motorização do carro. Durante a modelagem do veículo, utilizou-se das coordenadas dos *keypoints*, de modo a se ter a maior fidedignidade possível.

A escolha do veículo se deu pelo fato do número de veículos disponíveis em elementos finitos pela NCAC ser limitado e apresentar poucos modelos que atendessem ao escopo do projeto (estudo de SUVs). Por esse motivo, o modelo escolhido foi o SUV mais atual disponível na biblioteca da instituição.

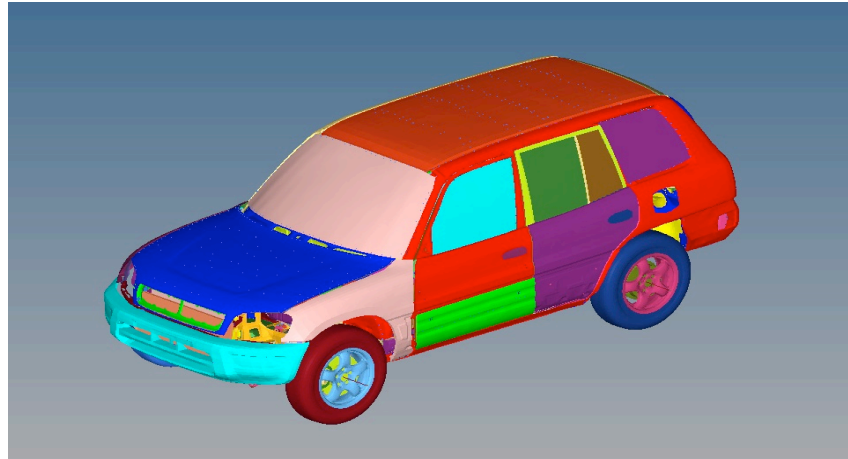


Figura 6. Modelo em elementos finitos da Toyota Rav4 disponível no site da NCAC

A suspensão do veículo em discussão é do tipo *semi trailing arm*, conforme mencionado na seção 1. Todas as informações sobre ela foram retiradas do software Hypermesh® e com o auxílio do software CAD Catia V5®, foi possível se certificar de alguns dados fornecidos pela NCAC.

A Fig. 7 mostra um fluxograma que representa o processo de obtenção dos dados para a modelagem do veículo no software de multicorpos. Pode-se perceber que vários valores importantes para a modelagem foram retirados do modelo em elementos finitos do SUV. A modelagem se inicia, a partir da importação do modelo de elementos finitos para o ambiente CAD. Nesse ambiente, procedeu-se a retirada de partes não relevantes para a presente modelagem. Ainda, nesse ambiente, foram retirados os *keypoints*, e as informações referentes ao material e espessura de cada peça. Também é preciso fazer uma comparação dos eixos de coordenadas e das unidades utilizadas nos dois softwares.

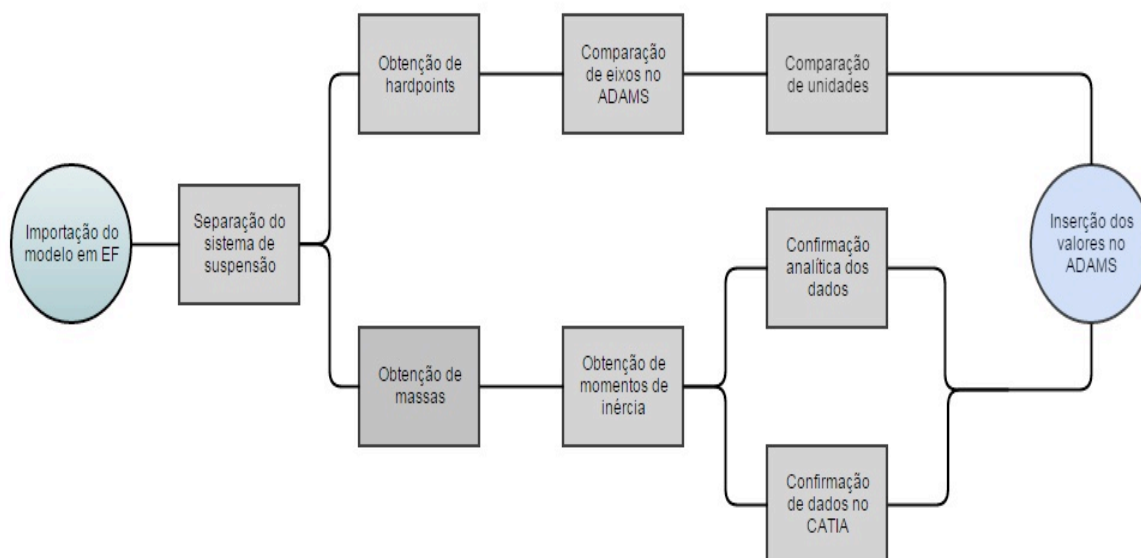


Figura 7. Fluxograma representativo das ações necessárias para obtenção de dados e modelagem em ambiente multicorpos.

3.1.1 Determinação da massa dos componentes

Após separar o subsistema de suspensão traseira do restante do veículo, utilizando o software *Hypermesh*®, foi possível separar cada elemento que a compõe e se obter as massas, de duas formas distintas.

Primeiro, o próprio software continha informações sobre o material de cada elemento, sua densidade, espessura e área. Com essas informações, foi possível calcular as massas da seguinte forma:

$$d = \frac{m}{v} \quad (1)$$

Onde, d é a densidade, m a massa e V o volume. Sabendo-se que:

$$v = A \cdot t \quad (2)$$

Onde, A é a área e t a espessura. Portanto a massa é obtida conforme a Eq. (3).

$$m = A \cdot t \cdot d \quad (3)$$

O outro método utilizado para se certificar das massas foi realizado no software *Catia v5*®, onde a peça é importada e suas propriedades analisadas. Para que o software fornecesse o valor correto da área foi preciso inserir o valor específico da densidade do material, que no caso, tratava-se do aço.

3.1.2 Determinação dos momentos de inércia de massa

Os momentos de inércia da peça também são fundamentais para garantir maior realismo na simulação das suspensões. Quando se modela a suspensão no *Adams/Car*® ele estipula uma massa e um momento de inércia para a peça criada de acordo com a geometria e o material adotado para ela, porém, as peças observadas no software de elementos finitos apresentam um formato mais complexo e disforme. Por essa razão, os momentos de inércia de todas as peças da suspensão traseira foram retirados usando o pós processador do *Hypermesh*®, que consiste em uma função do software, onde podem ser retiradas informações sobre o modelo trabalhado.

Quando o pós processador para momento de inércia é rodado no *Hypermesh*®, um documento do tipo txt é gerado contendo a massa da peça a selecionada, uma matriz 3x3 de momentos de inércia de massa, uma matriz 6x6 com os momentos de inércia de massa com relação à origem e uma 6x6 com momentos de inércia com relação ao centro de gravidade da

peça. A Fig. 8 mostra arquivo gerado e quais informações foram retiradas dele para os momentos de inércia da bandeja da suspensão.

```

Moment of Inertia
Component Name          ID  MASS          Moment of Inertia Matrix
BANDEJA ESQUERDA      2000249  0.003229  --
                                                                |
                                                                | 8.738405E+02 1.198579E+03 6.347078E+02
                                                                | 1.198579E+03 2.437598E+03 -3.44784E+02
                                                                | 6.347078E+02 -3.44784E+02 2.949013E+03
                                                                |
                                                                --

Number of Components: 1
Moment of Inertia for Model (Using origin As Center):
                                                                |
                                                                | 3.229362E-03 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00 7.620879E-01 -1.46743E+00
                                                                | 0.000000E+00 3.229362E-03 0.000000E+00 -7.62088E-01 0.000000E+00 -2.68175E+00
                                                                | 0.000000E+00 0.000000E+00 3.229362E-03 1.467427E+00 2.681748E+00 0.000000E+00
                                                                | 0.000000E+00 -7.62088E-01 1.467427E+00 8.738405E+02 1.198579E+03 6.347078E+02
                                                                | 7.620879E-01 0.000000E+00 2.681748E+00 1.198579E+03 2.437598E+03 -3.44784E+02
                                                                | -1.46743E+00 -2.68175E+00 0.000000E+00 6.347078E+02 -3.44784E+02 2.949013E+03
                                                                |
                                                                --

Moment of Inertia for Model (Using Center of Gravity As Center):
                                                                |
                                                                | 3.229362E-03 0.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00 7.620879E-01 -1.46743E+00
                                                                | 0.000000E+00 3.229362E-03 0.000000E+00 -7.62088E-01 0.000000E+00 -2.68175E+00
                                                                | 0.000000E+00 0.000000E+00 3.229362E-03 1.467427E+00 2.681748E+00 0.000000E+00
                                                                | 0.000000E+00 -7.62088E-01 1.467427E+00 2.719625E+01 2.001204E+01 -1.84970E+00
                                                                | 7.620879E-01 0.000000E+00 2.681748E+00 2.001204E+01 3.075991E+01 -1.50977E+00
                                                                | -1.46743E+00 -2.68175E+00 0.000000E+00 -1.84970E+00 -1.50977E+00 5.521675E+01
                                                                |
                                                                --
    
```

Figura 8. Documento .txt gerado com os momentos de inércia de massa.

Pela Fig. 8 é possível perceber que apenas uma parcela da matriz será utilizada na modelagem da suspensão. Isso se dá, porque a outra parcela desta matriz formada corresponde a momentos nas direções x, y e z e termos nulos. A matriz selecionada na figura corresponde aos momentos de inércia principais da peça. A Fig. 9 mostra o que cada termo da matriz representa.

$$\begin{bmatrix}
 M & 0 & 0 & 0 & MZ & -MY \\
 0 & M & 0 & -MZ & 0 & MX \\
 0 & 0 & M & MY & -MX & 0 \\
 0 & -MZ & MY & I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\
 MZ & 0 & -MX & -I_{yx} & I_{yy} & -I_{yz} \\
 -MY & MX & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_{zz}
 \end{bmatrix}$$

Figura 9. Matriz 6x6 gerada pelo software Hypermesh®

3.1.3 Hardpoints

Os *hardpoints* ou *keypoints* de uma suspensão correspondem aos pontos mais importantes para a modelagem do sistema (pontos da geometria), pois são nesses pontos que existem conexões entre as peças da suspensão ou do chassi. A Fig. 10 mostra quais foram os *hardpoints* utilizados na construção da suspensão traseira. Estes pontos também foram retirados do modelo em elementos finitos e são de extrema importância para caracterizar a geometria e comportamento da suspensão como um todo.

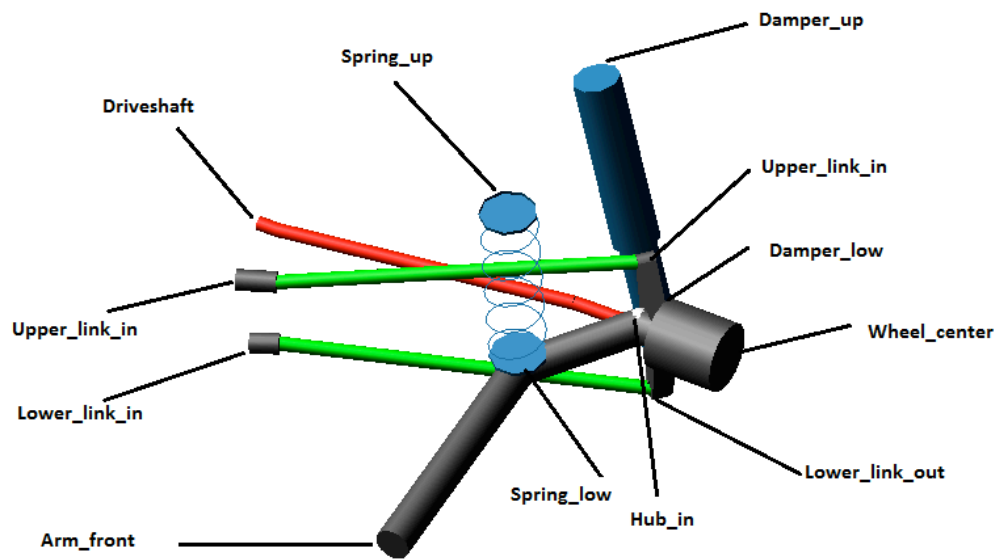


Figura 10. Principais pontos utilizados para a modelagem da suspensão traseira.

Tabela 1. Coordenadas dos *hardpoints*.

<i>Hardpoints</i>	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
Arm_front	-506.288	-582.405	38.0
Damper_low	106.192	-638.393	-86.844
Damper_up	150.106	-536.07	353.717
Driveshaft	0.0	-103.799	0.0
Upper_link_in	-139.655	-182.217	62.7
Upper_link_out	58.608	-651.02	131.75
Lower_link_in	-153.0	-187.38	-42.5
Lower_link_out	41.92	-667.36	-94.876
Wheel_center	11.923	-780.0	53.057
Spring_low	-109.171	-550.62	28.429
Spring_up	-109.171	-540.62	328.429
Hub_in	12.858	-610.0	52.47

As coordenadas dos principais pontos para a construção da suspensão traseira podem ser observados na Tabela 1. A obtenção dessas coordenadas é fundamental para garantir que a geometria do modelo em multicorpos, pelo menos nos principais pontos, seja semelhante à geometria obtida no modelo em elementos finitos, visto que o este é semelhante a um modelo real do veículo.

3.1.4 Parâmetros de alinhamento das rodas

Durante a modelagem da suspensão existem outros fatores que podem influenciar no seu comportamento além da sua geometria de forma. Um sistema de suspensão apresenta parâmetros que devem ser pensados para a modelagem de forma a manter o modelo realista. Alguns parâmetros como o câmbor e o ângulo de convergência foram retirados do manual de manutenção da Toyota. A rigidez das molas e do amortecedor também seriam parâmetros que ajudariam nos resultados finais, porém esses valores não estavam disponíveis em bibliografias. Ao gerar simulações com valores diferentes de rigidez para a mola e o amortecedor, foi possível perceber que eles não alteravam de forma expressiva os resultados finais. Portanto os valores adotados para esses parâmetros foram os fornecidos pelo software onde a suspensão foi modelada. Os valores de câmbor e ângulo de convergência utilizados podem ser vistos na Tabela 2. Estes dois parâmetros serão analisados dinamicamente durante as simulações.

Tabela 2. Parâmetros de geometria utilizados

	Lado Direito	Lado Esquerdo
Câmbor	-1.33°	-1.33°
Toe	0	0

3.2 Modelagem

Uma vez que todas as informações necessárias foram obtidas, é possível realizar a modelagem da suspensão traseira do veículo. Sua construção foi dividida em várias partes denominadas *General Part*. Essas partes representam os diferentes componentes que compõem a suspensão e são nelas que todas as informações referentes a peça estão contidas. A Fig. 11 representa como a janela referente ao braço da suspensão foi preenchida. Para os outros *General Parts*, as janelas foram preenchidas do mesmo jeito, mas com as informações referentes a cada parte.

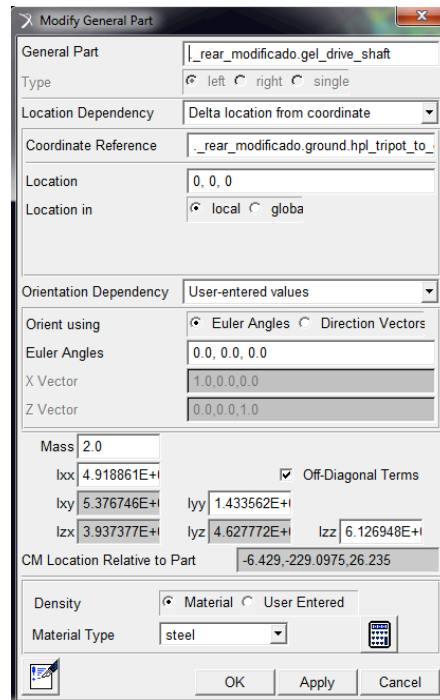


Figura 11. Janela de preenchimento do General Part do semi-eixo da suspensão

Além dos *General Parts*, outro ponto importante na modelagem da suspensão é uso adequado das juntas que estarão presentes no projeto. As juntas correspondem aos pontos de união de cada parte da suspensão. Por isso é de suma importância saber utilizá-las pois são nelas que a transferência de movimento acontece. Dependendo dos graus de liberdade que uma junta apresenta, ela pode permitir movimentos de rotação, translação, os dois, ou nenhum dos dois. Vale ressaltar também que se uma junta é utilizada de maneira errada, movimento de todo o sistema pode ser afetado gerando erros nos resultados finais. A Fig. 12 destaca todas as juntas utilizadas na construção da suspensão.

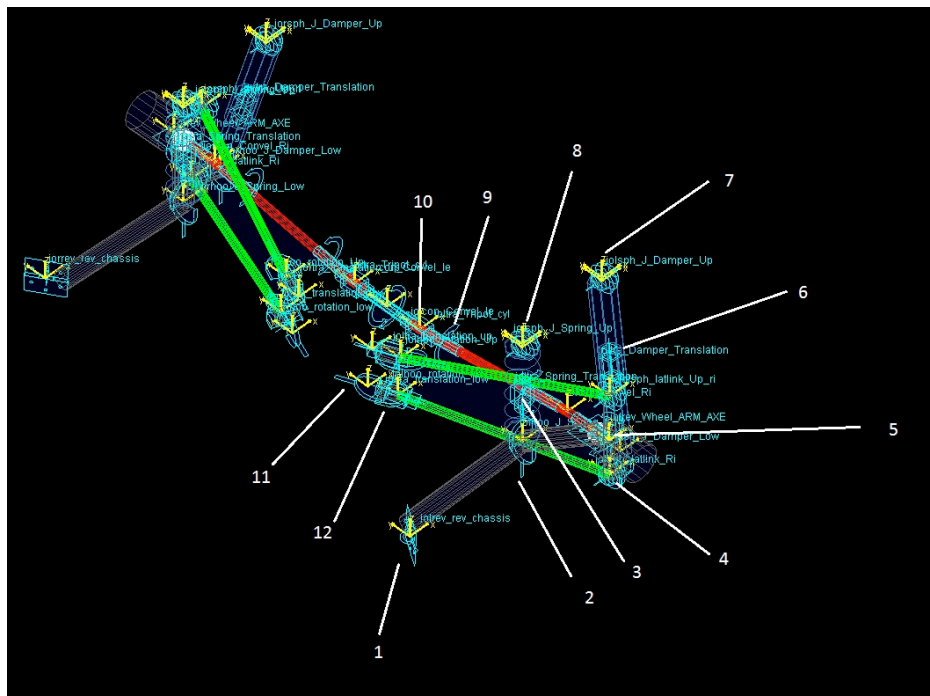


Figura 12. Juntas presentes na suspensão traseira da Rav4

Pela Fig. 12 pode-se perceber que as juntas apontadas pelos números 11 e 12 correspondem as conexões do link inferior. Para que a imagem não ficasse poluída as juntas referentes ao link superior não foram destacadas pois são exatamente iguais aos dos números 11 e 12. A função de cada junta está exposta na Tabela. 3

Tabela 3. Juntas utilizadas na suspensão e suas funções

Junta	Função
1	Junta de revolução entre o braço principal e o chassi
2	Junta do tipo gancho entre a base da mola e o braço principal
3	Junta translacional na mola
4	Junta esférica entre o braço superior e a manga de eixo
5	Junta de revolução entre a manga de eixo e o cubo de roda
6	Junta translacional no amortecedor
7	Junta esférica entre o amortecedor e o chassi
8	Junta esférica entre a mola e o chassi
9	Junta homocinética entre o semi eixo e o diferencial
10	Junta translacional entre o semi eixo e o diferencial
11	Junta do tipo gancho entre e extremidade dos links e o chassi
12	Junta translacional entre os links e o chassi

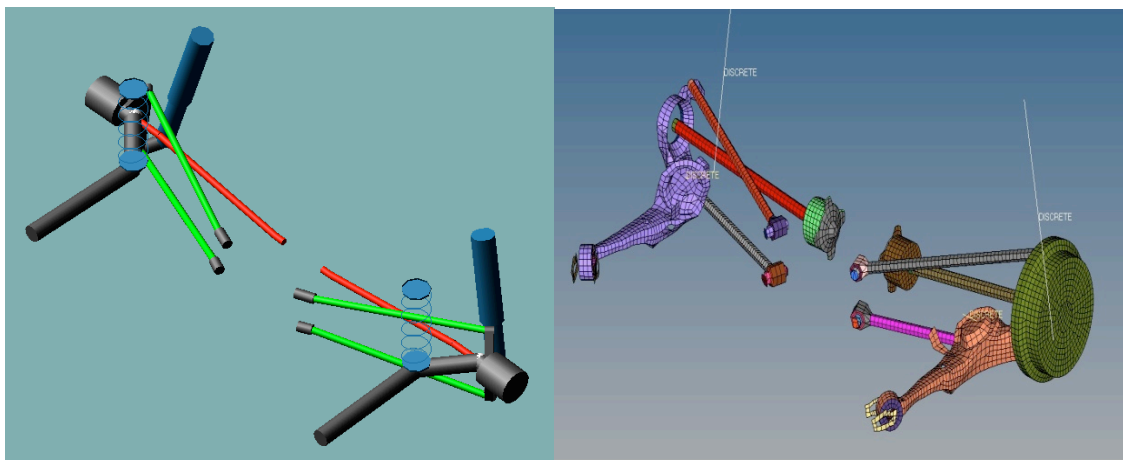


Figura 13. Comparação entre a suspensão modelada (direita) e a original (esquerda).

O produto final após todos os passos descritos nas seções 3.1.1 a 3.1.3 e na Fig. 7 está representado na Fig. 13, onde estão dispostas a suspensão modelada no software de multicorpos ao lado da suspensão destacada do veículo completo em elementos finitos. Com a imagem é possível observar que apesar da qualidade dos detalhes da suspensão modelada ser menor, a geometria das duas é semelhante e as características geométricas da suspensão original foram mantidas. Na imagem em elementos finitos, a mola e o amortecedor são representados como linhas.

3.3 Processo de simulação

Com a suspensão traseira modelada é possível dar início à etapa de simulação desta. Esta etapa será dividida em duas partes que indicarão como funciona e o porque da escolha da simulação realizada.

3.3.1 Testrig

O Testrig é um recurso oferecido pelo software que permite que o sistema de suspensão seja simulado individualmente. Desse modo, não é preciso que o resto do veículo seja modelado, apenas que o sistema de suspensão esteja modelado de forma adequada a se conectar com a bancada de testes. Esse recurso permite simular deslocamentos verticais ou fazer testes de esterçamento dos pneus e sistema de direção.

Quando se cria um *assembly* da suspensão o programa automaticamente insere rodas a ela e a coloca em cima da bancada de testes ou testrig conforme a Fig. 14. É possível alterar as características do pneu de modo que ele tenha um perfil parecido com o pneu utilizado no carro real. Portanto, as especificações dos pneus foram alteradas para que ficasse o mais próximo dos pneus utilizados no modelo da Rav4. Para isso foi inserido no software um perfil de pneu correspondente ao tipo 215/70R16 também retirados do manual de serviço do veículo (Toyota, 1997).

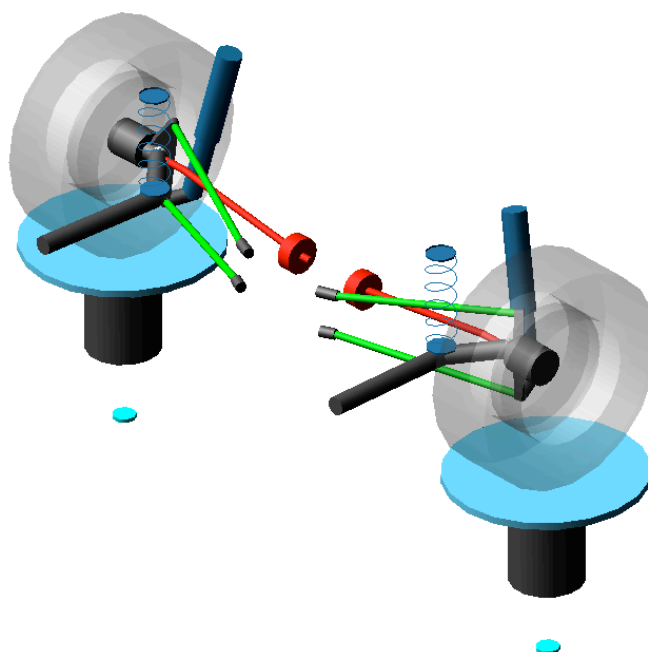


Figura 14. Suspensão traseira sobre o testrig

3.3.2 Parallel Wheel Travel

O teste a ser realizado neste estudo será o *parallel wheel travel* e consiste no deslocamento vertical simultâneo, ou seja, o testrig simula a passagem dos pneus por uma lombada onde os dois pneus atravessam ao mesmo tempo. Ao realizar a simulação o conjunto da suspensão experimenta um efeito de *bound* e um *rebound*. O primeiro corresponde ao momento em que as molas são tracionadas e o segundo o momento em que a força da lombada é exercida na direção do veículo fazendo com que as molas sejam comprimidas. A Fig. 15 ilustra como foi preenchida a imagem de simulação para o teste. Conforme sugerido por Reimpell (2001), os valores utilizados para *bound* e *rebound* foram de 80 mm e -80 mm.

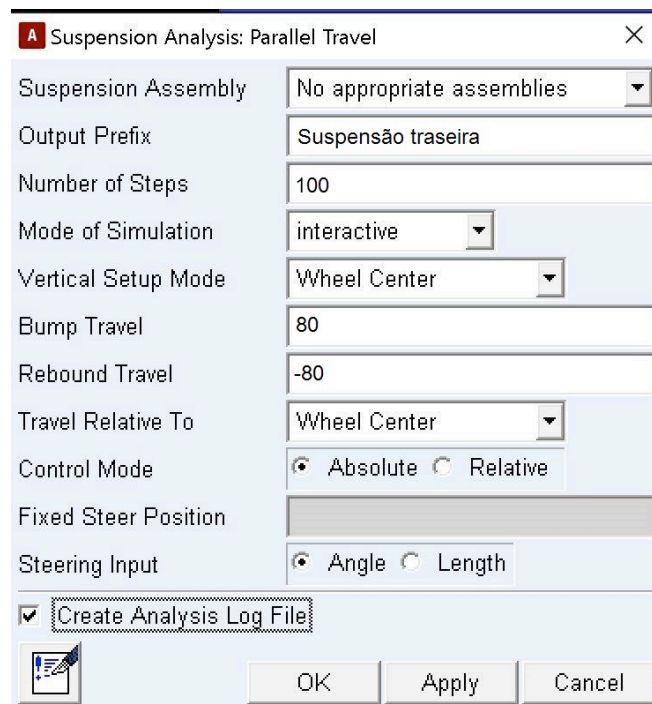


Figura 15. Janela preenchida para a simulação da suspensão

Os resultados obtidos para esta simulação serão gerados em forma de gráficos. Deste modo uma análise estática do sistema poderá ser feita gerando resultados sobre os parâmetros (câmbor e toe) desejados e o comportamento durante um deslocamento vertical da suspensão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa do documento serão apresentados os resultados obtidos graficamente com relação à simulação realizada para a suspensão traseira do Toyota Rav4 do ano de 1997. Esses resultados serão discutidos e analisados com base no que foi exposto na revisão teórica deste documento. Como se trata da suspensão traseira, apenas dois parâmetros foram levados em conta para os resultados.

4.1 Câamber

A Fig. 7 representa o resultado da simulação para a variação do ângulo de câamber da suspensão traseira. O gráfico apresentado, contém duas retas embora não fique claro na imagem pois as duas estão paralelas. As retas correspondem as curvas de variação de câamber para as rodas direita e esquerda. É fácil perceber que quando o deslocamento vertical é nulo, o valor de câamber é correspondente ao que foi dado durante a modelagem da suspensão. Com a simulação apresentada na Fig.7 pode-se observar também que quando a mola estava sendo comprimida, a suspensão apresentou um câamber ainda mais negativo, e quando a mola era sujeita a tração, o ângulo de câamber apresentou uma pequena variação acima de zero graus. Essa variação se da pelo fato de a suspensão inteira se deslocar para que a força gerada ao passar por uma lombada fosse amenizada antes de ser transmitida para o chassi do veículo.

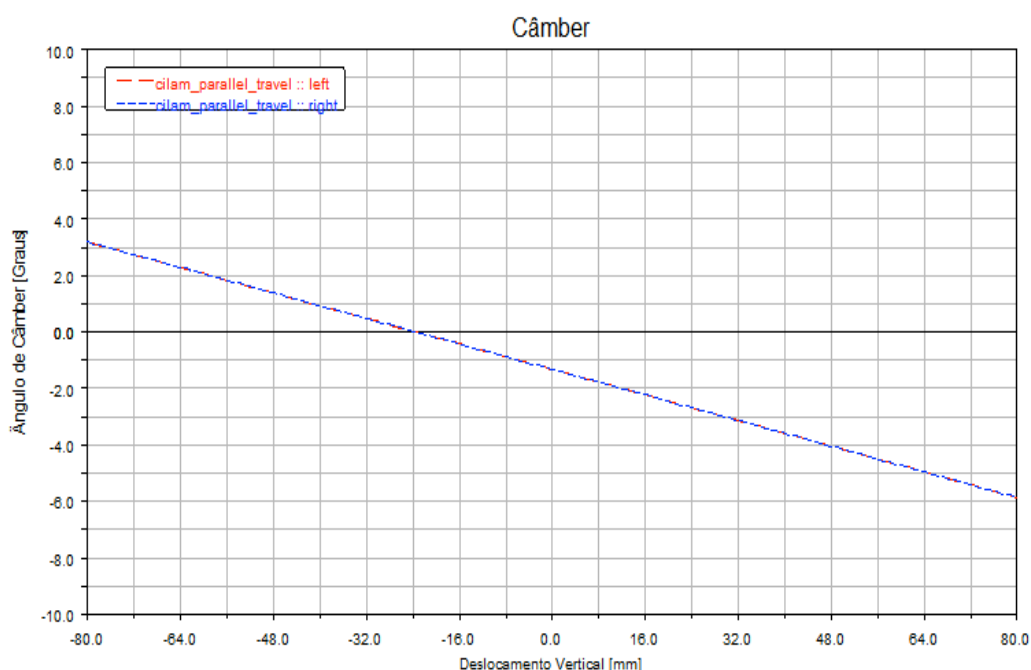


Figura 16. Gráfico da variação de câamber.

4.2 Ângulo de Convergência

O gráfico da Fig. 17 também é composto por duas curvas que representam a variação do ângulo de convergência para as rodas direita e esquerda. Com o gráfico da simulação apresentada na Fig. 17, pode-se perceber que o ângulo de convergência entre os pneus apresentou uma variação muito pequena. Isso mostra que a suspensão está trabalhando corretamente garantindo que este ângulo se mantenha pequeno durante toda a análise. Nesta simulação também foi utilizada uma variação vertical de 80mm a -80mm.

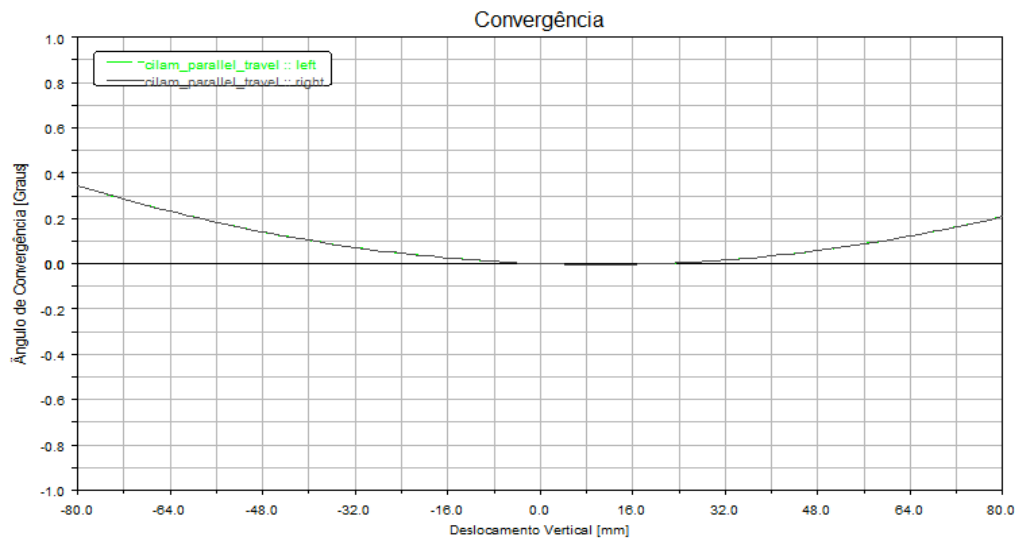


Figura 17. Variação do ângulo de convergência.

Como pode-se observar os dois parâmetros estudados para a suspensão do veículo no software apresentaram resultados positivos com relação aos propostos por Reimpell (2001) e Gillespie (1992) que afirmaram que esses parâmetros estudados não poderiam variar de forma acentuada. O comportamento da suspensão *semi trailing arm* se mostrou próximo do esperado para esse tipo de suspensão. Os resultados foram suficientes para inferir que é possível realizar simulações dinâmicas neste software que possam ser utilizadas e aplicadas em veículos reais.

5 CONCLUSÃO

A suspensão traseira do veículo estudado que foi modelada no software de multicorpos a partir de um modelo em elementos finitos foi analisada em dois parâmetros que se mostraram condizentes com os descritos por Reimpell (2001). Os resultados da simulação realizada caracterizam o comportamento da suspensão *semi trailing arm*, onde a variação do câmber e do ângulo de convergência variaram muito pouco.

Desta maneira pode-se afirmar que o software utilizado possibilitou analisar a dinâmica vertical da suspensão traseira da Rav4 de forma satisfatória. Portanto, o uso dos softwares de dinâmica multicorpos pode ser uma potente ferramenta em análises do comportamento de suspensões automotivas individualmente e conectadas ao veículo completo. Com os resultados deste estudo analisados, é possível dar continuidade ao projeto e fazer a modelagem do veículo completo e analisar sua dinâmica em curvas, tornando assim as análises realizadas cada vez mais realistas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a professor Rita Silva pelo apoio durante a criação deste documento e à equipe da GMSSA pela ajuda com as simulações e construção do documento.

REFERÊNCIAS

Gillespie, TD. “Fundamentals of vehicle dynamics”. 1992. Society of Automotive Engineers, Inc.

Reimpell J, Stoll H, Beltzler JW. The automotive Chassis. 2001. Reed Elsevier and Professional Publishing Ltd.

MSC.Adams.About Adams/Help, 2014.

Nunes MA, Silva RC. MSC ADAMS: Guia prático de Utilização. São Paulo: Editora Edgard Blucher.2014.

Nicolazzi, L.C., “Introdução a modelagem quase estática de veículos automotores de rodas”. 2012. Publicação interna do GRANTE- UFSC.

Toyota, “Manual de Manutenção Rav4”, 1997

Freitas Jr, LM. Estudo da dinâmica vertical de uma suspensão veicular do tipo mcpherson. 2006. Tese de mestrado – Universidade de São Paulo.

Ribeiro, LB. Análise comparativa da movimentação de uma suspensão dianteira. 2012. Trabalho de conclusão de curso – Instituto Mauá de Tecnologia.