

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
CENTRO DE ENGENHARIAS DA MOBILIDADE – CEM
ENGENHARIA AUTOMOTIVA

Fernando Rodrigues Demboski

**Estudo para Utilização de Componentes de Suspensão de Motocicleta em
Veículo Minimalista Urbano**

Joinville, 2014

Fernando Rodrigues Demboski

**Estudo para Utilização de Componentes de Suspensão de Motocicleta em
Veículo Minimalista Urbano**

Monografia apresentada ao Centro de Engenharias da Mobilidade da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Automotivo.

Orientador: Prof. Dr. Evandro Cardozo Da Silva

Co-Orientador: Prof. Dr. Antonio De Assis Brito Neto

Joinville, 2014

À minha esposa Karina, por me auxiliar sempre na busca dos nossos objetivos, por acreditar no meu potencial e ajudar a ser mais parecido com Cristo; Ao Kauã, meu enteado, pela paciência com meus dias dedicados à faculdade e por me ajudar a ser cada dia melhor com seu amor e inteligência.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por permitir esta e tantas outras realizações na minha vida, e por seu amor e cuidado demonstrado a todo tempo.

À minha família que sempre me apoiou e ajudou em todos os momentos, restaurando meus ânimos e comemorando a cada nova conquista.

Aos meus pais, que possibilitaram e sempre me apoiaram a buscar meus sonhos profissionais.

À família Onda Dura, pelas orações e companheirismo de todos para comigo, especialmente aos discipuladores e irmãos do GP.

Aos professores Evandro Cardozo da Silva e Antonio de Assis Brito Neto pelo apoio, incentivo e auxílios prestados nesta realização.

Aos outros professores do CEM que tive a oportunidade de conviver durante este período, dos quais levarei aprendizados importantes para minha vida profissional, especialmente àqueles com os quais desenvolvi projetos extracurriculares.

À todos os colegas de trabalho, de faculdade ou amigos que de alguma forma contribuíram nesse período.

“Pois nele vivemos, nos movemos e existimos”

Atos 17,28

RESUMO

A utilização de componentes de suspensão de motocicleta de baixo custo e grande volume de vendas mostra-se uma alternativa na construção de veículos minimalistas urbanos. Com o recente crescimento destes centros e constantes engarrafamentos nas cidades mais populosas, veículos menores, mais ágeis e econômicos se tornam cada vez mais competitivos e úteis frente aos automóveis, especialmente em trajetos diários curtos. As motocicletas, comumente utilizadas para este fim, possuem o aspecto negativo da vulnerabilidade dos ocupantes, por isso o veículo utilizado como base para o estudo possui a dinâmica de uma motocicleta (com duas rodas dispostas longitudinalmente ao veículo e inclinando-se em curvas), máximo de dois ocupantes, um à frente do outro, tornando-o mais esguio, e estrutura de carroceria fechada, o que aumenta a proteção e segurança em caso de colisões. É analisada a possibilidade de emprego do conjunto mola e amortecedor quanto ao conforto dos ocupantes pelas frequências naturais de vibração do sistema, pela massa máxima do veículo, e compressão e extensão dos componentes quando submetidos a esforços estáticos (do peso total do par veículo e piloto), e esforços dinâmicos por simulação em Matlab, pelo modelo de $\frac{1}{2}$ veículo, da transposição do mesmo em ondulação transversal na via, resultando em valores máximos e mínimos de deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa. Conclui-se que uma alternativa viável de aplicação, econômica e estruturalmente, é utilizar quatro conjuntos mola e amortecedor no veículo estudado, ao invés de componentes únicos ou de modelos mais caros de motocicleta.

Palavras-chave: Suspensão. Motocicleta. Veículo urbano. Matlab.

ABSTRACT

The use of motorcycle suspension components of low cost and high sales volume is shown an alternative construction of minimal urban vehicles. With the recent growth of these centers and constant traffic jams in the most populous cities, smaller vehicles, more agile and economical become increasingly competitive and useful compared to the car, especially for short daily journeys. Motorcycle, commonly used for this purpose, have the negative aspect of the vulnerability of the occupants, so the vehicle used as a basis for studying the dynamic features of a motorcycle (two wheels arranged longitudinally to the vehicle and leaning into curves), maximum of two occupants, one in front of the other, making it slimmer, and closed body structure, which increases the safety and security in case of collisions. Is analyzed the possibility of using the spring and damper set as comfort of the occupants by the natural frequencies of vibration of the system, the maximum mass of the vehicle, and compression and extension of components when submitted to static forces (the total weight of the vehicle and pilot pair), and dynamic efforts by simulation with Matlab, by the model of $\frac{1}{2}$ vehicle, the transposition of the same by a speed bump transverse to the road, resulting in maximum and minimum values of displacement, velocity and acceleration of the sprung mass. It is concluded that a viable application, economical and structurally alternative is to use four sets of spring and damping in the vehicle studied, instead of single components or more expensive models of motorcycle.

Key-words: Suspension. Motorcycle. Urban vehicle. Matlab.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVOS	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 VEÍCULOS MINIMALISTAS	15
2.1.1 MonoTracer	18
2.2 DINÂMICA DE MOTOCICLETAS.....	20
2.2.1 Influência da suspensão na dinâmica	23
2.3 SUSPENSÕES.....	25
2.3.1 Componentes de suspensão	26
2.3.2 Tipos de suspensão motociclística	28
2.3.3 Análise e dimensionamento de suspensões	31
2.3.4 Custos de componentes	32
3 METODOLOGIA	33
3.1 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DA SUSPENSÃO DE INTERESSE	34
3.2 CRIAÇÃO DE MODELO COMPUTACIONAL	35
3.2.1 Análise das frequências	36
3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	39
3.3.1 Simulação da transposição da lombada	41
3.3.2 Simulação de salto em rampa	42
3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4 CONCLUSÕES	45
5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
REFERÊNCIAS	47

APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO EM ODE45 PARA SIMULAÇÃO EM MATLAB DE TRANSPOSIÇÃO DE LOMBADA.....	50
APÊNDICE B – CÓDIGO EM MATLAB PARA SIMULAÇÃO DE TRANSPOSIÇÃO DA LOMBADA	51
APÊNDICE C – IMPLEMENTAÇÃO EM ODE45 PARA SIMULAÇÃO EM MATLAB DE SALTO EM RAMPA	52
APÊNDICE D – CÓDIGO EM MATLAB PARA SIMULAÇÃO DE SALTO EM RAMPA.....	53

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional em grandes centros urbanos, conforme Silva (2011), tem elevado os índices de poluição atmosférica e sonora, congestionamentos e conseqüentemente o tempo de deslocamento das pessoas. Estes fatores comprometem a saúde da população e influenciam na redução da qualidade de vida, juntamente com os acidentes de trânsito e a insegurança em veículos de pequeno porte.

As motocicletas, que são mais baratas do que os carros, tornam-se mais acessíveis a pessoas com baixa renda. Entretanto esses veículos não garantem aos ocupantes segurança em caso de colisão, deixando piloto e passageiro vulneráveis no trânsito, com proteção apenas para a cabeça com a utilização de capacetes.

O preço atual da gasolina e do etanol fazem com que veículos energeticamente eficientes tenham vantagem em relação aos demais, resultando em economia ao usuário e ao meio ambiente, já que por consequência irá emitir menos poluentes. Esta eficiência energética será obtida através da construção de um veículo leve, uma vez que quanto mais leve o corpo, menor a força necessária para movê-lo, resultando em menor gasto energético.

Leis e medidas governamentais, como o Inovar-Auto, apresentado pelo ICCT (*International Council on Clean Transportation*) (2013), obrigam as empresas do setor automotivo a reduzir as emissões de seus veículos a patamares desafiadores, a fim de possibilitar a cobrança de menores impostos sobre os mesmos. Estas práticas, embora recentes na indústria nacional, já são bastante conhecidas na comunidade europeia e em outros países, com legislações cada vez mais rigorosas, o que pode ser visto como forte tendência para a indústria nacional.

Existem algumas destas soluções urbanas, como o Carver, o Monotracer (Fig. 1), entre outros que são produzidos atualmente no exterior. Entretanto, estes possuem um custo elevado mesmo em seus países de origem, e terão preços proibitivos quando importados para o Brasil.

Alguns conceitos de veículo minimalista convencional (com quatro rodas) já são comercializados no Brasil, como no caso dos subcompactos Smart e Fiat 500, por exemplo. Estes por sua vez são mais caros que as motocicletas e outros modelos de carros básicos, tendo seu volume de vendas reduzido. Os valores de

manutenção, seja corretiva ou de rotina, bem como o seguro, são fortemente influenciados pelas taxas de importação, uma vez que são montados em outros países, além do custo inicial do produto ser elevado.

Figura 1 - Carver (esq.) e Monotracer (dir.).



Fonte: cars-bike.info e deviantart.com (set, 2010).

Desenvolver a tecnologia para produzir veículos minimalistas no Brasil, utilizando os componentes de motocicletas (motor, rodas, suspensão, sistema de freio, transmissões, etc), poderá fornecer um veículo energeticamente mais eficiente que os demais (por ser mais leve), mais seguro que as motos, mais barato que as soluções importadas. Por ser menor, ajudaria a descongestionar as ruas, uma vez que onde hoje um carro comum estaciona, por exemplo, podem caber quatro MonoTracers.

Com a ausência de um veículo de pequeno porte seguro, energeticamente eficiente e de baixo custo para atender a demanda de curtas viagens diárias da residência ao trabalho com tecnologia nacional, se faz necessário o estudo da implementação e criação de tal conceito.

Os modelos existentes no mercado exterior possuem, em geral, preços elevados de compra e manutenção, inviabilizando sua comercialização em massa no Brasil.

A utilização de componentes de motocicletas como base para o desenvolvimento do veículo minimalista é devido à sua característica de leveza, agilidade, motorização econômica e baixo custo dos componentes. Como estes são veículos amplamente comercializados e aparecem no topo das listas dos mais vendidos, a manutenção e custo de compra de alguns equipamentos torna-se

igualmente interessante do ponto de vista econômico, quando considerados os modelos de entrada.

A rede nacional de concessionárias de motocicletas e peças de reposição possibilita a utilização em grande escala com baixo custo de manutenção e compra, além de fornecer ao usuário maior flexibilidade e segurança quanto à disponibilidade de manutenção do veículo. Se forem utilizados componentes exclusivos, os custos com processos de fabricação e de desenvolvimento seriam repassados para as peças, encarecendo o produto final, além da eventualidade falta das mesmas no mercado.

Na Fig. 2 pode ser visto em maior detalhe o conjunto de suspensão traseira da Honda CG 125, o qual será a base do estudo por se tratar de um modelo de motocicleta de entrada, com baixo custo de produção e ampla rede de concessionárias, conforme citado anteriormente.

Figura 2 - Conjunto de suspensão traseira a ser estudado, modelo Honda CG 125.



Fonte: Correioauto (2013)

1.1 JUSTIFICATIVA

Os centros urbanos não comportam mais tantos automóveis e uma das soluções para melhorar a mobilidade urbana e reduzir a poluição gerada pela queima de combustíveis fósseis é a introdução de veículos menores que ocupem

menos espaço e por serem mais leves, por consequência, consomem menos combustível.

Motores de motocicletas, por exemplo, apresentam melhores razões de potência específica (potência por volume do motor, em cv/L) do que as encontradas em automóveis de passeio, comumente utilizados em perímetro urbano e em curtas distâncias.

Com o emprego do conceito de motocicleta como base para a criação de um veículo energeticamente eficiente urbano, tem-se a diminuição do peso como uma característica do conjunto. O baixo peso total do veículo favorece a economia de combustível, emite menos poluentes na atmosfera e diminui os gastos com transporte pessoal.

A falta de informações e estudos relativos à dinâmica de motocicletas amplia a gama de possibilidades de estudo para profissionais e acadêmicos da área de engenharia automotiva. Com base neste aspecto, a realização de simulações computacionais acerca do comportamento dinâmico do conjunto de suspensão analisado proporciona um grande avanço nos conhecimentos específicos da área.

Para o emprego de um conjunto de suspensão traseiro de motocicleta em um veículo minimalista urbano, mais pesado que a moto original, há a necessidade de avaliação de alguns aspectos como resistência mecânica, resposta a um impulso e a influência do conjunto na dinâmica do veículo.

A análise de alguns componentes, como molas e amortecedores possibilita o avanço em um conjunto que pode ser considerado crítico para o sistema como um todo, uma vez que suas características tem influência na dirigibilidade, segurança, conforto e na dinâmica do veículo em curvas, principalmente.

Caso tais análises não sejam realizadas para implementação do projeto e criação do protótipo, os custos para reformulação do projeto ou troca de componentes aumentam consideravelmente em cada nova fase subsequente do processo de implementação do veículo, podendo inclusive inviabilizar a criação do mesmo, ou gerando gastos desnecessários, como nos casos de *recall*.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal é avaliar a possibilidade de aplicação de componentes de motocicleta convencional de baixa cilindrada em veículo minimalista urbano. Visa-se também propor concepções de aplicações ou restrições de carga para utilização do conjunto de suspensão estudado no veículo proposto, bem como realizar um estudo preliminar acerca de projetos de suspensões de motocicletas, no que se refere ao conforto dos ocupantes, curso da suspensão e resposta do veículo à transposição de obstáculos que simulam a realidade. A viabilidade econômica de aplicação dos componentes estudados propostos é discutida e analisada ao fim do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica serão tratados os tópicos iniciais referentes ao trabalho, com descrição dos conceitos pertinentes à análise realizada e dos parâmetros importantes no dimensionamento de suspensões para veículos minimalistas. Os assuntos principais abordados são veículos minimalistas, dinâmica de motocicletas e suspensões, com detalhamentos em seus respectivos subtópicos.

2.1 VEÍCULOS MINIMALISTAS

De acordo com Lucinda (2012), no mundo todo foram produzidos 80,1 milhões de veículos em 2011, com a produção brasileira respondendo por pouco mais de 3,4 milhões no mesmo ano. Silva (2011) apresenta que o crescimento na frota circulante de autoveículos no país foi de 53,1% de 1999 a 2009. Schermach (2013) aponta que este aumento deve-se à redução de impostos e melhora da situação econômica, dentre outros fatores.

Com o aumento da produção e venda de automóveis no Brasil e restante do mundo, crescem, conseqüentemente, os problemas como aumento dos congestionamentos, altos índices de poluição e o estresse sobre os ocupantes, com veículos que, muitas vezes, levam apenas o motorista.

Medina (2003) expõe que a maior demanda na utilização de veículos em uma cidade está no “fluxo individual diário: de casa para o trabalho e do trabalho para casa.” Com base neste contexto, bem como com o surgimento de legislações cada vez mais rigorosas acerca de emissões e consumo de combustível, como o Inovar-Auto, que estipula o limite máximo de emissão de poluentes, torna-se interessante a utilização de veículos minimalistas, como opção econômica e ambiental sustentáveis, para atender as necessidades da população urbana.

Atualmente, encontram-se disponíveis no mercado automobilístico algumas opções de veículos minimalistas urbanos que tem como foco sua utilização em tais condições. Estes, segundo Medina (2003), suprem a demanda das grandes cidades por versatilidade, facilidade para manobrar e baixos níveis de poluição sonora e do

ar (principalmente, nestes casos, quando equipados com propulsores elétricos ou híbridos).

A utilização de veículos leves e compactos minimiza a emissão de poluentes também através de um menor consumo de combustíveis, além de amenizar problemas pela falta de vagas de estacionamento. Para cumprir com estes quesitos e melhorar a mobilidade, evitando os congestionamentos, muitos usuários aderem a opções alternativas aos carros, como bicicletas, *scooters* e motocicletas. Estes, porém, apresentam fragilidade quanto à integridade física dos ocupantes em caso de acidentes.

Denatran (Departamento Nacional de Trânsito) (2010 apud Silva, 2011) apresenta dados alarmantes quanto à quantidade de acidentes envolvendo motos (que envolvem motonetas, ciclomotores, quadriciclos, triciclos e motocicletas com ou sem *side-car*). No documento consta que os motociclistas representam 16% das vítimas fatais, 24% dos feridos e que as motocicletas representam 21% da frota, mas correspondem a 32% dos veículos envolvidos em acidentes.

Diante de tal situação é necessário o desenvolvimento de veículos com as vantagens das motocicletas, como mobilidade e economia de combustível, com maior nível de segurança à seus ocupantes. Uma alternativa baseada nestes objetivos é a *scooter* BMW C1, na qual o piloto possui cinto de segurança e proteção com arco na região da cabeça. Entretanto pernas e braços encontram-se expostos a colisões laterais, como mostrado na Fig. 3.

Há ainda automóveis com a preocupação principalmente ambiental, ou seja, que consomem muito pouco e emitem níveis mínimos de poluentes na atmosfera. Este é o caso do Volkswagen XL1 (Fig. 4), construído para ser o carro em série mais econômico do mundo, rodando 100 km com 0,9 litros de diesel (111 km por litro), e emissão de 21 g de CO₂ por km. Possui motor turbo diesel de 0,8 L com dois cilindros, capazes de gerar 48 cv, aliado a um motor elétrico de 27 cv, uma estrutura extremamente leve e com materiais de alta tecnologia. Com estes recursos e baixa resistência aerodinâmica, conseguida com sua área frontal de apenas 1,5 m² e 1,15 m de altura, chega a rodar 50 km apenas com o motor elétrico, e com velocidade limitada a 99 milhas/h (158,4 km/h). Todos estes valores, porém tem um preço bastante elevado e, segundo o próprio fabricante, custa €111.000,00 na Alemanha. A Fig. 4 mostra o XL1, capaz de transportar dois ocupantes.

Figura 3 - BMW C1: alternativa de motocicleta com maior proteção ao ocupante.



Fonte: Carros UOL (2012)

Figura 4 - Volkswagen XL1, veículo híbrido capaz de rodar 111 km com 1 litro de combustível.



Fonte: Volkswagen-XL1.com (2014)

Existem hoje no Brasil alguns carros compactos importados e produzidos localmente, a exemplo dos apresentados na Tab. 1. Estes, entretanto ainda representam uma pequena porcentagem do mercado nacional, o que pode ser explicado, em alguns casos, pelos preços cobrados pelas montadoras e qualidade dos produtos oferecidos, ou mesmo por fatores culturais, uma vez que o consumidor brasileiro não está acostumado a adquirir veículos compactos.

À medida que esta categoria prove sua eficiência, mobilidade e qualidade, a perspectiva é que, se ofertados com valores acessíveis, possam contribuir muito para a melhoria dos congestionamentos e deslocamentos urbanos.

Tabela 1 – Veículos compactos comercializados no Brasil (mês de referência: julho, 2014).

MARCA	MODELO	PREÇO (R\$)
Smart	fortwo Brasil Edition 1.0 mhd	53.400,00
Chery	QQ	24.985,00
Mini	ONE 1.6 mecânico	76.423,00
Lifan	320	28.864,00
Volkswagen	Up!	27.190,00
Fiat	500 Cult 1.4 Flex 8V EVO Mecânico	43.410,00

Fonte: FIPE (2014)

2.1.1 MonoTracer

O veículo utilizado como base para o presente trabalho, e um bom exemplo de agilidade (característica das motocicletas) com segurança (com a estrutura de um automóvel), é o MonoTracer, mostrado na Fig. 5. Ele é produzido pela empresa suíça Peraves AG e tem estrutura semelhante a uma motocicleta, com apenas 2 rodas e 2 ocupantes, posicionados um atrás do outro. Possui ainda rodas laterais que auxiliam no equilíbrio em curvas, baixas velocidades e em repouso, para evitar quedas e permitir inclinar-se até 52º nas curvas. Este custava em 2012, cerca de € 52.000,00, o equivalente a mais de R\$ 150.000,00 atualmente, desconsiderando taxas de importação, que o tornaria restrito a uma parcela mínima da população.

Segundo a companhia, o MonoTracer MTI-1200 com motor a combustão interna de moto BMW não está mais sendo comercializado, e atualmente encontra-se disponível como opção de compra zero km apenas a versão elétrica, o MonoTracer MTE-150 ACP.

Como o estudo é baseado na versão com motor a combustão interna, utilizando componentes facilmente encontrados no mercado e com o pouco incentivo por parte do governo para a produção de veículos com propulsores elétricos, serão descritos os dados referentes à versão MTI-1200.

Figura 5 - Veículo MonoTracer utilizado como base para o presente estudo.



Fonte: Peraves AG

De acordo com a MCS (2014) (*Motorcycle Specifications*) sua estrutura é feita com fibras de vidro, Kevlar e de carbono, além de alumínio reforçado e barras de reforço contra colisões. O compartimento do motor e coluna de direção são compostos de liga de aço utilizado em aeronaves. Os dados referentes à aceleração e motorização, e outros dados numéricos são descritos na Tab. 2.

Tabela 2 - Dados do MonoTracer MTI-1200

DADOS	VALORES	UNIDADE
Motorização	1171	cm ³
Potência máxima	117	cv
Torque máximo	117	N.m
Velocidade máxima	< 250	km/h
0-100 km/h	5,7	s
Diâmetro de giro	8,5	m
Consumo a velocidade constante de 90 km/h	27,6	km/L
Consumo a velocidade constante de 120 km/h	22,1	km/L
Distância de frenagem 100-0 km/h	43	m
Peso vazio	485	kg

Fonte: Peraves AG

É utilizado o MonoTracer como veículo base para o estudo por suas características de segurança próximas às de um carro - devido à sua estrutura -, e

dinâmica, posição das rodas e ocupantes semelhantes às de motocicletas - localizados longitudinalmente ao veículo.

2.2 DINÂMICA DE MOTOCICLETAS

Para melhor compreender a dinâmica de motocicletas e possibilitar o correto dimensionamento de suspensões, tanto dianteiras quanto traseiras, faz-se necessário conhecer as equações de equilíbrio governantes. Serão descritos os parâmetros geométricos (distâncias e ângulos) e dinâmicos (forças, velocidades e acelerações), especialmente do conjunto traseiro, que interferem direta ou indiretamente no desempenho em linha reta, em curvas, frenagens e acelerações.

O equilíbrio em uma motocicleta deve ser baseado na condição estática inicial, sem forças externas atuantes (provenientes de curvas, acelerações e outros) no conjunto motocicleta e motociclista. Pode ser utilizado o diagrama apresentado nas Figs. 6 e 7, a partir das quais são obtidas as Eqs. 2.1 à 2.6.

$$-Ar_p + F_t - F_b - (F_a + F_i) - Ar_a = 0 \quad (2.1)$$

$$Fp_p - Fp + Fp_a = 0 \quad (2.2)$$

$$-Fc_p - Fc - Fc_a = 0 \quad (2.3)$$

$$-Fp + Y_G \sin \gamma + FcY_G \times \cos \gamma = 0 \quad (2.4)$$

$$(F_a + F_i)Y_G \sin \gamma - FcX_{Grear} + Fc_a(X_{Gfront} + X_{Grear}) = 0 \quad (2.5)$$

$$(F_a + F_i)Y_G \cos \gamma - FpX_{Grear} + Fp_a(X_{Gfront} + X_{Grear}) = 0 \quad (2.6)$$

A partir das Eqs. 2.1 à 2.6 e considerando que $Fp = m \times g$, $Fc = m \times a_c = m \times \frac{v^2}{r}$, $Ar_a = Fp_a \times f_a$, e $Ar_p = Fp_p \times f_p$, pode-se afirmar que a força atuando na roda traseira é descrita através das Eqs. 2.7 à 2.10.

$$Fp_p = \frac{Fp \times (X_{Gfront} - f_a \times Y_G \times \cos \gamma) + Y_G \times \cos \gamma \times (F_t - F_b)}{X_{Gfront} + X_{Grear} - Y_G \times \cos \gamma \times (f_a - f_p)} \quad (2.7)$$

$$Fc_a = Fp_a \tan \gamma \quad (2.8)$$

$$F_{c_p} = F_{p_p} \tan \gamma \quad (2.9)$$

$$\gamma = \arctan \frac{v^2}{rg} \quad (2.10)$$

Onde:

X_G – distância do centro de gravidade aos eixos dianteiros e traseiros;

Y_G – altura do centro de gravidade;

γ – ângulo de inclinação lateral;

A_r – resistência ao rolamento do pneu com o solo;

F_c – força centrípeta;

F_p – componente de força na direção vertical, com relação ao peso;

F_i – força trativa;

a_c – aceleração centrípeta;

v – velocidade;

m – massa;

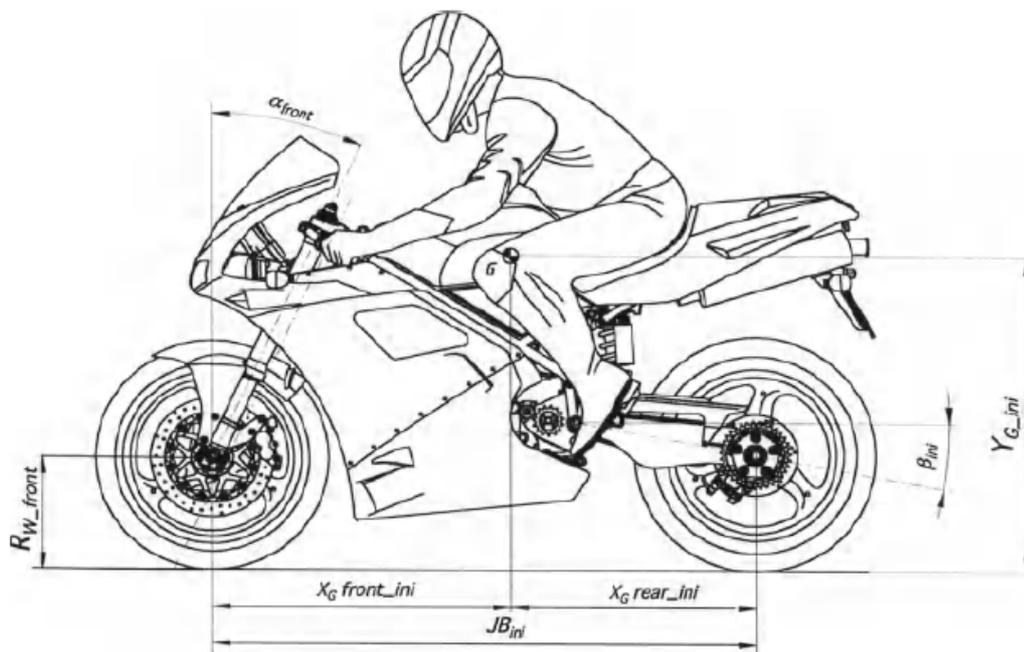
F_a – força de resistência aerodinâmica;

r – raio da curva;

g – aceleração da gravidade.

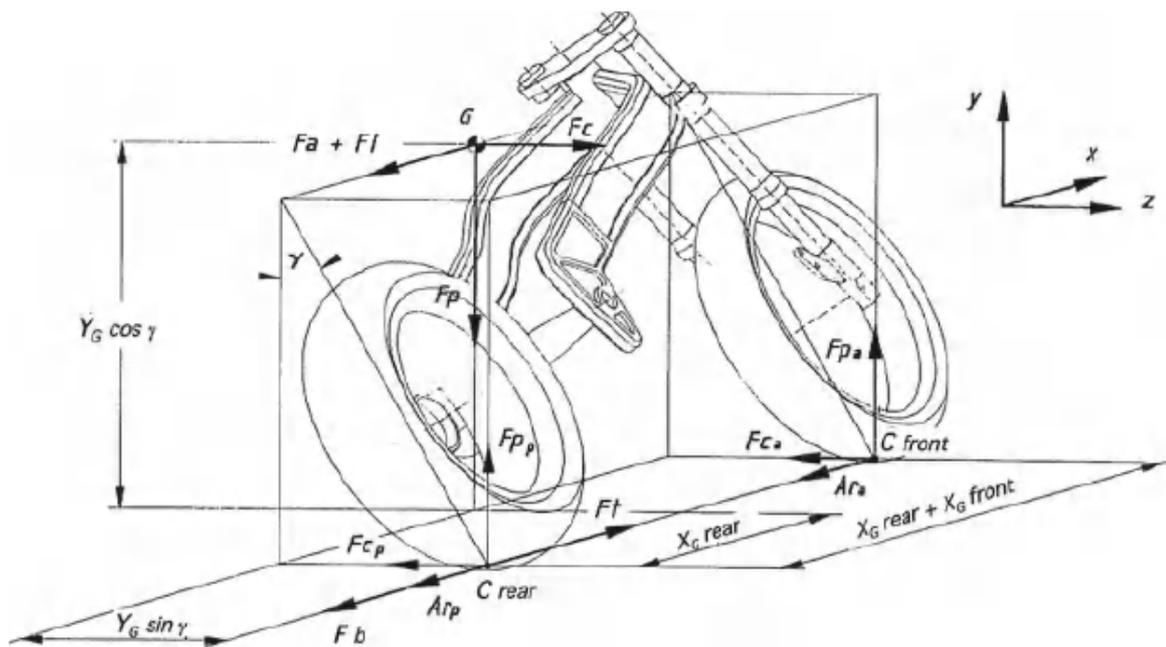
As fórmulas anteriores dependem da massa total do conjunto (veículo, piloto e passageiro), forças externas atuando no conjunto, da posição do centro de gravidade, do ângulo de rolagem, da velocidade, do raio da curva e do ângulo de direção. Em cálculos iniciais são considerados parâmetros conhecidos e constantes, como por exemplo, em situações de velocidade constante, em curva ou movimento retilíneo, conhecendo também valores externos como fator de atrito entre pneu e pista.

Figura 6 - Diagrama esquemático da vista lateral de uma motocicleta, destacando o CG e distâncias deste aos eixos.



Fonte: CROCCOLO & AGOSTINIS, 2013

Figura 7 - Diagrama simplificado da motocicleta representando as forças atuantes.



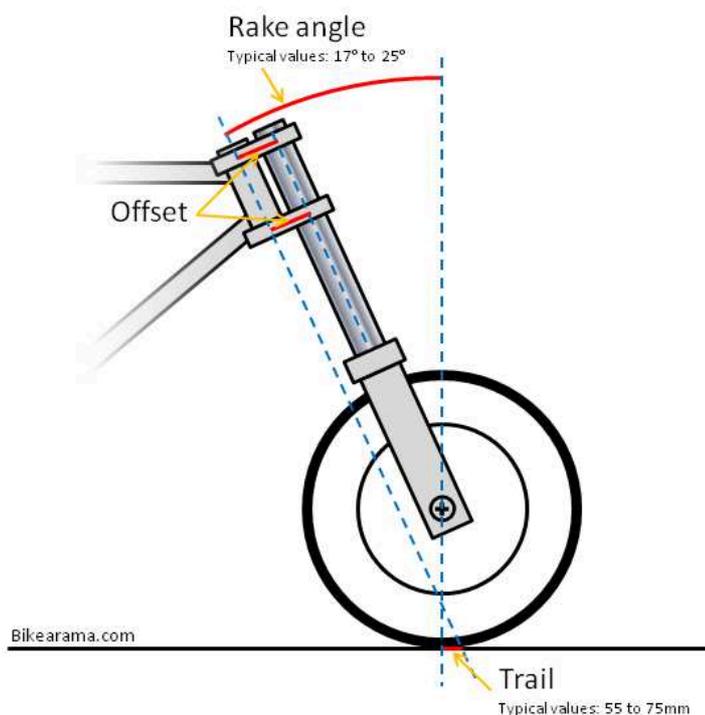
Fonte: CROCCOLO & AGOSTINIS, 2013

2.2.1 Influência da suspensão na dinâmica

Os sistemas de suspensão atuais permitem o ajuste independente do comprimento da mola (que pode ser realizado pelo proprietário com ferramentas comuns) e do curso do amortecedor. De acordo com Luque (2005) o aumento da altura traseira da motocicleta influi em alguns aspectos quanto à dinâmica do veículo, como:

- Redução do ângulo da suspensão dianteira em relação à vertical (rake ou caster) e do “trail” (medida de comprimento no solo, partindo do centro do ponto de contato do pneu até a prolongação do eixo da direção quando este encontra o solo, conforme Fig. 8), fazendo o veículo retornar à posição original mais abruptamente;

Figura 8 – Ilustração do ângulo da suspensão dianteira (caster) e do trail.



Fonte: bikerama.com (2014)

- Aumenta a altura do centro de gravidade (Y_G na Eq. 2.4), o que aumenta a transferência de carga decorrente de acelerações e frenagens;

- Aumenta a carga no conjunto dianteiro, ainda que o incremento seja pequeno.

Para uma correta regulagem da suspensão motociclística, há um ajuste usualmente utilizado conhecido como SAG (*Suspension Adjustments Gap*), o qual permite definir a altura ideal para a motocicleta a partir de modificações em ambos os conjuntos, de forma que não fique muito macia nem rígida demais, visando oferecer melhores características de pilotagem de acordo com preferências ou parâmetros do usuário, como massa e altura do mesmo.

Na suspensão traseira o ajuste pode ser facilmente realizado seguindo os passos descritos em *Ohlins.com*, para motocicletas comuns.

1. Colocar a motocicleta em um apoio ou cavalete central, de modo que a roda traseira perca o contato com o solo e a mola esteja estendida o máximo possível;
2. Marcar, com uma caneta ou fita, um ponto na carroceria verticalmente acima do eixo da roda;
3. Medir a distância entre o eixo da roda e o ponto marcado (medida R1);
4. Colocar o veículo com as rodas no chão (as suspensões irão comprimir-se levemente), sem outra carga sobre ele, e medir a distância entre os mesmos pontos (medida R2);
5. Com o piloto em posição normal de pilotagem e devidamente equipado (importante devido à distribuição da massa no conjunto), medir a distância dos mesmos pontos (medida R3).

Neste caso o fabricante recomenda, caso não haja outra recomendação do fabricante da própria motocicleta, por exemplo, que sejam seguidos tais valores para as medições:

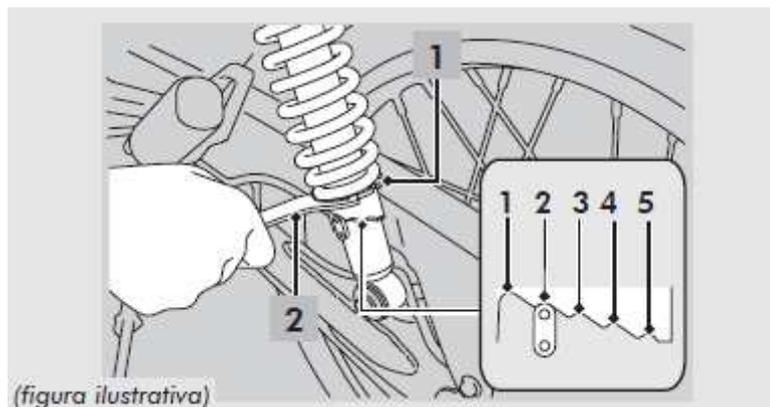
- *SAG livre*: $R1 - R2 = 5$ a 15 mm;
- *Peso do piloto*: $R1 - R3 = 25$ a 35 mm

Quanto maior for o valor ajustado, melhor será o conforto e menor a esportividade. Caso seja considerado o conjunto da frente, um valor menor atrás proporciona maior rapidez nas mudanças de direção, e no contrário as mudanças de direção ficam mais difíceis, enquanto a moto torna-se mais estável nas retas.

A fabricante Honda disponibiliza no manual de instruções de suas motocicletas diagrama e instruções quanto à realização do ajuste da suspensão

traseira, conforme pode ser visto na Fig. 9. Salaria também a importância de que todos os conjuntos de mola e amortecedor estejam ajustados na mesma posição.

Figura 9 – Detalhe do mecanismo de ajuste da suspensão traseira de motocicleta.



Fonte: Honda: Manual do Proprietário (2014)

2.3 SUSPENSÕES

O objetivo da suspensão traseira, conforme apresentado em Quatro Rodas (2014), é proporcionar conforto aos usuários e permitir o contato da roda com o chão pelo maior tempo possível. Desta forma evita os perigos de perder o contato da motocicleta com o solo em arrancadas, curvas, frenagens ou buracos.

Em matéria publicada na revista digital especializada em veículos, Auto Esporte (2014), o colunista Roberto Agresti mostra que em frenagens o afundamento da suspensão dianteira impede que a roda dianteira trave facilmente, perdendo a aderência do pneu com o solo. Já nas curvas os conjuntos da suspensão são responsáveis por absorver a variação da carga devido à mudança da trajetória, que tende a fazer o usuário sair da curva, apresentando comportamento subesterçante.

2.3.1 Componentes de suspensão

Nesta seção são apresentados os componentes principais de suspensões traseiras em motocicletas, que são o braço de suspensão, mola e amortecedor. São vistos também alguns parâmetros de projeto características funcionais requeridas de cada um.

a) Braço de suspensão

É o responsável por ligar o quadro (estrutura principal) à roda traseira por um pivô (como uma dobradiça), que permite seu movimento angular em relação ao quadro. Possui um formato em forma de “Y” para que a roda ocupe o vão entre os braços.

Nos sistemas convencionais, quando o quadro mantém sua posição e o braço movimenta-se, faz com que a roda descreva um movimento circular em torno da articulação, ao invés de movimento linear vertical (encontrado nas primeiras motocicletas com suspensão traseira criadas).

O braço deve suportar as cargas impostas deformando-se minimamente por flexão ou torção (elasticamente), o que poderia danificar o sistema em casos extremos, ou deformando-se plasticamente.

b) Mola

Rao (2008) apresenta a definição física para tal elemento:

Uma mola linear é um tipo de elo mecânico cuja massa e amortecimento são, de modo geral, considerados desprezíveis. Uma força é desenvolvida na mola sempre que houver um movimento relativo entre suas duas extremidades. A força da mola é proporcional à quantidade de deformação, e é dada por $F = kx$. (RAO, 2008, p. 11).

Sendo F a força da mola, x o deslocamento relativo entre uma extremidade e outra da mola (deformação), e k a rigidez da mola.

Para o caso de associação de molas, geralmente estas são utilizadas em paralelo nos conjuntos convencionais de suspensão (bichoque, apresentado no item “a”) ou molas únicas sem associação.

A constante elástica equivalente k_{eq} para o conjunto é dado pela Eq. 2.11:

$$k_{eq} = k_1 + k_2 + \dots + k_n \quad (2.11)$$

Ou seja, a constante elástica equivalente é a soma das constantes elásticas.

No caso de suspensões motociclísticas são utilizadas molas com a mesma constante elástica, pois se forem utilizadas molas com constantes diferentes em cada lado do veículo, este poderá apresentar características diferentes quando em curvas para a esquerda e para a direita, por exemplo, além de distribuir as solicitações para o braço da suspensão de maneira não uniforme.

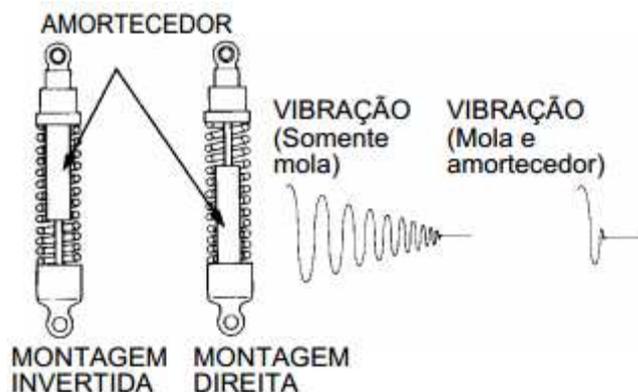
c) Amortecedor

De acordo com o manual de serviços da fabricante Honda, o amortecedor absorve parte da força de compressão da mola e controla sua extensão. Na compressão a maior parte da resistência é absorvida pela mola, com o amortecedor atuando principalmente na ação de retorno, ou extensão do conjunto.

Os amortecedores hidráulicos podem ser instalados na motocicleta com o reservatório para baixo ou para cima (chamada montagem invertida). Este tipo construtivo reduz o peso suspenso do conjunto. Na Fig. 10 é possível observar estes tipos de montagem, além do efeito do amortecedor na vibração do sistema.

Em amortecimentos viscosos, caso dos amortecedores hidráulicos, “a força de amortecimento é proporcional à velocidade do corpo vibratório” (RAO, 2008, p. 19).

Figura 10 – Tipos de montagem e efeito do uso de amortecedor na vibração do sistema



Fonte: Honda: Manual de serviços (2014)

A força de atrito viscoso é dada por $F_v = cv$, onde c é o coeficiente de amortecimento viscoso, dado em Ns/m, e v é a velocidade relativa de uma extremidade com a outra do conjunto.

A associação em paralelo de amortecedores é dada pela Eq. 2.12.

$$c_{eq} = c_1 + c_2 + \dots + c_n \quad (2.12)$$

Ou seja, o coeficiente de amortecimento equivalente é igual à soma dos coeficientes de cada amortecedor.

Usualmente, em sistemas de suspensão do tipo bicoque, são utilizados amortecedores associados em paralelo.

2.3.2 Tipos de suspensão motociclística

São apresentados alguns tipos de suspensão traseira mais utilizados em motocicletas, os componentes principais e seus mecanismos de funcionamento, além dos custos dos mesmos para possível aplicação comercial.

Antes do surgimento dos sistemas de suspensão traseiros conhecidos hoje, havia motocicletas com molas apenas sob os bancos, sem movimentação dos eixos, como nas bicicletas convencionais. Estas eram conhecidas popularmente como “rabo-duro”, e muitas vezes possuíam amortecimento apenas no conjunto dianteiro.

Este tipo construtivo apresenta boa estabilidade em piso completamente liso, entretanto oferece riscos ao organismo dos usuários devido transmissão de vibração do piso pela motocicleta.

a) *Bichoque*

Conforme mostrado em na revista digital Quatro Rodas (2014), o sistema bichoque era o mais utilizado até a década de 1980. Este possui dois amortecedores laterais fixados um em cada lado do braço da suspensão, a qual é ligada ao quadro (estrutura principal) por um pivô (como uma dobradiça), como mostrado na Fig. 11.

Figura 11 – Suspensão do tipo bichoque



Fonte: Auto Esporte (2014)

O sistema bichoque possui um problema que agrava o risco de cavitação no óleo dos amortecedores (formação de bolhas), o que pode prejudicar o correto funcionamento do conjunto. Tem como característica a facilidade nos cálculos geométricos, quando comparados a outros sistemas mais complexos de amortecimento, além de proporcionar maior conforto em relação à esportividade.

Possui a desvantagem de possibilitar que cada um dos conjuntos atue diferente um do outro, levando a desgastes irregulares e alterando o comportamento da motocicleta.

b) Monochoque

Os sistemas monochoque são mais utilizados em aplicações esportivas, e visam melhor desempenho na pilotagem e controle da motocicleta. Permite ainda, conforme visto em iCarros.com (2014), maior relação de contato da roda com o chão, aumentando o controle do piloto e maior aderência com a pista.

O conjunto mola - amortecedor fica localizado abaixo do banco, bem próximo da articulação do braço da suspensão, dificultando a visualização e alcance.

Segundo a Quatro Rodas (2014) o sistema monochoque possui a vantagem de proporcionar maior curso da roda traseira e vida útil do conjunto, enquanto que a regulagem geralmente necessita de uma desmontagem de parte do conjunto.

Uma variação deste sistema é o monobraço, no qual a balança traseira é ligada ao eixo por apenas um lado, visando facilitar a manutenção, reduzir o peso do conjunto e conferir um visual mais esportivo. Este sistema pode ser observado na Fig. 12.

Figura 12 – Sistema de suspensão monochoque, com amortecedor e mola localizados abaixo do assento do piloto.



Fonte: Motordream UOL (2014)

c) Monochoque com links

O link refere-se a um mecanismo em forma de triângulos e bielas articuladas, como observados na Fig. 13, que induzem na mola variação na sua rigidez, de

forma que em maiores solicitações de carga, seja endurecida, e vice-versa, proporcionando maior conforto em passeios com pequenas oscilações e mais esportividade para os casos com maiores velocidades e conseqüente maiores cargas na mola e amortecedor.

Esta característica confere ao conjunto maior eficiência no amortecimento, mas por ser um sistema mais complexo e sofisticado, é mais caro, além de possuir mais peças móveis, o que é indesejável por tornar-se mais susceptível ao desgaste e quebras.

Figura 13 – Sistema de fixação da suspensão por links



Fonte: Auto Esporte (2014)

2.3.3 Análise e dimensionamento de suspensões

Para análises primárias de suspensões traseiras convencionais (bichoque) são consideradas as trajetórias da roda, rigidez das molas e constantes de amortecimento. A partir de parâmetros conhecidos, como curso máximo da suspensão, abaixamento devido ao peso do veículo e velocidades máximas de elevação e descida da roda são selecionados componentes com tais características funcionais requeridas.

Os braços da suspensão são principalmente analisados quanto à integridade estrutural a partir de esforços de flexão, devido à característica construtiva, com

pontos de fixação em suas extremidades (no quadro e roda), e forças aplicadas em seção intermediária pelos amortecedores.

Visto que a complexidade do projeto dos braços da suspensão é elevada e depende essencialmente dos parâmetros geométricos e esforços previamente estabelecidos pelo peso total do conjunto e distâncias de montagem, o mesmo não será avaliado. Este demandaria a elaboração de um projeto novo, uma vez que não se encontram disponíveis na literatura ou internet informações construtivas de tais componentes, e a simulação de peças que não representam o real resultaria em valores distantes do real.

2.3.4 Custos de componentes

De acordo com pesquisa realizada em motopeças da região de Joinville e contato por e-mails, foram obtidos os valores do braço da suspensão e do conjunto mola e amortecedor do modelo Honda CG, ano 2014, 125 ou 150, dependendo do fornecedor.

Os valores obtidos pela Breikopf Motos são apresentados na Tab. 3, enquanto outras motopeças consultadas não responderam ao contato realizado ou enviaram valores que não correspondiam às peças originais.

Tabela 3 – Valores respondidos pela Breikopf Motos (mês de referência: jul, 2014).

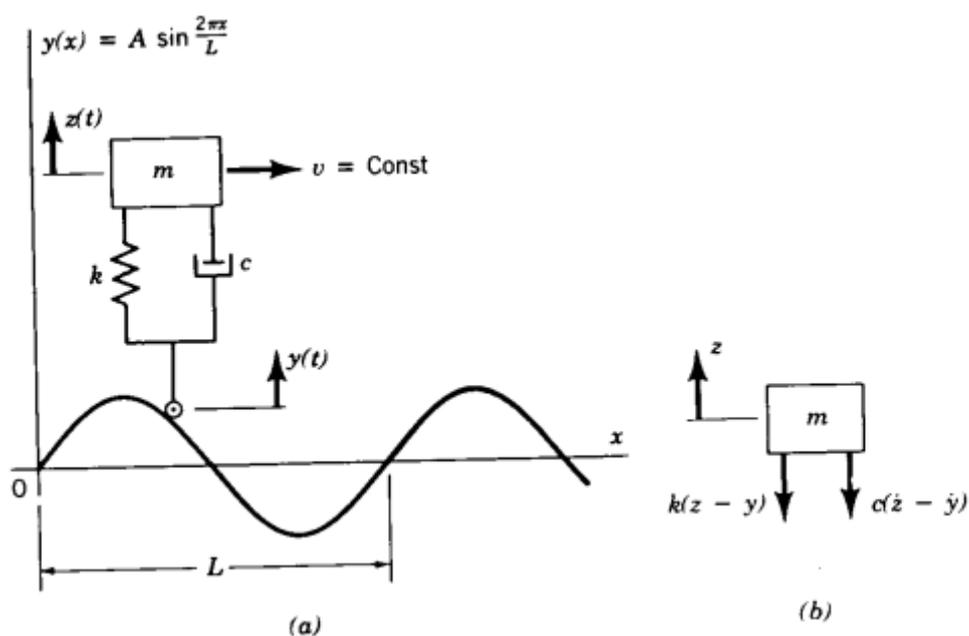
COMPONENTE	CG 125	CG 150
Braço de Suspensão	R\$255,00	R\$305,50
Par de Amortecedores e Molas	R\$357,40	R\$414,58

Fonte: Breikopf Motos (2014)

3 METODOLOGIA

Para a avaliação do par combinado mola e amortecedor, será implementado um modelo massa-mola-amortecedor com excitação de base e 1 grau de liberdade uma vez que para este estudo obtém-se apenas a resposta vertical da massa suspensa $z(t)$, conforme ilustrado na Fig. 14.

Figura 14 – Representação do sistema massa-mola-amortecedor com 1 grau de liberdade e excitação pela base (a) e forças atuantes pela presença do conjunto amortecedor e mola (b)



Fonte: IME - USP

Onde:

$y(x) = A \sin(2\pi x/L)$ - função senoidal arbitrária que descreve a superfície do terreno [m];

L - comprimento da onda senoidal [m];

A - amplitude da onda senoidal [m];

k - coeficiente de rigidez total das molas [N/m];

c - coeficiente de amortecimento total dos amortecedores [Ns/m];

$y(t)$ - movimento vertical da roda;

$z(t)$ - movimento vertical do veículo.

Será utilizado o modelo de $\frac{1}{2}$ veículo apresentado por Cossalter *et al* (2014) para dinâmica vertical de motocicletas, o qual considera apenas um pneu e uma suspensão. Tal modelo descreve com certa precisão os fenômenos estudados no presente trabalho, uma vez que tem como objetivo avaliar apenas o conjunto traseiro de suspensão.

Simulações em Matlab serão realizadas variando parâmetros geométricos de interesse da suspensão e de massa para cada situação (descritos no item 3.1), com base nos valores de coeficiente de rigidez e amortecimento encontrados na literatura do conjunto proposto para análise.

Será avaliada a possibilidade de utilização de 4 pares mola-amortecedor, ou seja, com o dobro destes componentes em comparação com uma motocicleta convencional, a fim de considerar maiores valores máximos para a massa total do veículo, conforme a Eq. 2.12.

3.1 LEVANTAMENTO DOS PARÂMETROS DA SUSPENSÃO DE INTERESSE

Os parâmetros de interesse para a avaliação dos componentes da suspensão são o coeficiente de rigidez da mola (K_s) e coeficiente de amortecimento do amortecedor (C_s). Para os cálculos, será atribuído também um valor para a rigidez de mola do pneu (K_t), e desconsiderado o coeficiente de amortecimento deste, conforme metodologia apresentada por Cossalter *et al* (2014) para determinação das frequências naturais do sistema.

Baseado na proposta do trabalho, de utilizar componentes de motocicleta convencional (Honda CG), foi buscado informações acerca dos coeficientes da suspensão. Os valores, nas análises, foram considerados seus respectivos equivalentes para associações paralelas de molas e amortecedores.

Os valores dos elementos unitários da suspensão e pneu utilizados nas simulações seguintes estão na Tab. 4.

Uma informação importante para o projeto é saber o curso máximo da suspensão, o qual, de acordo com Moto Honda da Amazônia LTDA, Manual do Proprietário: CG150 Titan ESD, EX, CG150 Fan ESDi é de 106 mm.

Tabela 4 – Parâmetros da suspensão de interesse

PARÂMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADE
Rigidez da mola	Ks	23,51	N/mm
Rigidez do pneu	Kt	180	N/mm
Coeficiente de amortecimento	Cs	1350	Ns/m

Fonte: Cossalter *et al* 2014; Barroso, 2009;

3.2 CRIAÇÃO DE MODELO COMPUTACIONAL

Para análise inicial dos parâmetros da suspensão, em função dos coeficientes inerentes aos componentes (amortecimento e rigidez da mola e pneu), massas (suspensas e não-suspensas) e carga aplicada relativo ao peso do piloto, é utilizada metodologia proposta por Cossalter *et al* (2014).

O modelo de $\frac{1}{2}$ veículo para motocicletas será implementado em software Excel para verificação das frequências naturais relativas às massas suspensa e não-suspensa, comparando-se com os valores ótimos apresentados pelo mesmo em termos de conforto e modos de vibração decorrentes do resultado obtido. Estes valores, de acordo com Genta & Morello (2009) são comumente alocados entre 1,2 e 1,6 Hz para a 1ª frequência natural, e de 8 a 10 Hz para a 2ª, podendo alocá-la entre 15 a 20 Hz também. São estipuladas tais faixas a fim de evitar as frequências naturais da cavidade abdominal, que é de 4 a 8 Hz e da caixa craniana, de 10 a 14 Hz.

Vale salientar que embora o modelo anterior apresentado na Fig. 14 e item 3 considera um grau de liberdade, no item 3.2.1 (Análise das frequências) serão consideradas as duas primeiras, devido à facilidade de implementação e cálculo dos parâmetros.

Para verificação da resposta da suspensão em função da oscilação da pista, será utilizado software Matlab, com o auxílio da metodologia de resolução de equações diferenciais “ode45”, para obtenção de valores de velocidade e deslocamento do ponto superior da suspensão.

As metodologias aplicadas, passos utilizados e formulação, são apresentados nos tópicos seguintes.

3.2.1 Análise das frequências

Wong (2001) apresenta os cálculos para obtenção das frequências naturais em função dos coeficientes de rigidez da mola e pneu, e massas suspensa e não-suspensa.

Cossalter *et al* (2014) detalham, a partir do modelo de ½ veículo para motocicletas, a obtenção da frequência natural amortecida e fator de amortecimento, bem como seus valores ótimos e desejáveis.

As frequências naturais não amortecidas são obtidas a partir das Eqs. 3.1 à 3.5 abaixo:

$$\omega_{n1,2}^2 = \frac{B_1 \mp \sqrt{B_1^2 - 4A_1C_1}}{2A_1} \quad (3.1)$$

$$f_{n1,2} = \frac{1}{2\pi} \omega_{n1,2} \quad (3.2)$$

Onde:

$$A_1 = m_s m_{us} \quad (3.3)$$

$$B_1 = m_s k_s + m_s k_t + m_{us} k_s \quad (3.4)$$

$$C_1 = k_s k_t \quad (3.5)$$

Sendo:

$\omega_{n1,2}$ – frequências naturais não amortecidas 1 e 2 do sistema [rad/s];

$f_{n1,2}$ – frequências naturais não amortecidas 1 e 2 do sistema [Hz];

m_s – massa suspensa [kg];

m_{us} – massa não-suspensa [kg];

k_s – fator de rigidez da mola [N/m];

k_t – fator de rigidez do pneu [N/m].

Já a frequência natural amortecida e fator de amortecimento, conforme apresentado por Cossalter *et al* (2014), são descritas a partir das Eqs 3.6 e 3.7.

$$f = f_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.6)$$

$$\zeta = \frac{c_s}{2m(2\pi f_n)} \quad (3.7)$$

Onde:

f – frequência natural amortecida [Hz];

ζ – fator de amortecimento;

f_n – frequência natural não amortecida [Hz];

m – massa total aplicada sobre o conjunto [kg].

Serão calculadas as frequências naturais não amortecidas do sistema para diversos casos possíveis de aplicação, e comparando-os com os valores resultantes a partir das massas da moto Honda CG 150 e do MonoTracer.

Serão considerados alguns valores constantes para todas as análises, como o peso do piloto de 80 kg, o equivalente a um adulto médio brasileiro, e da massa não-suspensa de 15 kg, bem como os coeficientes da suspensão e pneu, apresentados na Tab. 5. Nas análises nas quais a massa não-suspensa é maior ou igual à massa do MonoTracer, a massa suspensa é considerada com 20 kg.

Nesta etapa será analisado também o curso da suspensão com o peso do veículo e do piloto, a fim de verificar o SAG com peso do piloto, o qual é recomendável que se localize entre 25 e 35 mm.

Caso 1: Moto Honda CG 150 Original

Conforme Moto Honda da Amazônia LTDA, Manual do Proprietário: CG150 Titan ESD, EX, CG150 Fan ESDi, a massa do veículo é de 115 kg.

No caso da motocicleta original, por esta análise, as frequências naturais são de 3,23 e 19,65 Hz para a 1ª e 2ª, respectivamente.

O deslocamento da suspensão calculado resultante das cargas aplicadas é de 18,8 mm, o qual não se enquadra no intervalo desejável de acordo com o SAG. Estes valores, no entanto são considerados para o veículo seco, ou seja, sem fluidos, os quais são indispensáveis para o correto funcionamento da moto.

Caso 2: MonoTracer

Para o MonoTracer, o qual possui 485 kg, apresenta valores de frequências naturais em 1,86 e 16,98 Hz, para a 1ª e 2ª frequências naturais, respectivamente.

O deslocamento da suspensão para este caso é de 56,8 mm, alcançando mais da metade do curso total da suspensão, que é de 106 mm. Tal valor é indesejável e inviável, baseado também na medida recomendável de SAG.

Caso 3: MonoTracer com 4 conjuntos

Para este caso, são considerados 4 conjuntos de mola e amortecedor, o que resulta em coeficientes de rigidez e de amortecimento duas vezes maior.

Em tal caso, as frequências naturais resultantes são de 2,39 e 18,71 Hz para a 1ª e 2ª, respectivamente. Já o deslocamento da suspensão resulta em 28,4 mm. Tal valor é significativo no que se refere ao SAG (pág. 23) desejável. No entanto a 1ª frequência não se encontra na faixa ótima recomendável no que se refere ao conforto dos ocupantes.

Caso 4: Veículo com 2 conjuntos e massa máxima de 250 kg

Neste caso as frequências naturais resultantes são de 2,44 e 19,62 Hz, e o deslocamento da suspensão estático foi de 32,9 mm.

Em tal as frequências são um pouco acima do recomendável citado por Cossalter *et al* (2014), e o SAG se localiza na faixa proposta.

Caso 5: Veículo com 4 conjuntos e massa de 600 kg

No 5º caso as frequências naturais são 2,17 e 18,70 Hz, e o deslocamento estático da suspensão de 34,4 mm.

Os valores resultantes de frequência localizam-se próximo do recomendável, e o SAG fica na faixa desejável.

Para melhor visualização dos resultados, os mesmos são apresentados na Tab. 5 abaixo.

Tabela 5 – Análises das frequências e deslocamento estático da suspensão.

CASO	1ª FREQUÊNCIA [Hz]	2ª FREQUÊNCIA [Hz]	DESLOCAMENTO ESTÁTICO [mm]	FAIXA SAG	MASSA [kg]
1	3,23	19,65	18,8	Sim	115
2	1,86	16,98	56,8	Não	485
3	2,39	18,71	28,4	Sim	485
4	2,44	19,62	32,9	Sim	250
5	2,17	18,70	34,4	Sim	600

Fonte: Autor

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Na simulação computacional será utilizado um método iterativo de cálculo numérico, o Matlab, para simular tais casos citados no tópico 3.2.1. Análise das frequências.

Serão implementados os casos com simulação dos mesmos trafegando sobre uma lombada do tipo II, de 3,7 m de comprimento por 0,10 m de altura, a uma velocidade de 30 km/h, conforme Resolução nº 567/80 de 12 de dezembro de 1980 do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito), a qual regulamenta a colocação de ondulações transversais em vias públicas.

O perfil da via será aproximado a uma função seno, conforme a Eq. 3.8, sendo integrada até meio período, compreendendo apenas a parte positiva da função.

$$y = A \sin(2\pi ft) \quad (3.8)$$

Onde:

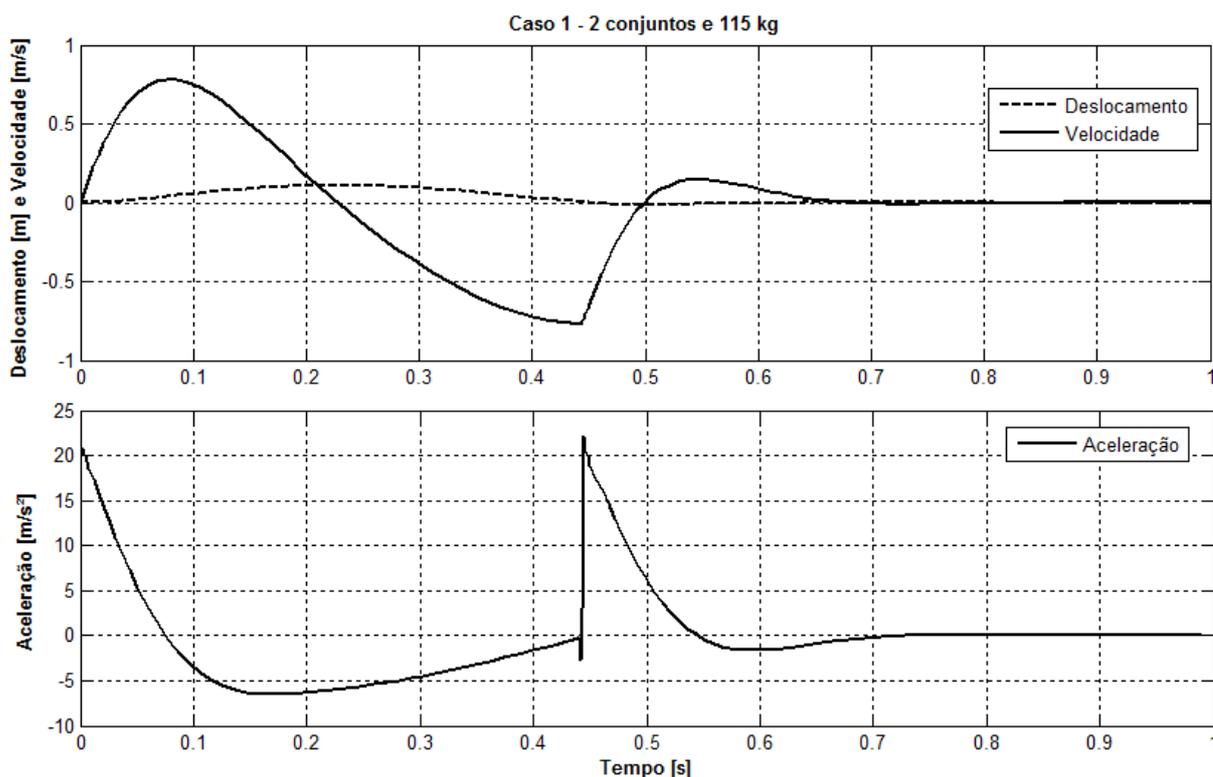
A – altura da lombada [m];

f – frequência do seno [Hz]

t – variável de integração [s].

A partir desta simulação, é possível obter os perfis de deslocamento, velocidade e aceleração para cada caso, com destaque para os valores absolutos máximos de cada função. Na Fig. 15 pode-se observar o comportamento para as funções descritas, como exemplo do caso 1. As respostas são analisadas em gráficos diferentes por conter escalas distintas.

Figura 15 – Comportamento do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa em função do tempo em simulação de transposição de lombada.



Fonte: Autor

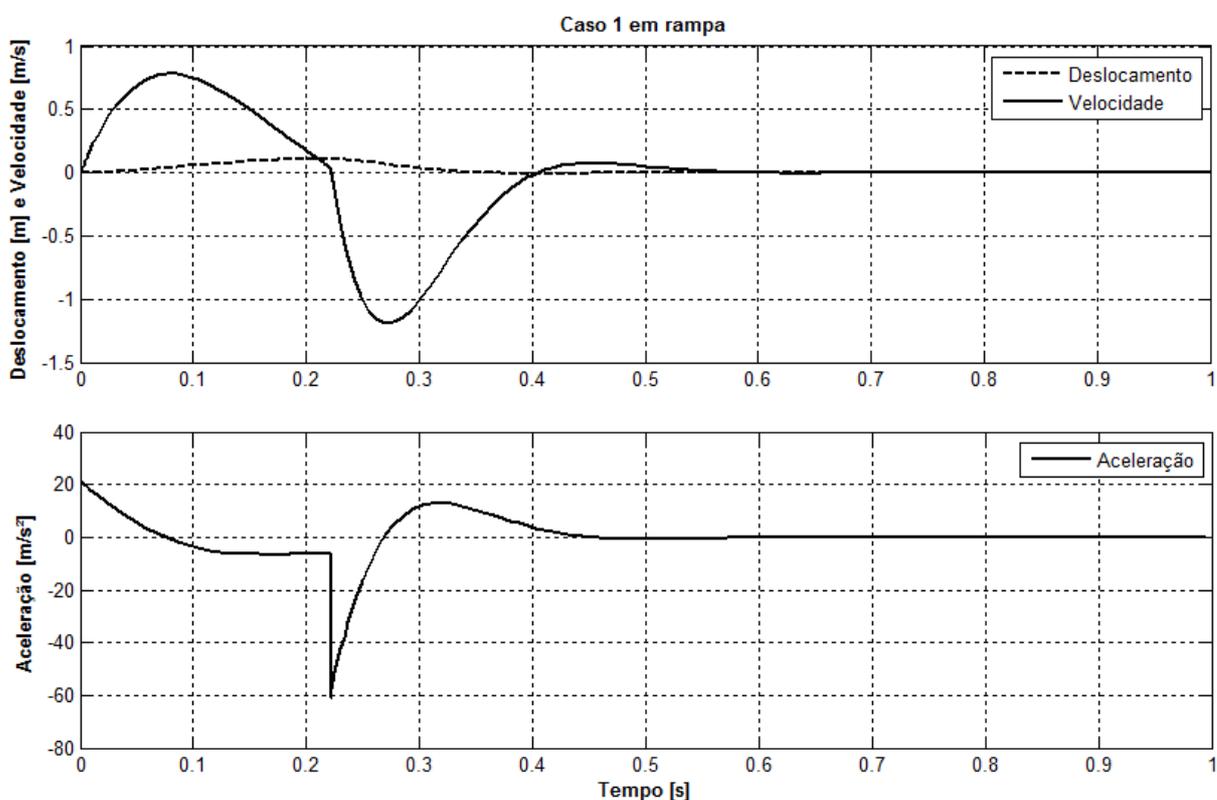
Com exceção do caso 2 (MonoTracer com 2 conjuntos), o fator de amortecimento (Eq. 3.7) resultante é maior do que 1, gerando respostas superamortecidas, o que explica o fato de o conjunto não vibrar após a transposição do obstáculo, conforme pode ser observado na Fig. 15.

Os códigos implementados em Matlab encontram-se no Apêndice A e B, com exemplo do caso 1.

Será estudado o caso para $\frac{1}{4}$ de seno, a fim de representar um salto com o veículo em um perfil equivalente a meia lombada. Neste também serão obtidos o deslocamento, velocidade e aceleração, bem como seus valores absolutos máximos.

Os códigos para tais funções encontram-se no Apêndice C e D, com exemplo do caso 1, o qual tem seu comportamento apresentado na Fig. 16.

Figura 16 – Comportamento do deslocamento, velocidade e aceleração da massa suspensa em função do tempo em simulação de salto em rampa.



Fonte: Autor

3.3.1 Simulação da transposição da lombada

Os resultados de deslocamento, velocidade e acelerações máximas são apresentados na Tab. 6 para melhor visualização e comparação.

Tabela 6 – Valores de deslocamentos superior e inferior e velocidade e aceleração máximos para a transposição da lombada.

CASO	DESLOCAMENTO SUPERIOR [mm]	DESLOCAMENTO INFERIOR [mm]	VELOCIDADE [m/s]	ACELERAÇÃO [m/s²]
1	109,7	13,6	0,782	22,2
2	127,1	37,3	0,995	8,8
3	115,8	18,5	0,815	14,0
4	118,3	21,8	0,837	12,4
5	119,2	23,5	0,849	12,2

Fonte: Autor

3.3.2 Simulação de salto em rampa

Os valores de deslocamento, velocidade e acelerações máximas são condensados na Tab. 7 para melhor visualização dos resultados.

Tabela 7 – Valores de deslocamentos superior e inferior e velocidade e aceleração máximos para salto em rampa.

CASO	DESLOCAMENTO SUPERIOR [mm]	DESLOCAMENTO INFERIOR [mm]	VELOCIDADE [m/s]	ACELERAÇÃO [m/s²]
1	109,7	7,1	1,189	61,4
2	118,9	33,1	0,962	24,9
3	114,9	15,9	1,130	40,7
4	116,8	19,4	1,105	39,0
5	117,4	20,5	1,096	38,2

Fonte: Autor

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na análise das frequências naturais o caso que melhor aproximou-se do recomendado por Genta & Morello (2009), que compreende as faixas de 1,2 a 1,6 Hz para a 1^a frequência e 8 a 10 Hz ou 15 a 20 Hz como alternativa para a 2^a

frequência foi o caso 2, o qual dispõe de 2 pares mola e amortecedor, com a massa do MonoTracer, de 485 kg.

Entretanto neste caso o deslocamento da suspensão atinge mais da metade de sua compressão máxima (56,8 mm), restando pouco espaço para a mesma movimentar-se e possibilitar a absorção das irregularidades da pista adequadamente. Na transposição da rampa, por exemplo, este mesmo conjunto atinge uma compressão de aproximadamente 37 mm, e uma vez que o mesmo inicialmente encontrava-se com 56,8 mm comprimido, restam apenas 12 mm do curso total do conjunto, inviabilizando a aplicação de tal solução.

Genta & Morello (2009) apresentam que o recomendável é que as primeiras frequências naturais estejam entre 1,2 e 1,6 Hz. Além disso, afirmam também que a mesma deve permanecer abaixo de 4 Hz, o mais distante possível deste valor, e acima de 1 Hz. Com base nestas informações pode-se afirmar que todos os casos enquadram-se nos quesitos de conforto desejáveis, conforme apresentado na página 35.

Entretanto, visando aproximar a 1ª frequência natural do valor de 1,6 Hz, é notável que o caso 5 (com 4 conjuntos e 600 kg) se adequa melhor à situação buscada, com valor de 2,17 Hz. Outro caso que ficou bastante próximo destes valores foi o 3 (com 4 conjuntos e 485 kg), com 2,39 Hz.

Comparando-se o caso 3 com o 5, nota-se que o primeiro possui deslocamento estático da suspensão de 28,4 mm, dentro da faixa desejável de ajuste do SAG. Já o caso 5 apresenta este resultado como 34,4 mm, bastante próximo do valor máximo recomendável de 35 mm de compressão.

O caso 3 foi também o que apresentou os menores valores de deslocamento máximo e mínimo em ambas as situações analisadas (excetuando-se a configuração de peso original da moto estudada – caso 1), com os resultados de velocidade e aceleração máximos e mínimos muito próximos dos demais.

De acordo com Genta & Morello (2009), o aumento da aceleração vertical imposta sobre o ocupante do veículo diminui o tempo máximo que o mesmo consegue permanecer no mesmo antes da vibração proporcionar queda no desempenho e funções corporais do passageiro ou piloto. Estas magnitudes máximas de aceleração são em torno de 6 m/s² (rms) para excitação senoidal constante na frequência de 20 Hz.

Como a excitação no caso estudado não é permanente, os valores de acelerações máximas não se mostram tão significativos quando comparados com as frequências naturais do sistema e da compressão e extensão máximas do conjunto, uma vez que não devem ocorrer choques de fim de curso na suspensão pelo risco de danificar os componentes desta.

4 CONCLUSÕES

A partir das análises das frequências naturais, com critérios que visam o conforto dos passageiros, é possível notar que o caso 3 (com 4 conjuntos e 485 kg) possui resultados muito próximos das faixas ideais de 1,2 a 1,6 Hz – ou menor que 4 Hz – para a 1ª frequência natural e de 8 a 10 Hz ou 15 a 20 Hz para a 2ª frequência natural, com valores de 2,39 e 18,71 Hz.

Já para o deslocamento estático máximo, ou seja, compressão do conjunto sem cargas dinâmicas ou excitação da via, a faixa ideal de acordo com a altura de SAG recomendável é de 25 a 35 mm. Com 28,4 mm de deslocamento estático, o caso 3 enquadra-se bem, com boa folga para compressão e extensão do conjunto.

No caso 3 o valor máximo de compressão devido à transposição dos obstáculos foi de 18,5 mm, o que resultaria em compressão máxima de 46,9 mm. Já no caso do deslocamento positivo – ou extensão – do conjunto, este foi de 15,8 mm, restando também margem até o ponto máximo.

Pode-se concluir, a partir dos dados mostrados, que uma alternativa viável no que diz respeito ao conforto dos ocupantes e curso da suspensão, é utilizar 4 conjuntos de amortecedores e molas ao invés dos 2 conjuntos convencionais utilizados em motocicletas, apresentado como Caso 3.

A alternativa citada duplicaria os investimentos iniciais destes componentes, resultando em investimentos em torno de R\$ 800,00. No entanto, por tratar-se de peças facilmente encontradas em pontos de venda localizados em diversas cidades do país, as mesmas tornam-se competitivas, principalmente no que se refere à produção em série do veículo, o que eventualmente reduziria os custos de aquisição junto aos fornecedores. Outro fator positivo é a fácil manutenção e troca destes pelo consumidor final, o qual não necessitaria solicitar à empresa componentes específicos, o que poderia resultar em demora na entrega e maiores custos em envio dos mesmos.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se analisar a implementação e projeto da suspensão dianteira do veículo, bem como a criação de conceito para a carroceria, com simulações estruturais dos elementos. Pode-se ainda avaliar a motorização quanto ao desempenho dinâmico do veículo, aumentar o número de graus de liberdade do modelo, bem como variar parâmetros e relacioná-los com o desempenho veicular.

REFERÊNCIAS

- Auto Esporte: Roberto Agresti – Dicas de Motos, **Muitas vezes ignorado, ajuste de suspensão melhora uso das motos**. 11 de abr, 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/carros/dicas-de-motos/noticia/2014/04/muitas-vezes-ignorado-ajuste-de-suspensao-melhora-uso-das-motos.html>>, acesso em 16 de ago. 2014, as 18:47h.
- Bikerama.com, **Motorcycle rake, trail and offset explained**. Disponível em: <<http://bikearama.com/theory/motorcycle-rake-trail-explained>>, acesso em 15 de dez. 2014, as 20:00h.
- Cars-bike.info, **Carver One**, Disponível em: <<http://www.cars-bikes.info/d/8032-1/carver-one-004.jpg>>, acesso em 29 de abr. 2014, às 19:50h.
- CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito), **Resolução nº 567/80: Colocação de Ondulações Transversais à Vias Públicas**, Brasília, Contran, 1980.
- Correioauto, Disponível em: <<http://www.correioauto.com.br/wp-content/uploads/2013/08/gew1.jpg>>, acesso em 29 de abr. 2014, às 21:59h.
- COSSALTER, Vittore; LOT, Roberto; MASSARO, Matteo, **Modelling, Simulation and Control of Two-Wheeled Vehicles: Cap 1 – Motorcycle Dynamics**. Informazione e Bioingegneria, Politecnico di Milano, Italy, Ed. Wiley, 2014.
- CROCCOLO, Dario; AGOSTINIS, Massimiliano De, **Motorbike Suspensions: Modern Design and Optimisation**, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, DOI 10.1007/978-1-4471-5149-4, New York, 2013.
- Deviantart.com, **Monotracer**, Disponível em: <<http://themightyquinn.deviantart.com/art/monotracer-sighting-1-178803861>>, acesso em 29 de abr. 2014, às 19:50h.
- FIPE (Fundação Instituto de Pesquisas Econômicas): **Preço Médio de Veículos**. Disponível em: <<http://www.fipe.org.br/web/index.asp?aspx=/web/indices/veiculos/introducao.aspx>>, acesso em 02 de ago. 2014, às 21:45h.
- GENTA, Giancarlo, MORELLO, Lorenzo, **The Automotive Chassis, Volume 2: System Design**, Mechanical Engineer Series, Springer Science+Business Media B.V., 2009.
- IME – USP. **17 - Aplicações: Desbalanceamento Rotativo, Excitação da Base, Isolamento de Vibrações**. Apostila Online. Disponível em: <http://www.ime.usp.br/~oda/contents/01Matem%e1tica/01Sistemas%20Din%e2micos/17_Desbal_Excit_Base_Isol_Vibra.pdf>, acesso em 02 de nov. 2014, às 18:53h.

ICCT (*International Council on Clean Transportation*), **Policy Update: Brazil's Inovar-Auto Incentive Program**, February, 2013.

LUCINDA, Cláudio R. de, **Economia de Baixo Carbono: Avaliação de Impactos de Restrições e Perspectivas Tecnológicas**, Contrato de colaboração financeira não reembolsável nº 11.2.0488.1, Fundace – BNDES. Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2012.

LUQUE, Gilabert José David; NÚÑEZ, Juana María Mayo, **Estudio Dinámico de un Modelo de Motocicleta**, Proyecto de Fin de Carrera Univ. Sevilla, ESI. – Ejempl. no publicado, 2005. Disponível em: <<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3895/>>, acesso em 11 de ago. 2014.

MCS – Motorcycle Specifications: MonoTracer. Disponível em: <<http://www.motorcyclespecs.co.za/model/Custom%20Bikes/monotracer.htm>>, acesso em 03 de ago. 2014, às 18:47h.

MEDINA, Heloisa V. de, **Eco-design na Indústria Automobilística: O conceito de carro urbano**, Comunicação técnica ao 2º Congresso Internacional em Pesquisa e Design – CT2003-059-00, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2003-059-00.pdf>>, acesso em 30 de jul., 2014.

Moto Honda da Amazônia LTDA, **Manual de Serviços Honda BR.** Disponível em: <http://www.hornetonline.net/portal/downloads/manual_de_servicos_honda_BR.pdf>, acesso em 15 de ago. 2014, às 18:59h.

Moto Honda da Amazônia LTDA, **Manual do Proprietário: CG150 Titan ESD, EX, CG150 Fan ESDi.** Disponível em: <<http://www.honda.com.br/motos/pos-venda/conheca-melhor-sua-honda/ManuaisDoProprietarios/CG%20150%20Fan%202014.pdf>>, acesso em 29 de jul. 2014, às 19:45h.

Motordream UOL, **KTM: duas motos conceito em Milão**, 12 de nov. 2009. Disponível em: <<http://motordream.uol.com.br/noticias/ver/2009/11/13/ktm-duas-motos-conceito-em-milao>>, acesso em 15 de dez. 2014, às 20:45h.

Ofertas Volkswagen – up!, Disponível em: <http://ofertas.vw.com.br/up/joinville-SC?gclid=CI_29ez9i8ACFU4F7AodV0wAPg>, acesso em 11 de ago. 2014, às 16:52.

Ohlins.com, **After Installing na Öhlins Shock Absorber/Front Fork.** Disponível em: <http://www.ohlins.com/Checkpoint-Ohlins/Setting-Up-Your-Bike/Underrubrik_1/>, acesso em 13 de ago. 2014, às 20:45h.

PERAVES AG – MonoTracer MTI-1200 BMW, Disponível em: <http://www.webroad.ch/monotracer/index.php?option=com_content&view=article&id=75&Itemid=158>, acesso em 02 de ago. 2014, às 23:29h.

Quatro Rodas, **Suspensão Traseira**. 08 de jul. 2011. Disponível em: <<http://quatorrodas.abril.com.br/moto/reportagens/suspensao-traseira-633161.shtml>>, acesso em 16 de ago. 2014, às 21:06h.

RAO, Singiresu S., **Vibrações Mecânicas**, 4ª Ed., Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2008.

SCHERMACH, Alexandre, **Design em Função de um Carro Urbano de Dois Lugares**, Unoesc & Ciência – ACET, v4, n. 1, p. 13-22, jan./jun. 2013. Disponível em: <editora.unoesc.edu.br/index.php/acet/article/download/2694/pdf>, acesso em 29 de jul., 2014, às 21:53h.

SILVA, Elenice R da, **Análise do Crescimento da Motorização no Brasil e seus Impactos na Mobilidade Urbana**, Dissertação (Mestrado) – UFRJ/ COPPE / Programa de Engenharia de Transportes. 126 p., il. Rio de Janeiro, 2011.

XL1: The new Volkswagen XL1 Super Efficient Vehicle (SEV). Disponível em: <<http://www.volkswagen.co.uk/about-us/futures/xl1>>, acesso em 02 de ago. 2014, às 20:45h.

WONG, J. Yung, **Theory of Ground Vehicles**, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 528p., 2001.

APÊNDICE A – Implementação em ode45 para simulação em Matlab de transposição de lombada

```

function dz = resproda_caso01(t, z, mv, mp, mus, cs, ks)

%Excitação pela base - Caso 1

dz = zeros(2,1);           %vetor (x,v) da massa

ms = (mv-mus)/2 + mp/2;   %massa suspensa

A = 0.1;                   %Altura da lombada
f = 1/0.888;               %frequência de excitação para v = 30 km/h

if t < 0                   %período em regime plano
    y=0;
    dy=0;
elseif t>=0 && t<=1/(2*f) %período de excitação
    y=A*sin(2*pi*f*t);
    dy=A*2*pi*f*cos(2*pi*f*t);
elseif t>1/(2*f)          %período em regime plano
    y=0;
    dy=0;
end
dz(1) = z(2);
dz(2) = (ks*y + cs*dy - cs*z(2) - ks*z(1))/ms;

```

APÊNDICE B – Código em Matlab para simulação de transposição da lombada

```

clear all; close all; clc; format short eng

mv = 115;           %massa do veículo [kg]
mp = 80;           %massa do piloto [kg]
mus = 15;          %massa não-suspensa [kg]
cs = 2*1350;       %coeficiente de amortecimento [Ns/m]
ks = 2*23.51e3;    %coeficiente de rigidez [N/m]

[T,Z] = ode45(@ (t,z) resproda_caso01(t,z,mv,mp,mus,cs,ks), [0,1], [0,0]);

acel = diff(Z(:,2))./diff(T); %cálculo da aceleração vertical [m/s²]

t2 = T(1:end-1);

%gráficos resultantes de deslocamento, velocidade e aceleração em função do
%tempo
subplot(2,1,1), plot(T,Z(:,1), '--', 'LineWidth', 2)
ylabel('Deslocamento [m] e Velocidade [m/s]')
xlabel('Tempo [s]')
title('Caso 1 - 2 conjuntos e 115 kg')
legend('Deslocamento')
grid on
hold on

subplot(2,1,1), plot(T,Z(:,2), 'LineWidth', 2)
ylabel('Deslocamento [m] e Velocidade [m/s]')
xlabel('Tempo [s]')
legend('Velocidade')
grid on

subplot(2,1,2), plot(t2,acel, '-', 'LineWidth', 2)
ylabel('Aceleração [m/s²]')
xlabel('Tempo [s]')
legend('Aceleração')
grid on

%Obtenção dos valores máximos e mínimos dos parâmetros de interesse
disp('Deslocamento positivo máximo');
    max(Z(:,1))
disp('Velocidade de subida máxima')
    max(Z(:,2))
disp('Deslocamento negativo máximo');
    min(Z(:,1))
disp('Velocidade de descida da máxima');
    min(Z(:,2))
disp('Aceleração máxima');
    max(acel)
disp('Aceleração mínima');
    min(acel)

```

APÊNDICE C – Implementação em ode45 para simulação em Matlab de salto em rampa

```

function dz = resproda_caso01_rampa(t, z, mv, mp, mus, cs, ks)

%Excitação pela base - Caso 1 em rampa
dz = zeros(2,1);           %vetor (x,v) da massa

ms = (mv-mus)/2 + mp/2;   %massa suspensa

A = 0.1;                   %Altura da lombada
f = 1/0.888;               %frequência de excitação

if t < 0                   %período em regime plano
    y=0;
    dy=0;
elseif t>=0 && t<=1/(4*f) %período de excitação
    y=A*sin(2*pi*f*t);
    dy=A*2*pi*f*cos(2*pi*f*t);
elseif t>1/(4*f)         %período em regime plano
    y=0;
    dy=0;
end
dz(1) = z(2);
dz(2) = (ks*y + cs*dy - cs*z(2) - ks*z(1))/ms;

```

APÊNDICE D – Código em Matlab para simulação de salto em rampa

```

clear all; close all; clc; format short eng

mv = 115;                %massa do veículo [kg]
mp = 80;                %massa do piloto [kg]
mus = 15;              %massa não-suspensa [kg]
cs = 2*1350;           %coeficiente de amortecimento [Ns/m]
ks = 2*23.51e3;       %coeficiente de rigidez [N/m]

[T,Z]= ode45(@ (t,z) resproda_caso01_rampa (t,z,mv,mp,mus,cs,ks), [0,1], [0,0]);

acel = diff(Z(:,2))./diff(T);    %cálculo da aceleração vertical [m/s²]

t2 = T(1:end-1);

%gráficos resultantes de deslocamento, velocidade e aceleração em função do
%tempo
subplot(2,1,1),plot(T,Z(:,1),'--','LineWidth',2)
ylabel('Deslocamento [m] e Velocidade [m/s]')
xlabel('Tempo [s]')
title('Caso 1 em rampa')
legend('Deslocamento')
grid on
hold on

subplot(2,1,1),plot(T,Z(:,2),'LineWidth',2)
ylabel('Deslocamento [m] e Velocidade [m/s]')
xlabel('Tempo [s]')
legend('Velocidade')
grid on

subplot(2,1,2),plot(t2,acel,'-','LineWidth',2)
ylabel('Aceleração [m/s²]')
xlabel('Tempo [s]')
legend('Aceleração')
grid on

%Obtenção dos valores máximos e mínimos dos parâmetros de interesse
disp('Deslocamento positivo máximo');
    max(Z(:,1))
disp('Velocidade de subida máxima')
    max(Z(:,2))
disp('Deslocamento negativo máximo');
    min(Z(:,1))
disp('Velocidade de descida da máxima');
    min(Z(:,2))
disp('Aceleração máxima');
    max(acel)
disp('Aceleração mínima');
    min(acel)

```