



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DE
TESTE PARA SISTEMAS DE SUSPENSÃO**

Por,
Gustavo Oliveira Cavalcanti

Brasília, 29 de Junho de 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO
**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA DE
TESTES PARA SISTEMA DE SUSPENSÃO**

Por,
Gustavo Oliveira Cavalcanti

*Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.*

Banca Examinadora

Prof. Alessandro Borges de Sousa Oliveira,
UnB/ENM (Orientador) _____

Prof.^a Rita de Cássia Silva, UnB/FGA (Co-orientador) _____

Prof. Fernando Neves, UnB/ ENM _____

Brasília, 26 de Setembro de 2012

Agradecimentos

Agradeço a Deus por me agraciar com uma família que sempre me deu todo o suporte necessário para chegar a este ponto de minha vida e a virgem Maria por interceder por nós. Agradeço a São Jorge, o santo guerreiro, que sempre atendeu minhas orações em intenção das lutas diárias. Agradeço aos Professores Alessandro Borges e Rita Silva por todo o tempo e a paciência dispensados na orientação deste trabalho e agradeço a Fabrícia Dias por ter me incentivado a entrar neste projeto.

RESUMO

O desenvolvimento de um veículo passa por várias etapas, desde análise de viabilidade, concepção, projeto e testes entre outros. Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma bancada de testes para sistemas de suspensão, uma das etapas essenciais para o estudo e validação de um projeto de suspensão automotiva. Através do uso da bancada será possível complementar o estudo da área de vibrações e contribuir para o aprimoramento dos veículos SAE Baja e Fórmula SAE desenvolvidos pelos alunos da universidade.

ABSTRACT

The development of a vehicle passes through several stages, from feasibility analysis, conception, design and testing among others. This work aims at the development of a test bench for suspension systems, one of the steps essential to the study and validation of an automotive suspension design. Through the use of bench you can complement the study of vibration area and contribute to the improvement of vehicles SAE Baja Formula SAE developed by the students of the University.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sistema de suspensão automotiva de um veículo de competição	03
Figura 1.2 – Dispositiva de teste de suspensão montada separadamente.....	04
Figura 1.3 – Dispositivo de teste de suspensão para um eixo.....	05
Figura 1.4 – Bancada de ensaio de um modelo de suspensão em escala reduzida.....	06
Figura 3.1 – Vista isométrica do atuador pneumático.....	13
Figura 3.2 – Vista em corte do atuador pneumático.....	14
Figura 3.3 – Características técnicas do atuador selecionado.....	14
Figura 3.4 – Controlador do atuador pneumático.....	15
Figura 3.5 – Transdutor linear do atuador pneumático.....	15
Figura 3.6 – Atuador da ponte treliçada.	16
Figura 3.7 – Características técnicas do atuador da ponte.....	17
Figura 3.8 – Válvula solenoide 5/2.....	17
Figura 3.9 – Condições de contorno usadas para simulação usando pressão de 3 bar...18	
Figura 3.10 – Resultados calculados para simulação de 3 bar.....	18
Figura 3.11 – Comportamento dinâmico do atuador pelo tempo.....	19
Figura 3.12 – Condições de contorno para uma simulação usando pressão de 6 bar....19	
Figura 3.13 – Resultados calculados para a simulação de 6 bar.....	20
Figura 3.14 – Comportamento dinâmico do atuador pelo tempo.....	20
Figura 3.15 – Dados de entrada para o atuador da ponte.....	21
Figura 3.16 – Dados de saída para o atuador da ponte.....	21
Figura 3.17 – Gráfico da posição e velocidade do embolo pelo tempo.....	21
Figura 3.18 – Comportamento da válvula para a condição de 8bar.....	22
Figura 4.1 – Vista frontal da bancada de ensaio de suspensão.....	23
Figura 4.2 – Pórtico de sustentação.....	24
Figura 4.3 – Enrijecedor de fixação das vigas.....	25
Figura 4.4 – Guia de fixação inferior das vigas.....	25
Figura 4.5 – Placa universal de fixação da bandeja.....	26
Figura 4.6 – Vista explodida da placa de fixação universal.....	27
Figura 4.7 – Ponte treliçada de fixação do amortecedor.....	28
Figura 4.8 – Pinhão dentado.....	28
Figura 4.9 – Fixação do amortecedor.....	29
Figura 4.10 – Atuador pneumático fixado a ponte treliçada.....	29
Figura 4.11 – Conjunto moto-reductor.....	30
Figura 4.12 – Dados técnicos do motor elétrico.....	31
Figura 4.13 – Curvas características do motor elétrico.....	32
Figura 4.14 – Base de apoio da roda e fixação do atuador.....	33
Figura 4.15 – Base de apoio de referência.....	34
Figura 4.16 – Primeira versão da base de apoio da roda.....	34
Figura 4.17 – Força lateral suportada pela haste do cilindro.....	35
Figura 4.18 – Bases de fixação do atuador sobre suas guias lineares.....	36
Figura 4.19 – Base de concreto e armadura de aço.....	37
Figura 5.1 – Viga para comparação de modos de vibração.....	39
Figura 5.2 – Comparação dos dados das simulações com os dados de controle.....	41
Figura 5.3 – Condições de contorno para a simulação da viga.....	42
Figura 5.4 – Deformação ampliada 320 vezes.....	42
Figura 5.5 – Tensão ampliada 320 vezes.....	42
Figura 5.6 – Coeficiente de segurança para fadiga ampliado 320 vezes	43
Figura 5.7 – Frequência natural de 75, 8 Hz para configuração com três vigas "I".....	43
Figura 5.8 – Frequência natural de 128,8 Hz para configuração com viga superior perfil "caixa".....	43
Figura 5.9 – Condições de contorno para a simulação da ponte treliçada.....	44
Figura 5.10 – Deformação associada ampliada 280 vezes.....	45

Figura 5.11 – Tensão associada ampliada 280 vezes.....	45
Figura 5.12 – Coeficiente de segurança ampliado 280 vezes.....	45
Figura 5.13 – Frequência natural de 83,1 Hz da ponte treliçada.....	46
Figura 5.14 – Deformação associada aos esforços ampliada 390 vezes.....	47
Figura 5.15 – Tensão associada aos esforços ampliada 390 vezes.....	47
Figura 5.16 – Coeficiente de segurança a fadiga ampliado 435 vezes.....	47
Figura 5.17 – Detalhe da deformação associada aos esforços no carrinho da guia linear.....	48
Figura 5.18 – Tensão associada aos esforços no carrinho da guia linear.....	48
Figura 5.19 – primeiro modo de vibração e convergência dos resultados para a base de apoio da roda e fixação do atuador.....	49
Figura 5.20 – Deformação do primeiro modo de vibração ampliada 510 vezes.....	50
Figura 5.21 – Convergência dos resultados para o primeiro modo de vibração da base de concreto.....	50
Figura 5.22 – Mensagem de erro ocorrido na simulação.....	51
Figura 5.23 – Suspensão McPherson do FIAT Fiorino.....	52
Figura 5.24 – Mensagem de erro ocorrido durante a simulação da suspensão.....	53
Figura 5.25 – Posição inicial do ensaio.....	54
Figura 5.26 – Posição dos componentes após variação de 50mm da haste.....	55
Figura 5.27 – Posição final dos componentes após variação de 100mm da haste.....	56
Figura 5.28 – Resultados obtidos após variações da posição da haste do atuador da roda.....	57
Figura 6.1 – Curva de vibração de alta frequência.....	58
Figura 6.2 – Curva de vibração senoidal.....	59
Figura 6.3 – Resultados da resposta da suspensão ao transpor um quebra-molas.....	60
Figura 6.4 – Esquema pneumático de acionamento dos atuadores.....	61
Figura 6.5 – Esquema pneumático e elétrico detalhado de acionamento do atuador da roda.....	62
Figura 6.6 – Esquema pneumático e elétrico de acionamento dos atuadores da ponte e da bandeja.....	63
Figura 6.7 – Cilindro pneumático montado para ensaio.....	64
Figura 6.8 – Válvula de acionamento do cilindro.....	65
Figura 6.9 – Fonte de acionamento e controle da válvula.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais modelos fabricados no Brasil e suas suspensões.....	07
Tabela 3.1 - Variação da amplitude, velocidade angular, período e frequência.....	12
Tabela 4.1 – Principais componentes da bancada de ensaio de suspensão.....	24
Tabela 4.2 – Características técnicas do redutor de engrenagens helicoidais.....	32
Tabela 5.1 – Características físicas da viga.....	39
Tabela 5.2 – condições de contorno usadas na simulação.....	40
Tabela 5.3 – dados das simulações e dados de comparação.....	40
Tabela 5.4 – Erros da simulação.....	41
Tabela 5.5 – 10 primeiros modos de vibração do pórtico.....	44
Tabela 5.6 – 10 primeiros modos de vibração para a ponte treliçada.....	46
Tabela 5.7 – 10 primeiros modos de vibração para a base de apoio da roda e fixação do atuador.....	49
Tabela 5.8 – 10 primeiros modos de vibração para a base de concreto.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

Kg	Quilograma	[Kg]
mm	Milímetros	[mm]
mm/s	Milímetros por segundo	[mm/s]
A	Amplitude	[m]
T	Período	[s]
V	Velocidade	[m/s]
V	Velocidade	[Km/h]
F	Frequência	[Hz]
bar	Pressão	[10 ⁵ N/m]
N	Newton	[N]
N.m	Torque	[N.m]
m/s	Velocidade	[m/s]
HP	Horse Power	[Hp]
rpm	Rotações por minuto	[rpm]

Símbolos Gregos

ψ	Deslocamento de onda	[mm]
ψ'	Velocidade de onda	[mm/s]
ω	Velocidade angular	[rad/s]

Siglas

SAE	Society of Automotive Engineering
CAD	Computer Aided Design
MEF	Método de Elementos Finitos
Detran	Departamento de Trânsito