

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO MECÂNICO DO MECANISMO DE APLICAÇÃO DE CARGA DO
SISTEMA DE DESLOCAMENTO LONGITUDINAL E VERTICAL DE UM
SIMULADOR DE TESTE ACELERADO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

por

Humberto Todeschini

Dissertação para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

Porto Alegre, 17 de Dezembro de 2001

Projeto Mecânico do Mecanismo de Aplicação de Carga do Sistema de Deslocamento
Longitudinal e Vertical de um Simulador de Teste Acelerado de Pavimentos Rodoviários

por

Humberto Todeschini
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao corpo Docente do PROMEC – Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de concentração: Mecânica dos sólidos

Orientador: Vilson João Batista Dr. Eng.

Comissão de avaliação:

Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti
DECIV/EE/UFRGS

Prof. Dr. Flávio José Lorini
DEMEC/EE/UFRGS

Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro
Faculdade de Engenharia da PUC/RS

Prof. Alberto Tamagna Dr.
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 17 de Dezembro de 2001

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a minha preciosa sobrinha Vitória e aos meus amados pais Danilo Domingos e Neura Cecília. Vocês são o máximo.

Agradeço aos meus irmãos Bernardo e Márcia e meus cunhados Márcia e Luiz Antônio, minhas tias Guade, Jô, Zô, e Dedé por toda a energia e estímulo.

Agradeço ao meu orientador Vilson João Batista pela orientação e oportunidade, e pela sugestão do assunto.

Agradeço a minha banca: Prof. Dr. Jorge Augusto Pereira Ceratti, Prof. Dr. Flávio José Lorini e Prof. Dr. José Antônio Esmério Mazzaferro.

Por participarem ativamente deste trabalho agradeço muito aos meus colegas e amigos. Alguns leram e opinaram, outros simplesmente foram companheiros. Por outro lado outros pressionavam, porém, acreditavam e estimulavam. Um chegou a se mudar de computador e cuia para minha casa. Outra com a simples pergunta: afinal, qual é o objetivo? abriu um horizonte de pensamento que impulsionou as idéias. Com outros vivi dias maravilhosos apesar das circunstâncias da vida. Através de idéias requintadas ou simplesmente pelos exemplos refinados de alguns fui aprimorando o meu ser. Todos, contudo, ajudaram-me a realizar este trabalho. A todos vocês meu muito obrigado: Rogério Marzack, Caco Panzenhagen, Tamagna, Jun, Zaro, Tavares, Maria Isabel Beta Tim, Ivo Lusa, Diego & Rafa Crivelaro, Alemão Rodrigo Roesler, Lu Rosa, Dudu Androvandi, DW, Gabriel, Ricardo & Paola Zordan, Pato, Guertz, Wilsinho, Gerbase, Lorini, Mazza, Augusto, Vittor Ruffoni, Jeferson Cebola, Casal Carlomagno e o pessoal da Volvo Eng. de vendas Antônio Barcelos, Mecânico Carlos Henrique Ferreira de Souza, Balconista de peças Júlio Cesar da Silva, Auxiliar de estoque André Martins Cascaes e Instrutor técnico André Jenisch.

RESUMO

O presente trabalho trata do desenvolvimento do projeto mecânico do mecanismo de aplicação de carga do sistema de deslocamento longitudinal do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS. Esta é uma máquina utilizada para executar teste acelerado em pavimentos rodoviários. O sistema mecânico que executa o deslocamento longitudinal é composto de um chassi tipo carro que se movimenta de forma alternada dentro de uma estrutura metálica ao longo de 12 metros. Neste sistema mecânico deverá estar acoplado um par de pneus para fazer a aplicação da carga por rolamento sobre a pista que estará sendo testada pelo simulador de tráfego. A cada ciclo completo um atuador hidráulico fará o respectivo carregamento sobre o garfo que guia os pneus, num único sentido, ou seja, no retorno o atuador suspende este mesmo garfo garantindo que não haja contato com a pista. A magnitude da carga aplicada deverá ser mantida constante e devidamente monitorada no decorrer dos ensaios. Para isso, conta-se com a implementação de elementos elásticos e células de carga no conjunto.

Para o desenvolvimento deste estudo foi empregada uma metodologia para o processo de projeto que se desdobra em quatro fases principais: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado. Tem-se como resultado deste trabalho o projeto mecânico do mecanismo de aplicação de carga do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS que poderá ser facilmente fabricado e implementado no equipamento existente. O projeto foi elaborado considerando os itens montagem, manutenção e operação, o que resultará em aumento da sua performance durante sua utilização.

Palavras chaves: projeto mecânico, simulador de tráfego, teste acelerado de pavimentos, mecanismo de aplicação de carga.

ABSTRACT

Mechanical Project of a Load Application Mechanism in Longitudinal and Vertical Movement System for Road Accelerated Pavement Testing Simulator

This project is based on the development of a mechanical design for a load application mechanism in longitudinal movement system of a Traffic Simulator (which belongs to UFRGS-DAER/RS). This machine is used to proceed accelerated pavement testing. The mechanical system that executes the longitudinal movement is compounded by a type car chassis which moves in an alternate way along 12 meters inside of a metallic structure. In this mechanical system should be coupled a pair of tires to apply load by rolling over the pavement which will be being tested by the traffic simulator. At each completed cycle an hydraulic actuator will proceed the respective loading over the fork that guides the tires, in an only way, i.e., during the return the actuator suspends this same fork to avoid any contact to the pavement. The magnitude of the applied load shall be kept constant and properly controlled during the tests. For this, it is necessary to use elastic elements and load cells in the set.

During the development of this project, it was employed a methodology for the project processes, divided in four main phases: Informational, Conceptual, Preliminary and Detailed Project. As a result of this job, there is a mechanical design for the UFRGS-DAER/RS Traffic Simulator load application mechanism which can be easily implemented in the equipment, improving its performance and use.

Key words: mechanical design, traffic simulator, accelerated pavement testing, load application mechanism.

ÍNDICE

1.	COMENTÁRIOS INICIAIS.....	1
1.1	A Rodovia.....	1
1.2	A utilização dos simuladores de tráfego.....	2
1.3	Importância do tema e objetivos deste trabalho.....	3
1.4	Método de trabalho.....	3
1.5	Estrutura do trabalho.....	4
2.	INFORMAÇÕES GERAIS.....	5
2.1	O teste acelerado.....	5
2.2	Pistas experimentais.....	7
2.3	Estado da Arte – Os simuladores de tráfego.....	7
2.3.1	<i>Simulated Loading and Vehicle Emulator (SLAVE)</i>	8
2.3.2	<i>French Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Test Facility</i>	10
2.3.3	<i>Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX)</i>	11
2.3.4	<i>Nevada Automotive Test Center WesTrack</i>	12
2.3.5	<i>Texas Mobile Load Simulator (TxMLS)</i>	13
2.3.6	<i>Australian Accelerated Loading Facility (ALF/AUSTR)</i>	15
2.3.7	<i>Dutch LINear TRACKing Apparatus (LINTRACK)</i>	17
2.3.8	<i>Kansas Accelerated Testing Laboratory (K-ATL)</i>	20
2.3.9	<i>South African Heavy Vehicle Simulator (SA - HVS)</i>	21
2.3.10	Outros simuladores de tráfego.....	23
2.4	O Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS (ST).....	24
2.4.1	Principais sistemas do ST.....	25
2.4.2	O carro do ST e seus componentes.....	26
2.4.3	Movimentos das rodas do ST.....	29
2.4.4	Análise estática do ST.....	30
2.4.5	Manutenção.....	33
2.4.6	Reações e deformações do ST – observações gerais.....	33
2.4.7	Considerações sobre o ST.....	34
2.5	Generalidade sobre suspensões.....	34
2.5.1	Suspensão mecânica.....	35
2.5.2	Suspensão pneumática.....	36
2.5.3	Suspensão hidropneumática.....	37
2.5.4	Suspensão em veículos pesados.....	38

2.6	Molas.....	40
2.6.1	Molas helicoidais	40
2.6.2	Feixe de molas	41
2.6.3	Molas pneumáticas.....	44
2.7	Amortecedores	45
3.	ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO	46
3.1	O Desdobramento da Função Qualidade (QFD).....	46
3.2	Entendendo o problema	48
3.3	Restrições de projeto.....	50
3.3.1	Partida inicial.....	50
3.3.2	Sobre forças reativas do carro.....	50
3.3.3	A estrutura do garfo.	51
3.4	A aplicação do <i>QFD</i>	52
3.5	Considerações sobre este capítulo.....	57
3.5.1	O custo do protótipo <i>versus</i> valor do pavimento	57
3.5.2	A produtividade.....	58
4.	PROJETO CONCEITUAL.....	59
4.1	Alternativas de solução	59
4.2	Propondo soluções	60
4.2.1	Proposta 1. Mola posicionada entre o cilindro e os mancais	61
4.2.2	Proposta 2. Mola posicionada sob o cilindro.	62
4.2.3	Proposta 3. Mola posicionada diretamente sobre o eixo.....	62
4.2.4	Proposta 4. Feixe de molas tipo semi- <i>cantilever</i>	63
4.2.5	Proposta 5. Feixe de molas.	64
4.2.6	Proposta 6. Sistema deslizante.....	64
4.3	A configuração da proposta escolhida: proposta 3	66
5.	PROJETO PRELIMINAR.....	69
5.1	Mecanismo de aplicação da carga.....	69
5.2	Dimensionamento	71
5.3	Análise dinâmica.....	73
6.	PROJETO DETALHADO.....	75
6.1	O modelo final.....	75
6.1.1	O garfo articulado	77
6.1.2	A viga articulada	78

6.1.3 O conjunto do rodado.....	80
6.2 As molas pneumáticas.....	82
6.3 As alterações no carro.....	83
6.4 A montagem do conjunto.....	84
7. RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
7.1 Conclusões gerais sobre o projeto.....	87
7.2 Conclusões gerais sobre o trabalho	88
8. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DESTE TRABALHO	89
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
APÊNDICE I.....	95
APÊNDICE II.....	96
APÊNDICE III	119
APÊNDICE IV	120
APÊNDICE V.....	122
APÊNDICE VI.....	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquemática do teste acelerado de pavimentos.....	6
Figura 2.2 – O <i>SLAVE</i> :.....	9
Figura 2.3 – Figura esquemática do conjunto de aplicação de carga do <i>SLAVE</i>	9
Figura 2.4 – Vista do simulador do <i>LCPC Circular Test Track</i>	11
Figura 2.5 – Pista de testes do <i>CEDEX</i>	12
Figura 2.6 – Vista de parte da pista e dois conjuntos móveis do <i>WesTrack</i>	13
Figura 2.7 – Vista superior da pista de testes do <i>WesTrack</i>	13
Figura 2.8 – O <i>TxMLS</i>	14
Figura 2.9 – Protótipo em escala 1/10 do sistema de aplicação de carga do <i>TxMLS</i>	14
Figura 2.10 – Vista geral do <i>ALF</i>	16
Figura 2.11 – Vista lateral do <i>ALF</i> . Princípio de deslocamento longitudinal.	16
Figura 2.12 – Detalhe do carro do <i>ALF</i>	17
Figura 2.13 – Detalhe do carro do <i>LINTRACK</i>	18
Figura 2.14 – As instalações do <i>LINTRACK</i>	19
Figura 2.15 – Detalhe do carro do <i>LINTRACK</i>	19
Figura 2.16 – O simulador do <i>K-ATL</i>	20
Figura 2.17 – O simulador de tráfego africano <i>HVS IV</i>	22
Figura 2.18 – Vista geral destacando o sistema de climatização do <i>HVS IV</i>	22
Figura 2.19 – O Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS.	25
Figura 2.20 – O carro do ST – vistas do rodado.	27
Figura 2.21 – O carro do ST.	27
Figura 2.22 – As principais dimensões do ST.	28
Figura 2.23 – Movimentos do rodado.	29
Figura 2.24 – Componentes dos movimentos.	30
Figura 2.25 – Análise bidimensional do sistema no plano longitudinal.	31
Figura 2.26 – Diagrama de corpo livre do garfo, parte de baixo do conjunto.	32
Figura 2.27 – Diagrama de corpo livre do carro, parte de cima do conjunto.	32
Figura 2.28 – Suspensões mecânicas.	35
Figura 2.29 – Suspensão dianteira de braços articulados.	36
Figura 2.30 – Válvula de regulação de nível de suspensão pneumática.	36
Figura 2.31 – Detalhe da suspensão do Pulverizador <i>John Deere 4700</i>	37
Figura 2.32 – Suspensão hidropneumática do Citroën.	38

Figura 2.33 – Suspensão com feixe de molas e feixe auxiliar.....	39
Figura 2.34 – Suspensão pneumática.	40
Figura 2.35 – Suspensão dianteira utilizando mola helicoidal.....	41
Figura 2.36 – Feixe de molas.	42
Figura 2.37 – Feixe de molas tipo <i>cantilever</i>	42
Figura 2.38 – Suspensão dianteira de uma motocicleta militar utilizando feixe de molas.	43
Figura 2.39 – Mola pneumática.....	44
Figura 2.40 – Amortecedor telescópico hidráulico	45
Figura 3.1 – Inclinação indesejável do eixo e rodas.....	49
Figura 3.2 – O ponto de partida.....	50
Figura 3.3 – Casa da Qualidade.....	54
Figura 4.1 – Estudo preliminar da inserção de um elemento elástico no conjunto.....	60
Figura 4.2 – Proposta 1.....	61
Figura 4.3 – Proposta 2.....	62
Figura 4.4 – Proposta 3.....	63
Figura 4.5 – Proposta 4.....	63
Figura 4.6 – Proposta 5.....	64
Figura 4.7 – Proposta 6 (molas pneumáticas).	65
Figura 4.8 – Proposta 6 (molas helicoidais).	65
Figura 4.9 – Vista 3D da alternativa a ser desenvolvida.	67
Figura 5.1 – O posicionamento das rodas.	69
Figura 5.2 – A atuação das molas no movimento do sistema de aplicação de carga do ST.	70
Figura 5.3 – Detalhe da inclinação das molas do sistema articulado.	70
Figura 5.4 – Representação esquemática do conjunto com seus pontos críticos.	72
Figura 5.5 – Sistema mecânico equivalente.	73
Figura 6.1 – O novo mecanismo de aplicação de carga do ST.....	76
Figura 6.2 – Detalhe das molas e células de carga.	76
Figura 6.3 – O <i>conjunto garfo articulado</i>	78
Figura 6.4 – O <i>conjunto viga articulada</i>	79
Figura 6.5 – Detalhe da célula de carga.	80
Figura 6.6 – O <i>conjunto do rodado</i>	80
Figura 6.7 – O cubo de roda completo.	81
Figura 6.8 – Corte longitudinal do <i>conjunto do rodado</i>	82
Figura 6.9 – As alterações no carro.	83

Figura 6.10 – O posicionamento do <i>conjunto viga articulada</i>	84
Figura 6.11 – O posicionamento do <i>conjunto garfo articulado</i>	85
Figura 6.12 – A montagem da célula de carga.	85
Figura 6.13 – A montagem dos <i>conjuntos garfo articulado e viga articulada</i>	86
Figura 6.14 – A montagem do <i>conjunto do rodado</i>	86
Figura 9.1 - Tensões em um pavimento.	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Outras características do <i>SLAVE</i>	10
Tabela 2.2 – Outras características do LCPC.....	10
Tabela 2.3 – Outras características do <i>CEDEX</i>	12
Tabela 2.4 – Outras características do <i>TxMLS</i>	15
Tabela 2.5 – Outras características do <i>ALF</i>	17
Tabela 2.6 – Outras características do <i>LINTRACK</i>	19
Tabela 2.7 – Outras características do <i>K-ATL</i>	20
Tabela 2.8 – Outras características do <i>HVS</i>	23
Tabela 2.9 – Características principais do ST.	24
Tabela 2.10 – Componentes do carro do ST.	28
Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens dos tipos de transmissão da carga.....	52
Tabela 3.2 – Especificações de Projeto.	55
Tabela 3.3 - Especificações de Projeto (continuação).	56
Tabela 4.1 – Principais componentes da proposta 3 para o ST.	67
Tabela 5.1 – As solicitações e as tensões nos componentes escolhidos.....	72
Tabela 6.1 – Componentes do <i>conjunto garfo articulado</i>	77
Tabela 6.2 – Componentes do <i>conjunto viga articulada</i>	79
Tabela 6.3 – Componentes do conjunto do rodado.	81
Tabela 6.4 – Componentes do cubo de roda completo do modelo EDC NL12 da Volvo.....	81

1. COMENTÁRIOS INICIAIS

De acordo com as suas necessidades, o homem há mais de cinco milênios, vem fabricando utensílios. Confundido com a evolução tecnológica, o processo de projeto de objetos e máquinas adaptou-se às necessidades atuais, objetivando produtos com alta qualidade, desempenho e melhor relação custo-benefício, para satisfazer as necessidades de usuários cada vez mais exigentes. Este trabalho aborda um estudo de caso de um simulador de tráfego que é tratado como um produto a ser aprimorado e melhor adaptado à realidade.

Neste capítulo apresentam-se, inicialmente, breves comentários relativos à rodovia em seu processo evolutivo, bem como a utilização dos simuladores de tráfego nos dias de hoje. Assim, a justificativa deste estudo reforça a importância do equipamento e o desenvolvimento deste trabalho. De forma simples são citados o método de trabalho e a estrutura utilizada no mesmo.

1.1 A Rodovia

A construção de rodovias vem ocorrendo há quase cinco mil anos, após o surgimento da roda. A Civilização Chinesa, o Império Persa e a Bretanha já utilizavam vias pavimentadas desde 2500 A.C., e a Índia, a Mesopotâmia e o Egito posteriormente [Wignall, et al., 1991]. Entretanto, foi no Império Romano que 80.000km de vias pavimentadas foram construídas para a passagem de carroças puxadas por animais e tropas do Império. Estas formaram uma grande malha rodoviária divergindo de Roma, se estendendo por grande parte do seu domínio. O pesado material bélico romano necessitava vias com grande resistência e por isso elas já eram construídas em camadas com funções específicas, semelhantes às atuais. Não se pode exigir muito da qualidade da superfície daqueles pavimentos pois utilizavam a pedra como revestimento. Durante o declínio do Império Romano suas vias foram abandonadas e muitas não resistiram aos saques e as severas condições do inverno. Este quadro permaneceu o mesmo por mais de mil anos e somente no final da Idade Média é que voltaram a ser construídas boas rodovias, nas regiões onde se localizam atualmente a Suécia, Áustria, Itália e Grã-Bretanha [Wignall, et al., 1991].

Mas foi nos Século XVIII que surgiram os primeiros estudos e sugestões sobre os efeitos de cada camadas no conjunto da estrutura viária. No século XIX, contudo, é que ocorreu o grande impulso no desenvolvimento de pavimentos, quando começaram a surgir os primeiro

veículos motorizados. A partir daí a evolução tecnológica e a utilização do conhecimento científico levaram o homem a desenvolver veículos de carga cada vez mais capazes e velozes que necessitavam de estradas compatíveis com as suas exigências.

1.2 A utilização dos simuladores de tráfego

A evolução da qualidade dos pavimentos ocorreu de forma empírica juntamente com a degradação, pelo uso, dos mesmos. Porém, as estradas são projetadas e construídas para resistirem aos contínuos carregamento por muitos anos, o que implica em uma longa espera por informações a respeito de sua durabilidade. Isso gerou uma demanda por máquinas capazes de simular a utilização de rodovias com ciclos de carga de maior frequência que no uso cotidiano por veículos. As máquinas citadas são os Simuladores de Tráfego, os quais foram especialmente projetados e fabricados para executarem testes acelerados em pavimentos (*Accelerated Pavement Testing – APT*).

O Teste Acelerado de Pavimentos consiste na aplicação de cargas cíclicas de compressão através do rolamento de rodas sobre pavimentos, simulando, em escala real, a utilização das rodovias por veículos. Para que um teste acelerado seja validado deve-se monitorar (além do clima e intempérie local) e controlar dois parâmetros: a magnitude da carga e o número de ciclos aplicados. Isso é imprescindível para que seja estabelecido algum tipo de relação entre a vida útil do pavimento e sua estrutura, tanto com relação as dimensões de cada camada quanto aos materiais nele empregados. A magnitude da carga é mantida constante e seu valor depende do simulador utilizado, bem como o tipo de teste proposto, podendo atingir um limite de 440 kN [Lynch, et al., 1999], para testes em pistas de aeroportos. O número de ciclos é contabilizado através de simples contadores. Além disso os simuladores possuem ciclos de carga de maior frequência que a utilização convencional dos pavimentos, e esta é uma de suas grandes virtudes: possibilitar o conhecimento sobre a qualidade dos pavimentos e sua durabilidade em um período de tempo relativamente curto. Isso permite que muitos anos de utilização das rodovias sejam simulados em poucos meses. Os equipamentos mais modernos são dotadas de instrumentação e automação de alto desempenho tecnológico, atingindo custos que podem chegar à cifra de milhões de dólares. Cifras como estas são plenamente justificadas se comparadas com os custos de fabricação e manutenção das rodovias.

1.3 Importância do tema e objetivos deste trabalho

Atualmente existe um Simulador de Tráfego que é resultado de um projeto de pesquisa conjunta entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e o Departamento Autônomo do Estradas de Rodagem (DAER/RS) realizado no período compreendido entre 1992 e 1994. Localizado no Campus do Vale da UFRGS, em Porto Alegre, este equipamento encontra-se em pleno funcionamento, necessitando, porém, de alguns ajustes em seu sistema de aplicação de carga. Este trabalho trata do projeto de um novo sistema de deslocamento vertical do rodado do ST que consiga absorver as imperfeições surgidas no pavimento, não alterando a constância da carga durante o deslocamento longitudinal, além de distribuí-la perfeitamente sobre a pista. Isso tem como objetivo melhorar a qualidade dos ensaios a serem por ele realizados conseguindo, assim, tê-los dentro dos padrões e parâmetros utilizados hoje em dia. Esta sofisticação requerida dos ensaios garante a qualidade dos resultados obtidos, agregando valor a este equipamento.

Além disso, o ST é um equipamento totalmente nacional que possui grande importância sócio-econômica, pois o Governo Federal é responsável por grande parte da malha rodoviária brasileira, e esta necessita ser mantida e reparada constantemente. Rodovias construídas criteriosamente e com vida útil determinada representam uma economia a médio e longo prazos de uma verba pública, que poderia, por exemplo, ser destinada à ampliação das estradas de rodagem. Estes argumentos justificam em parte este trabalho.

1.4 Método de trabalho

A fim de propor um novo projeto, foi necessário ter um conhecimento prévio sobre o assunto de forma a identificar as necessidades do equipamento possibilitando o entendimento do problema.

Para atender o desenvolvimento deste tema, foram considerados os desdobramentos das seguintes etapas:

- Realizou-se um estudo detalhado do atual ST através do acompanhamento do seu funcionamento, bem como da leitura da bibliografia, e relatórios técnicos científicos já gerados;
- Procedeu-se uma busca por informações sobre as diversas máquinas espalhadas pelo mundo e demais informações sobre Teste Acelerado de Pavimentos [Conference CD, 1999], [CSIR, 1998];

- Estabeleceram-se as necessidades do equipamento junto aos atuais usuários da máquina, que são os técnicos, alunos, pesquisadores e professores da UFRGS;
- As especificações de projeto foram obtidas através da utilização do Desdobramento da Função Qualidade (*QFD*);
- Definiu-se alternativas para a solução do problema;
- Foi escolhida a alternativa que mais se adequasse às especificações de projeto;
- Os componentes do novo projeto foram dimensionados estabelecendo suas características geométricas;
- Os componentes necessários para sua fabricação e montagem foram desenhados e detalhados.

1.5 Estrutura do trabalho

Objetivando um projeto que contemple as necessidades do equipamento e de seus proprietários, segue-se, então, a metodologia sugerida por Pahl & Beitz, 1988. Estes propõem que o projeto seja dividido em quatro etapas: Projeto Informacional, Projeto Conceitual, Projeto Preliminar e Projeto Detalhado.

Por questões didáticas, este trabalho está sendo apresentado em capítulos. Cada qual apresenta seus respectivos desenvolvimentos e comentários.

Nos Capítulos 2 e 3 está apresentado o projeto informacional. As informações relativas a este assunto, como o Estado da Arte, estão no Capítulo 2 e as especificações de projeto, geradas a partir do processamento das necessidades e requisitos através do uso do *QFD*, no Capítulo 3.

O Projeto Conceitual, apresentado no Capítulo 4, mostra as alternativas de solução criadas e sujeitas a alguma reflexão quanto as suas capacidades. Posteriormente, a alternativa escolhida retorna à cena com uma descrição mais detalhada, seguida do esboço de sua geometria com indicação dos principais componentes. Desta forma, define-se conceitualmente o projeto.

No Capítulo 5, Projeto Preliminar, estão à mostra os parâmetros envolvidos nos processos de cálculo, os movimentos do conjunto projetado e dimensionamento do sistema.

No Projeto Detalhado, Capítulo 6, estão apresentados os desenhos e informações necessárias para sua fabricação e montagem.

Por fim, nos Capítulos 7, 8 e 9 apresentam-se, respectivamente, a conclusão do trabalho, sugestões para futuros estudos e referências bibliográficas.

2. INFORMAÇÕES GERAIS

O Projeto Informacional consiste em um estudo sistemático das necessidades do usuário/cliente/consumidor através de um levantamento a respeito, para chegar a uma definição do problema a ser resolvido. Posteriormente todas estas informações ajudam a identificar os diversos parâmetros que influenciam o desempenho do produto. Estes parâmetros são então quantificados e hierarquizados originando as especificações de projeto plausíveis de implementação tanto técnica como economicamente.

Dando início à fase informacional do projeto será apresentado um conteúdo referente a teste acelerado de pavimentos e suas diferentes pistas. Em seguida o item Estado da Arte apresenta informações sobre os diversos simuladores de tráfego existentes. Embora pertencente ao Estado da Arte, o Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS encontra-se descrito detalhadamente no sub-capítulo seguinte. Algumas noções sobre suspensões e seus componentes encerram este capítulo. O projeto informacional, porém, é concluído no capítulo seguinte.

Informações relativas a estruturas e normas de pavimentos não fazem parte do escopo deste trabalho, estando, contudo, citadas brevemente no Apêndice IV normas que permitem situar os valores de cargas e outros dados relativos a sua estrutura.

2.1 O teste acelerado

Testes acelerados em pavimentos são executados desde 1912 em pista circular com o *British Road Machine* no *National Physical Laboratory* [Brown e Brodrick, 1999]. Atualmente o procedimento é o mesmo e, de modo geral, o teste acelerado em pavimentos pode ser resumido na figura 2.1.

Neste ensaio, dois parâmetros a serem controlados são realmente importantes: a magnitude da carga e o número de ciclos aplicados. Quanto ao primeiro, a carga deve estar devidamente calibrada e de valor conhecido, além de ser bem distribuída na pista. Com relação ao segundo, deve-se, simplesmente, conhecer o número de ciclos de aplicação da carga. Ambos podem assumir valores de acordo com o tipo de ensaio e pavimento em questão. A magnitude da carga pode ser referenciada nos diversos simuladores em atividade e o número de ciclos, geralmente, chega à casa dos milhões. Outro fator também importante, mas não facilmente controlável, é a temperatura ambiente durante o ensaio. Tendo um comportamento visco-elástico, a camada asfáltica apresenta diferentes propriedades físicas de acordo com a

temperatura, além de apresentar baixo ponto de fusão. Fica clara a importância do controle deste fator durante o ensaio. Como será visto no capítulo 2.3, pode-se, de alguma forma, manter a temperatura do pavimento constante, com o devido dispêndio econômico. Entretanto, deve-se levar em conta este fator além da intempérie local, na posterior análise dos resultados. Esses têm grande importância, pois os ensaios fornecem intrinsecamente dados empíricos que se transformam em resultados quando devidamente analisados e relacionados com outros casos semelhantes. Através da utilização de outros simuladores também expostos à intempérie de suas regiões, com condições de ensaio diferenciadas, tem-se à disposição uma gama muito grande de ensaios distintos.

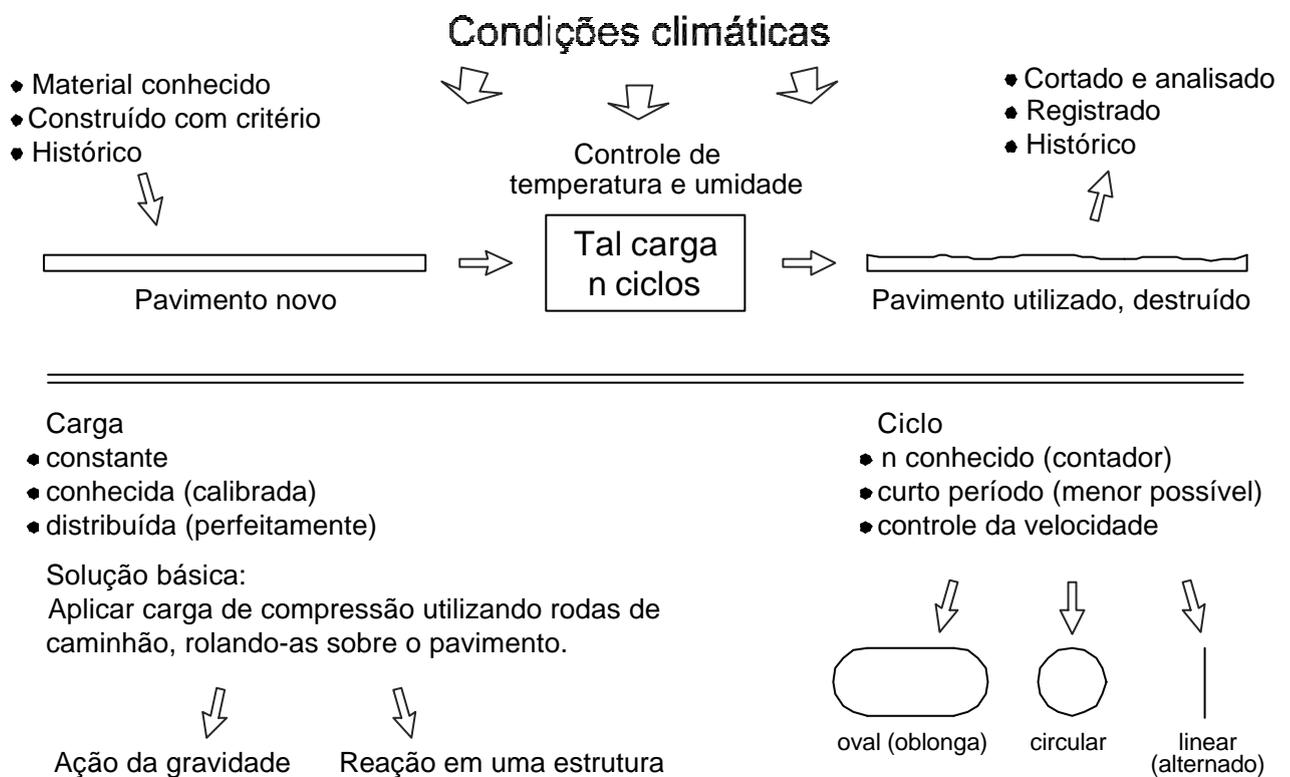


Figura 2.1 – Esquematização do teste acelerado de pavimentos.

Outro fator controlável e importante é pressão de inflação dos pneus durante os testes. Esta tem influência direta na deterioração da pista de rolamento. Este parâmetro foi estudado por Albano, (1998) no mesmo equipamento analisado.

2.2 Pistas experimentais

As pistas experimentais utilizadas pelos simuladores são apresentadas basicamente em três tipos: pista linear, pista circular e pista oblonga. Estas conferem características básicas à geometria e ao princípio de funcionamento do equipamento que são intrínsecas a cada tipo de pista, como por exemplo suas dimensões e a maneira que a carga será aplicada repetidas vezes. Todas elas apresentam vantagens e desvantagens, mas, acima de tudo, representam a possibilidade de obtenção de resultados com parâmetros de ensaio diferenciados.

Pista Linear – Os simuladores que atuam em pistas lineares necessariamente executarão um movimento alternado do seu sistema de aplicação de carga, o que limita as dimensões da pista ensaiada bem como a velocidade de deslocamento da carga. São de alguma forma guiados em trilhos e podem – ou não – fazer uso dos mesmos para aplicação da carga no pavimento.

Pista Circular – Esta pista apresenta como principal característica um ensaio contínuo, podendo atingir grandes velocidades em um espaço relativamente pequeno. A pista pode atingir grandes dimensões, o que permite ser dividida em partes, tanto radiais como transversais, testando várias configurações de pavimentos simultaneamente. Como desvantagem, esta pista sempre apresentará uma diferença entre as distâncias percorridas pelas partes interna e externa do conjunto das rodas.

Pista Oblonga – Segundo Ruiz (1999) este tipo de pista agrega as características das duas outras, pois apresenta um ensaio contínuo e, simultaneamente, com trechos retilíneos. Da mesma forma que os simuladores de pista circular, os que atuam em pista oblonga aplicam a carga através da ação da gravidade.

2.3 Estado da Arte – Os simuladores de tráfego

Em uma pesquisa bibliográfica, complementada por buscas de informações na rede internacional de computadores (Internet), encontrou-se alguns centros de pesquisa que fazem uso de algum tipo de simulador de tráfego como ferramenta para o conhecimento científico. Alguns destes centros utilizam os mesmos modelos de equipamentos, mas ainda assim, somam-se vários outros modelos distintos. Todos têm a mesma finalidade, porém concepções diferentes, incluindo essencialmente tipo de pista e sistema de aplicação da carga. Alguns, ainda, estão na sua primeira versão, como o Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS (ST) por exemplo. Outros, em estágios bem mais avançados, contendo requintes tecnológicos conferidos pelos paulatinos

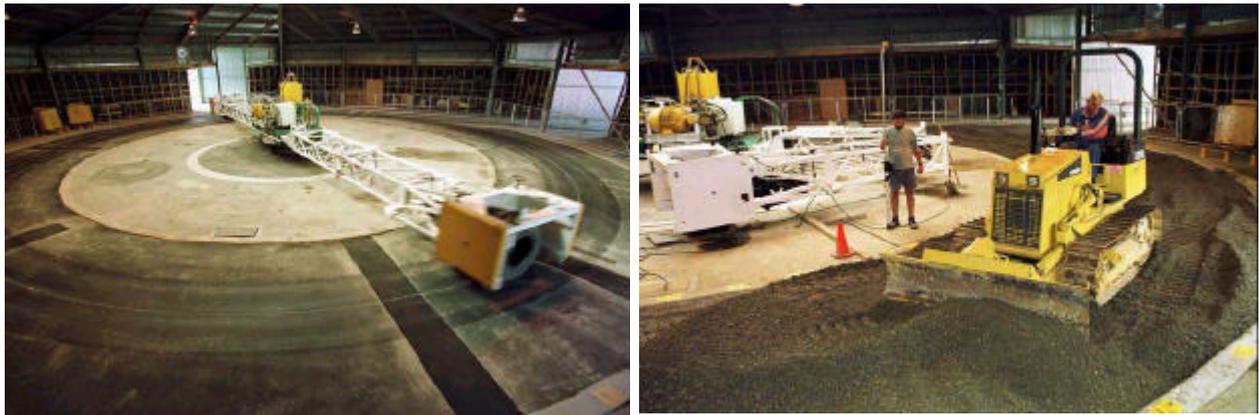
investimentos e anos de experiência de uso do equipamento. Este é o caso do *Heavy Vehicle Simulator IV (HVS IV)*, de origem sul-africana, que está em seu quarto modelo e é totalmente computadorizado [CSIR, 1998].

Nos seguintes sub-itens apresentam-se algumas descrições de diversos simuladores ainda em atividade, bem como dos respectivos centros de pesquisas.

2.3.1 *Simulated Loading and Vehicle Emulator (SLAVE)*

Com uma malha rodoviária de 100.000 km onde praticamente a metade está sujeita a todo tipo de intempérie e é utilizada por 3,3 milhões de pessoas, em uma área aproximada de 268.000 km² e volume de tráfego relativamente baixo, a Nova Zelândia optou pelo uso de métodos e materiais alternativos no projeto, fabricação e manutenção dos pavimentos [Steven, et al., 1999]. Por isso, desde 1987 testes acelerados de pavimentos vêm sendo efetuados naquele país, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Canterbury, no *Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility (CAPTIF)*. O *SLAVE* opera em uma pista circular e possui um sofisticado sistema de aplicação de carga desenvolvido com o intuito de emular os reais balanços nos veículos que aplicam cargas dinâmicas (verticais) nos pavimentos. Além de variar a magnitude da carga aplicada, o *SLAVE* simula a aceleração e a frenagem dos veículos. Também possui pneus, rodas e sistema de suspensão típicos de veículos pesados. Sua estrutura foi projetada para suportar os mais variados tipos de suspensões, como por exemplo a utilização de feixe de molas ou molas pneumáticas [Steven, et al., 1996], possibilitando analisar qual a contribuição de cada tipo de suspensão para a deterioração de um pavimento. Estas características conferem ao *SLAVE* muita versatilidade na simulação de situações diversas de tráfego. Entretanto, o ensaio deste equipamento caracteriza-se pela aplicação de carga não rolante sobre o pavimento.

O *SLAVE* possui dois braços que giram em torno do centro e guiam as rodas durante a aplicação da carga, que são recolhidos durante a construção da pista, com está ilustrado na figura 2.2. O equipamento é controlado de uma sala de comandos equipado com um sistema de transmissão de dados que permite enviá-los no instante em que são gerados para qualquer lugar da Nova Zelândia. A figura 2.3 ilustra um detalhe do carro que aplica a carga do *SLAVE*.



(a) – Em funcionamento.

(b) – Construção da pista (braços recolhidos)

Figura 2.2 – O SLAVE:

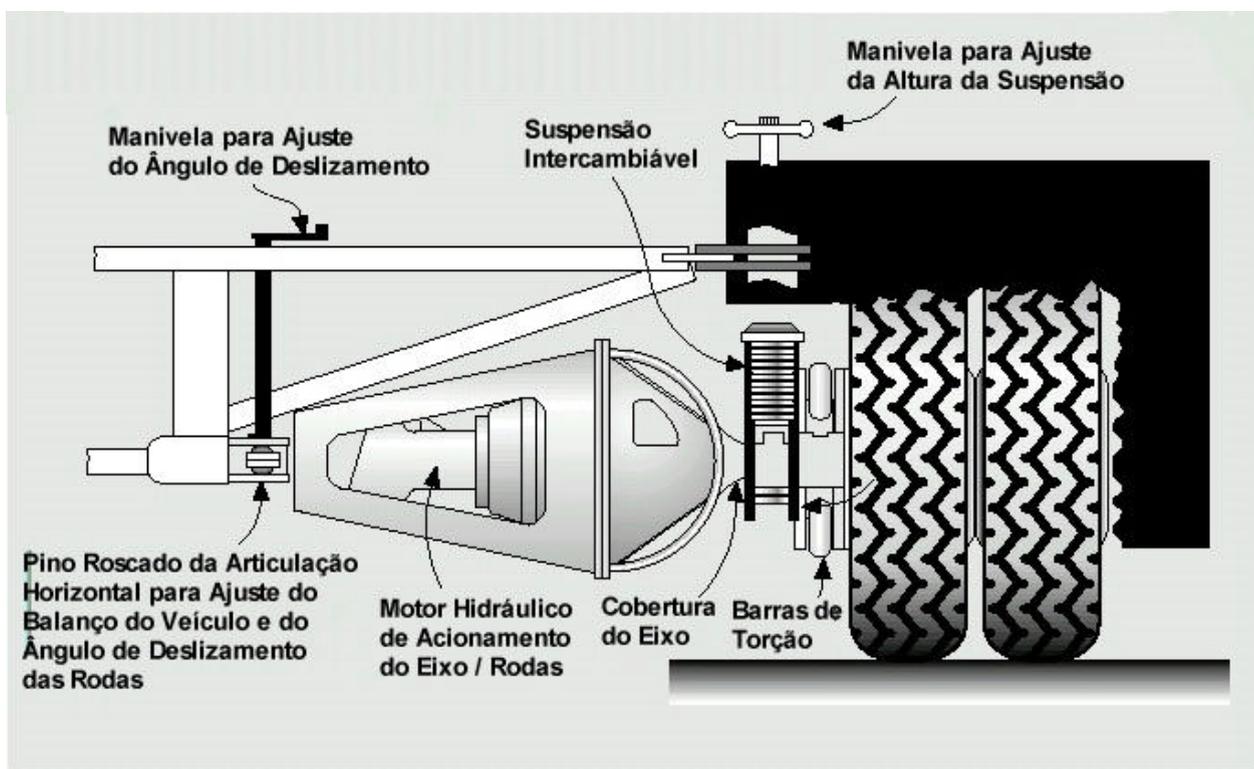


Figura 2.3 – Figura esquemática do conjunto de aplicação de carga do SLAVE.

Cabe ressaltar que o *Transit New Zealand* (formalmente, *National Roads Board*), órgão máximo de trânsito na Nova Zelândia, está cooperando com a Universidade de Canterbury nos testes acelerados de pavimentos em escala real, através de um programa de pesquisas em pavimentos.

Steven et al., (1999) e Steven e Pont, (1999) citam outras características do *SLAVE* (tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Outras características do *SLAVE*.

Pneus	Geminados
Carga	80 kN eixo simples, 145 kN tandem, 175 kN triplo tandem
Inflação dos pneus	700 kPa
Diâmetro	18,45 metros
Largura da pista de teste	4 metros
Largura de pista ensaiada	1,45 metros
Velocidade	De 5 a 50 km/h com incremento de 1 km/h

2.3.2 French Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Test Facility

Também atuando em pista circular, o *French Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* possui um simulador de grandes proporções (20 metros de raio) que vem operando com sucesso desde 1984 [Gramsammer, et al., 1999]. Impulsionadas por um motor eletro-hidráulico de 1000 HP, as rodas podem atingir velocidades superiores a 100 km/h. Para estas velocidades a influência aerodinâmica do conjunto afeta os resultados, necessitando, assim, de perfis adequados a fim de controlar a magnitude da carga aplicada. Sua pista com 120 metros de perímetro pode ser dividida em quatro segmentos diferentemente pavimentados, ensaiando-os simultaneamente. Como o citado laboratório possui três pistas, o equipamento foi projetado para ser facilmente desmontado e transportado para qualquer uma delas, quando necessário. Conforme a figura 2.4, o simulador francês possui quatro braços contendo as rodas e correspondentes cargas que somadas às elevadas velocidades atingidas durante os ensaios, tornam este simulador altamente produtivo.

Gramsammer et al., (1999) e Bonnot (1996) citam outras características do *LCPC* (tabela 2.2).

Tabela 2.2 – Outras características do *LCPC*.

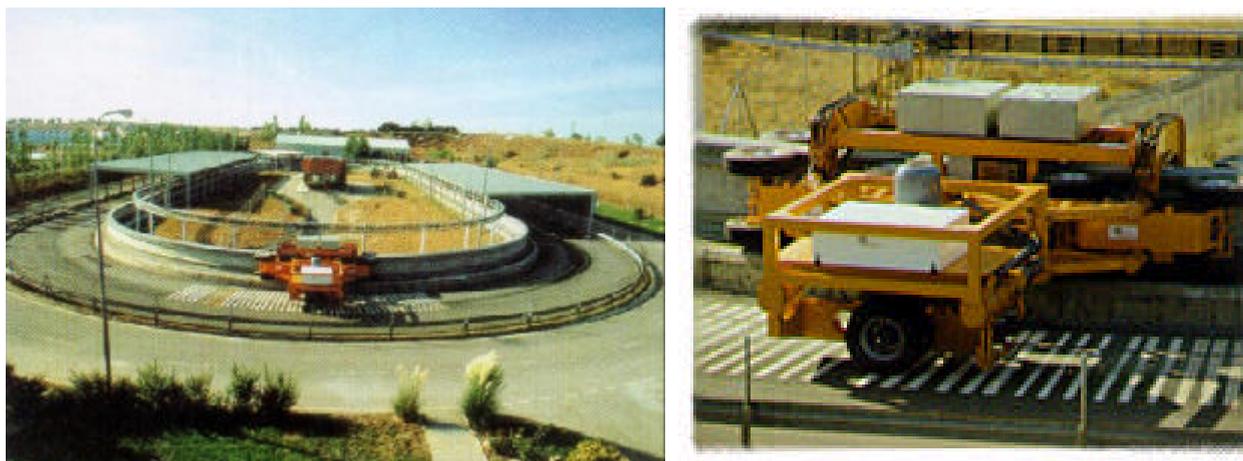
Largura da pista de testes	6 metros
Desvio lateral	1 metro para pneus geminados e 0,75 metro para <i>single</i>
Suspensão	Pneumática
Ciclo	Aplica 1 milhão de ciclos em um mês
Eixos	Semi-eixo simples, tandem ou triplo tandem
Pneus	Super <i>single</i> ou geminado
Pressão de inflação dos pneus	Até 850 kPa
Carga	De 50 a 70 kN (eixo simples), de 80 a 140 kN (eixo tandem)
Custo estimado	US\$ 6 milhões



Figura 2.4 – Vista do simulador do *LCPC Circular Test Track*.

2.3.3 *Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX)*

O *CEDEX*, situado na Espanha, possui um simulador de tráfego que opera em uma pista oblonga, ilustrado na figura 2.5, (a) vista geral, (b) detalhe do carro. Este possui um carro, guiado por um trilho interno à pista, que utiliza a força da gravidade para aplicação da carga através de massas posicionadas sobre ele. Com trechos retilíneos de 75 metros, a pista de testes pode ser dividida em varias partes a fim de realizar os ensaios simultaneamente [Ruiz, 1999]. Isto melhora sua produtividade uma vez que a velocidade é mantida constante (até 50 km/h) durante os testes.



(a) – Vista geral.

(b) – Detalhe do carro.

Figura 2.5 – Pista de testes do *CEDEX*.

Ruiz (1999) cita outras características do *CEDEX* (tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Outras características do *CEDEX*.

Largura da pista de testes	8 metros
Desvio lateral	1,3 metros
Suspensão	Pneumática
Pneus	Geminados
Pressão de inflação dos pneus	830 kPa
Carga	Constante de 64 kN

2.3.4 Nevada Automotive Test Center *WesTrack*

Em funcionamento desde 1995 o *WesTrack* é o conjunto que simula a utilização do pavimento o mais próximo possível da realidade. Totalmente computadorizado, é composto de um caminhão guiado por satélite que puxa várias carretas contendo cargas. Desta forma utiliza a gravidade para aplicação do carregamento. Está situado no *Nevada Automotive Test Center*, aproximadamente 100 km a sudoeste de Reno, devido as condições climáticas do local (\pm 100 mm de precipitação por ano). Sua pista é extensa (2,9 km) permitindo, além de testar simultaneamente 26 diferentes tipos de pavimentos dispostos em locais específicos na pista, desenvolver grandes velocidades de deslocamento (64 km/h) [Williams, et al., 1999].

Desenvolvido para aplicar 10 milhões de ciclos de 89 kN de carga por eixo, utilizando apenas uma carreta, trabalhando 22 horas por dia, sete dias por semana, o teste completo dura aproximadamente dois anos. Entretanto, pode-se mobilizar mais de um conjunto (até quatro), operando simultaneamente, diminuindo o tempo total do teste [Williams, et al., 1999].

Na figura 2.6 pode-se ver a pista e dois veículos em atividade. Já na figura 2.7 está ilustrada a vista superior da pista e as divisões para os diferentes pavimentos.



Figura 2.6 – Vista de parte da pista e dois conjuntos móveis do *WesTrack*.

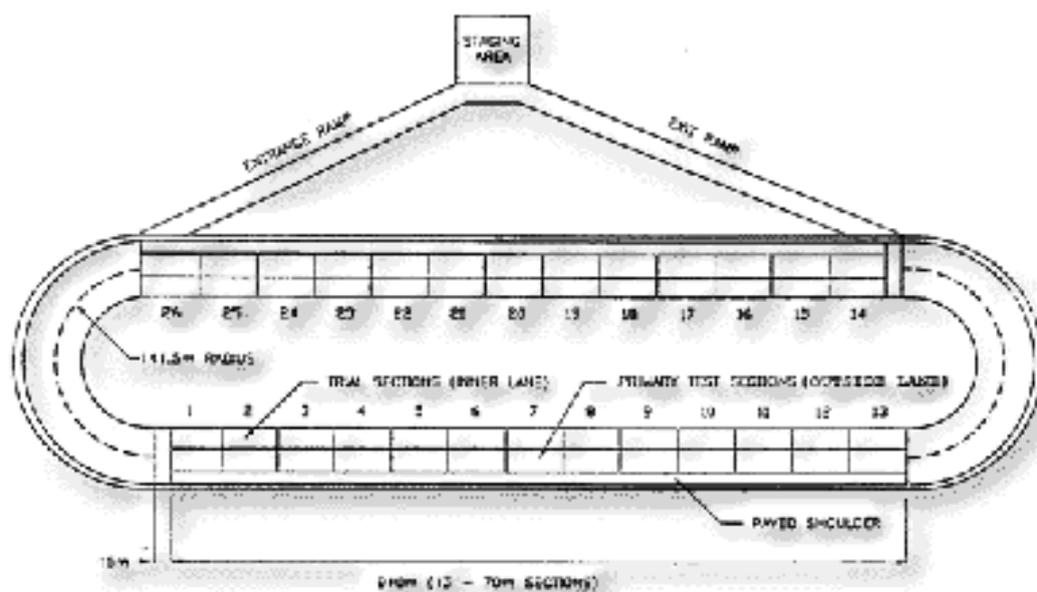


Figura 2.7 – Vista superior da pista de testes do *WesTrack*.

2.3.5 Texas Mobile Load Simulator (*TxMLS*)

Com um *design* totalmente diferente o *TxMLS* é um equipamento de grandes proporções, figura 2.8 (a), que apesar disto é facilmente transportável a qualquer local de ensaio. Faz uso de truques, eixos e suspensão de caminhão figura 2.8 (b) o que possibilita um ensaio muito próximo da situação real [Abdallah, et al., 1999]. Dois motores elétricos impulsionam dois dos seis truques com duplo eixo, ligados por correntes e guiados em dois trilhos oblongos, verticais e paralelos entre si (figura 2.9) que fazem o conjunto executar um “looping” contínuo [Abdallah,

et al., 1999]. Tais características juntamente com a velocidade de deslocamento de 20 km/h conferem ao equipamento um período muito curto do ciclo de aplicação de carga. Cada truque tem a possibilidade de ser deslocado lateralmente (250 mm) de forma independente. Utilizando um sistema hidráulico/mecânico o equipamento aplica carga constante durante o ciclo, sendo ela monitorada individualmente em cada truque. Um sistema de transmissão de dados repassa através de ondas de rádio as informações de cada eixo sobre a carga aplicada e da velocidade de deslocamento do sistema.

Projetado para aplicar 6000 cargas por hora no eixo o *TxMLS* pode simular 20 anos de tráfego em três meses. Segundo Hugo et al., (1999a), desde novembro de 1995 mais de cinco milhões de ciclos já foram aplicados.

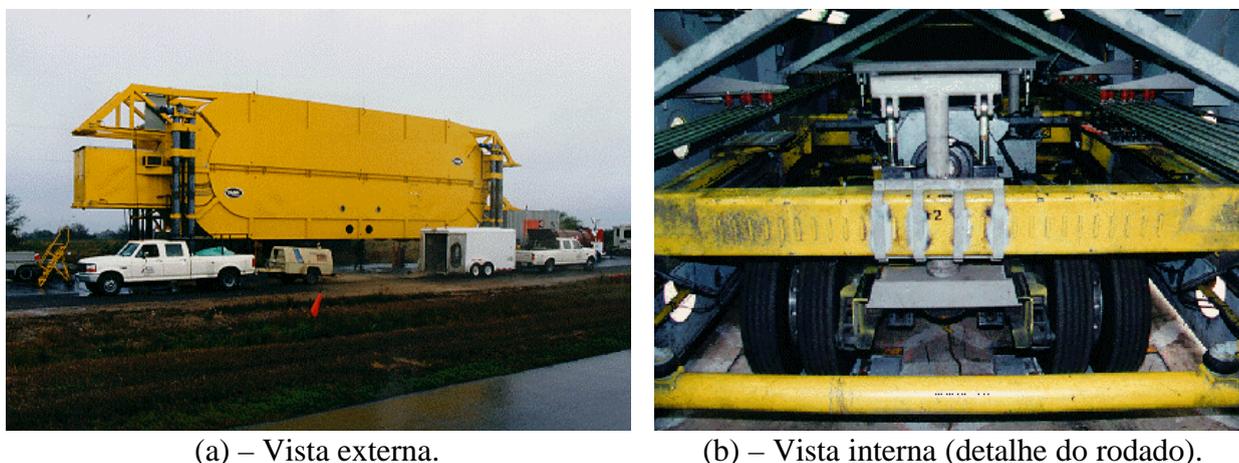


Figura 2.8 – O *TxMLS*.

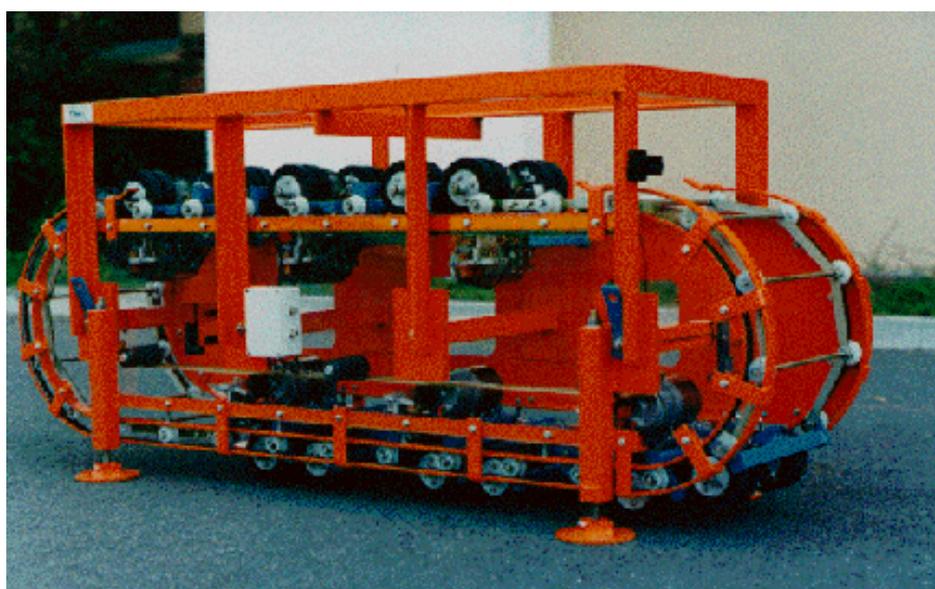


Figura 2.9 – Protótipo em escala 1/10 do sistema de aplicação de carga do *TxMLS*.

Abdallah et al., (1999), Chen e Lin, (1999) e Hugo et al., (1998), citam outras características do *TxMLS* (tabela 2.4).

Tabela 2.4 – Outras características do *TxMLS*.

Aplicação de carga	Sistema hidráulico/mecânico
Suspensão	Feixe de molas e pneumática
Carga	22 a 89 kN (<i>single</i>), 36 a 98 kN (<i>geminados</i>)
Comprimento da pista de testes	11,1 metros
Pressão dos pneumáticos	690 kPa
Desvio lateral	± 250 mm
Comprimento total	26,4 metros, 40,0 (transporte)
Largura	3,8 metros
Altura	6,9 metros (operação), 4,0 metros (transporte)
Massa total	114 toneladas; 1136 kN

2.3.6 Australian Accelerated Loading Facility (ALF/AUSTR)

De origem australiana, o *Accelerated Loading Facility (ALF)* foi projetado e construído em 1984 pelo *Department of Main Roads*, em *New South Wales* para o *National Association of Australian State Road Authorities*. Desde então vem atuando e contribuindo bastante para a pesquisa nesta área tendo sido já aplicados mais de 23 milhões de ciclos em 120 tipos de pavimentos [Sharp, et al., 1999]. É composto basicamente por uma caixa estrutural metálica com trilhos cujas extremidades são curvadas para cima intuindo acelerar e desacelerar o carro, ilustrado na figura 2.10. Nestes trilhos desliza um carro contendo massas que podem variar de 4 a 10 toneladas, com incremento de 1 tonelada [Sherwood, et al., 1999].

O carro é levado à altura máxima de um dos lados dos trilhos (figura 2.11) e depois solto lomba abaixo. Aproveitando-se de sua energia potencial o carro acelera até o contato com a pista, passando, então, a deslocar-se com velocidade praticamente constante aplicando carga no pavimento. Ao chegar à outra extremidade o carro sobe a rampa dos trilhos até uma certa altura. Durante o retorno o carro volta suspenso nos trilhos, não aplicando carga no pavimento. Para compensar a energia gasta no movimento, pequenos motores elétricos, com um baixo consumo (2 x 11 kW), ajudam o carro a posicionar-se novamente no local mais alto do percurso para dar-se início a um novo ciclo. Deste modo, a carga é aplicada pela ação direta da gravidade, e ainda, parte da energia, de outra forma gasta para alternar o sentido, é também aproveitada. Embora o carro seja equipado com um sistema de suspensão, ainda assim, no instante que entra em contato com o solo oscila significativamente, invalidando um pequeno trecho inicial da pista. Na figura

2.12 está ilustrado um detalhe do carro durante vistoria do sistema. Contém, contudo, sistemas de alto fator tecnológico, entre eles: controle de posição transversal das rodas – para obter uma distribuição normal da carga –, monitoramento computadorizado dos ciclos incluindo cargas dinâmicas e posição das rodas.



Figura 2.10 – Vista geral do *ALF*.

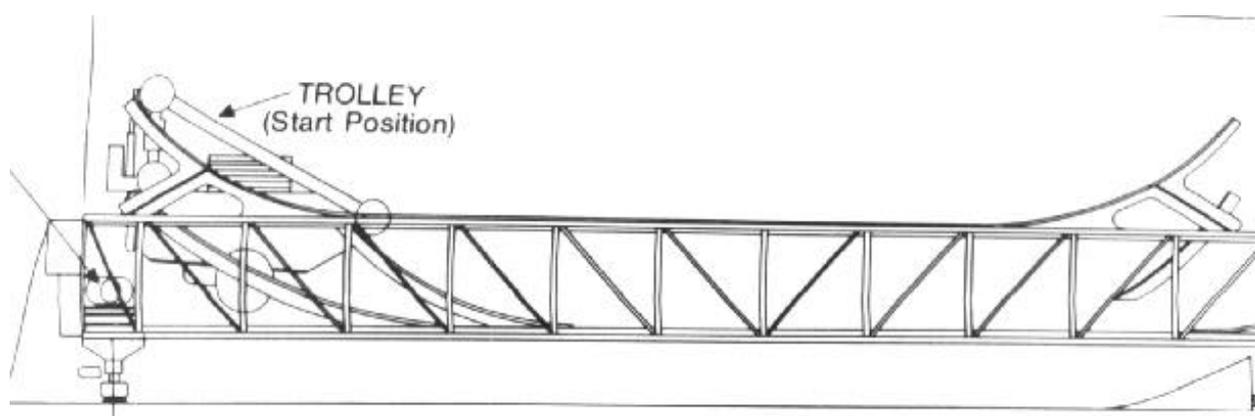


Figura 2.11 – Vista lateral do *ALF*. Princípio de deslocamento longitudinal.



Figura 2.12 – Detalhe do carro do *ALF*.

Existem vários modelos construídos e em funcionamento, inclusive um na China conforme Shutao et al., (1999). Além disso, algumas empresas utilizam comercialmente este simulador oferecendo seus serviços pela Internet.

Sharp et al., (1999) cita outras características do *ALF* (tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Outras características do *ALF*.

Suspensão	Pneumática ou molas helicoidais
Carga	Até 100 kN
Velocidade	Até 20 km/h
Ciclo	9 s (um milhão de ciclos a cada 100 dias)
Comprimento da pista de testes	10 metros
Pressão dos pneumáticos	690 kPa
Comprimento total	26,3 metros
Largura	4,0 metros (operação), 3,2 metros (transporte)
Altura	5,7 metros (operação), 4,4 metros (transporte)
Massa total	45 toneladas

2.3.7 Dutch LINear TRACKing Apparatus (*LINTRACK*)

Começou a operar em 1991. O projeto surgiu do esforço conjunto entre *Road and Railroad Research Laboratory* da *Delft University of Technology*, e *Road and Hydraulic*

Engineering, divisão do *Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management*., órgão que coordena o setor de transportes da Alemanha.

O *LINTRACK* foi projetado para atuar em pista linear utilizando-se da reação em uma viga para gerar a carga aplicada no pavimento (característica semelhante ao Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS). Utiliza, para isso, um sistema pneumático que, expandindo uma mola, aplica carga no pavimento através de uma viga articulada. A carga, então, é transmitida ao eixo e conseqüentemente às rodas. Quando ensaia aplicando carga somente em um sentido, um cilindro hidráulico suspende o conjunto desde o fim do curso até que o carro retorne ao início, posicionando-o novamente para um novo ciclo. Caso contrário, a unidade hidráulica permanece sem funcionamento. Longitudinalmente, o carro do *LINTRACK* desloca-se guiado em trilhos, tracionado por um sistema de cabos de aço. As vistas lateral e frontal, figura 2.13 (a) e (b) respectivamente ilustram os sistemas utilizados deste equipamento.

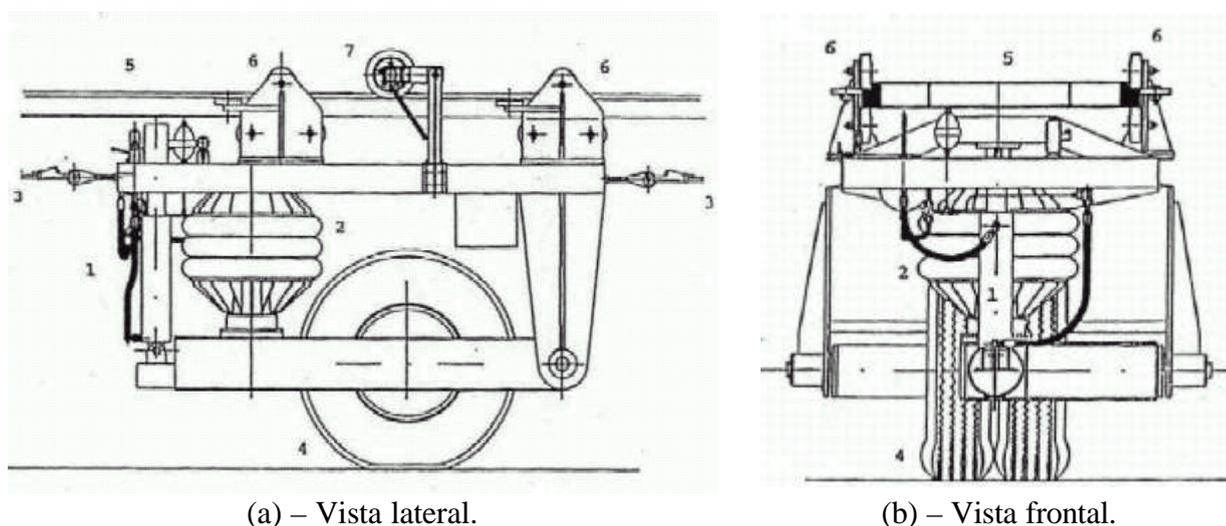


Figura 2.13 – Detalhe do carro do *LINTRACK*.

Nestas figuras a numeração indica: 1) cilindro (passivo) para carga em um sentido; 2) sistema pneumático de carregamento; 3) cabos; 4) rodas; 5) trilhos; 6) rodas guias; 7) *Encoder* de posição das rodas (y).

Devido a sua localização Ihe foi conferida uma peculiaridade: sob a proteção de um galpão (figura 2.14) e através de um sistema de aquecimento por infravermelho, a temperatura do asfalto pode ser elevada em 30°C acima da temperatura ambiente, isto quer dizer entre 40°C e 60°C. Tem, ainda, a liberdade de mover-se lateralmente um metro para os dois lados a partir da linha de centro.



Figura 2.14 – As instalações do *LINTRACK*.

A operação de troca de pneu *single* para geminados e vice-versa, ou simplesmente a remoção dos mesmos, é facilitada pela geometria adotada, ilustrada na figura 2.15 (a) e (b).



(a) – Sem rodas.



(b) – Utilizando pneu *single*.

Figura 2.15 – Detalhe do carro do *LINTRACK*.

Hugo et al., (1998) e Molenaar et al., (1999) citam outras características do *LINTRACK* (tabela 2.6).

Tabela 2.6 – Outras características do *LINTRACK*.

Aplicação de carga	Atuador pneumático em um ou dois sentidos
Carga no eixo	15 a 100 kN
Velocidade	Até 20 km/h
Ciclo	1000 carregamentos por hora (nos dois sentidos)
Comprimento da pista de testes	11,5 metros
Pressão dos pneumáticos	500 a 1100 kPa
Desvio lateral	± 1 metro
Comprimento total	23 metros
Largura	6 metros
Altura	5 metros
Massa do carro	3 toneladas
Massa total	38 toneladas

2.3.8 Kansas Accelerated Testing Laboratory (K-ATL)

Também operando em pista linear o simulador de tráfego do *K-ATL*, pertence ao Departamento de Engenharia Civil do *Kansas State University*, nos Estados Unidos. Este possui um sistema de rodado completo tipo tandem de caminhão (figura 2.16) e suspensão a ar [Vijayanath, et al., 1999]. Assim como a suspensão, molas pneumáticas posicionadas nos finais do curso longitudinal são controladas automaticamente, e, durante o movimento longitudinal as últimas absorvem a energia cinética do carro, impulsionando-o no outro sentido [Vijayanath, et al., 1999]. O mesmo compressor abastece estes dois sumidouros. O equipamento permite, ainda, aplicação de carga em um ou nos dois sentidos. Em um sentido conta com o auxílio de dois cilindros hidráulicos que suspendem as rodas durante o retorno. O conjunto é guiado em trilhos e impulsionado por um motor elétrico de 20 HP que permite a inversão do movimento a qualquer instante.



(a) – Vista lateral do carro



(b) – Vista do conjunto.

Figura 2.16 – O simulador do *K-ATL*.

Vijayanath et al., (1999) cita outras características do *K-ATL* (tabela 2.7).

Tabela 2.7 – Outras características do *K-ATL*.

Aplicação de carga	Em um ou nos dois sentidos
Suspensão	Pneumática
Carga	180 kN
Velocidade	Até 11 km/h, em um trecho central da pista
Ciclo	313 ciclos por hora (em um sentido)
Comprimento da pista de testes	12,8 metros, de centro a centro
Rodas	Eixo simples ou tandem com pneus <i>single</i> ou geminados
Desvio lateral	14 metros, de centro a centro

2.3.9 South African Heavy Vehicle Simulator (SA - HVS)

Desde a década de 60 a África do Sul pesquisa pavimentos com o auxílio destes equipamentos. No decorrer deste período, foram aperfeiçoando e sofisticando seus modelos cada vez mais. “Desde 1978 mais de 400 testes foram realizados naquele país (um protótipo e três *HVS III*) gerando 4 Gbytes de informações e dados. Foram investidos cerca de US\$ 40 milhões no programa *HVS* durante os últimos 20 anos. Isto inclui: hardware, instrumentação e associações tecnológicas. Em adicional, US\$ 17,5 milhões em projetos relativos ao *HVS*. Existem dois *HVS III* fornecidos para *Californian Department of Transportation* ainda em funcionamento” [Roesler, et al., 1999, Harvey, et al., 1999]. Segundo Kekwick et al., (1999), os simuladores sul africanos têm sido uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento de estruturas apropriadas de pavimentos, bem como na análise dos métodos construtivos utilizados.

Atualmente o *HVS* está em seu quarto modelo. Como era de se esperar, o *HVS IV* (figura 2.17), tem muitas vantagens sobre o seu antecessor. Além de ser totalmente computadorizado, possui praticamente o dobro da produtividade do *HVS III*. Conta ainda com um sistema para irrigar o asfalto simulando em pista molhada ou uma situação de chuva. Ambos possuem equipamentos para climatizar o local do ensaio, ilustrado na figura 2.18 [Steyn, et al., 1999]. O *HVS IV* é um equipamento autotransportável (para pequenos deslocamentos), com uma cabina de controle que aloja, também, os demais equipamentos a serem utilizados. Sua aplicação de carga é feita por um sistema hidráulico, não contendo nenhum tipo de amortecedor ou suspensão. A aplicação da carga é em um ou nos dois sentidos. Alguns *HVS IV* foram exportados pela África do Sul e estão em pleno funcionamento, como por exemplo para o *U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory*, em Hanover [Odermatt, et al., 1999] e para um programa conjunto entre a Finlândia e Suécia [Matti, et al., 1999]. Além destes existe um modelo super pesado chamado “*Big foot*” utilizado para testar pavimentos de aeroportos cujas cargas envolvidas são de elevada magnitude. De propriedade do corpo de engenheiros do exército americano, este modelo é praticamente o dobro do *HVS IV*, podendo chegar a 440 kN de carga aplicada [Lynch, et al., 1999].



Figura 2.17 – O simulador de tráfego africano *HVS IV*.



Figura 2.18 – Vista geral destacando o sistema de climatização do *HVS IV*.

De todas as referências utilizadas neste capítulo, citam outras características do *HVS* (tabela 2.8).

Tabela 2.8 – Outras características do *HVS*.

Aplicação de carga	Sistema hidráulico em um ou nos dois sentidos
Carga	30 a 200 kN com <i>HVS IV</i> ; 30 a 440 kN com “ <i>Big foot</i> ”
Velocidade	Até 12 km/h
Ciclo	28000 ciclos/dia (nos dois sentidos) com <i>HVS IV</i> ; 16000 ciclos/dia com “ <i>Big foot</i> ”
Comprimento da pista de testes	12,0 metros
Pressão dos pneumáticos	560 a 690 kPa; para pistas de aeroportos 1450 kPa
Desvio lateral	1,5 metros
Comprimento total	23 metros
Largura	3,7 metros
Altura	4,2 metros
Massa total	46 toneladas <i>HVS IV</i> ; 84 toneladas “ <i>Big foot</i> ”

2.3.10 Outros simuladores de tráfego

Na Europa existem, ainda, alguns outros simuladores:

- *IVT-ETH Test Track* em Zurique na Suíça [Turtschy e Sweere, 1999];
- *Danish Asphalt Rut Tester* na Dinamarca [Nielsen, 1999];
- *Nottingham Pavement Test* [Brown e Brodrick, 1999].

No continente americano citam-se outros:

- *Minnesota Road Research Project (Mn/ROAD)* [Newcomb, et al. 1999];
- *Accelerated Pavement Testing (APTF)* localizado em Indiana [Galal e White, 1999b];
- *Circular Accelerated Test Track (UCF-CATT)* na Flórida [Kuo, et al., 1999];
- *Model Mobile Load Simulator (MMLS3)* no Texas [Hugo, et al., 1999b].

O Brasil possui, além do ST, um outro simulador, do tipo carrossel, pertencente ao IPR-RJ, situado no Rio de Janeiro. Segundo Medina, (1997), este simulador foi construído nos moldes do existente na Universidade Estadual de Washington desde 1965. Sua pista possui raio médio de 12,7 metros e largura de 2,5 metros. “A estrutura metálica compreende três braços treliçados e um tanque de água central. No extremo de cada braço tem-se rodas geminadas que aplicam cinco toneladas, em geral. A velocidade de operação prevista é de 55 Km/h, o que corresponde a 2000 repetições por hora numa seção da pista” [Medina, 1997].

2.4 O Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS (ST)

O ST teve como primeiro objetivo conhecer o comportamento mecânico de pavimentos utilizando o basalto alterado como única camada granular, quando empregado em vias rodoviárias de baixo volume de tráfego [Núñez, 1997]. “O projeto do equipamento foi desenvolvido pelo Grupo de Projeto Mecânico e Automação Industrial (GPA) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS. O simulador foi construído entre 1992 e 1994 pelo DAER/RS, na sua Oficina Central, na cidade de Guaíba, sob supervisão dos projetistas e da coordenação do Protocolo de Colaboração Consensual Técnico-Científico UFRGS-DAER/RS.” [Núñez, 1997]. Atualmente está localizado no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em Porto Alegre. Composto basicamente de estruturas (sucata) de pontes, o ST vem sendo utilizado com sucesso pelo Laboratório de Pavimentos e sua equipe de pesquisadores do Departamento de Engenharia Civil de UFRGS [Núñez et al., 1999]. Entretanto, tratando-se do primeiro protótipo, o mesmo pode ser aprimorado implementando-se algumas atualizações tecnológicas, tendo como base adicional de informações o conhecimento agregado nos anos de utilização do equipamento. Tem-se com isso a garantia da aplicação de uma carga de compressão através do rolamento de suas rodas sobre pavimentos, constante, devidamente calibrada e bem distribuída, aplicada de forma cíclica.

A seguir é feita uma breve descrição do simulador passando por sua estrutura, componentes e funcionamento. Estas informações foram coletadas, organizadas e processadas, tendo como fonte as referências, este capítulo, inspeção visual, e informações advindas da equipe que opera e é responsável pelo equipamento, bem como pela equipe de manutenção. Segundo Núñez, (1997) o equipamento é formado por diferentes sistemas, dos quais são descritos os mais importantes para este trabalho.

Como pode ser visualizado na figura 2.19, o ST é uma estrutura relativamente grande, mede aproximadamente 15 metros de comprimento, 2,5 metros de largura e 4,3 metros de altura, e apresenta as características listadas na tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Características principais do ST.

Curso de atuação da carga sobre o pavimento	8 metros
Curso de aceleração e desaceleração	3 metros
Carga sobre o pavimento	Regulável até 65 kN
Princípio de aplicação da carga	Hidráulico
Sistema de rodado	Simplex ou duplo, articulado, regulável
Velocidade de deslocamento	Regulável até 20 km/h
Princípio de acionamento geral	Elétrico



Figura 2.19 – O Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS.

2.4.1 Principais sistemas do ST

O ST possui alguns sistemas necessários para o seu funcionamento, que serão descritos neste capítulo. Os elementos que os compõem serão descritos no capítulo 2.4.2.

- Sistema guia do rodado – O rodado, *single* ou geminado, é ligado a um carro que possui em cada lateral cinco rodas, que deslocam-se entre trilhos promovendo seu guiamento. Estas rodas-guia estão dispostas de forma a três delas suportarem as reações verticais de baixo para cima advindas da aplicação da carga pelo cilindro hidráulico.
- Sistema de aplicação de carga – A carga é aplicada através de uma unidade hidráulica comandada eletricamente e de um cilindro hidráulico, montados sobre o carro. Esta carga é aplicada sempre com deslocamento em um sentido. O retorno se dá com o rodado suspenso. Ao operar sobre as pistas experimentais, o Simulador foi programado para ter um tempo de ciclo de 16 a 18 segundos; permitindo a aplicação de 225 ou 220 ciclos de carga, respectivamente, a cada hora de operação.

- Sistema do rodado – O rodado é ligado ao carro por um garfo articulado, que possui um semi-eixo de caminhão na extremidade, onde é fixado o cubo das rodas. Este semi-eixo é regulável, de forma a permitir o alinhamento do rodado. São utilizados rodados comerciais.
- Sistema de deslocamento transversal – Toda a estrutura está bi-apoiada em trilhos que permitem o deslocamento transversal do conjunto. Através de dois motoredutores elétricos sincronizados é realizado o movimento lateral, em cinco milímetros a cada ciclo. Como efeito tem-se uma distribuição da carga contendo trechos que sofreram o mesmo número de ciclos.

2.4.2 O carro do ST e seus componentes

Na figura 2.20, estão ilustradas as vistas superior, lateral e traseira do carro, ressaltando o detalhe da folga presente entre as rodas guias e os trilhos. Essa folga (presente nos dois lados) torna-se fundamental, uma vez que sua completa exclusão pode ser inviável economicamente. Sua existência deve-se aos fatos: cargas de elevada magnitude envolvidas, e trilhos bi-apoiados em um vão extenso. A combinação destes fatores acaba por deformar a estrutura. Isto implica a possibilidade do carro vir a trancar durante seu passeio longitudinal. Contorna-se o problema com a permissão das folgas que impõem restrições aos possíveis projetos. Pode-se visualizar na vista traseira da mesma figura a posição fora da linha de centro do cilindro hidráulico. Esta assimetria da carga deve-se a presença dos cabos de tração longitudinal do carro que passam exatamente sobre a linha de centro do equipamento. Ainda, são estabelecidos na figura 2.20 os eixos coordenados que serão utilizados como referência.

Além da descentralização do ponto de aplicação da carga o garfo é assimétrico, causando uma transmissão de carga também assimétrica. O conjunto do carro está ilustrado na figura 2.21 (a) e (b), montado e em vista explodida, respectivamente, com seus componentes identificados na tabela 2.10. A figura 2.22 mostra as principais dimensões do ST.

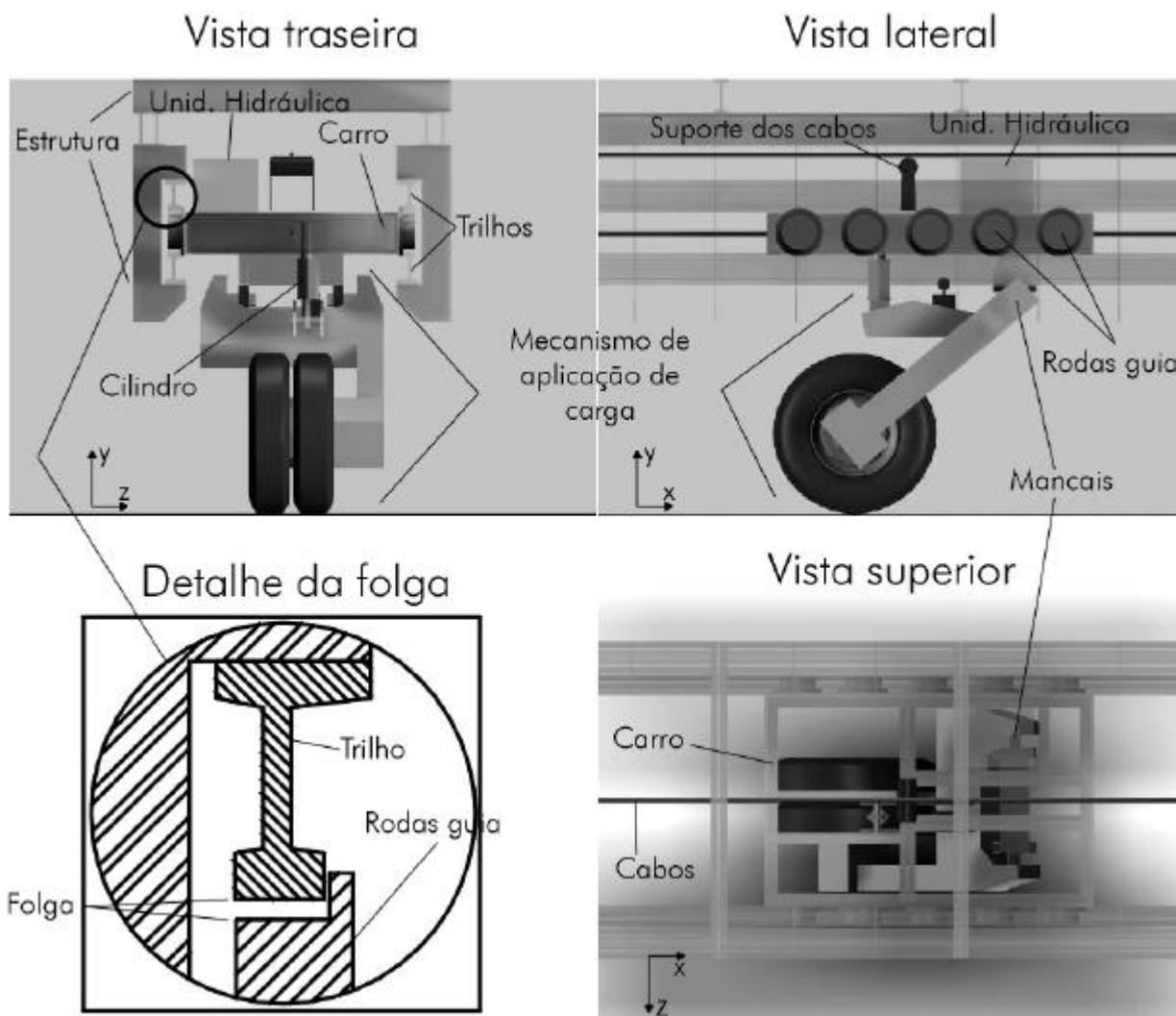


Figura 2.20 – O carro do ST – vistas do rodado.

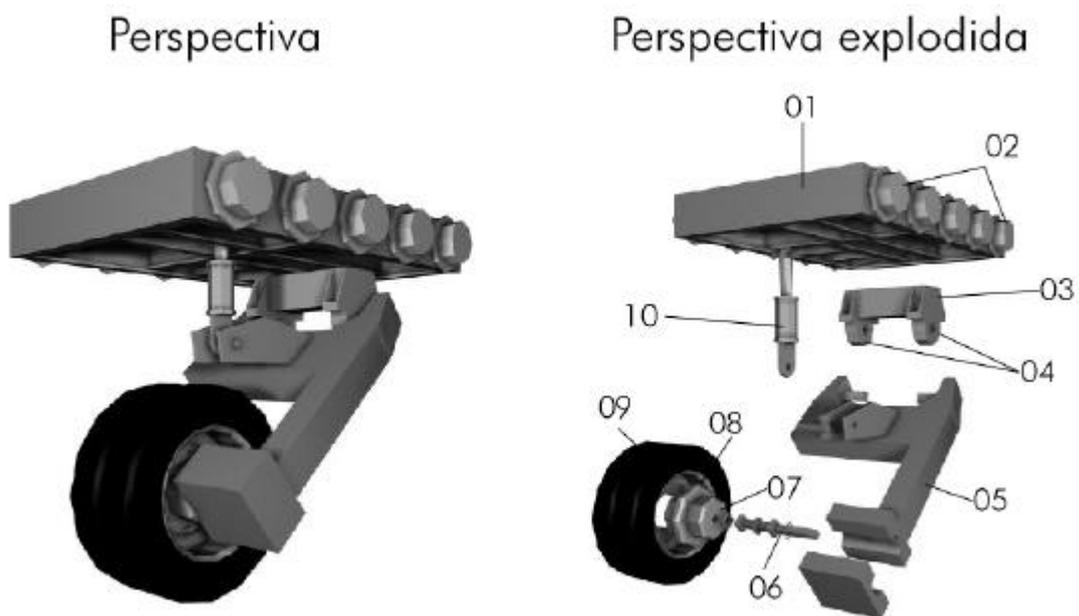


Figura 2.21 – O carro do ST.

Tabela 2.10 – Componentes do carro do ST.

Nº	Componente	Comentário
01	Carro	Construído em aço perfil “U”, soldado e reforçado. É tracionado por um cabo de aço arrastando consigo todos os outros componentes. Carrega em um de seus cantos a unidade hidráulica do cilindro. É nesta estrutura que está vinculado o cilindro hidráulico;
02	Rodas-guia	Estão presas na estrutura (2) e guiadas pelos trilhos (1) presos na estrutura do ST. As rodas-guia recebem todas as reações decorrentes do ensaio permitindo o deslocamento longitudinal do carro. A folga existente entre essas e o trilho que as guia é da ordem de 20 mm;
03	Suporte dos mancais	Confeccionado em aço, é soldado ao carro e possui estruturas para a fixação dos mancais;
04	Mancais *	Mancais de rolamento, comerciais;
05	Garfo articulado	Faz a transmissão da carga através de um braço de alavanca para a aplicação de carga e distribui as reações. É assimétrico, tanto em sua geometria como no local onde o cilindro é vinculado. Tal característica acarreta em uma distribuição de reações assimétrica, bem como suas deformações. É um componente super dimensionado;
06	Semi-eixo *	Comercial, de caminhão;
07	Cubo *	Através dos rolamentos presentes no seu interior transmite a carga proveniente do eixo, permitindo o giro da roda;
08	Aros*	De caminhão;
09	Pneus *	De caminhão;
10	Cilindro hidráulico *	Comercial.

* componentes padronizados comerciais.

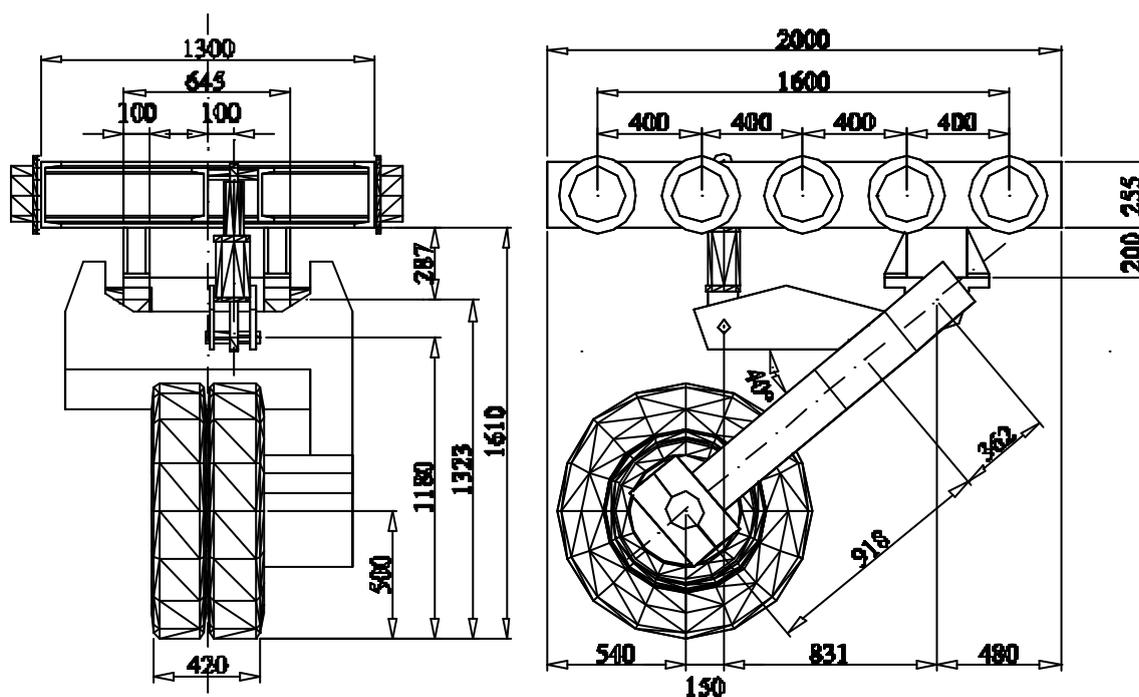


Figura 2.22 – As principais dimensões do ST.

2.4.3 Movimentos das rodas do ST

Pode-se dizer que o ST é uma caixa estrutural dimensionada para sofrer uma carga vertical de baixo para cima. Esta carga origina-se da reação da expansão de um cilindro hidráulico quando o sistema está aplicando carga no pavimento. Durante o retorno, a estrutura suporta o próprio peso e o do carro. Este, desloca-se em trilhos, que guiam o movimento, tracionado por um sistema de cabos acionados por um motor elétrico. O movimento descrito pelo centro de giro da roda tem a forma aproximada de um retângulo, ou seja, não há movimento combinado nos eixos x e y. A execução de tarefas simultâneas, como acelerar o carro baixando suas rodas, e desacelerá-lo levantando-as simultaneamente reduz o período do ciclo.

O pneu é o último elemento do sistema e está em contato com o solo. É ele que realmente aplica a carga no pavimento. O pneumático, solidário à roda, realiza alguns movimentos durante sua atuação: deslocamento horizontal, deslocamento vertical e rotação em torno do próprio eixo, figura 2.23. Estes movimentos são essenciais ao ST. O deslocamento horizontal, ou longitudinal, é executado juntamente com o carro, pela tração dos cabos, cujas rodas-guia movimentam-se entre trilhos restritas ao movimento horizontal. O deslocamento vertical origina-se de um sistema articulado que proporciona um deslocamento que resulta na aplicação de uma carga vertical. A rotação da roda decorrente do seu contato com o solo durante o deslocamento do conjunto é viabilizada pela utilização de rolamentos. Os responsáveis por estes movimentos estão ilustrados na figura 2.24, que mostra o conjunto nas posições abaixada e elevada.

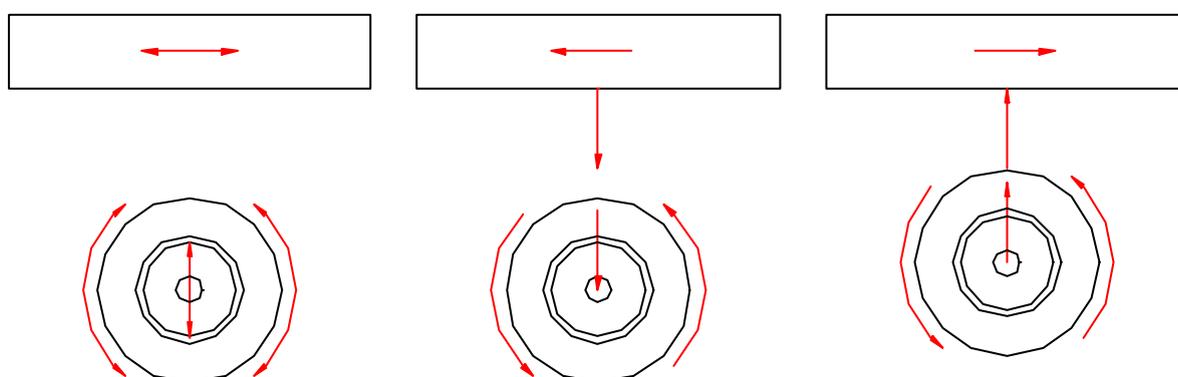


Figura 2.23 – Movimentos do rodado.

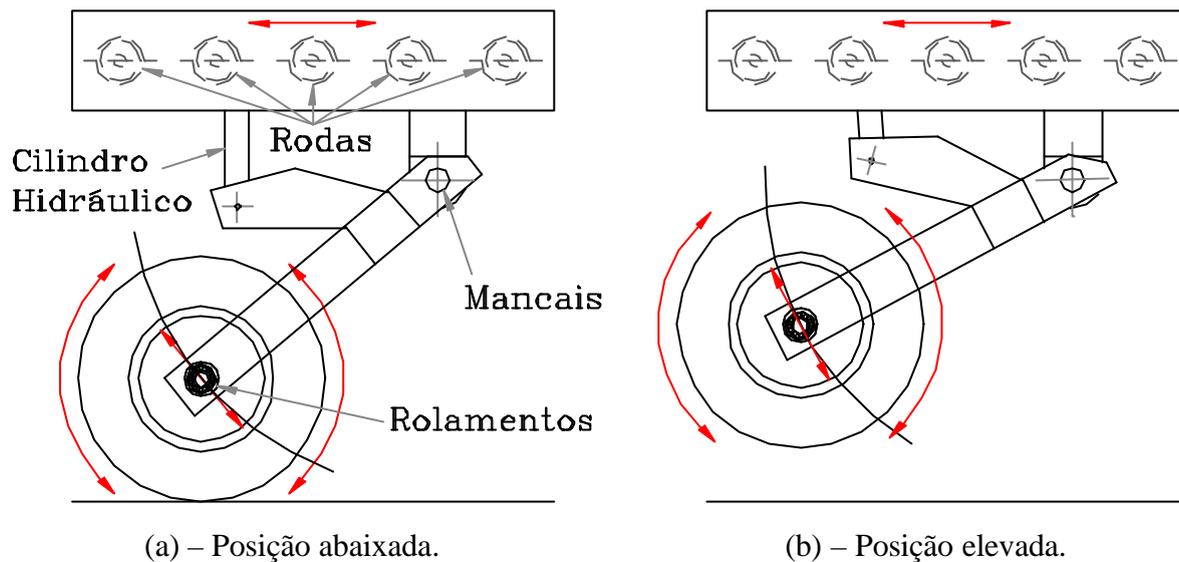


Figura 2.24 – Componentes dos movimentos.

2.4.4 Análise estática do ST.

A fim de conhecer o comportamento do sistema e o efeito geometria do garfo nas reações que ocorrem nas rodas-guia e no eixo da roda quando o sistema está sendo solicitado fez-se uma análise estática do conjunto. Por se tratar de uma análise inicial fizeram-se algumas considerações:

- análise qualitativa;
- efeito das folgas foram desprezados;
- dimensões aproximadas;
- eixo vinculado e não o pneu;
- elemento de viga passando pela linha média dos componentes.

Inicialmente, fez-se uma análise bidimensional considerando que todas as cargas e vínculos pertencem ao mesmo plano. Na figura 2.25 (a) e (b) estão ilustradas a representação esquemática e o diagrama de corpo livre do sistema no plano longitudinal.

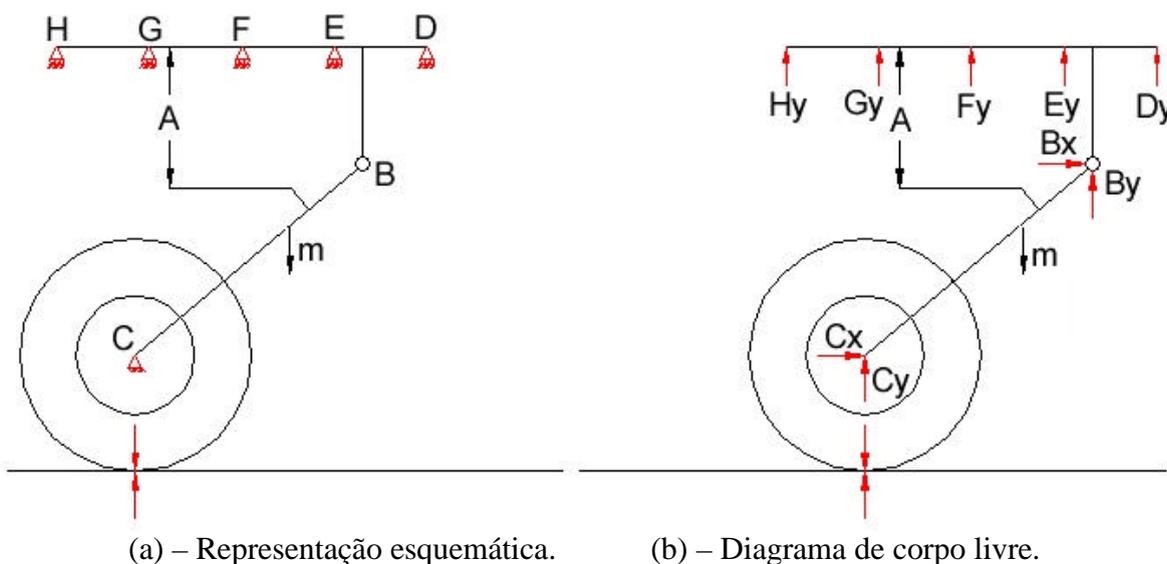


Figura 2.25 – Análise bidimensional do sistema no plano longitudinal.

Pouco mais da metade da carga aplicada pelo cilindro hidráulico é transmitida verticalmente no eixo ($-c_y$), as reações d_y , e_y , f_y , g_y e h_y confirmaram a tendência a rotação do carro no eixo z conforme fora projetado. Esta rotação faz com que as rodas-guia das extremidades do carro tenham um contato maior com os trilhos do que as demais, o que acarreta em um funcionamento suave do conjunto quando no início e fim de curso. Entretanto, a assimetria do garfo no plano transversal tornou necessária uma análise tridimensional do sistema.

Simplificando o problema dividiu-se o carro e o restante do conjunto em duas partes: abaixo e acima dos mancais. De acordo com as reações obtidas nos vínculos 4 e 7 localizados na parte inferior (figura 2.26) os correspondentes valores foram aplicados na parte superior do sistema juntamente com a reação do cilindro (figura 2.27). Além disto foram consideradas somente as quatro rodas das extremidades do carro, não comprometendo, porém, os fins a que esta análise se propõe.

Utilizando como base os eixos coordenados ilustrados nas figuras anteriores demonstra-se que o carro apresenta uma leve tendência de giro no eixo X . Este efeito é acentuado pela existência das folgas entre as rodas-guia e os trilhos e pela assimetria geométrica transversal do garfo que acaba por ter uma tendência de giro em torno do seu eixo longitudinal. Devido a isso o posto 2 da figura 2.26 é o local onde ocorrem as maiores tensões.

Cabe lembrar que esta é uma análise estática. Quando em funcionamento, a ação dinâmica da força de tração dos cabos e a ação das imperfeições do piso excitando os pneus alteram o comportamento do conjunto e conseqüentemente as reações e momentos surgidas no carro. É recomendável, então, incorporar fatores dinâmicos às cargas para obtenção de uma simulação mais real possível.

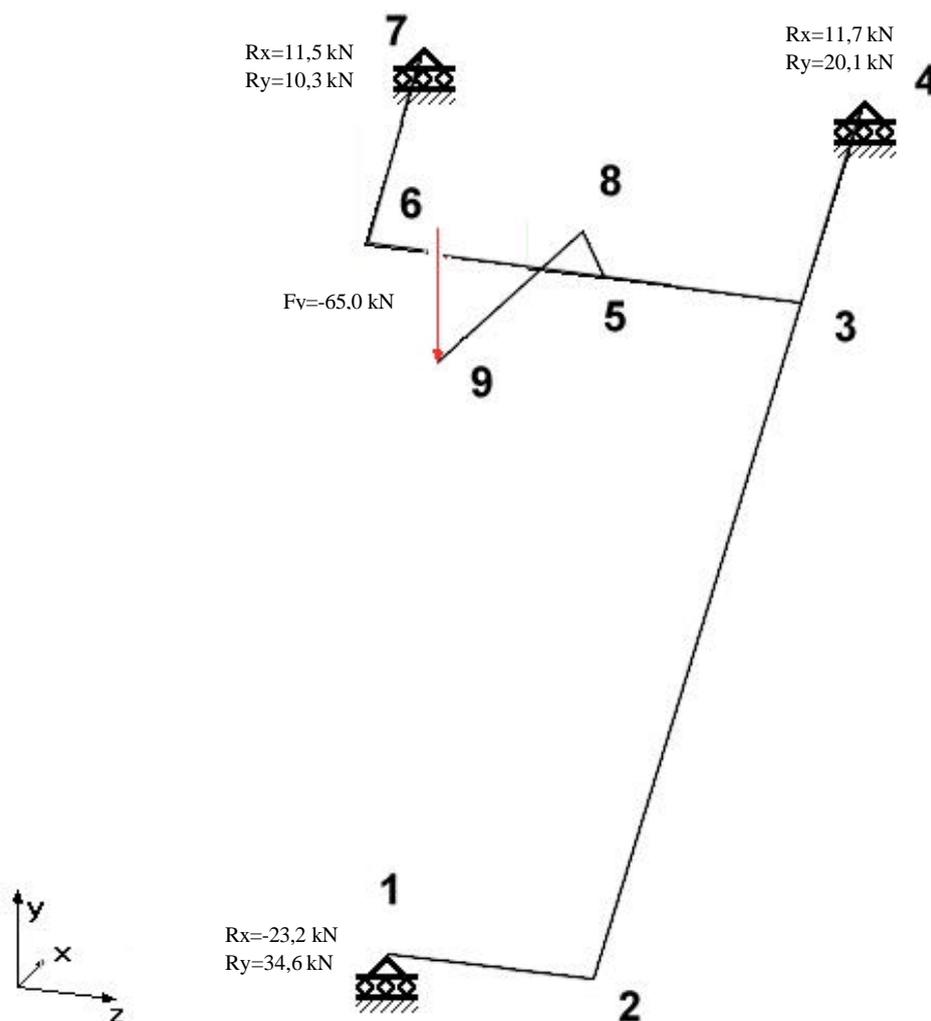


Figura 2.26 – Diagrama de corpo livre do garfo, parte de baixo do conjunto.

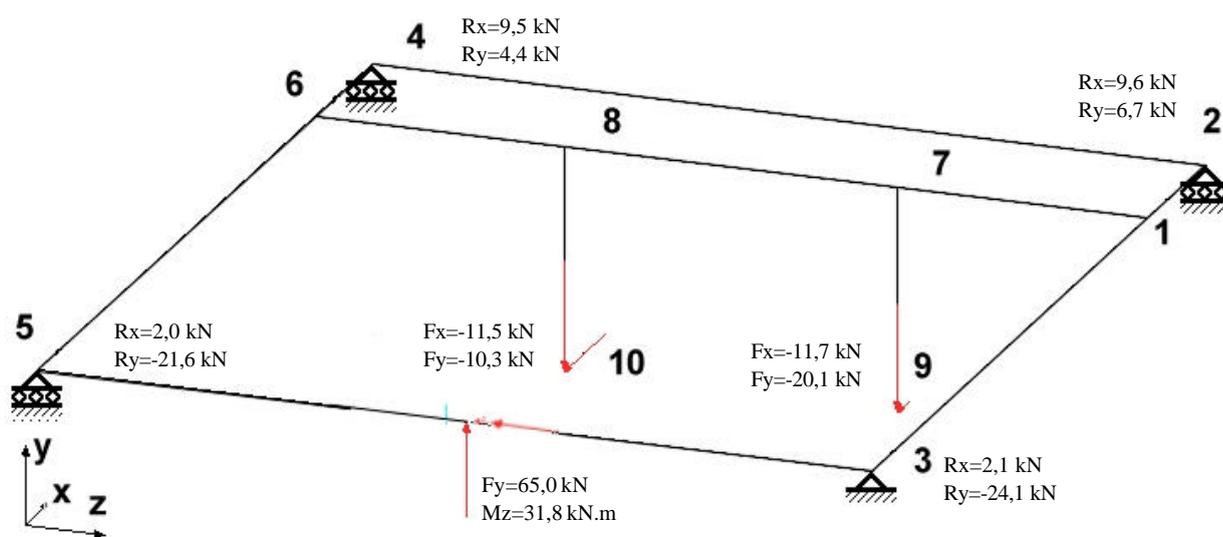


Figura 2.27 – Diagrama de corpo livre do carro, parte de cima do conjunto.

2.4.5 Manutenção

Apesar de suas grandes proporções o ST necessita de pouca manutenção. A lubrificação dos rolamentos da roda, dos mancais e das rodas-guia são efetuadas rapidamente e sem maiores dificuldades para o operador. Como o equipamento apresenta a possibilidade de utilização de pneus geminados ou *single*, a remoção e colocação das rodas também são efetuadas quando necessário, ou pela simples substituição dos pneumáticos. Isto também é simples; uma vez que o braço transmite a carga através da extremidade engastada do eixo, permitindo que as rodas simplesmente sejam retiradas do mesmo, não necessitando de outros equipamentos ou mão de obra especializada. Além destas pode-se citar a necessidade da vistoria dos cabos de tração e do circuito hidráulico, responsáveis pelos deslocamentos longitudinal e vertical. Neste último, deve-se ter cuidado com o derramamento do fluido de trabalho sobre o piso asfáltico, que altera suas propriedades

2.4.6 Reações e deformações do ST – observações gerais

O sistema para o deslocamento vertical do rodado foi feito com muito critério. A rotação do sistema em um eixo distante do eixo de giro da roda, e a correta escolha do ponto de aplicação da carga (no plano longitudinal), permitem uma decomposição de forças tal que, mais da metade da carga aplicada pelo cilindro seja transmitida verticalmente ao eixo.

O conjunto é extremamente rígido não possuindo nenhum elemento elástico além dos pneus. Esta característica confere ao equipamento uma incapacidade de absorver as imperfeições da pista ao longo do deslocamento longitudinal causando uma oscilação da pressão de trabalho do circuito hidráulico. Da mesma forma a carga aplicada no pavimento sofre variações na sua magnitude, mascarando os resultados dos ensaios.

A utilização do componente (6) que é assimétrico apresenta as seguintes conseqüências:

- Reações assimétricas no carro;
- Deformações assimétricas;
- A aplicação unilateral da carga causa um momento assimétrico no semi-eixo;
- Toda a carga é transmitida somente por um elemento;
- O cilindro hidráulico está posicionado fora do eixo de simetria da máquina.

Tais fatos acarretam a não permanência do semi-eixo paralelo ao solo causando diferença na magnitude da carga aplicada pelas duas rodas, sendo a ocasionada pela roda de dentro a de maior valor.

2.4.7 Considerações sobre o ST

O ST é o primeiro modelo de Simulador de Tráfego implementado nesta região do país. Desde que foi construído vem operando regularmente, possibilitando vários estudos nesta área. Este equipamento possui uma grande importância para o desenvolvimento de novas pesquisas, objetivando um incremento no conhecimento e na tecnologia nacional neste setor. Além disso, há uma demanda crescente pela utilização deste equipamento, desde construtores de pavimentos até mesmo os fabricantes de pneumáticos, a fim do aperfeiçoamento de seus produtos.

As características geométricas e de funcionamento do ST cumprem quase que na totalidade os quesitos necessários a um Teste Acelerado de Pavimento, colocando-o no mesmo patamar de importância dos outros simuladores existentes.

Mesmo sendo um projeto que demonstra ser bastante simples, possuindo poucos recursos tecnológicos, o ST possui um sistema de deslocamento do rodado e aplicação da carga inéditos, totalmente desenvolvidos com tecnologia nacional. Este resultado é mérito de seus projetistas, que como todos os pesquisadores brasileiros sabem contornar a falta de recursos adaptando-se a condições alternativas de projeto, como a utilização de sucata de pontes na confecção do ST.

Embora o ST seja um bom equipamento ele ainda pode receber melhorias e evoluções de projeto em itens que dizem respeito à aplicação da carga, o que será abordado no Capítulo 3.

2.5 Generalidade sobre suspensões.

Em veículos automotivos a suspensão tem a finalidade de atenuar as oscilações oriundas do contato entre o solo irregular e as rodas. Estas flutuações de carga, se não absorvidas, seriam transmitidas aos passageiros, à carga e à própria massa suspensa do veículo causando muitos danos, desde desconforto dos usuários e principalmente a fadiga dos componentes mecânicos.

“Em todos os automóveis, as qualidades da suspensão serão melhores quanto menor for o peso “não suspenso” em relação ao peso “suspenso”. O peso “não suspenso” abrange todos os

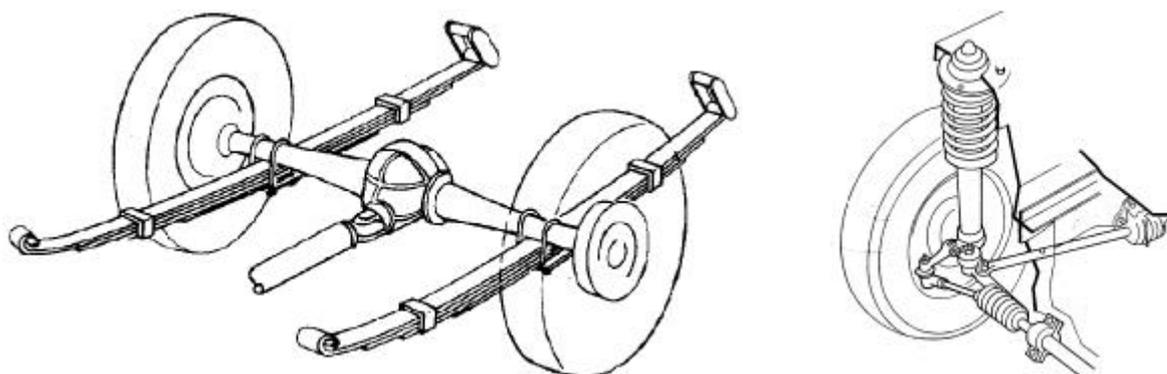
elementos situados entre as molas e a superfície do solo” [Chollet, 1996]. Massa suspensa é o restante do veículo.

Podem ser separadas em dois grupos: suspensão de eixo rígido e suspensão independente. Na primeira as rodas são ligadas transversalmente por uma peça rígida (eixo), que as torna dependentes uma da outra. Na segunda, como o nome já diz, as rodas tem movimentos independentes. Diferentemente da primeira, os eixos de giração das rodas varia de acordo com as solicitações do terreno e este movimento do eixo não é transmitido à outra roda.

Os modelos convencionais de suspensões empregam princípios hidráulicos e mecânicos para prover uma relação rigidez/amortecimento desejada. Disto resultam três categorias básicas de suspensões, a saber: mecânica, pneumática e hidropneumática.

2.5.1 Suspensão mecânica

Valendo-se da deformação de algum elemento elástico (geralmente metálico) a suspensão mecânica é a mais utilizada entre os veículos leves, e para automóveis e camionetes. Devido às suas características possui frequência natural elevada, e para reduzir a velocidade de oscilação das rodas, são utilizados amortecedores. Na figura 2.28 (a) e (b) estão ilustradas duas suspensões mecânicas. A suspensão independente, onde “cada roda é ligada ao chassi por um sistema de braços articulados no sentido vertical” [Chollet, 1996], pode assumir variadas configurações como: o sistema de alavancas transversais desiguais (figura 2.29) [Jost, 2000], sistema de paralelogramo transversal e sistema telescópico.



(a) – Eixo traseiro rígido com feixe de molas.

(b) – Suspensão dianteira telescópica.

Figura 2.28 – Suspensões mecânicas.

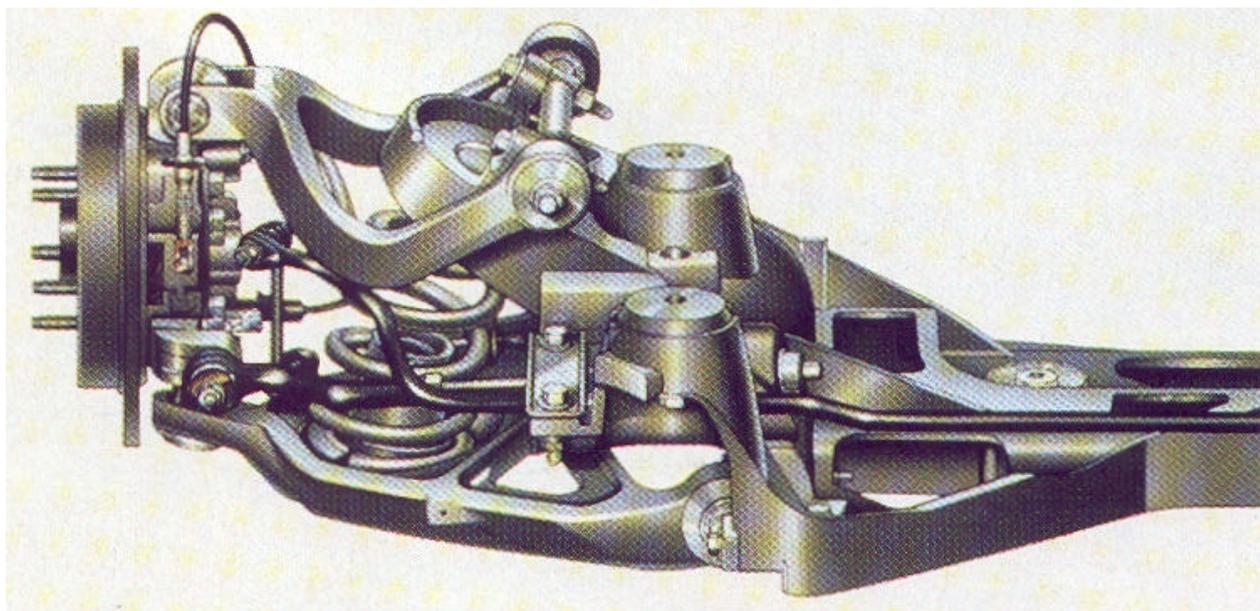


Figura 2.29 – Suspensão dianteira de braços articulados.

2.5.2 Suspensão pneumática

Utilizando molas pneumáticas e com o auxílio de um compressor acionado pelo giro do motor e com uma válvula de regulagem de nível (figura 2.30), a suspensão pneumática efetua instantaneamente a pressão de equilíbrio apropriada a toda gama das possibilidades de trabalho do veículo. Uma forma de utilização da suspensão pneumática está ilustrada na figura 2.31 que mostra o sistema de suspensão deslizante adotada pelo Pulverizador *John Deere 4700*.

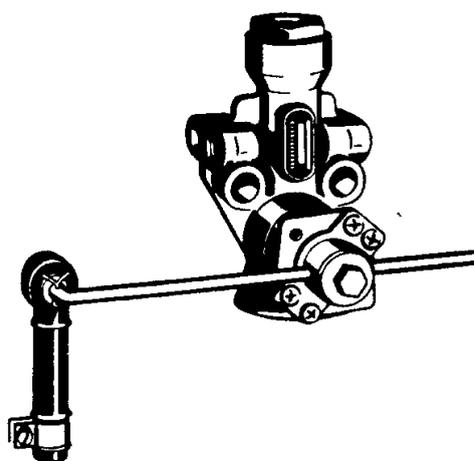


Figura 2.30 – Válvula de regulagem de nível de suspensão pneumática.



Figura 2.31 – Detalhe da suspensão do Pulverizador *John Deere 4700*.

Segundo Steven et al., (1996) a suspensão pneumática gera cargas dinâmicas com metade da magnitude das similares metálicas.

2.5.3 Suspensão hidropneumática

Já a suspensão hidropneumática utiliza um cilindro ligado a um reservatório esférico contendo óleo e gás. Quando ocorre uma variação na altura do veículo um sistema regulador entra em ação e restabelece a altura original. Este sistema aumenta a pressão do cilindro e do reservatório adicionando óleo (através de uma bomba acionada pelo motor do veículo) para

dentro do sistema, ou reduz a pressão retirando o óleo através de um dreno. Além disso, a suspensão hidropneumática não possui amortecedores externos. O movimento do óleo é simplesmente limitado no cilindro de suspensão por meio de um obturador de válvulas opostas. O pistão pode deslocar-se rapidamente no sentido da compressão, sendo freado no sentido da distensão. Na figura 2.32 está ilustrada a suspensão pneumática do Citroën [Chollet, 1996].

Como vantagens desta suspensão pode-se citar: a suavidade de marcha, pouca manutenção e grande resistência.

Suspensão hidropneumática Citroën.

- 1) Painel de suspensão com membrana e cilindro inferior.
- 2) Braço de suspensão articulado no chassi.
- 3) Braço de comando do corretor.
- 4) Corretor.
- 5) Válvula móvel do corretor.
- 6) Canal de retorno.
- 7) Canal de alimentação por pressão.

- I) Altura normal do veículo.
A válvula obstrui os dois canais (6 e 7).
- II) Veículo carregado e rebaixado.
A válvula abre a alimentação (7) e o óleo penetrando sob a membrana recoloca o veículo na posição normal.
- III) Veículo descarregado e levantado.
A válvula abre o canal de retorno e o óleo escorre da panela de suspensão até ao retorno do veículo à sua posição normal.

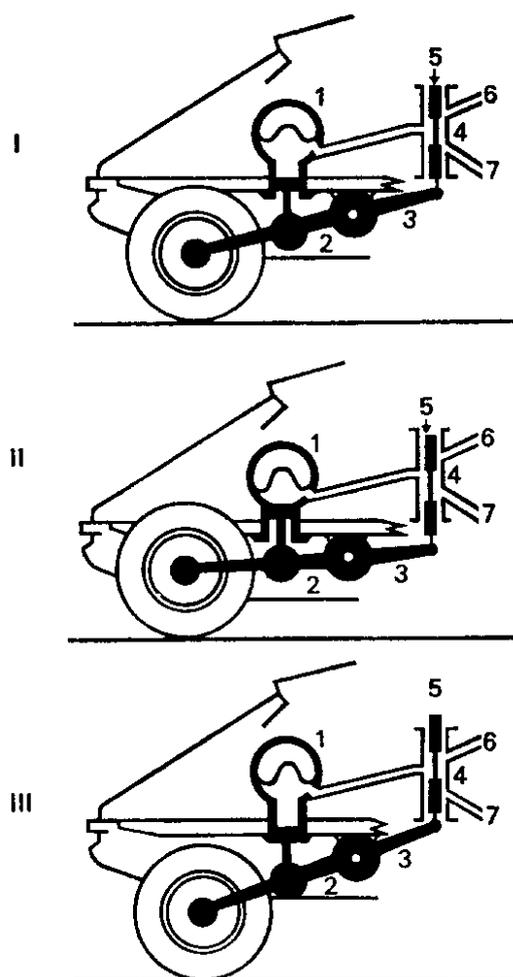


Figura 2.32 – Suspensão hidropneumática do Citroën.

2.5.4 Suspensão em veículos pesados

Vários métodos de suspensão são utilizados em veículos pesados, que podem variar muito sua capacidade de carga necessitando assim de suspensões que possam compensar a solicitação, desde vazio até totalmente carregado. De acordo com a capacidade de carga do veículo, a suspensão pode conter eixos simples ou tandem. Um tandem é uma unidade de

suspensão que consiste em dois eixos unidos por um único suporte transversal que atua como pivô para toda unidade. As molas levam a mesma carga, porém está distribuída em dois eixos ao invés de um. Com esta suspensão devem ser utilizadas molas com capacidade de carga mais elevada. Quando se utiliza feixe de molas em uma suspensão, braços de torção devem ser utilizados a fim de manter o alinhamento das rodas nas mais severas aplicações.

Com relação à correção da altura dos veículos pesados devido à diferença de carga quando vazio e carregado, a utilização de molas auxiliares ou molas secundárias ou de flexibilidade variável contempla esta necessidade (figura 2.33). Assim como a anterior as suspensões pneumáticas também cumprem este papel. Entretanto, segundo Ponticel, (2000) há uma tendência do mercado em utilizar estas últimas em veículos pesados (figura 2.34).

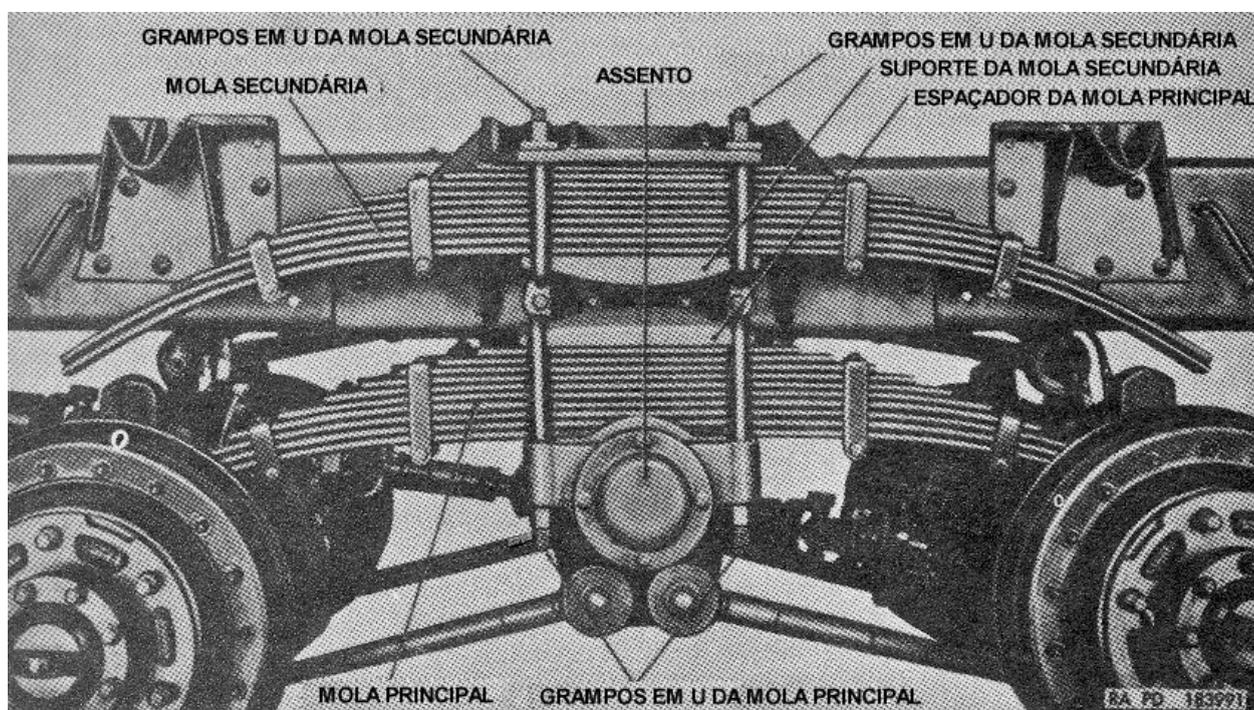


Figura 2.33 – Suspensão com feixe de molas e feixe auxiliar.

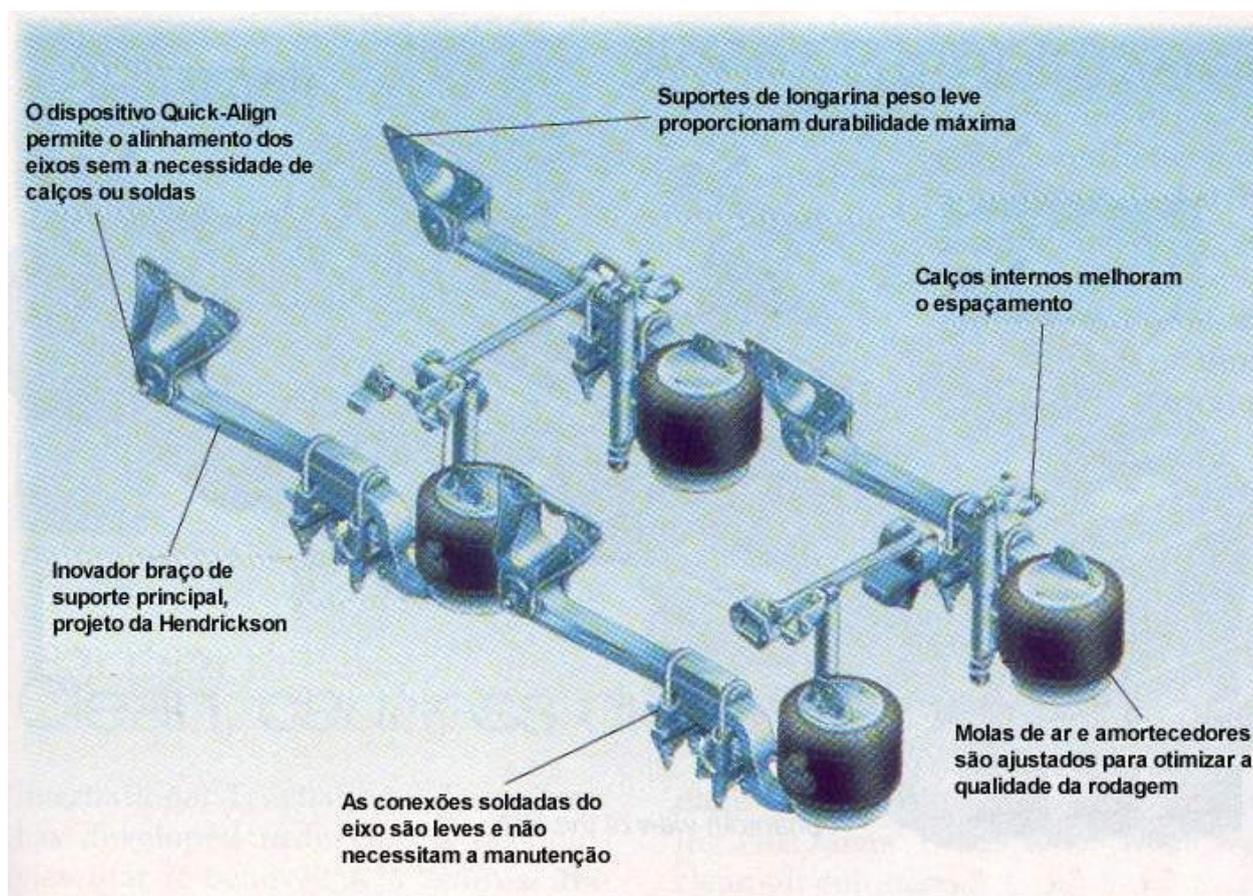


Figura 2.34 – Suspensão pneumática.

2.6 Molas

Os diferentes tipos de molas utilizadas nas suspensões em veículos são: molas helicoidais, feixe de molas, molas pneumáticas e ainda molas a base de barra de torção, que não serão abordadas.

2.6.1 Molas helicoidais

Necessitando de uma guia as molas helicoidais geralmente funcionam em conjunto com um sistema articulado. Possuem ampla faixa de utilização, sua fabricação é de baixo custo, são compactas e eficientes. De fácil manufatura, as molas helicoidais são confeccionadas com uma barra de aço que, após conformada é tratada termicamente para atingir um alto grau de dureza superficial no aço, conferindo um baixo peso para determinado carregamento e flexibilidade, reduzindo seu espaço de atuação, embora para cargas de grande magnitude o diâmetro da hélice também atinja dimensões elevadas. Além disso não necessita manutenção pois não apresenta

atrito durante seu desempenho. Cada vez mais utilizada em veículos que utilizam suspensão independente, “as molas helicoidais não asseguram nenhuma ligação longitudinal e nem transversal entre o chassi e o eixo, e, por isto, as suspensões compostas por molas helicoidais têm sempre braços articulados para efetuar esta ligação.” [Chollet, 1996]. Um conjunto de suspensão dianteira de alavancas desiguais que utiliza mola helicoidal está ilustrada na figura 2.35.

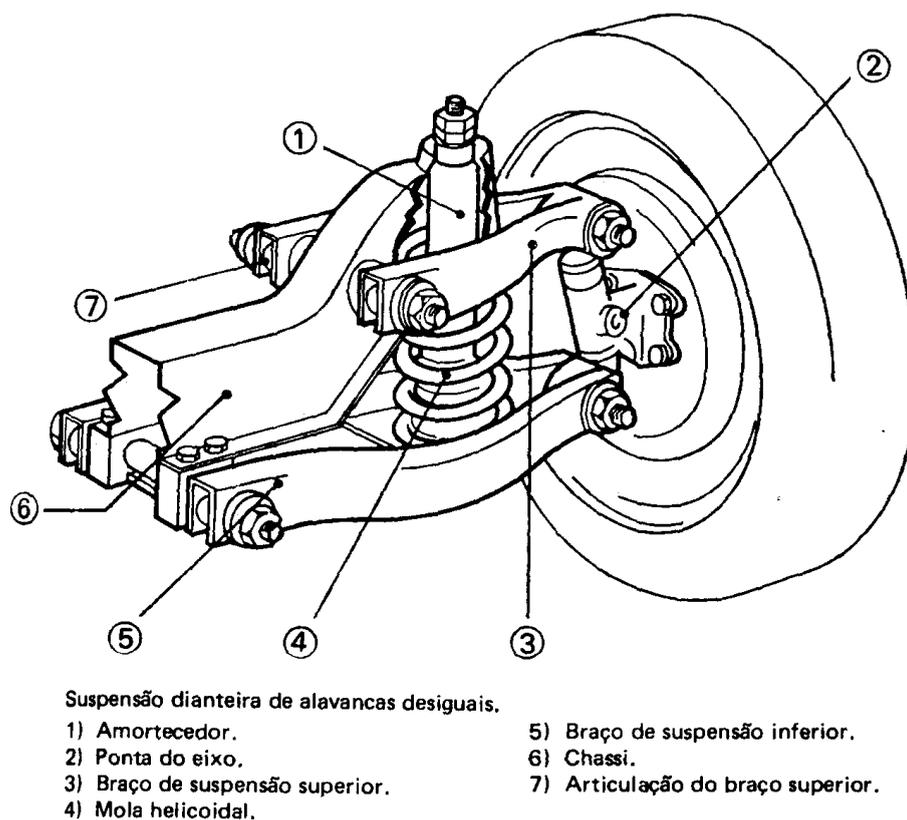


Figura 2.35 – Suspensão dianteira utilizando mola helicoidal.

2.6.2 Feixe de molas

O feixe de molas é formado pela superposição de um determinado número de lâminas de aço, de comprimento decrescente de razão constante, ligadas por um parafuso central (parafuso de fixação) de cabeça cilíndrica. Cada extremidade da lâmina mestra tem um ilhó que serve de articulação. As lâminas secundárias são mantidas paralelas à lâmina mestra por meio de estribos verticais. Também de simples fabricação o feixe de molas proporciona uma ligação rígida entre o eixo e o chassi nos sentidos longitudinal, necessitando de uma barra estabilizadora para restringir o movimento de rotação em relação ao seu próprio eixo. Além de segurança de funcionamento, uma vez que o rompimento de uma lâmina não elimina a ligação do eixo com o chassi. “A flexão de qualquer plano altera o seu comprimento e assim as molas são fixadas ao chassi através de

casquilhos de bronze onde se localizam buchas de borracha, chamadas jumelos, bielas de suspensão, oito, etc.” [Pugliesi, 1951]. Em contrapartida a mola de lâminas apresenta grandes superfícies de contato e conseqüentemente de atrito, cuja lubrificação é difícil de assegurar. Para tentar contornar este problema folhas de outro material (ou até mesmo o próprio) são colocadas entre as lâminas sendo geralmente de zinco ou borracha ou qualquer material antifricção. Além disso, tem facilidade de rompimento das lâminas devido a dilatação e contração térmica. A tendência dos feixes de molas mais modernos é reduzir o número de lâminas e a curvatura.

As características de um feixe de molas são: comprimento, largura e espessura das molas (flexibilidade). Lucchesi, (1986) define a flexibilidade como a flecha em mm quando o feixe de molas é submetido a um carregamento de 100 kg (flexibilidade 50 = flecha de 50 mm com 100 kg de carga). Na figura 2.36. está ilustrado um feixe de molas com os seus componentes.

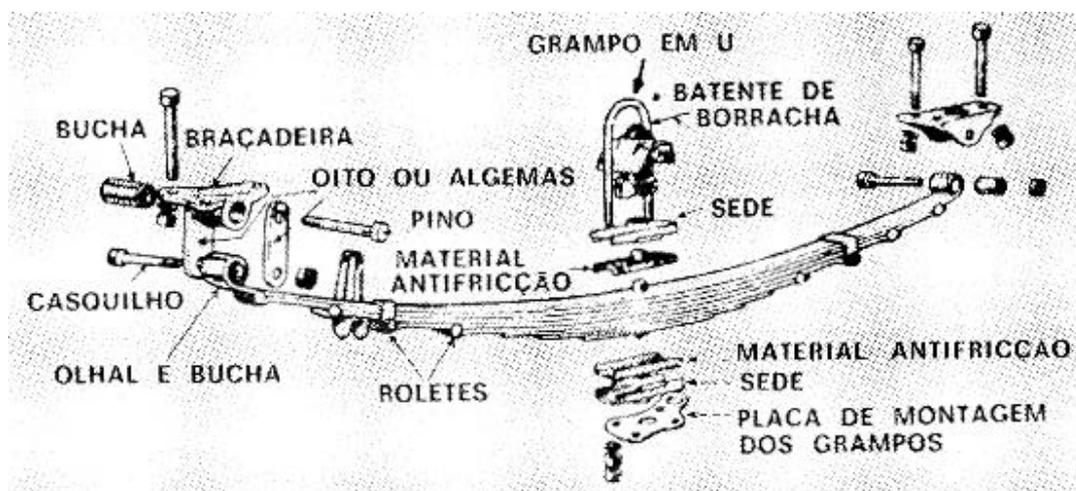


Figura 2.36 – Feixe de molas.

Segundo Lucchesi, (1986) o feixe de molas pode assumir configurações tipo *cantilever*, e *semi-cantilever*, ilustradas na figura 2.37 (a) e (b) respectivamente.

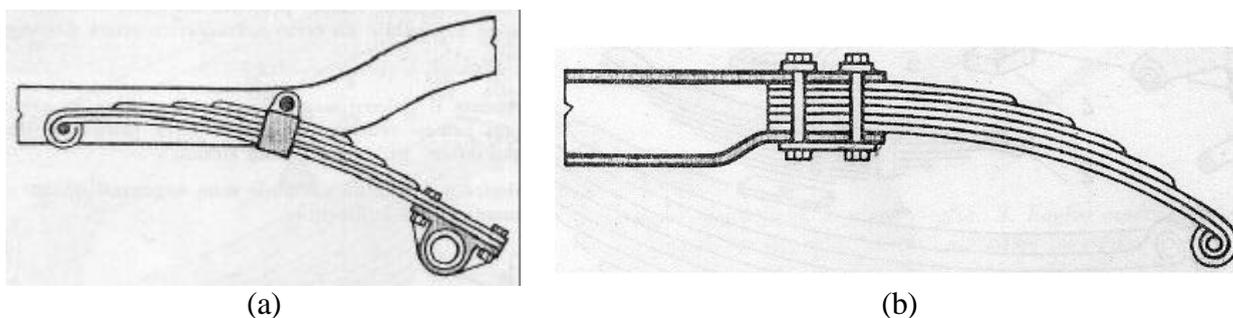


Figura 2.37 – Feixe de molas tipo *cantilever*.

Alguns modelos de motocicletas militares utilizaram feixe de molas como elemento elástico da suspensão, como pode ser visto na figura 2.38, [Ministerio del Ejercito y la Fuerza Aerea de los EUA, 1970].

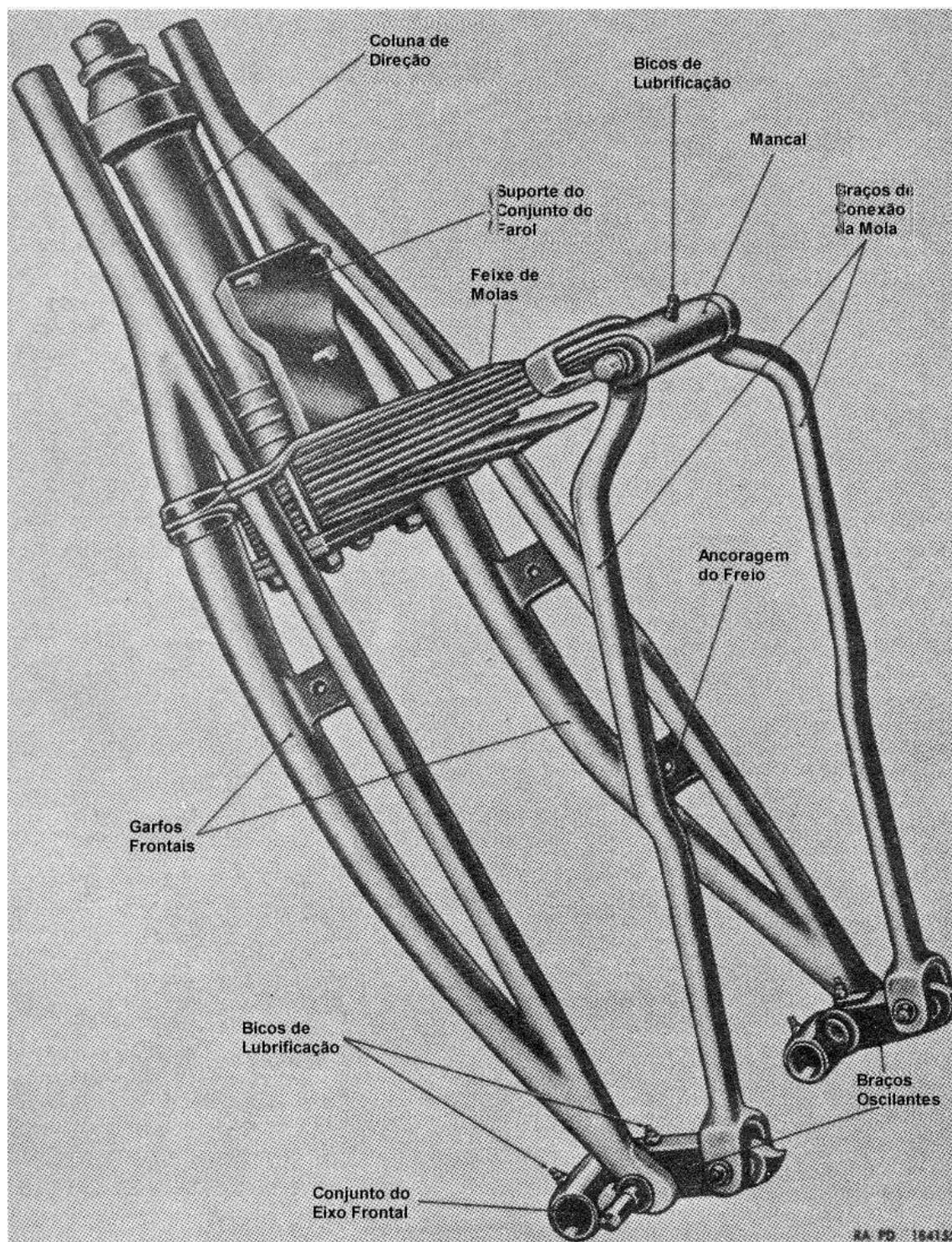


Figura 2.38 – Suspensão dianteira de uma motocicleta militar utilizando feixe de molas.

2.6.3 Molas pneumáticas

É comum utilizar-se somente de molas pneumáticas em alguns veículos. Estas molas funcionam ligadas a um compressor de ar que é acionado pelo motor a fim de corrigir a altura do veículo. Basicamente são compostas de duas tampas metálicas unidas por um fole de borracha estanque que, ao ser comprimido, sofrerá um acréscimo de pressão proporcional à deformação sofrida, aumentando sua pressão interna. Enfim, característica de um elemento elástico.

Existem vários fabricantes deste produto, disponibilizando assim, uma grande quantidade de modelos, admitindo cargas até 450 kN para deslocamentos de até 355 mm [Firestone]. Possuem larga aplicação, desde suspensões pneumáticas nas linhas automotiva e ferroviária, até como atuadores e isoladores, na linha industrial. São versáteis, toleram o desalinhamento das extremidades e podem operar inclinadas a ângulos de até 25°. Ainda, segundo os fabricantes possuem vida útil mais longa que as similares metálicas e reduzem o desconforto em marcha. Na figura 2.39 está ilustrada uma mola pneumática.

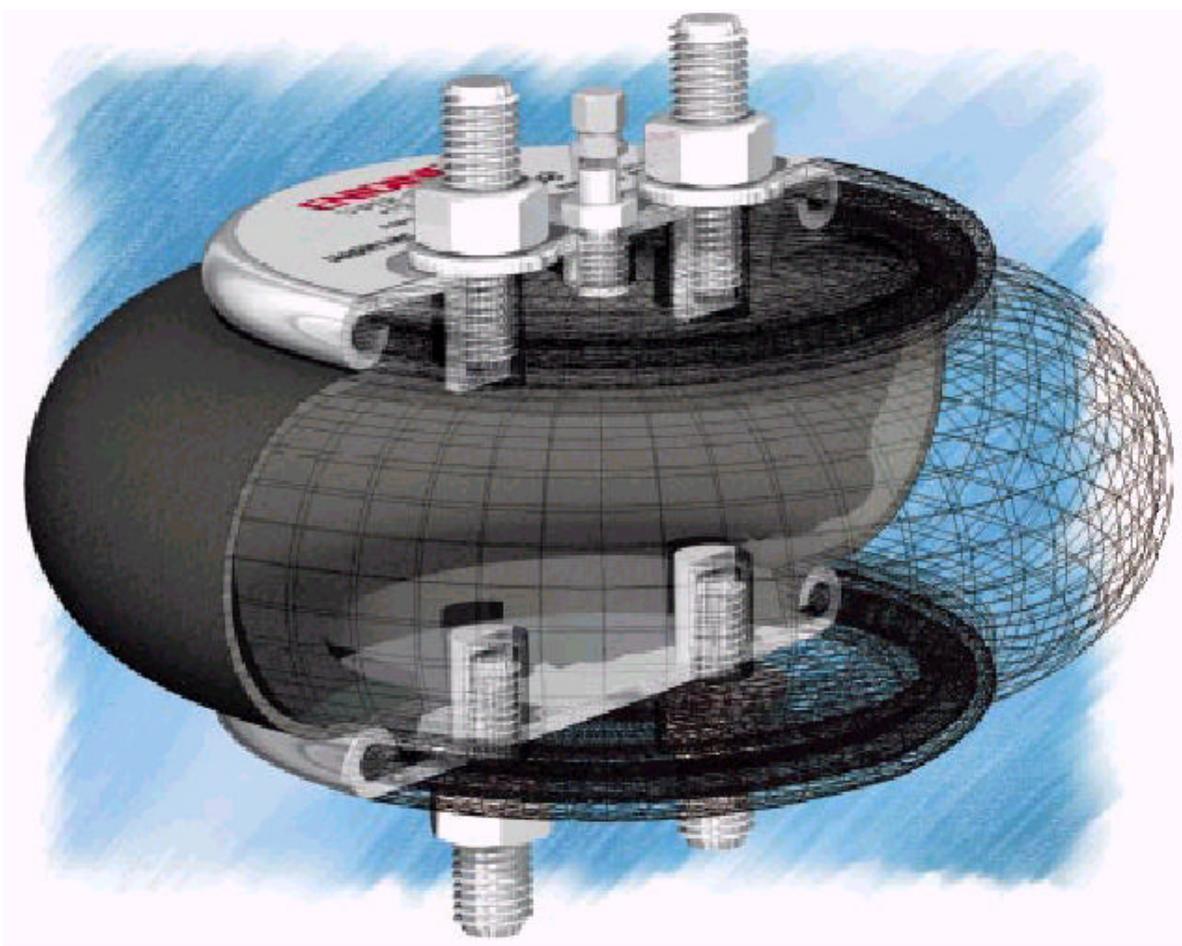
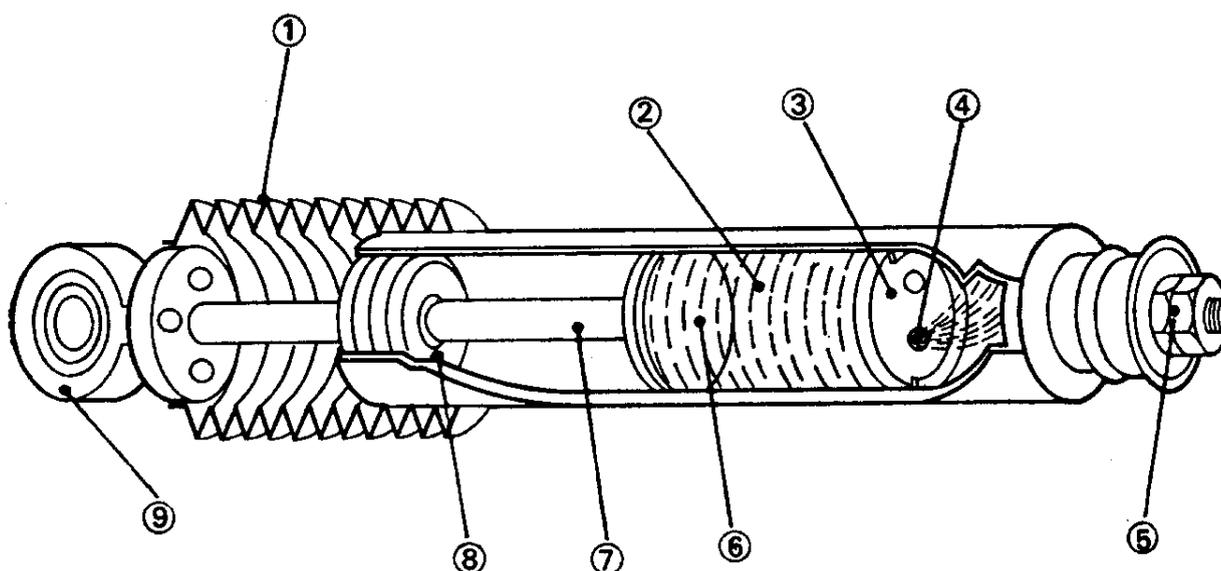


Figura 2.39 – Mola pneumática.

2.7 Amortecedores

A função principal de um amortecedor é regular o rebote das molas de tal maneira que a roda regresse a sua posição inicial lentamente, impedindo assim que sacudidas e golpes violentos repentinos sejam transmitidos ao chassi e conseqüentemente aos seus ocupantes e cargas [Ministerio del Ejercito y la Fuerza Aerea de los EUA, 1970]. Estes dispositivos são instalados perto de cada roda e formam uma ligação particular entre a massa não suspensa e o chassi. O princípio básico de funcionamento dos amortecedores é a força hidráulica gerada pela resistência de um líquido que flui através de uma abertura restrita, suficiente para dissipar a energia das molas. Na figura 2.40 está ilustrado um amortecedor telescópico hidráulico, utilizado pela maioria dos automóveis de passeio.



Amortecedor.

1) Guarda-pó.

2) Líquido.

3) Válvula de frenagem.

4) Passagem limitada.

5) Fixação superior no chassi.

6) Pistão.

7) Barra.

8) Junta.

9) Fixação inferior no eixo.

Figura 2.40 – Amortecedor telescópico hidráulico

Este trabalho não prevê a utilização de nenhum tipo de amortecedor.

3. ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO

Dando continuidade ao projeto informacional, este capítulo trata de processar as informações contidas nos dados do capítulo anterior e, direcionando estas para a elaboração das especificações de projeto.

Inicialmente apresenta-se uma breve explanação sobre o método Desdobramento da Função da Qualidade (*QFD*). Em seguida, esclarece-se as necessidades e restrições deste projeto. As especificações de projeto são obtidas e apresentadas numa tabela. Tem-se, por fim, uma reflexão sobre este capítulo encerrando com uma abordagem sobre custo de protótipo *versus* valor do pavimento, e a produtividade do equipamento.

3.1 O Desdobramento da Função Qualidade (*QFD*)

O método do Desdobramento da Função Qualidade (*QFD*) foi desenvolvido no Japão por volta de 1972 na empresa Mitsubshi Co., sendo seu conceito posteriormente aprimorado pela Toyota Co., e vem sendo caracterizado como uma boa ferramenta no processo de projeto.

Ullman, (1992), afirma que “entender o problema” é fundamental para o desenvolvimento de projetos. O *QFD* é utilizado como ferramenta capaz de complementar o conhecimento, pois objetiva fornecer especificações para o projeto baseadas nas necessidades do usuário do produto, além de identificar os fatores que influenciam o desenvolvimento do projeto.

Na utilização desta ferramenta (*QFD*) o próprio usuário estabelece as necessidades do produto e seus graus de importância. É adequado o conhecimento do usuário assim como suas características e preferências básicas.

Da linguagem popular a linguagem técnica as necessidades fornecidas pelo usuário são traduzidas pelo engenheiro mecânico, gerando os requisitos de projeto. Estes são qualificados e relacionados entre si. Relacionam-se, também, entre com as necessidades, agora, porém, de forma quantitativa.

Destas relações forma-se uma hierarquia de importância dos requisitos mensuráveis de projeto. Assim, tem-se as especificações de projeto que orientam o estudo para uma solução de acordo com o que deseja – ou não – o usuário.

Segue uma descrição passo a passo deste método, utilizando-se como referência básica Ullman, (1992):

1.º Etapa: identificar o(s) usuário(s) – ou seja, determinar exatamente quem é o usuário, a que grupo sócio-econômico, faixa etária etc. ele pertence.

2.º Etapa: determinar as *necessidades do usuário* (NU) – Nesta etapa busca-se informações junto ao usuário com relação as características que ele necessita do produto a ser desenvolvido. Estas informações podem vir em uma linguagem simples, própria do usuário, como: fácil, rápido, melhor, etc. Podem, ainda, serem organizadas em grupos funcionais, como por exemplo: de funcionamento, fabricação, montagem, custo, aparência e quantos outros forem necessários.

3.º Etapa: determinar o *grau de importância* de cada uma das necessidades do usuário – Nesta etapa é estabelecida a importância relativa de cada uma das *necessidades do usuário*. “Para uma avaliação de quanto cada necessidade vale para o consumidor, os mesmos fornecem pesos de importância, geralmente em porcentagem, sobre cada um de seus desejos.” [Amorim, 1996].

4.º Etapa: comparar com projetos similares – nesta etapa são adicionados pesos nas necessidades com base na percepção que o usuário tem sobre produtos já existentes ou equivalentes encontrados no mercado.

5.º Etapa: montar a casa da qualidade – Nesta etapa, trata-se de traduzir as *necessidades do usuário*, ditas de forma abstrata, em requisitos mensuráveis de projeto. Estes são chamados *requisitos de projeto* (RP) e representam o como atender ao que o cliente quer. A tradução nem sempre é direta; por exemplo: deseja-se um produto “fácil de limpar”. Isto pode ser traduzido em tempo de limpeza (minutos ou segundos), número de pontos de acúmulo de sujeira, etc. Executa-se uma análise sobre como cada um dos requisitos de projeto relaciona-se com cada necessidade do consumidor. Estabelece-se um grau de relacionamento entre NU × RP com valores de qualificação, que vão desde fortemente relacionados até sem nenhum relacionamento, constituindo-se a *matriz de relação*.

Já a *matriz de correlação* trata de relacionar os requisitos de projeto entre si. Além de correlacionar o caráter positivo ou negativo da interferência dos requisitos, a *matriz de*

correlação também permite quantificá-los. Executa-se, basicamente, o mesmo procedimento feito na *matriz de relação*.

6.º Etapa: determinar as *especificações de projeto* – Por fim, os *requisitos de projeto* são quantificados através do cálculo dos seus respectivos valores de importância, expresso pela fórmula:

$$\sum_{i=1}^n I_u \cdot r_i$$

onde I_u é o grau de importância para o consumidor, e r_i o grau de relacionamento (NU \times RP).

Classificados por ordem de importância, são conferidos aos requisitos de projeto valores objetivos e outras informações importantes ao projeto como: saída indesejável, método de verificação e comentários. Desta forma são obtidas as especificações de projeto, que ajudam o projetista na escolha da melhor solução, segundo o usuário, para o produto a ser desenvolvido.

3.2 Entendendo o problema

O Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS necessita de alguns ajustes no seu sistema de aplicação de carga a fim de aprimorar seu funcionamento, visando melhorar a qualidade dos futuros ensaios. Sendo sua função principal a aplicação cíclica de uma carga de compressão constante em pavimentos através do rolamento de rodas sobre o mesmo, tem-se então como objetivo a melhoria dos quesitos que mantenham a repetibilidade da carga nominal com conseqüente aumento da produtividade dos teste.

Os dois principais pontos estão relacionados com a aplicação da carga, que deve ser:

- Uniformemente distribuída na pista – como já citado no capítulo 2.4.6, a geometria do garfo articulado juntamente com a aplicação da carga fora do centro geométrico do carro, somados às folgas necessárias e existentes nos trilhos, causam uma má distribuição transversal da carga. Agregando todas estas características às deformações assimétricas, tem-se uma inconveniente inclinação do eixo em relação ao piso, como ilustrado (de forma exagerada) na figura 3.1. Marcas em um dos pavimentos ensaiados pelo ST no Campus do Vale da UFRGS indicam uma maior carga aplicada pela roda interna, comprovando tal fato. Observa-se, então, que a

garantia de uma boa distribuição de carga está vinculada à necessidade de manter o eixo das rodas paralelo ao pavimento e perpendicular ao plano longitudinal.

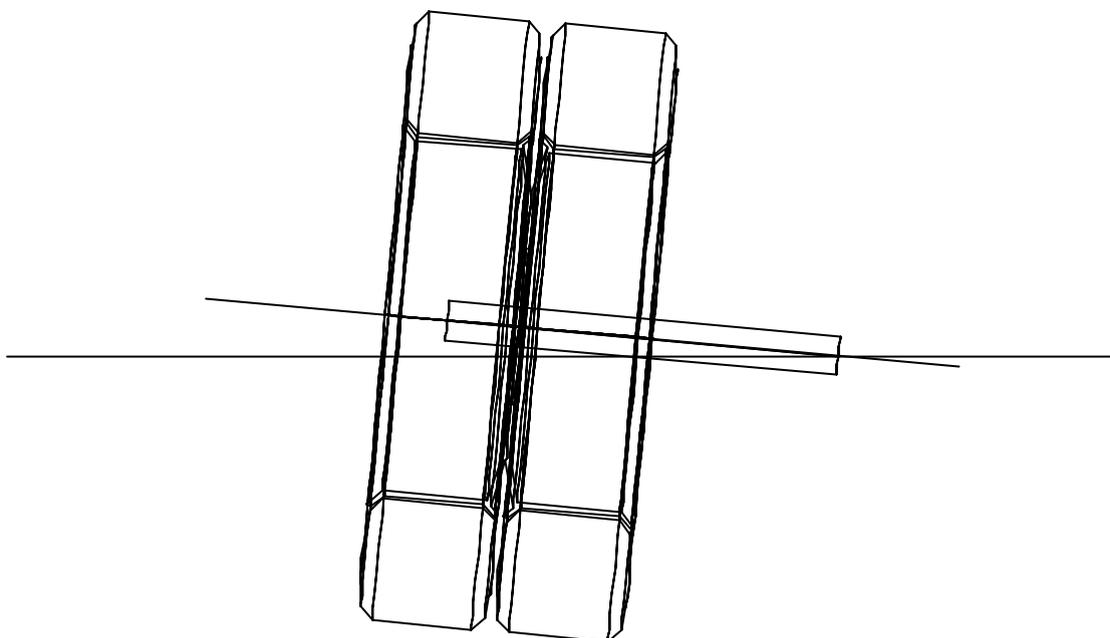


Figura 3.1 – Inclinação indesejável do eixo e rodas.

- Constante ao longo do trajeto longitudinal – as deformações plásticas imprevisíveis e não homogêneas conferidas ao pavimento, que resultam da destrutiva carga aplicada, faz com que diferentes pontos ao longo da pista tenham cotas diferentes. Mesmo com suaves ondulações e, de acordo com velocidade de deslocamento, estas causam uma excitação nas rodas que não são absorvidas pelos pneus, nem pelo sistema hidráulico ou pelo garfo articulado dotado de elevada rigidez. Visível no manômetro do sistema hidráulico do equipamento, este efeito faz com que o sistema aplique picos e alívios de carga. Marcas nos pavimentos ensaiados pelo ST indicam a ocorrência de um impacto quando as rodas entram em contato com a pista, no início do curso do carro. Estes fatos resultam da ausência de qualquer tipo de suspensão no ST, evidenciando, assim, a necessidade de implementação de um sistema de compensação.

Tem-se, então, como objetivo corrigir estes detalhes mantendo ou melhorando a produtividade atual. Deve-se, contudo, respeitar alguns limites impostos pelos proprietários e responsáveis do equipamento, descritos no capítulo 3.3.

3.3 Restrições de projeto

3.3.1 Partida inicial

Tem-se como ponto de partida o sistema atual, do qual serão mantidos os elementos estruturais e alguns componentes. Como ilustra a figura 3.2 (a), os trilhos juntamente com as rodas guias permanecerão os mesmos, bem como o respectivo sistema de acionamento do deslocamento longitudinal. No carro, dois perfis “U” que suportam o cilindro serão deslocados para o centro e distanciados entre si, figura 3.2 (b). Quanto ao deslocamento vertical será mantido o acionamento hidráulico. A altura livre entre o carro e o solo é de 1620 mm, o que permite espaço suficiente para a montagem, operação e manutenção do novo sistema.

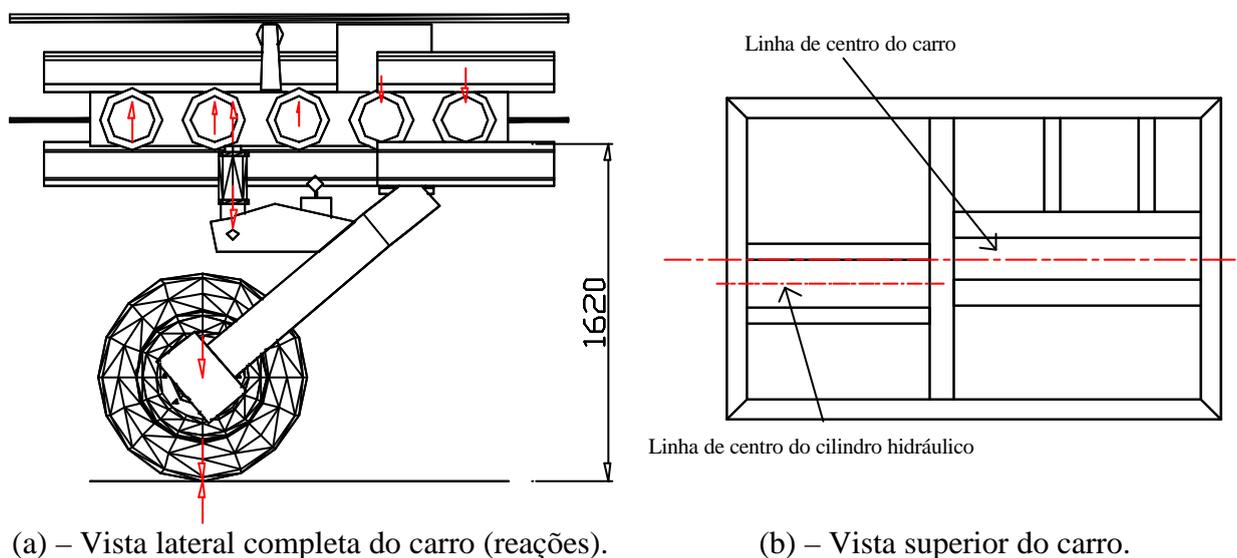


Figura 3.2 – O ponto de partida

Os itens que atenderem às solicitações mecânicas e de funcionamento no projeto original serão mantidos, que são: mancais de rolamento e unidade hidráulica.

3.3.2 Sobre forças reativas do carro

Como já citado no capítulo 2.4.1, o carro é composto de uma estrutura metálica com cinco pares de rodas guiadas em trilhos. Este carro suporta todo o sistema de posicionamento e reação da aplicação de carga do ST. Para que o conjunto tenha um funcionamento suave, suas reações devem ser criteriosamente estudadas. Como pode ser visto na figura 3.2, as reações

desejadas em seu projeto original podem e devem ser mantidas, acarretando um funcionamento suave, quando no início e no fim do ciclo.

Fica evidente que a existência de cargas e reações no eixo Z não são favoráveis ao funcionamento do conjunto e nem mesmo a estrutura esta dimensionada para este tipo de solicitação. Evita-se, portanto, momentos em torno do eixo Y (normal ao solo). Deve-se sim, efetuar um giro em torno do eixo Z (figura 2.20), causando uma distribuição linear das reações nas rodas em Y, suavizando o funcionamento do sistema. Prevendo todas estas reações e deformações quando solicitados, a estrutura a ser proposta deve contemplar todos estes requisitos.

3.3.3 A estrutura do garfo.

Levando em conta as reações do carro, a estrutura deve ser projetada de acordo com os seguintes aspectos:

- O cilindro hidráulico deve ser posicionado no centro transversal da máquina, conseqüentemente, no centro do garfo;
- A estrutura deve absorver as imperfeições do pavimento;
- O garfo deve garantir o alinhamento do eixo.

A estrutura do conjunto ao qual pertence o garfo deve necessariamente garantir que as imperfeições do pavimento não alterem a magnitude da carga aplicada. Para tanto, utiliza-se de um elemento elástico posicionado entre o ponto de aplicação da carga e o eixo das rodas. Esta tarefa também poderia ser feita por um controlador hidráulico, porém a utilização de um sistema do tipo suspensão automotiva reproduz com mais fidelidade a atuação de uma veículo de carga – caminhão. Assim, define-se a utilização de algum tipo de mola para permitir a oscilação do conjunto, quando necessário.

De forma a atender as necessidades e objetivando a solução do problema, a aplicação da carga nos dois lados do eixo evita o risco dele sair da posição horizontal, distribuindo a carga de maneira uniforme. Esta simetria acarreta em um cuidado especial com relação à manutenção, pois o conjunto das rodas fica inserido no garfo, dificultando sua remoção. Como a aplicação de carga bilateral acaba enclausurando o rodado tem-se como solução a remoção do conjunto todo (rodas, cubo e eixo) posteriormente desmontado.

Segue na tabela 3.1 as vantagens e desvantagens destas duas configurações:

Tabela 3.1 – Vantagens e desvantagens dos tipos de transmissão da carga.

	Unilateral	Bilateral
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidade de remoção das rodas; • Menor número de componentes envolvidos; 	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilidade real de tornar o baricentro do carro situado no eixo de simetria da máquina; • Deformações de componentes iguais (tendência) o que acarreta em uma carga do solo mais homogênea; • Componentes menos robustos;
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Baricentro do carro fora do eixo de simetria de máquina; • Deformações assimétricas • Efeito das folgas (facilitam o giro irregular); • Alguns componentes acabam recebendo toda a carga: barra, eixo (engaste e não bi-apoiada) etc.; 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificuldade de remoção das rodas; • Mais tempo gasto na troca de rodas; • Custo mais elevado;

3.4 A aplicação do *QFD*

Conforme o procedimento descrito no capítulo 3.1 sobre a utilização do *QFD*, o projeto mecânico do mecanismo de aplicação de carga do sistema de deslocamento longitudinal e vertical de um simulador de teste acelerado de pavimentos rodoviários teve o seguinte desdobramento:

1.º Etapa – identificação: a identificação do usuário é formada por duas entidades sendo o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER/RS) e o Laboratório de Pavimentos do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da UFRGS;

2.º Etapa – informação: as informações originaram-se de duas fontes principais, sendo obtidas através das equipes de teste e pesquisa. Outras informações foram obtidas por inspeção visual da máquina de testes em diversos momentos com apoio da equipe de operação durante seu funcionamento, o que permitiu uma análise detalhada da interface máquina de teste/pista pavimentada;

3.º Etapa – hierarquia: a importância hierárquica de cada um dos itens ficou estabelecida a partir das necessidades do usuário, que resultou na análise individual e de conjunto das informações obtidas;

4.º Etapa – comparação: não foi necessária a comparação deste projeto com nenhum outro similar, uma vez que não há concorrência;

5.º Etapa – requisitos de projeto: todas as necessidades foram traduzidas em requisitos de projeto, e relacionados entre si, sendo então posteriormente cruzados com as necessidades de projeto;

6.º Etapa – especificações de projeto: efetuou-se a operação via software que hierarquizou os requisitos que foram associados aos demais parâmetros pertinentes à sua especificação.

As necessidades do usuário, os requisitos de projeto, bem como os pesos a eles associados e todas as suas relações estão resumidos e ilustrados na casa da qualidade na figura 3.3, gerada através de um software comercial. As respectivas especificações de projeto estão listadas na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Especificações de Projeto.

	Requisito	Unid. de medição	objetivo	sensor	Saída indesejável	Comentários
01	Custo	R\$	mínimo possível	Orçamento	Custo muito elevado	Em todo e qualquer projeto o custo deve ser minimizado, mesmo em se tratando de protótipos.
02	Componentes padronizados	%	100		Porcentagem muito abaixo de 100%	Entende-se como 100% das peças padronizadas a escolha de chapas de aço comercial, rolamentos, parafusos e molas e não a forma física dos componentes.
03	N. de componentes envolvidos	un.	poucos	Contagem	Numero demasiadamente elevado	Este parâmetro deve contemplar um número mínimo de componentes.
04	Deformações do garfo	ε.	0,1	Cálculo	Permitam o desalinhamento do eixo	As deformações do garfo não devem interferir no alinhamento do eixo. Estas, quando minimizadas, aumentam a vida útil dos componentes.
05	Vida útil	anos	20	Análise de confiabilidade e nível de tensões	Baixa vida útil	Este sistema deve permitir reparos que aumentem sua vida útil.
06	Massa do garfo	kg	400	Cálculo	que interfira significativamente na resposta do sistema.	A massa é importante para a resposta dinâmica do sistema.
07	Resposta em frequência	1/s	A maior possível	Medição através da célula de carga	Resposta insuficiente	O sistema deve manter a magnitude da carga constante, na ação conjunta das molas e do sistema hidráulico.
08	Período dos ciclos	s	9	Calculado	Acima do atual	O período do ciclo deve ser o menor possível uma vez que está diretamente relacionado com a produtividade do equipamento.

Tabela 3.3 - Especificações de Projeto (continuação).

	Requisito	unid. de medição	objetivo	sensor	Saída indesejável	Comentários
09	Num. de células de carga	un.	2	Contagem	****	A utilização de uma única célula de carga não torna o sistema de aquisição apto a perceber possíveis desalinhamentos no eixo.
10	Dimensões da mola	mm	inserir a mola no projeto	Metro	Mola excessivamente grande	A mola deve ser de dimensões reduzidas devido ao problema da falta de espaço no local.
11	Num. Comp. entre célula e eixo	un.	1	Contagem	Que o número de componentes interfira na medição	O ideal seria medir a aplicação de carga diretamente no eixo e dos dois lados diminuindo o efeito da geometria e dos componentes na medição.
12	Num. de molas	un.	2	Contagem	****	O número de molas será de acordo com o arranjo escolhido
13	Cargas transv. na célula de carga	kN	0	Cálculo	Acima de 1,5 kN	Devem ser minimizadas afim de aumentar a vida útil da célula de carga. 1,5 kN representam 2% da carga aplicada.
14	Faixa de aplic. Mola	kN	0 a 75	Dados do fabricante	Não tenha boa resposta em ensaios na faixa estabelecida	Preferencialmente, as propriedades da mola não devem ser drasticamente alteradas quando opera em toda sua faixa de utilização.
15	Altura da célula de carga	mm	30	Dados do fabricante	50 mm	A altura da célula de carga deve ser minimizada a fim de liberar espaço no arranjo bem como reduzir qualquer tipo de carregamento transversal.
16	Frequência natural da mola	Hz	adequada	Dados do fabricante	Não amenizar o efeito das imperfeições da pista	No conjunto, deve agir para retirar a frequência natural do conjunto garfo da faixa de frequência de excitação da pista.

3.5 Considerações sobre este capítulo

Obviamente existem muitas possibilidades de implementação de uma solução viável que contemple as necessidades reais. Do estudo apresentado neste capítulo, pode-se dizer que o projeto tem viabilidade técnica, pois há espaço, material e componentes comerciais suficientes para o projeto do equipamento. Por outro lado, a viabilidade econômica é relativa, pois valores envolvidos com a construção e restauração de pavimentos superam, de longe, os custos para a construção ou reforma do ST. Porém, pode-se minimizar os custos de fabricação otimizando a geometria dos componentes que não forem diretamente comerciais, ou mantendo-se algumas características básicas, fazendo um número mínimo de alterações possíveis.

3.5.1 O custo do protótipo *versus* valor do pavimento

Sempre em um projeto o custo será um fator relevante e determinante. Na produção em larga escala visualiza-se melhor os efeitos de uma boa metodologia e de um bom estudo do processo de fabricação, quanto ao que se refere a benefícios econômicos. Entretanto, em se tratando de um protótipo, do qual será fabricado somente um modelo, os custos da produção tendem a elevar-se um pouco. Todavia, é necessário refletir a respeito dos custos e dos valores envolvidos. Como já foi citado no Capítulo 2, alguns centros de pesquisa investiram alguns milhões de dólares neste tipo de programa, tendo também comprovado um retorno muitas vezes superior ao investimento feito. O produto a ser testado tem de ser mantido em bom estado de conservação, restaurado a cada intervalo de tempo, de preferência determinado, conferindo preferencialmente atualizações tecnológicas. É neste contexto que se encontra o Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS, que possui grande valor em termos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, de visível aplicação prática comparado ao seu custo. Além disso, dada a necessidade, existe uma demanda por este tipo de equipamento acarretando em um peso diferenciado para o custo do protótipo. Entretanto, isto não descarta a possibilidade de otimização de todo o processo visando uma redução dos custos, apenas expõe a importância relativa do capital, neste caso.

3.5.2 A produtividade

A produtividade deste tipo de máquina varia de acordo com a sua concepção. As máquinas que utilizam pistas lineares, ou seja, executam um movimento alternado, possuem uma limitação intrínseca do movimento que precisa acelerar e desacelerar o sistema de aplicação de carga, ou a carga propriamente dita. Neste caso, a velocidade de deslocamento das rodas durante o teste chegam a 20 Km/h, fazendo com que a produtividade do equipamento seja função da capacidade de alterar a inércia do sistema de carga, poucas paradas para manutenção, possibilidade de funcionar ininterruptamente e da quantidade de pista ensaiada. Este último quesito também é limitado por questões estruturais relacionadas aos trilhos, que suportam as reações da carga aplicada.

Diferente das anteriores, os equipamentos que funcionam em pistas circulares (e oblongas) não necessitam alternar seu movimento, podendo manter a velocidade das rodas constante durante o ensaio, podendo atingir altíssima magnitude, como é o caso do *LCPC* (capítulo 2.3.2). Este equipamento atinge 100 km/h e possui quatro pontos de aplicação de carga diminuindo em muito o tempo de um ensaio de pavimento. Por outro lado, mesmo chegando a altas velocidades, o *WesTrack* (capítulo 2.3.4) utiliza uma pista com 2,9 km de extensão, de forma a testar 26 diferentes tipos de pavimentos. Ou seja, mesmo com um tempo total de ensaio de aproximadamente dois anos, 26 resultados serão obtidos de uma só vez.

Para o caso do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS (capítulo 2.4), que utiliza pista linear e executa movimento alternado, com aplicação de carga em um sentido, deve-se fazer com que seu ciclo de aplicação de carga seja o menor possível, aumentando sua velocidade durante o retorno e implementando-se a execução de tarefas simultâneas, como posicionar as rodas na pista durante a aceleração do mecanismo e suspender o sistema durante a desaceleração. Tem-se com isso, a otimização do ciclo reduzindo seu período.

4. PROJETO CONCEITUAL

Este capítulo tem como objetivo apresentar o conceito do novo sistema de aplicação de carga do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS. Inicialmente, apresentam-se alguns aspectos sobre o processo criativo. Estes, juntamente com as informações contidas nos capítulos anteriores levaram a seis princípios de solução plausíveis de execução, que contemplam as necessidades do cliente e as exigências do projeto. Estas alternativas são descritas, avaliadas, analisadas e comparadas entre si. Por fim, uma descrição detalhada da concepção escolhida juntamente com respectivos desenhos e listagem dos componentes encerram este capítulo.

4.1 Alternativas de solução

Basicamente, o ST necessita de uma unidade para a transmissão da força que garanta a aplicação de uma carga constante e igualmente distribuída nos pneus. A importância desta necessidade é evidente, pois esta é uma das principais funções do equipamento, ou seja, aplicar a carga preestabelecida em cada ciclo ao longo do período arbitrado para o teste de pavimento em estudo.

Considerando que este é um projeto evolutivo, onde já existe o equipamento em funcionamento, o qual já possui um princípio de funcionamento, optou-se por manter ao máximo as características básicas do sistema original, inserindo, simplesmente, molas entre o cilindro hidráulico e as rodas. Pode-se desta forma variar: o tipo de mola, a sua posição e curso, a geometria da estrutura e componentes e a forma de transmissão da carga. Além dos sistemas sugeridos pelos simuladores existentes, outros, ainda, podem ser avaliados e implementados, conforme ilustrados na figura 4.1 de (a) a (i) um estudo preliminar das possibilidades de solução.

Estas, são algumas das muitas possibilidades da execução da citada tarefa. Pequenas alterações na configuração causam grandes variações nas reações, tensões e resposta do sistema, bem como o número de componentes envolvidos. Apesar da resposta dinâmica do sistema ser função de uma série de fatores, como massa suspensa, características elásticas da mola e frequência de excitação do sistema, a variedade de tipos de molas e o grande número de arranjos conferem ao projeto a possibilidade de obtenção uma boa resposta dinâmica do conjunto.

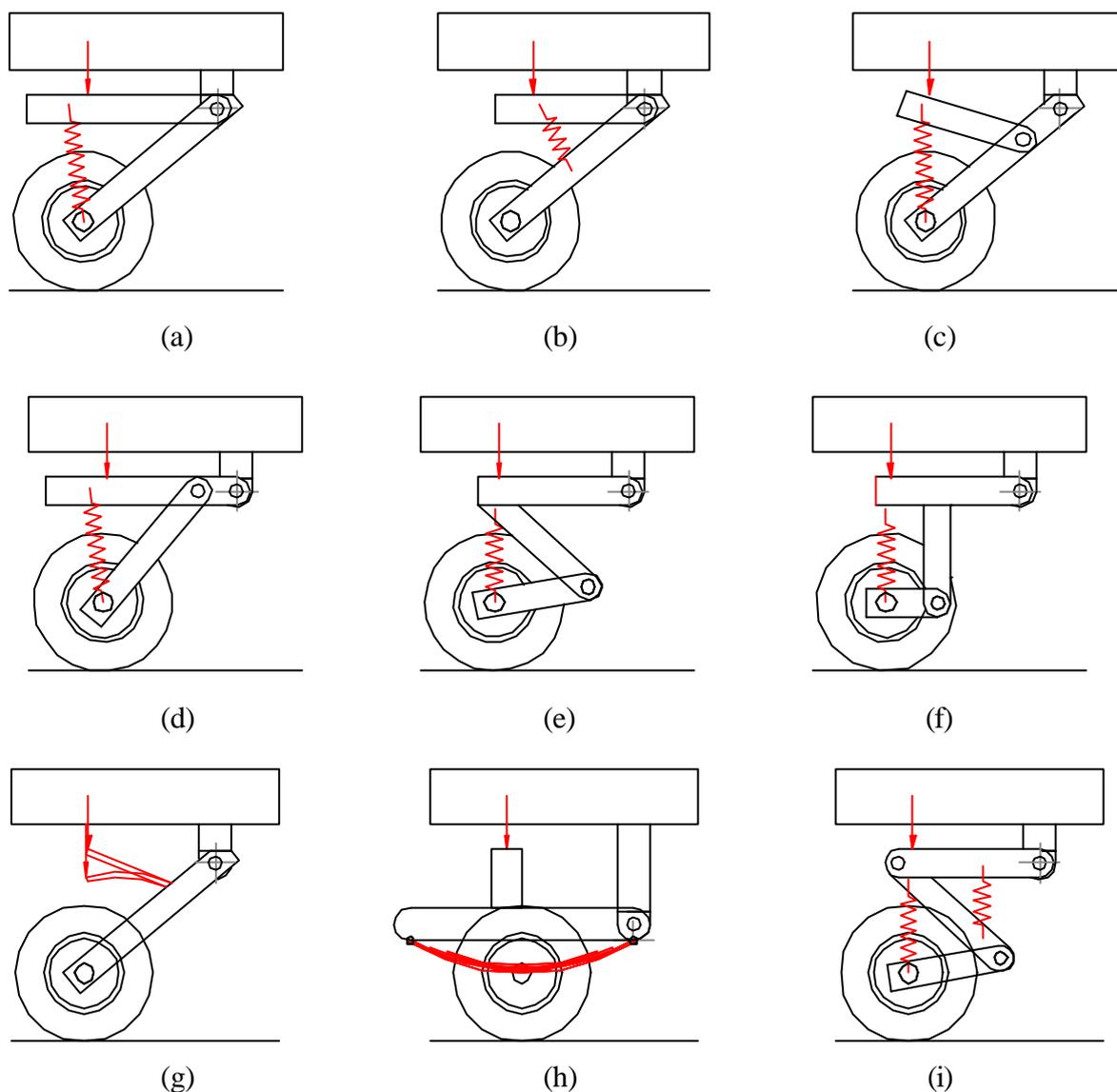


Figura 4.1 – Estudo preliminar da inserção de um elemento elástico no conjunto.

4.2 Propondo soluções

Com base em todas as informações até então apresentadas, gerou-se seis alternativas passíveis de implementação. Todas apresentam simetria no plano xy , e, conseqüentemente, apresentam aplicação de carga nos dois lados do eixo e o cilindro está posicionado no centro transversal do carro. Além disso, todas utilizam o mesmo conjunto do rodado, inclusive o eixo.

As três primeiras são muito semelhantes entre si, e mantêm muitas características do projeto original. Fazem uso de uma viga articulada e de molas helicoidais ou pneumáticas, diferenciando-se pela posição delas. Esta diferença é significativa no que diz respeito a

transmissão da carga ao eixo, acarretando na variação do número de componentes envolvidos e suas dimensões.

A quarta proposta é praticamente igual ao projeto atual mantendo muitos componentes, exclusive o elemento rígido que liga o cilindro ao garfo, que fora substituído por um flexível.

A quinta proposta contempla a utilização de feixe de molas, e mantém poucas características da versão em uso.

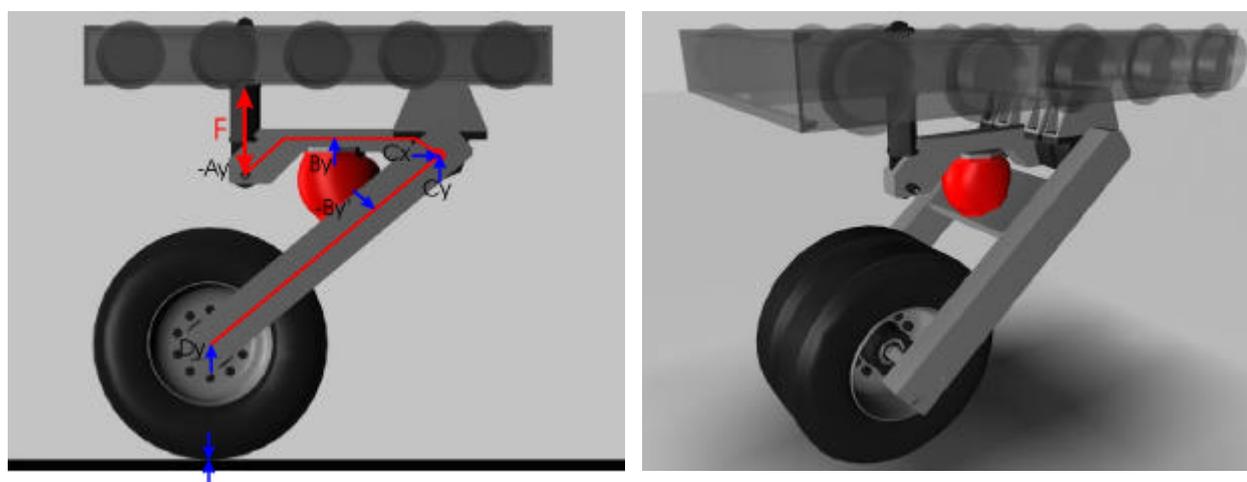
Por fim, uma proposta com muitas diferenças, devidas, basicamente, a um sistema de deslocamento vertical das rodas, no qual pode-se utilizar molas helicoidais ou pneumáticas.

Segue uma descrição mais detalhada das alternativas de solução.

4.2.1 Proposta 1. Mola posicionada entre o cilindro e os mancais

Como primeira alternativa, esta apresenta a inserção de uma viga articulada e uma mola (helicoidal ou pneumática) transmitindo a carga ao garfo, posicionada entre o cilindro e os mancais.

Esta configuração aplica aos componentes cargas elevadas (momento fletor no garfo e na viga articulada), além disso, a análise estrutural do caso estático acusa que as reações causadas no carro fazem com que este desloque-se para cima explorando a existência de folga entre as rodas guias e os trilhos. Desta maneira, o mecanismo tende a funcionar com menos suavidade quando no início e no meio do ciclo. Esta proposta de solução está ilustrada na figura 4.2, utilizando mola pneumática.



(a) – Vista lateral (diagrama de corpo livre)

(b) – Perspectiva

Figura 4.2 – Proposta 1.

4.2.2 Proposta 2. Mola posicionada sob o cilindro.

Esta proposta é semelhante à anterior e diferencia-se basicamente pela localização da mola que está agora alinhada com o cilindro hidráulico. Neste caso, sugere-se a utilização de molas de aço, helicoidais. Os mancais permanecem na mesma posição, sugerindo o centro de giro da viga articulada. Esta alternativa de solução está ilustrada na figura 4.3.

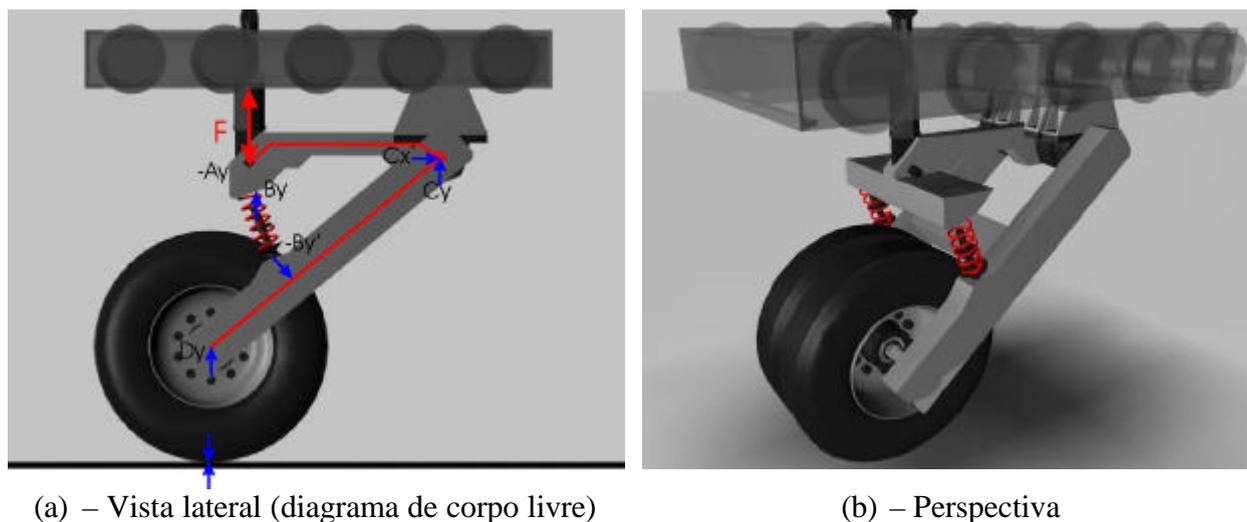


Figura 4.3 – Proposta 2.

A análise estática do conjunto indicou que as reações geradas no carro cumprem com as necessidades citadas no capítulo 3.3.2. Nesta configuração o garfo é o componente mais solicitado.

4.2.3 Proposta 3. Mola posicionada diretamente sobre o eixo

Esta alternativa também mantém os mancais na posição original, cujos centros coincidem com o centro de giro da viga articulada adicionada. Diferente das anteriores, a carga neste caso é transmitida diretamente sobre o eixo, reduzindo consideravelmente as solicitações impostas ao garfo – não há braço de alavanca. Com a adição da(s) mola(s), a principal função do garfo passa a ser simplesmente guiá-las e manter o alinhamento do eixo. A viga articulada, porém, caracteriza-se por uma viga bi-apoiada que sofre um elevado momento fletor. Apesar disso, este fato causa uma boa distribuição de reações no carro.

O sistema proposto está ilustrado na figura 4.4 utilizando molas helicoidais, embora as molas pneumáticas também sejam de possível aplicação.

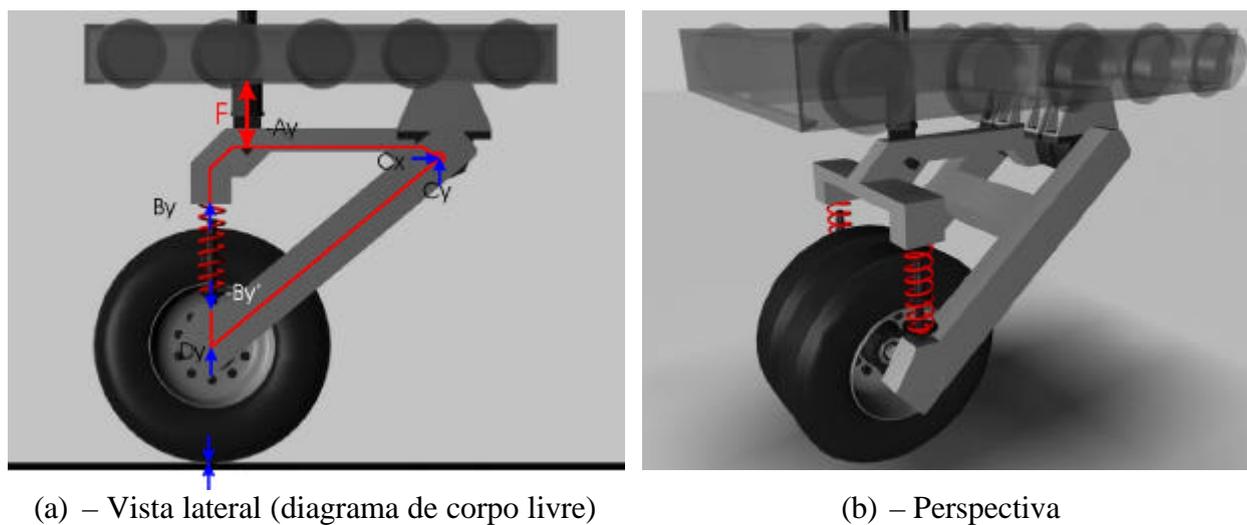


Figura 4.4 – Proposta 3.

4.2.4 Proposta 4. Feixe de molas tipo semi-*cantilever*

Esta proposta objetiva simplesmente a substituição do braço de alavanca do garfo, que é um elemento extremamente rígido, por um outro flexível. Este último pode ser um feixe de molas tipo semi-*cantilever* (figura 4.5).

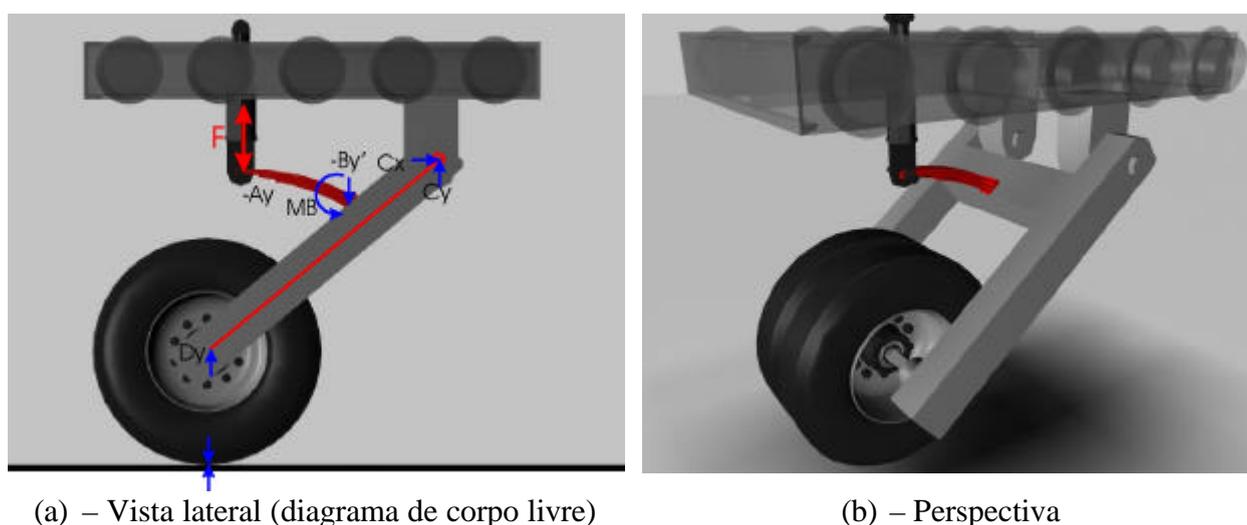


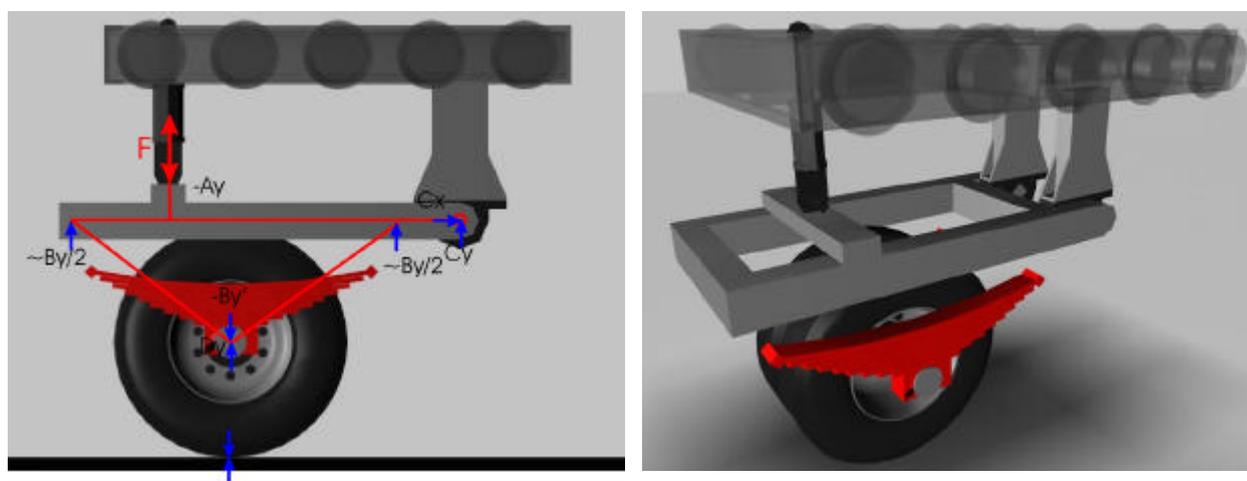
Figura 4.5 – Proposta 4.

Apesar de simples e de aparente baixo custo de execução, esta alternativa apresenta algumas características desfavoráveis, como por exemplo: a dificuldade de implementação da célula de carga, faixa de aplicação deste tipo de mola bem como sua obtenção.

4.2.5 Proposta 5. Feixe de molas.

A utilização de um feixe de molas como elemento elástico leva à alteração de alguns elementos estruturais do carro, em razão de sua fixação. Necessita de pontos de apoio localizados a uma determinada distância do eixo das rodas. O curso deste tipo de mola depende desta distância. Para comportar este componente, a estrutura deve ser composta de um quadro articulado onde são fixadas as extremidades da mola. O eixo das rodas do carro é fixado diretamente no centro das molas, através de braçadeiras. Embora rústico, este sistema reduz bastante a massa livre da suspensão (apenas rodas e eixo), tendendo-se, desta forma, a um sistema que apresente boa resposta dinâmica. Apesar disso, este sistema pode apresentar dificuldade no que diz respeito ao alinhamento do eixo, pois, como citado no capítulo 2.6.2 este tipo de mola necessita de uma barra estabilizadora para restringir o movimento de rotação em relação ao seu próprio eixo.

De acordo com análise estrutural estática realizada, esta estrutura gira sobre o eixo z , suavizando assim seu funcionamento. Este arranjo está ilustrado na figura 4.6.



(a) – Vista lateral (diagrama de corpo livre)

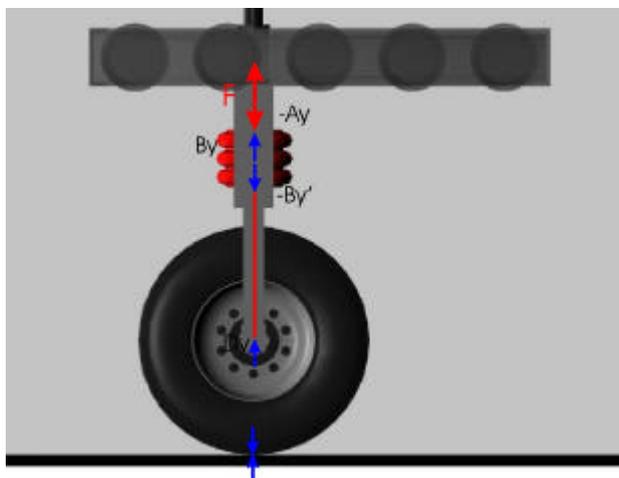
(b) – Perspectiva

Figura 4.6 – Proposta 5.

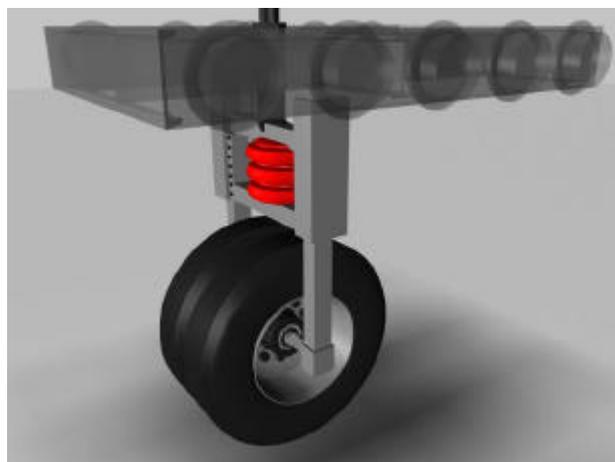
4.2.6 Proposta 6. Sistema deslizante.

Entre todas as alternativas esta é a que sugere um maior número de alterações na configuração original. Em uma tentativa de substituir o sistema de deslocamento existente (articulado) por um novo (deslizante) são adicionados então dois trilhos, fixados ao carro, que servem como guias para garfo que comporta o rodado durante o deslocamento vertical. Molas

pneumáticas ou helicoidais são posicionadas sobre o garfo ou paralelas às rodas, como ilustrado na figura 4.7 e figura 4.8 respectivamente. Esta configuração também reduz bastante a massa suspensa do conjunto.

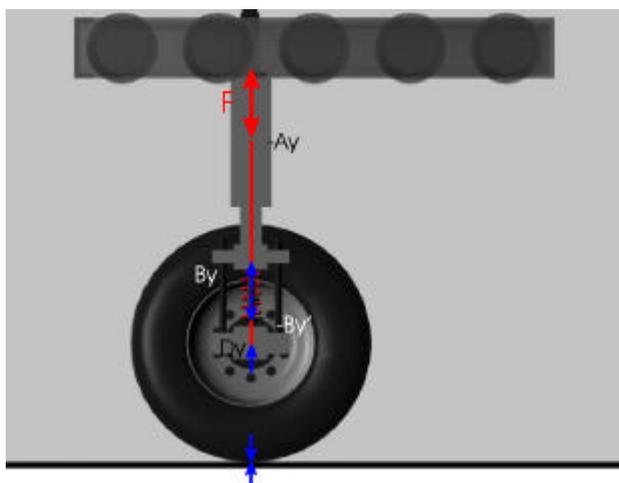


(a) – Vista lateral (diagrama de corpo livre)



(b) – Perspectiva

Figura 4.7 – Proposta 6 (molhas pneumáticas).



(a) – Vista lateral (diagrama de corpo livre)



(b) – Perspectiva

Figura 4.8 – Proposta 6 (molhas helicoidais).

Este sistema apresenta dificuldade na fabricação e manutenção dos trilhos, além de serem de alto custo. Em uma análise estrutural estática, as reações causadas no carro não satisfizeram com eficácia as necessidades, ocorrendo instabilidade estrutural.

4.3 A configuração da proposta escolhida: proposta 3

Seguindo às prioridades definidas anteriormente com as especificações de projeto (capítulo 3.5), tem-se seis propostas passíveis de execução, todas viáveis técnica e economicamente. Uma, contudo, sobressai-se perante as demais. Partindo de uma idéia simples, a aplicação da carga diretamente sobre o eixo, apresentada pela proposta 3, apresentou algumas vantagens sobre as outras. Segue uma descrição comparada das especificações de projeto que melhor se classificaram na casa da qualidade, exclusive o custo que já fora previamente abordado (capítulo 3.5.1).

- Deformações do garfo – Assim como a sexta alternativa, a proposta escolhida apresenta as menores deformações no garfo. A transmissão da carga através da compressão de colunas faz com que o restante dos componentes sejam menos solicitados, sofrendo menores deformações;
- Componentes padronizados – Todas as propostas se equivalem, quanto a este quesito;
- N. de componentes envolvidos – A quarta alternativa supera suas concorrentes sucedida pela alternativa cinco, em seguida pelas demais;
- Vida útil – Esta especificação é vencida pela proposta três, pois sua estrutura sofre solicitações de baixa magnitude. Além disso, de acordo com os fabricantes das molas pneumáticas, [Firestone, 1997], estas apresentam vida útil superior às suas similares metálicas;
- Massa do garfo – Possuindo menores solicitações o garfo da alternativa três pode ser formado por perfis de menor resistência mecânica, portanto de menor massa.
- Resposta em frequência – Relacionada com a massa suspensa e o tipo de molas utilizadas. Apesar de possuir a menor massa suspensa dentre todas alternativas, a proposta cinco utiliza feixe de molas, que são de elevada rigidez.

Ainda, assim como a primeira e a terceira, esta alternativa possui o mesmo princípio de funcionamento do sistema de suspensão independente de braço articulado, diferenciando-se, somente, pela direção de deslocamento da roda. Referência da eficácia deste tipo de arranjo.

O conceito de solução e seus principais componentes estão ilustrados na figura 4.9 e listados na tabela 4.1.

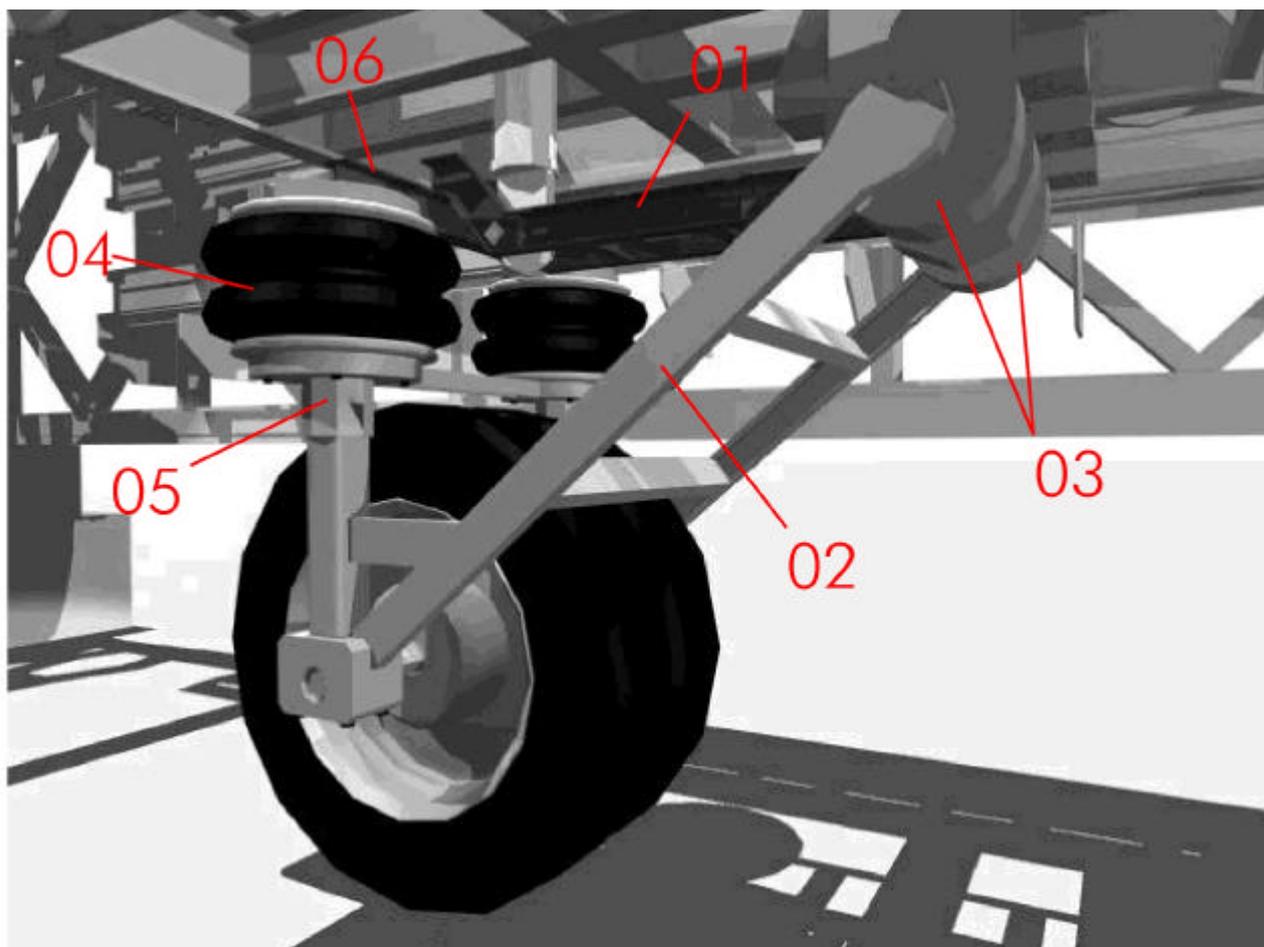


Figura 4.9 – Vista 3D da alternativa a ser desenvolvida.

Tabela 4.1 – Principais componentes da proposta 3 para o ST.

Num.	Denominação	Quant.
01	Garfo articulado	1
02	Viga articulada	1
03	Mancais	4
04	Molas pneumáticas	2
05	Células de carga	2
06	Viga transversal	1

A escolha pela utilização de molas pneumáticas se deve aos seguintes fatores:

- componente com alto fator tecnológico;
- mais de um fabricante (grandes empresas);
- possibilidade de regulagem (curso e pressão) de acordo com a carga aplicada;
- possibilidade de utilização de vários modelos;
- tendência do mercado na utilização em caminhões [Ponticel, 2000];
- facilidade de implementação;
- frequência natural mais baixa que as similares rígidas [Gueler, 1994];
- tolera desvios laterais e inclinação das extremidades;

Esta mola apresenta como desvantagem o fato de necessitar de um compressor de ar que tenha capacidade de suprir a pressão indicada para a mola. Apesar disto este recurso possibilita a regulagem da mola permitindo que tenha o mesmo padrão de resposta para uma faixa ampla de utilização.

5. PROJETO PRELIMINAR

Como resultado obtido junto ao projeto conceitual, a figura 4.9 apresenta a configuração do projeto preliminar para o sistema de aplicação de carga do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS.

Neste capítulo, inicialmente apresenta-se uma descrição do mecanismo de aplicação de carga, seus movimento e a faixa de utilização do equipamento. Em seguida, estão apresentados os locais que sofrem as maiores cargas. Encerrando este capítulo, o efeito dinâmico do conjunto é brevemente abordado.

5.1 Mecanismo de aplicação da carga

Este sistema é um mecanismo articulado de duas barras solidário ao carro, articuladas em suas extremidades por mancais de rolamento e unidas por molas pneumáticas na extremidade oposta. Esta configuração permite o movimento relativo entre as partes. A atuação do cilindro hidráulico possibilita a rotação do conjunto que resulta nas duas posições das rodas: abaixada – em contato com a pista, e levantada – sem contato com a pista, para retorno durante o ciclo. Na figura 5.1 estão ilustradas as posições levantada, abaixada sem e com aplicação de carga, como percebe-se a compressão das molas.

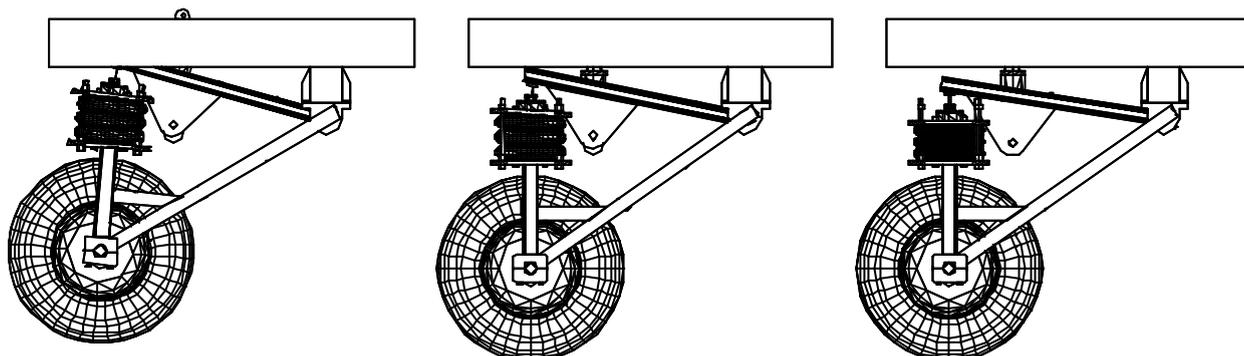


Figura 5.1 – O posicionamento das rodas.

Para atender as necessidades de testar os diversos tipos de pavimentos, a carga nominal estabelecida para este projeto é de 150 kN, aplicados no eixo. O monitoramento da carga durante o ciclo de trabalho é realizado por duas células de carga montadas em série com as molas pneumáticas fixadas, também em série, com o eixo da roda. Como acontece o monitoramento

constante da magnitude da carga nas duas extremidades do eixo, controla-se o alinhamento do mesmo, ou seja, a distribuição da carga no pavimento. A combinação da carga nominal de teste com a pressão da mola pneumática, devido as suas características técnicas, possibilita a regulagem da altura de trabalho. Este mecanismo de carga está projetado para trabalhar em uma superfície irregular, podendo ter ondulações com amplitudes até 100 mm (de pico a pico) a partir da linha média, as quais surgem durante o período de teste.

Na figura 5.2 estão ilustradas vistas laterais do novo sistema de aplicação de carga do ST quando sujeito às imperfeições do pavimento. Pode-se observar a correção da altura da linha média, efetuada pelo cilindro hidráulico, deslocada para baixo de acordo com o pavimento.

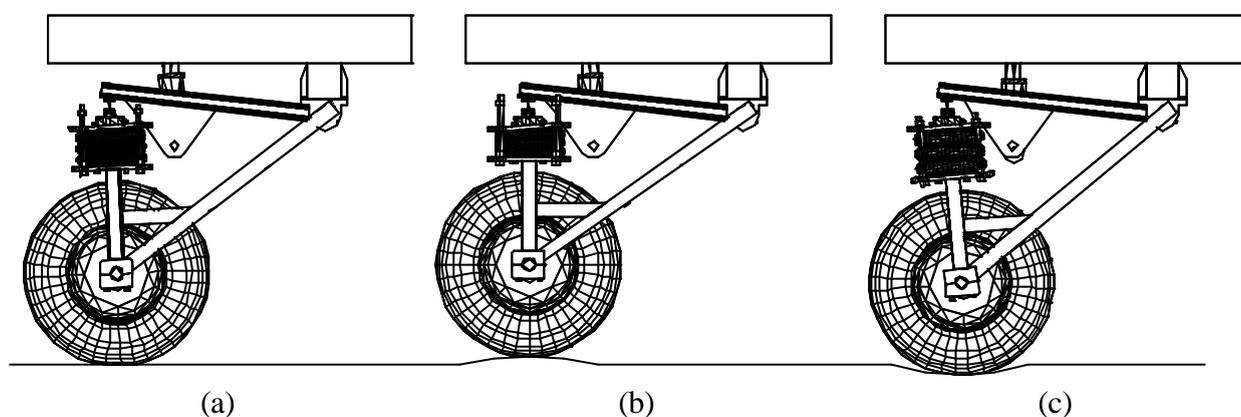


Figura 5.2 – A atuação das molas no movimento do sistema de aplicação de carga do ST.

A mudança relativa de posição dos componentes articulados causam a inclinação de $2,5^\circ$ nos dois sentidos das extremidades de fixação das molas. Este efeito é absorvido pelas molas pneumáticas escolhidas, como pode ser observado na figura 5.3.

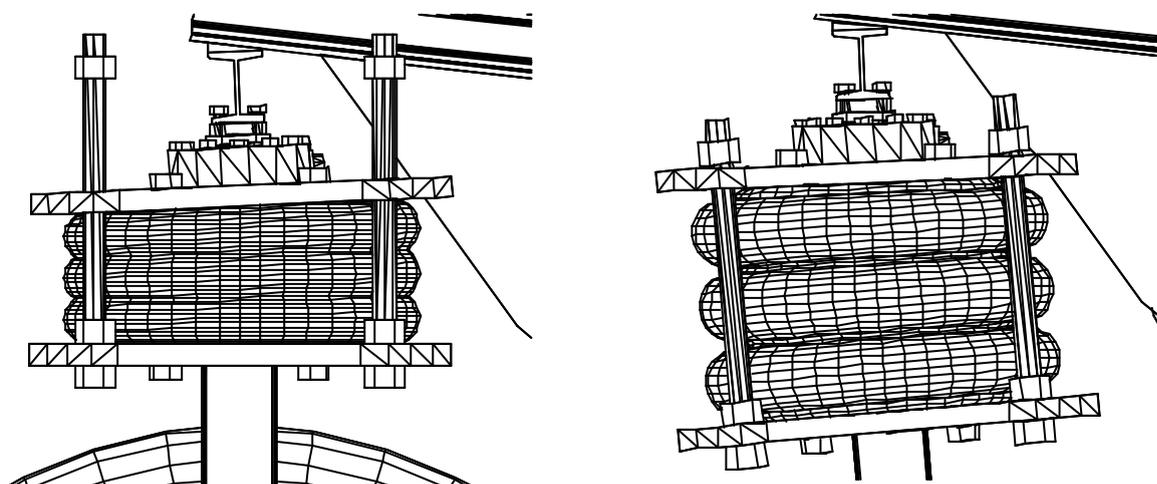


Figura 5.3 – Detalhe da inclinação das molas do sistema articulado.

Mantendo a necessidade de ensaio em uma só direção, e o princípio hidráulico de posicionamento e aplicação de carga, o sistema possibilita que os pneus não tenham contato com o solo durante o retorno do carro.

A carga advinda do cilindro hidráulico (aproximadamente 210 kN) é diretamente aplicada próxima a extremidade posterior da viga articulada, sendo distribuída desigualmente entre a viga I e os mancais de rolamento. Isto faz com que uma pequena parcela desta carga force a parte anterior do carro para baixo, conforme as restrições de projeto (capítulo 3.3.2). A carga efetiva, ou seja, a carga transmitida à viga I fica em torno de 70% da originada no cilindro hidráulico.

5.2 Dimensionamento

Utilizando-se os métodos tradicionais de resistência dos materiais fez-se uma análise estática do conjunto considerando as solicitações atuantes nos diversos componentes do sistema. Sua geometria simétrica permitiu ser simplificada, sendo considerada plana, podendo, desta forma, conhecer a magnitude das cargas envolvidas nos componentes possibilitando o dimensionamento dos mesmos. Nesta análise a carga aplicada foi inclinada $\pm 5,0^\circ$ (figura 5.3) simulando uma situação crítica na coluna e restante do garfo, com uma carga diferente de compressão pura. Para a viga articulada, também simétrica, foi efetuado o mesmo procedimento.

Na figura 5.4 está ilustrada uma representação esquemática simplificada do conjunto com indicação dos pontos das maiores solicitações dos componentes. Na tabela 5.1 estão à mostra as tensões máximas ocorridas durante a aplicação da carga. No Apêndice V estão apresentados os respectivos diagramas de corpo livre nos casos citados de carregamento. As dimensões dos componentes estão apresentadas em conjunto e individualmente no Apêndice II.

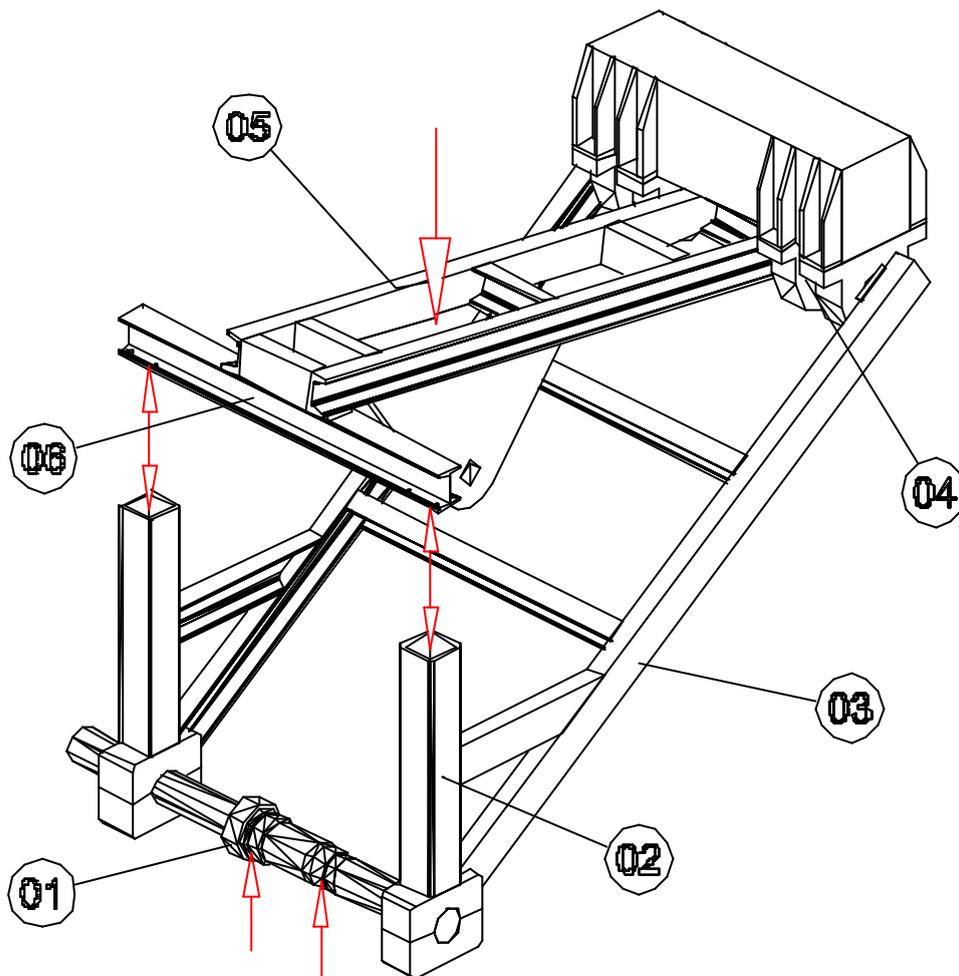


Figura 5.4 – Representação esquemática do conjunto com seus pontos críticos.

Tabela 5.1 – As solicitações e as tensões nos componentes escolhidos.

Local	Solicitações	Escolha	Tensões
01	Flexão	Eixo Cilíndrico	8,0 MPa
02	Compressão e flexão	Perfil tubular quadrado	0,4 MPa
03	Flexão e compressão	U	1,1 MPa
04	Cortante	Eixo cilíndrico	7,0 MPa
05	Flexão	Perfil U duplo reforçado	3,0 MPa
06	Flexão	Perfil I	6,3 MPa

A adição das chapas de fixação inferior do cilindro (item 12 da figura 6.4) possibilitam a instalação do atuador hidráulico em um espaço diminuto, deslocando-o para baixo. Além disso as chapas soldadas à viga articulada reduzem as solicitações na mesma distribuindo a carga em uma extensão dela.

5.3 Análise dinâmica

Qualquer movimento que se repete depois de um intervalo de tempo é chamado de vibração ou oscilação [Rao, 1995]. A excitação aplicada no garfo articulado devido as imperfeições do pavimento fazendo o conjunto que forma a massa suspensa oscilar verticalmente, caracteriza o fenômeno de vibração forçada por excitação na base.

Neste caso tem-se uma massa suspensa articulada em mancais ligada em molas, caracterizando um sistema com um grau de liberdade. O conjunto garfo articulado e o conjunto do rodado compõem a massa suspensa. A mola equivalente do sistema é composta de duas molas pneumáticas em paralelo e um ou dois pneus também em paralelo. A frequência de excitação causada pelo piso é proporcional a velocidade de deslocamento do conjunto que é baixa (20 km/h). Além disso, não há vibração livre, pois, quando suspenso, as molas distendem até o limite imposto pelos batentes, que suportam rigidamente o conjunto. O sistema equivalente do conjunto está ilustrado na figura 5.5.

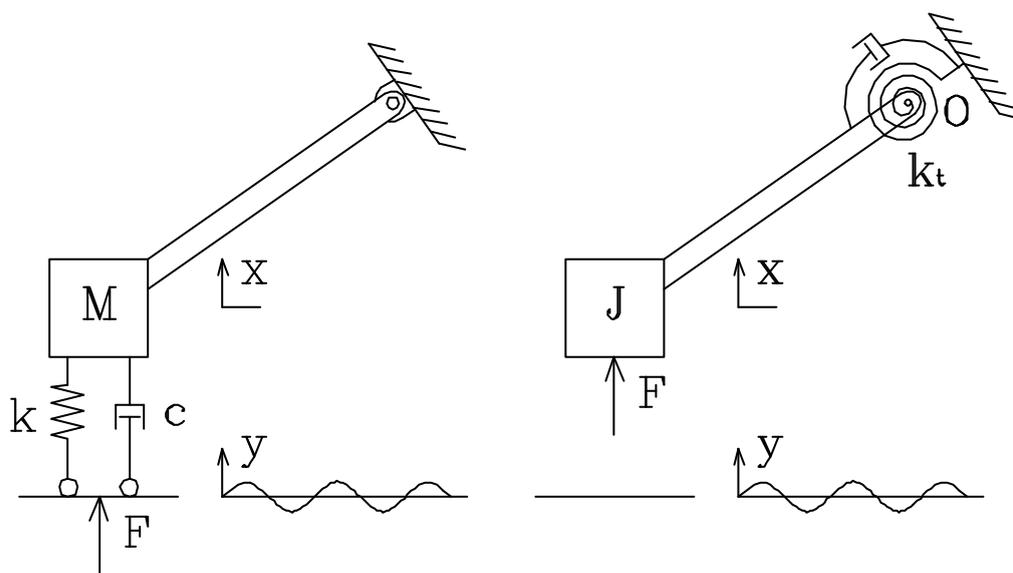


Figura 5.5 – Sistema mecânico equivalente.

Nesta figura, a massa m representa a massa do garfo, as constantes k_m , c_m e k_p são os coeficientes de rigidez e amortecimento das molas e o coeficiente de rigidez dos pneus, respectivamente. A força de excitação F advém do pavimento, sendo sua frequência e amplitude conforme o estado de destruição do mesmo.

Apesar desta descrição, a incerteza de alguns parâmetros torna esta análise pouco confiável. A frequência de excitação do piso é a principal delas, devido aos seguintes motivos:

quando relacionada com a frequência natural do sistema fornece a relação de frequências, que é o parâmetro que indica se o sistema entrará em ressonância; é difícil de ser estimada pois os valores apresentados pela literatura referem-se a pavimentos deformados sob outras condições de carregamentos. O efeito da excitação causada pelas imperfeições do pavimento nos veículos pesados foi estudado por Gueler, (1994), que apresenta um estudo experimental envolvendo análise de vibrações nos chassis de dois caminhões com diferentes configurações de suspensões.

Além disto, o índice de amortecimento das molas não é fornecido pelo fabricante destes componentes, que também necessita ser estimado, bem como o dos pneus.

Devido a tantas aproximações esta análise encontra-se no Apêndice VI utilizando-se uma função periódica como fonte de excitação do pavimento e um índice de amortecimento igual a 0,1.

6. PROJETO DETALHADO

Neste capítulo é apresentado o *layout* definitivo para o novo sistema de aplicação de carga do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS. Inicialmente faz-se a apresentação geral do novo mecanismo, em seguida uma visão detalhada dos conjuntos e componentes que o compõem, bem como seus processos fabricação e montagem. Os demais desenhos detalhados das partes estão detalhadas no Apêndice II.

6.1 O modelo final

Trata-se de um projeto otimizado, em que os diversos componentes utilizados são comerciais, padronizados. Os componentes especiais foram projetados para serem fabricados por processos convencionais. O dimensionamento de todo o conjunto, bem como seus respectivos componentes, apresentam uma geometria adequada para executar os movimentos de acordo com a faixa de utilização e carga aplicada.

Os sistemas de deslocamento horizontal, tanto o longitudinal tracionado por cabos como o transversal que desloca toda a estrutura metálica, permanecem os mesmos. Da mesma forma o princípio de aplicação de carga que utiliza um cilindro hidráulico permanece inalterado.

O protótipo completo está ilustrado na figura 6.1 e é composto de três conjuntos: *conjunto garfo articulado*, *conjunto viga articulada* e *conjunto do rodado*, nas cores laranja, violeta e amarela, respectivamente. A descrição detalhada destes estão apresentadas nos sub-ítemos seguintes.

A possibilidade do movimento relativo entre o *conjunto garfo articulado* e o *conjunto viga articulada* que regulado pelas molas pneumáticas proporcionam ao sistema um funcionamento similar às suspensões independentes (figura 6.2).

A presença das células de carga permitem o monitoramento constante da magnitude da carga aplicada em cada lado do eixo.

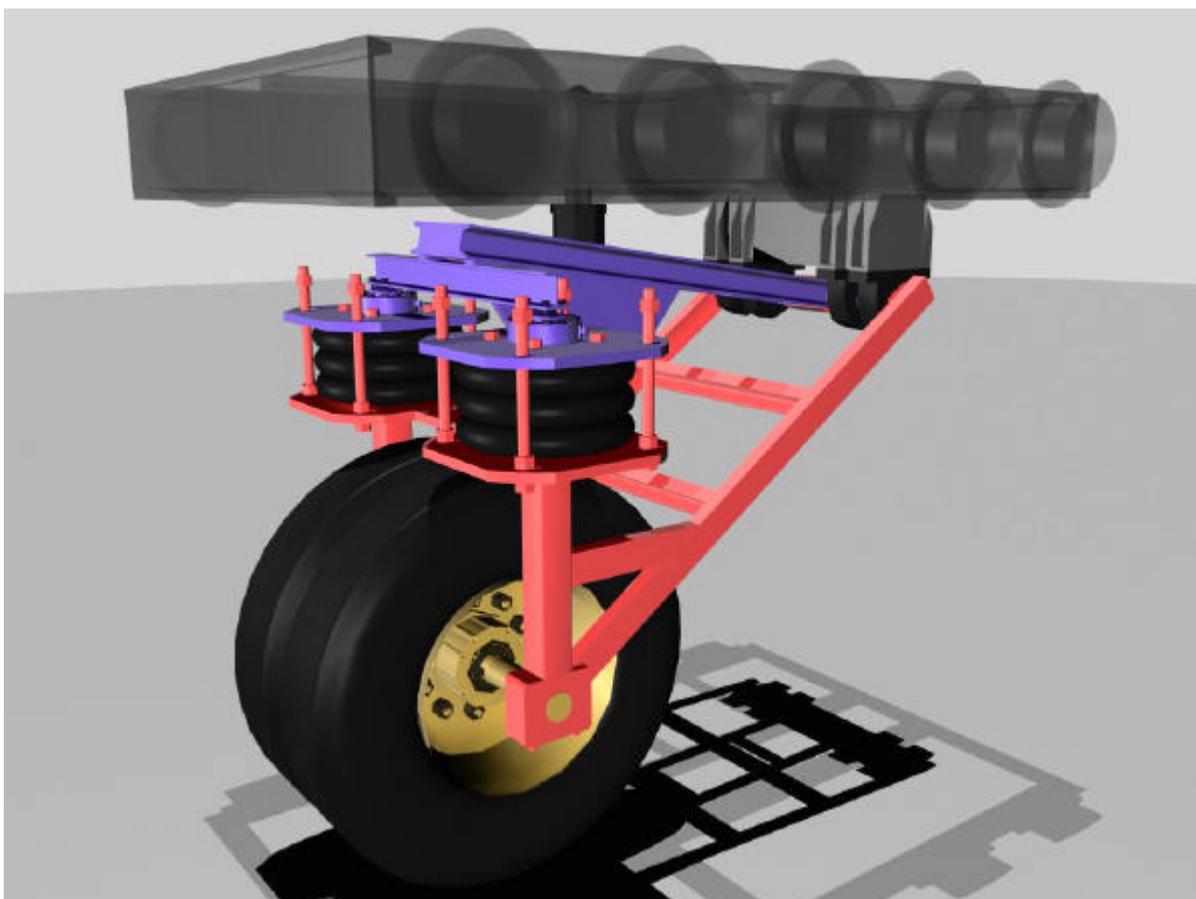


Figura 6.1 – O novo mecanismo de aplicação de carga do ST.

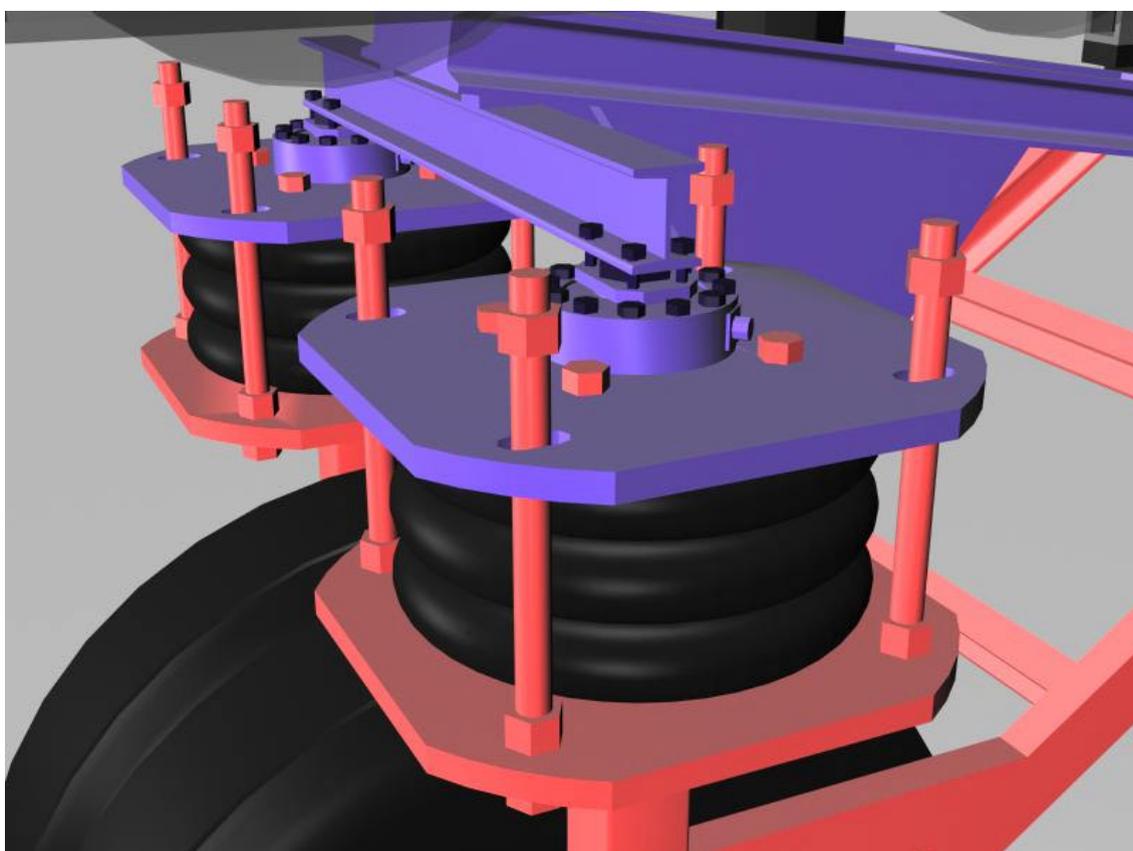


Figura 6.2 – Detalhe das molas e células de carga.

6.1.1 O garfo articulado

O *conjunto garfo articulado* está ilustrado na figura 6.3 e a tabela 6.1 mostra a lista de componentes deste conjunto.

Ele é composto basicamente de perfis e chapas de aço comerciais, cortados, posicionados e soldados. Neste processo o alinhamento entre os mancais e o eixo é de extrema importância, sendo necessária a utilização de gabaritos durante a etapa da soldagem dos componentes.

A transmissão da carga através da compressão de elementos diretamente sobre o eixo permite que o restante da estrutura seja composta de elementos de baixo peso. Este fato acarretou na diminuição da massa suspensa, melhorando a resposta dinâmica do sistema.

O *conjunto fixação do eixo* (01) permite que o *conjunto do rodado* seja simplesmente solto do conjunto, sendo sua montagem e alinhamento do eixo de similar simplicidade. Os parafusos que o compõe estão sujeitos ao carregamento somente durante o retorno suspenso do conjunto, suportando o peso do *conjunto do rodado*.

Os componentes *base inferior da mola* (06) bem como suas similares pertencentes ao *conjunto garfo articulado* são utilizadas para a fixação das molas pneumáticas e seus batentes (11).

Este garfo contempla a utilização dos mesmos mancais em uso, permanecendo em suas posições originais. Por isso, este sistema não está detalhado.

Tabela 6.1 – Componentes do *conjunto garfo articulado*.

Comp.	Denominação	Massa (kg)	Quant.
01	Conjunto fixação do eixo	14,6	2
02	Coluna	8,9	2
03	Guia do garfo	16,0	2
04	Reforço da coluna	3,7	2
05	Reforço da guia do garfo	7,7	2
06	Base inferior da mola	31,9	2
07	Reforço do garfo	4,7	1
08	Conjunto fixação mancal	3,4	2
09	Parafuso fixação do eixo	0,2	8
10	Parafuso (3/8 – 16) fixação da mola	0,2	8
11	Parafuso do batente	0,5	8
12	Porcas do batente	0,1	16

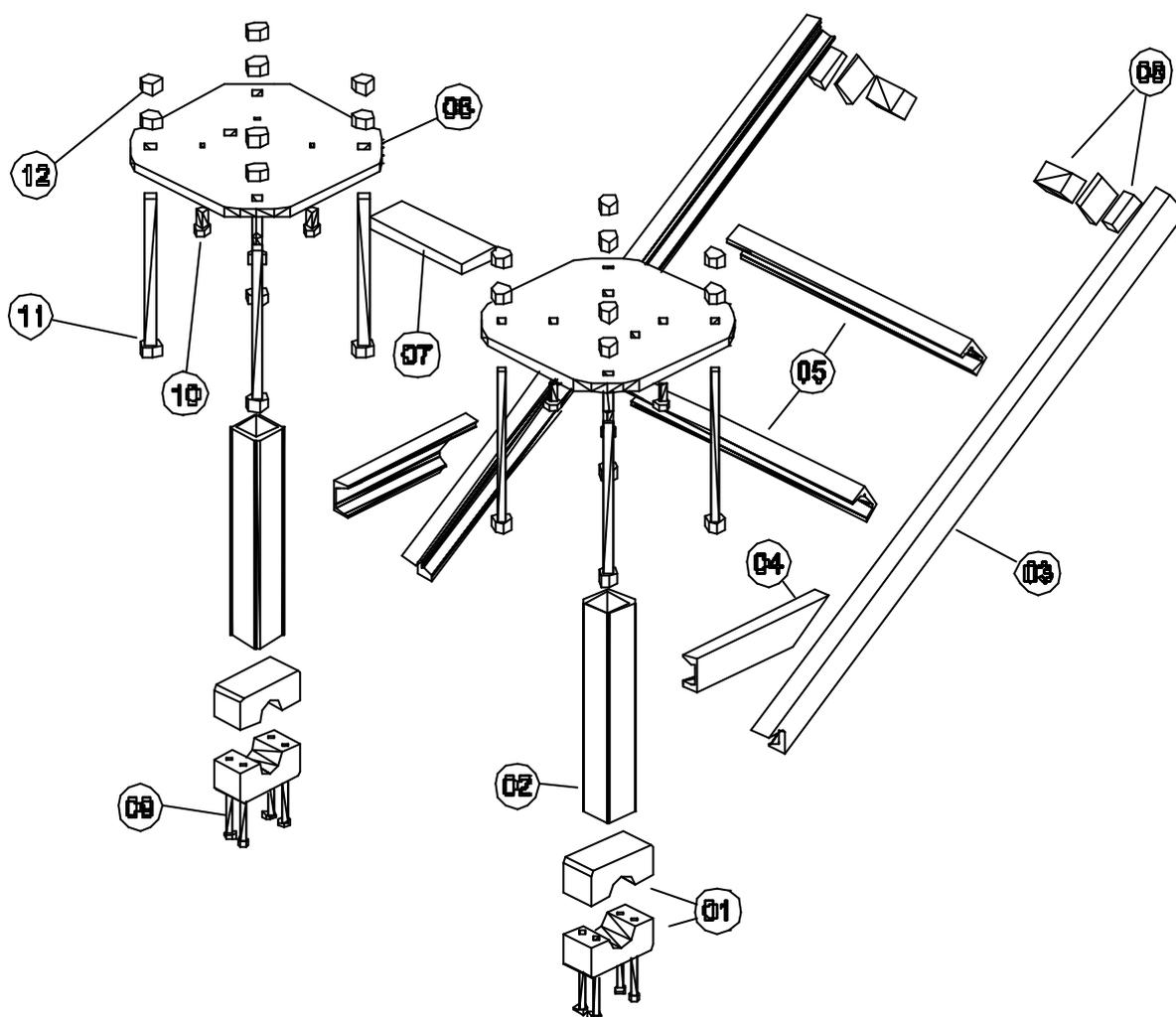


Figura 6.3 – O conjunto garfo articulado.

6.1.2 A viga articulada

Este conjunto recebe a maior carga envolvida e transmite parte dessa para as molas. A viga articulada é composta basicamente de dois perfis U paralelos unidos distantes de si o suficiente para a passagem do cilindro hidráulico entre eles (figura 6.4). Chapas de aço (12), com um formato que possibilitasse deslocar o ponto de união com o cilindro para baixo, são soldadas a eles, distribuindo a carga em um trecho longo da viga, diminuindo consideravelmente a magnitude das solicitações na mesma. Estas, transmitem a carga a *viga I* (07) que repassa às células de carga, e, conseqüentemente, às molas pneumáticas. Na outra extremidade a viga está articulada em mancais, cujos centros coincidem com os mancais do garfo. A tabela 6.2 mostra a lista de componentes do *conjunto viga articulada*.

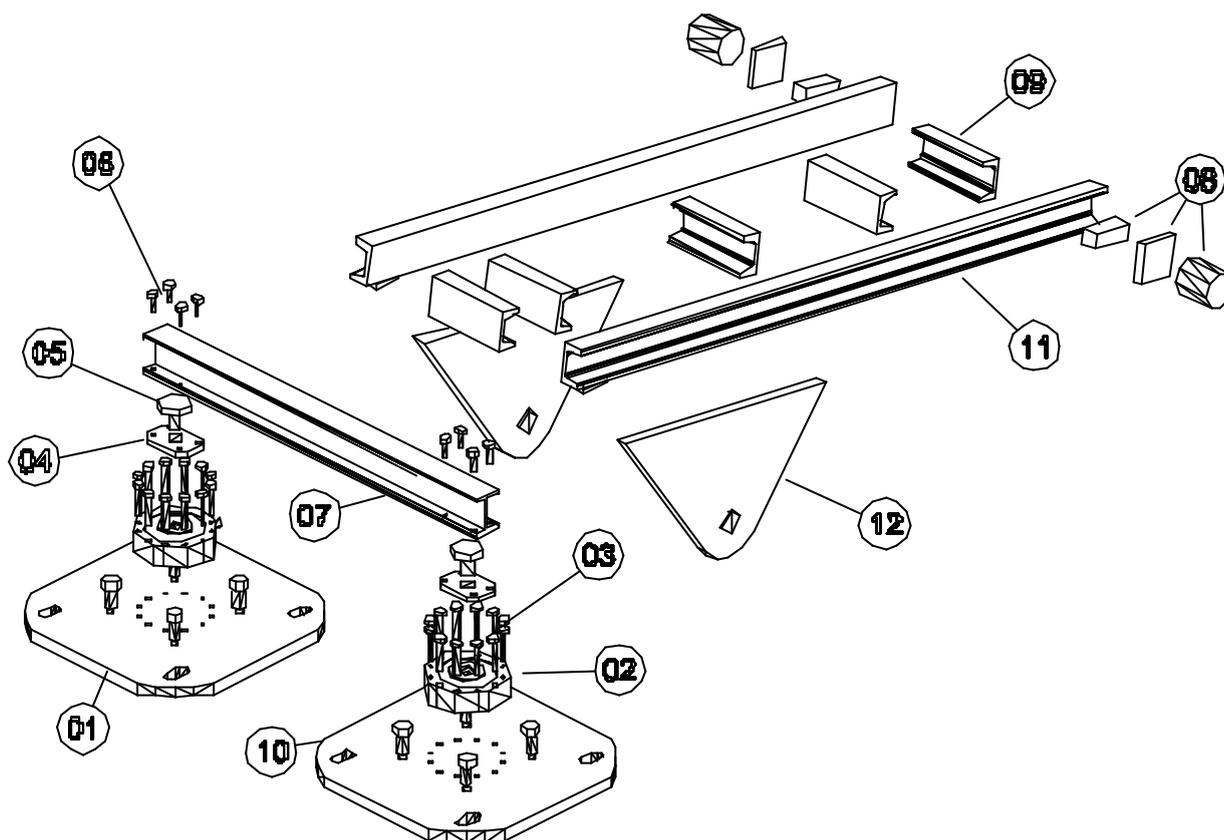


Figura 6.4 – O conjunto viga articulada.

Tabela 6.2 – Componentes do conjunto viga articulada.

Comp.	Denominação	Massa (kg)	Quant.
01	Base superior da mola	31,4	2
02	Célula de carga	***	2
03	Parafuso (10 x 1,5) fixação célula de carga	$5,0 \times 10^{-2}$	24
04	Chapa fixação célula de carga	0,4	2
05	Parafuso (30 x 2,0) fixação célula de carga	0,5	2
06	Parafuso (10 x 1,5) fixação da chapa	$4,0 \times 10^{-2}$	8
07	Viga I	7,1	1
08	Conjunto fixação mancal	3,4	2
09	Reforço viga articulada	2	5
10	Parafuso (3/8 – 16) fixação da mola	0,2	8
11	Viga articulada	14,8	2
12	Chapa fixação inferior do cilindro	15,9	2

Esta configuração permite um ajuste fino quanto ao alinhamento vertical do eixo, regulando a posição relativa entre os *parafuso (30 x 2,0) fixação célula de carga* e as mesmas. Na figura 6.5 pode ser visto um detalhe desta união em duas situações extremas.

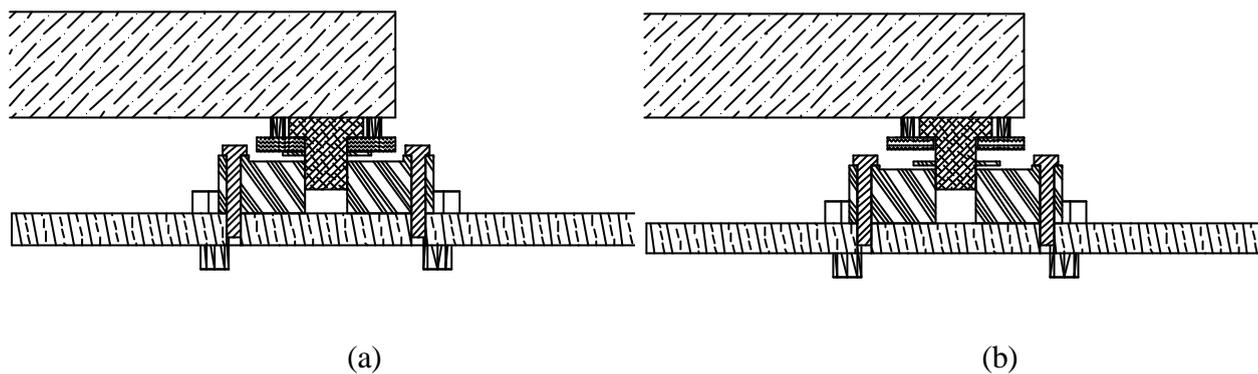


Figura 6.5 – Detalhe da célula de carga.

6.1.3 O conjunto do rodado

Utiliza cubos, rolamentos e seus elementos de fixação, aros e pneus comerciais. Neste conjunto, apenas o eixo não é diretamente encontrado no comércio, necessitando ser usinado. O eixo é confeccionado de acordo com o cubo de roda escolhido. O *conjunto do rodado* está ilustrado na figura 6.6 e seus componentes listados na tabela 6.3.

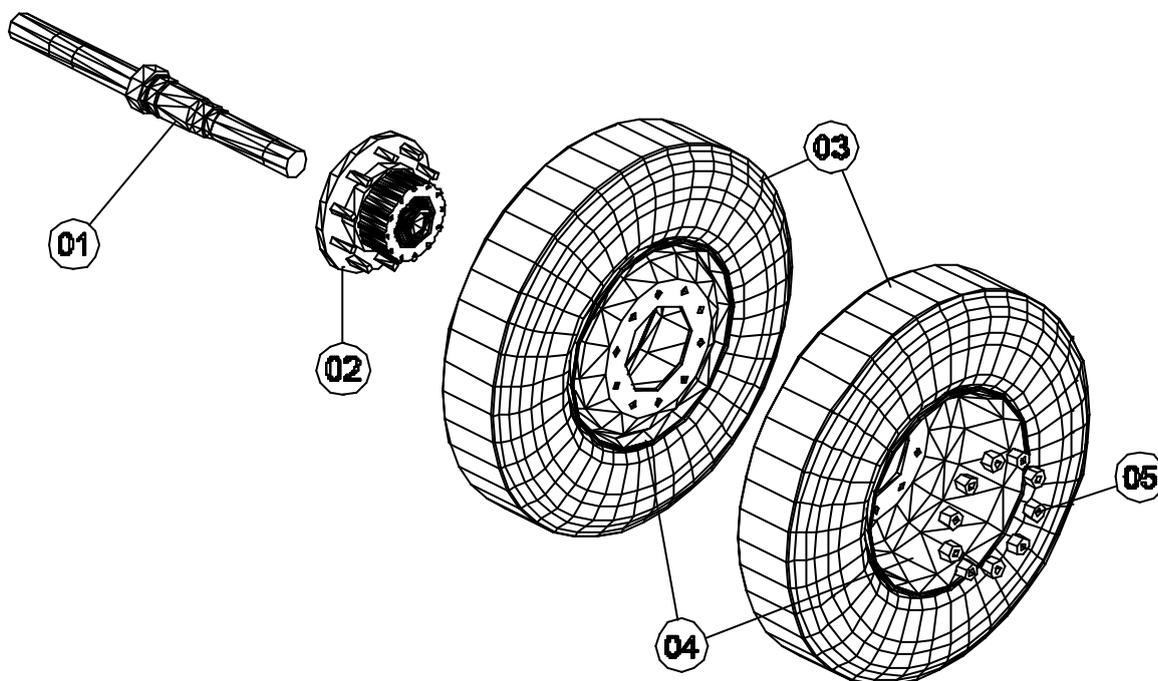


Figura 6.6 – O conjunto do rodado.

Tabela 6.3 – Componentes do conjunto do rodado.

Comp.	Denominação	Massa (kg)	Quant.
01	Eixo	33,5	1
02	Cubo de roda completo	30,8	1
03	Pneu 10,0 R20	***	1 ou 2
04	Aro R20	38,0	1 ou 2
05	Porca fixação do aro	0,3	10

Este projeto faz uso do cubo de roda completo modelo EDC NL12 da linha de veículos pesados da Volvo (figura 6.7). Este conjunto é composto pelos elemento listados na tabela 6.4, e está ilustrado montado e em corte na figura 6.8.

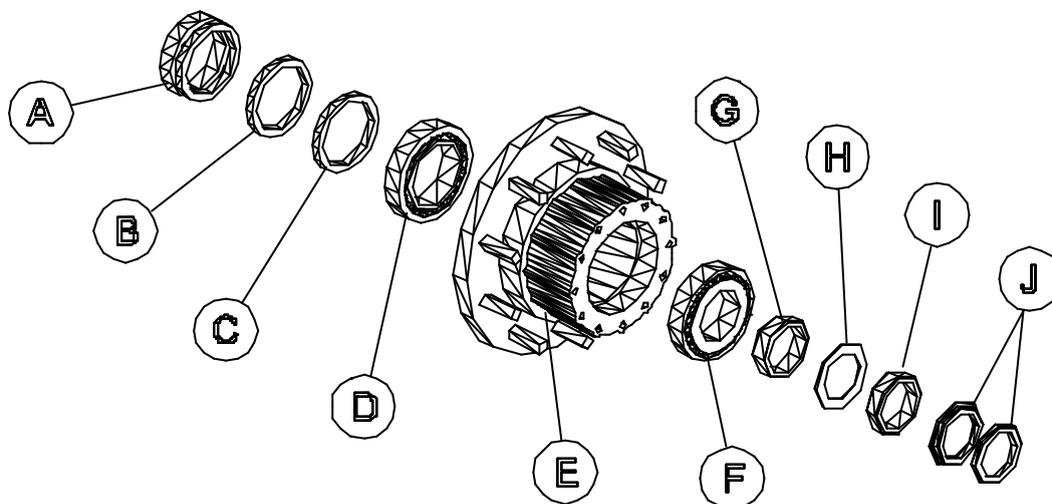


Figura 6.7 – O cubo de roda completo.

Tabela 6.4 – Componentes do cubo de roda completo do modelo EDC NL12 da Volvo.

Num.	Componente	Código	Massa (kg)	Preço
A	Coletor de óleo*	352946		
B	Anel espaçador	1576308		
C	Retentor interno	6884308		
D	Jogo de rolamento interno	6889593	3,7	390,00
E	Cubo roda traseira de disco	3159698	30,8	370,00
F	Jogo de rolamento externo	6889594	2,7	220,00
G	Porca	191178	2,00	
H	Arruela trava	191179		
I	Porca	3090331	2,00	
J	Retentores	3090331		

* O coletor de óleo é selecionado de acordo com o chassi do caminhão.

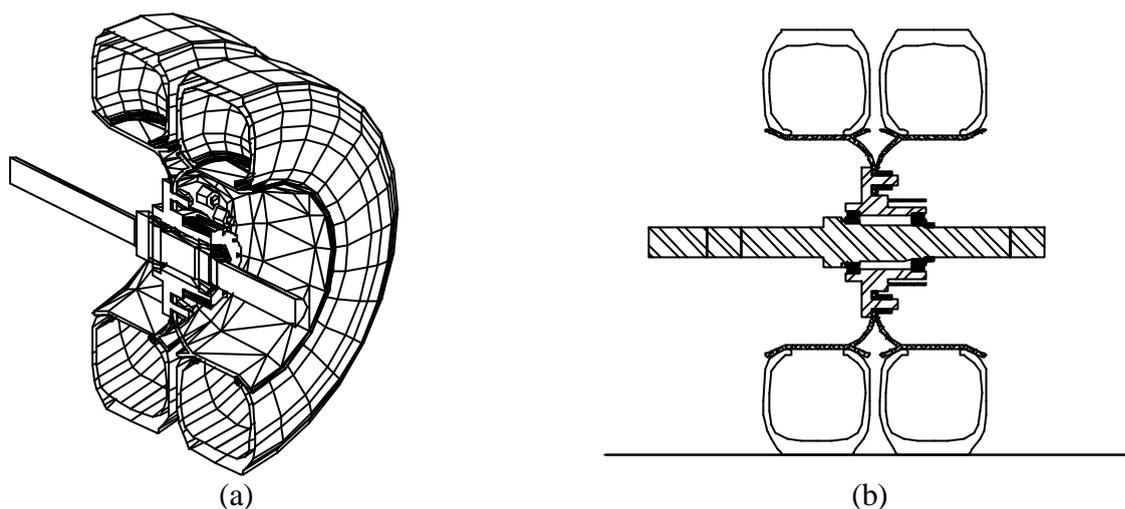


Figura 6.8 – Corte longitudinal do *conjunto do rodado*.

Este protótipo comporta a utilização de pneus rodoviários nas seguintes medidas:

- 10,00 R20
- 11,00, R20
- 275/80 R22,5
- 295/80 R22,5
- 305/75 R24,5

A limitação imposta para a escolha destas medidas de aros e pneus foi o diâmetro total do pneu, tendo como valor limite 1100 mm (distância máxima do eixo até o *reforço do garfo* é igual a 573,6 mm). Neste projeto utilizou-se como base o menor aro com pneu de menor diâmetro. A escolha de utilização de aros de maior diâmetro acarreta do deslocamento do eixo da roda para cima. Tal efeito, porém, não altera as características do ensaio nem compromete estruturalmente os componentes.

Como pode ser visto na figura 6.6, o eixo possui um comprimento maior que a distância de sua vinculação no garfo. Tal característica permite, no caso de utilização da configuração de rodado tipo *single*, que o pneu seja facilmente centrado no garfo, bastando ser deslocado para o lado.

6.2 As molas pneumáticas

As molas pneumáticas adotadas possibilitam, através do controle de sua pressão interna, a regulagem da sua faixa de utilização. Além de possuírem tampas de fácil montagem, estas podem operar mesmo não estando paralelas entre si, tolerando-se até 25°.

O modelo escolhido foi o Firestone 333, de três foles, com tampas tipo 2. Dimensionadas para a deflexão de 100 mm (50 mm para cima e para baixo) este modelo, nestas condições, pode assumir a altura máxima de 250 mm e mínima de 150 mm. Estas molas permitem que a sua faixa de aplicação de carga especificada para um determinado ensaio possa ser alterada sem modificar o curso de projeto, bastando, simplesmente, alterar a pressão das mesmas. Estas relações entre pressão, deflexão e carga podem ser detalhadamente visualizadas no Apêndice III, onde se encontram as especificações deste modelo, fornecidos pelo fabricante destes componentes. De acordo com os mesmos, [Firestone, 1997], apresenta vida útil superior às suas similares metálicas. Pode-se, contudo, estabelecer com precisão suas reposições, não prejudicando, assim, a qualidade dos ensaios.

6.3 As alterações no carro

Este projeto se propôs a não fazer nenhum tipo de alteração no carro nem no sistema de acionamento do deslocamento longitudinal, que permanece o mesmo, tracionado por cabos. Duas alterações, contudo, tornarem-se imprescindíveis: o deslocamento para o centro dos perfis U que suportam o cilindro, e a adição de dois suportes para mancais. Apesar disto, estas tarefas são de simples execução, e podem ser visualizadas na figura 6.9.

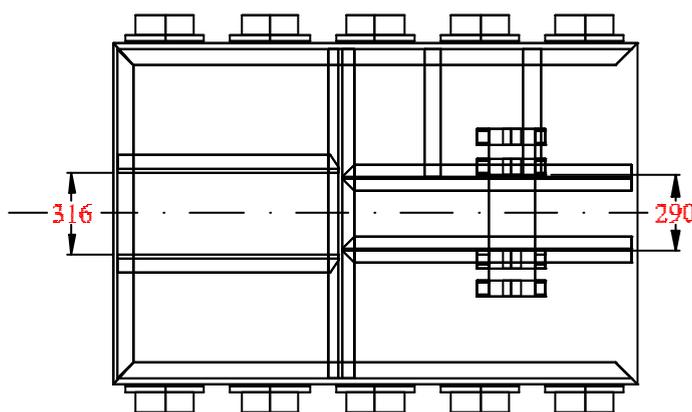


Figura 6.9 – As alterações no carro.

Uma vez que os perfis foram deslocados para o centro do carro, foram, também, afastados um do outro de forma que o cilindro e a viga articulada passassem entre eles.

Os suportes para os mancais estão posicionados simétricos em relação ao centro da máquina, paralelos aos existentes. Estes, são idênticos aos atuais.

6.4 A montagem do conjunto

A montagem do equipamento é simples, devendo-se, apenas, tomar cuidado com o peso dos componentes. A utilização de bancadas sob o carro, visando aproximar os componentes de seus vínculos, torna a montagem simples e ágil.

O conjunto viga articulada

Para a montagem deste conjunto, sugere-se a utilização de uma bancada de aproximadamente 0,9 metros de altura. Inicialmente, vincula-se o cilindro em sua fixação superior, girando-o para trás e amarrando-o no carro. Logo em seguida, prepara-se a bancada sob o carro. Nesta, utilizando-se uma grua, ou, em esforço manual (o conjunto possui uma massa aproximada de 110 kg), coloca-se o conjunto, na posição em que será fixado. Os dois mancais são montados em seus respectivos eixos. Posicionada sobre a bancada, a extremidade dos mancais do *conjunto viga articulada* pode ser levantada, levando os mancais ao suporte onde são fixados com parafusos, da mesma forma que os atuais. O cilindro hidráulico é, então, solto do carro, encaminhado-se naturalmente a sua posição. O conjunto é erguido e a bancada retirada. É colocado o pino de ligação entre o cilindro e as *chapas fixação inferior do cilindro* (12). Este processo está resumido na figura 6.10. Unida ao cilindro a viga é recolhida para cima. Nesta etapa, por se tratarem de instrumentos de precisão, as células de carga e os elementos que as fixam ainda não estão presentes.

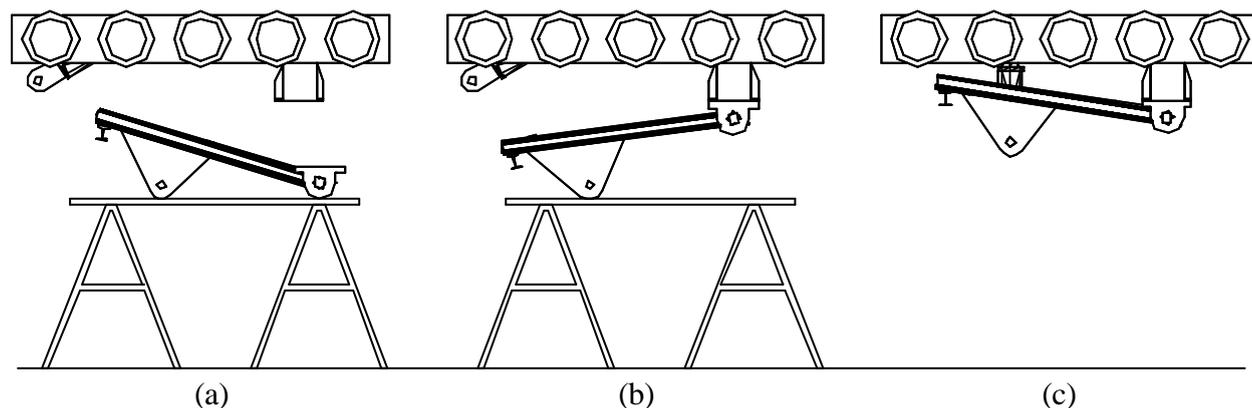


Figura 6.10 – O posicionamento do *conjunto viga articulada*.

O conjunto garfo articulado

Para a montagem deste conjunto, sugere-se a utilização de uma bancada de aproximadamente 0,5 metros de altura. Da mesma forma que o conjunto viga articulada, este conjunto é apoiado em uma bancada, porém, já com os mancais em seus eixos. O garfo é

levantado, aproximado-se os mancais de seus vínculos, onde são fixados com os correspondentes parafusos. Posiciona-se as molas pneumáticas sem pressão e os batentes. Este processo está resumido na figura 6.11.

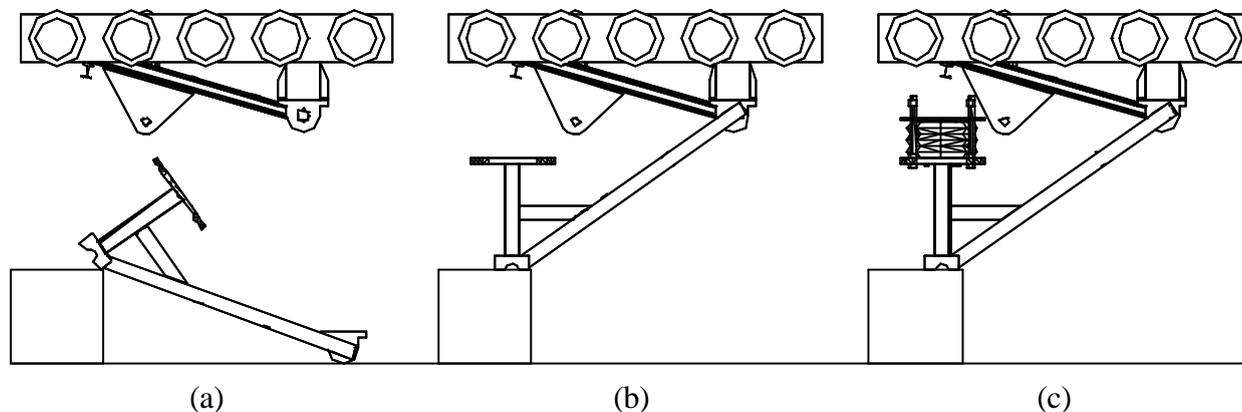


Figura 6.11 – O posicionamento do *conjunto garfo articulado*.

As células de carga são fixadas nas *bases superiores das molas* e nas *chapas fixação célula de carga* nesta ordem e com seus correspondentes parafusos (figura 6.12). Estes conjuntos são posicionados sobre as molas, fazendo os parafusos dos batentes passarem nos orifícios. Coloca-se as porcas nos parafusos dos batentes. Através da atuação do cilindro hidráulico a viga articulada é abaixada até a *viga I (07)* fazer contato com os *parafusos (30 x 2,0) fixação célula de carga (05)*. Parafusa-se a viga I nas *chapas fixação célula de carga* com os respectivos parafusos. O conjunto, por fim, pode ser suspenso, a bancada removida, e, as molas pneumáticas infladas até a pressão adequada para o ensaio a ser realizado. Esta seqüência final está ilustrada na figura 6.13.

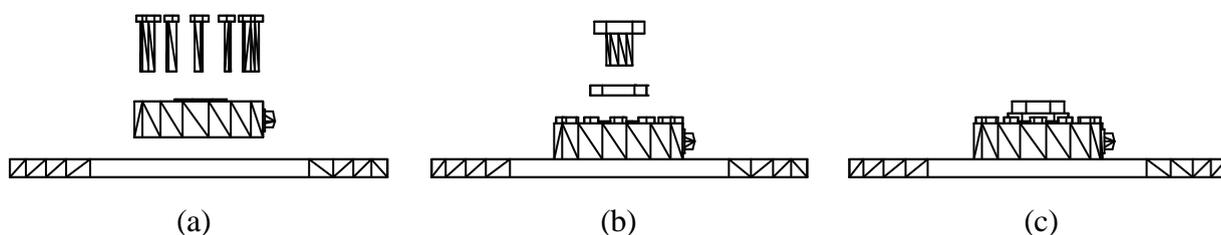


Figura 6.12 – A montagem da célula de carga.

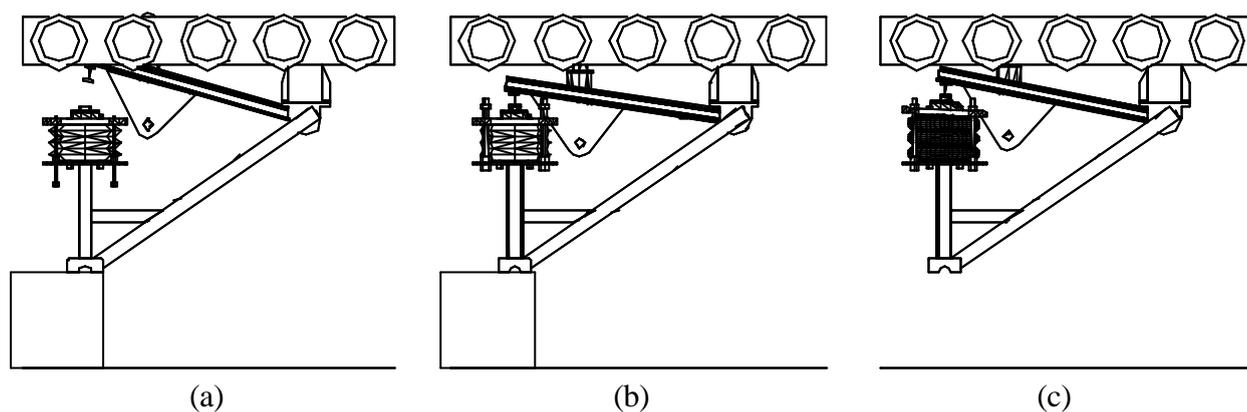


Figura 6.13 – A montagem dos *conjuntos garfo articulado e viga articulada*.

O conjunto do rodado

O conjunto previamente montado é levado para junto de sua fixação (figura 6.14). Neste instante, os conjuntos já posicionados garfo articulado e viga articulada ainda encontram-se recolhidos. Após o posicionamento do eixo sob a parte superior do *conjunto fixação do eixo* o cilindro é estendido até que as partes se encontrem. Posiciona-se a parte inferior do conjunto fixação do eixo, prendendo o eixo entre eles. As rodas podem ser centradas e os parafusos atarrachados.

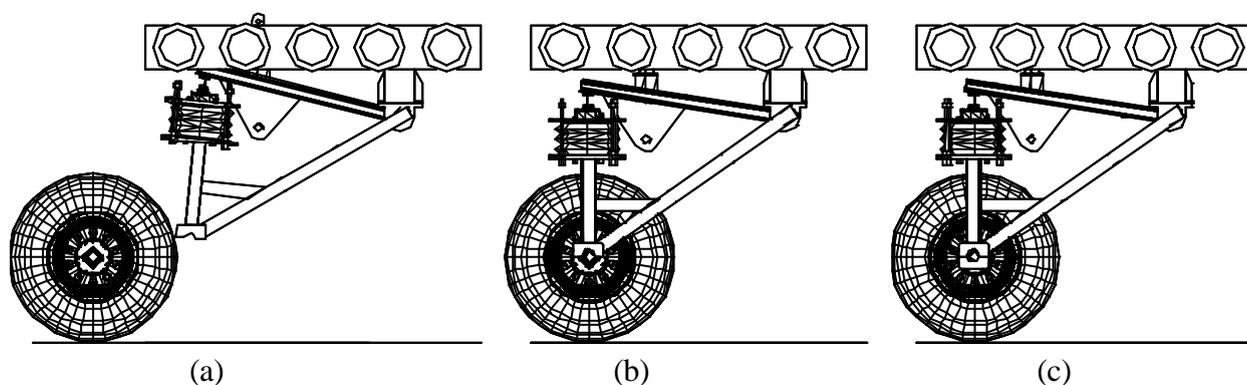


Figura 6.14 – A montagem do *conjunto do rodado*.

Deve-se efetuar a calibragem do sistema. Pode-se utilizar o mesmo procedimento já utilizado neste simulador descrito por Núñez, (1997) ressaltando, apenas, a necessidade do conhecimento prático do efeito das molas pneumáticas na carga.

A manutenção necessária ao equipamento permanece a mesma adicionando-se os cuidados com as molas pneumáticas e células de carga.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 Conclusões gerais sobre o projeto

O desenvolvimento do sistema de aplicação de carga do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS apresenta como resultado um novo conjunto de concepção e funcionamento simples que cumpre com as necessidades básicas do usuário/cliente/consumidor.

Segundo Ullman, (1992) existem quatro tipos diferentes de problemas no projeto mecânico: de seleção, configuração, parametrização e *design* original. Todos estes foram observados, em todas as etapas do processo de projeto.

Este projeto se propôs alterar somente o carro e o mecanismo de aplicação da carga, permanecendo inalterados os sistemas de deslocamento horizontal através da tração de cabos e o vertical através do cilindro hidráulico. O carro entretanto, permanece praticamente inalterado fazendo-se necessária somente o deslocamento das vigas que fazem a fixação superior do atuador hidráulico, e a adição de um par de mancais similares aos existentes.

O mecanismo de aplicação de carga apresenta-se esbelto, fazendo uso de perfis e chapas comerciais, cortados e soldados conforme os desenhos apresentados no Apêndice II. Apesar do custo do protótipo não ter valor decisivo nas escolhas necessárias durante o projeto, este foi minimizado, desde os componentes utilizados como em todo seu processo de fabricação.

Incorporam-se neste novo modelo componentes de alto fator tecnológico como as células de carga e as molas pneumáticas. O modelo existente já utiliza um manômetro, integrado ao circuito do cilindro hidráulico, como instrumento para monitorar a carga aplicada. O novo modelo recebe, para atuar em paralelo com o manômetro, duas células de carga digitais independentes que devem fazer a leitura do valor da carga aplicada diretamente sobre o eixo. Por sua vez as molas pneumáticas, além de absorver as imperfeições do pavimento, possibilitam que a condição da aplicação da carga seja alterada. Pode-se, para isso, variar a pressão de inflação das molas alterando suas rigidezes. Além disso se adaptam com facilidade ao não paralelismo de suas bases.

Esta nova versão mostra-se simples com relação a sua montagem e manutenção. Apresenta ainda a possibilidade de utilização de pneus geminados ou *single*. Permite, contudo, a utilização de rodas de menor diâmetro, pois as molas pneumáticas podem absorver a alteração na inclinação do garfo, e a estrutura apresenta-se dimensionada também para estes casos.

7.2 Conclusões gerais sobre o trabalho

É de conhecimento dos projetista que o processo de projeto de um produto é determinante para a concepção de bens com boa aceitação pelos consumidores. Com este trabalho, através da aplicação de uma metodologia de projeto, busca-se uma solução para aprimorar e modernizar o sistema de aplicação de carga do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS, objetivando um produto que cumprisse com sua função básica (relativa à aplicação da carga), de interesse dos usuários do equipamento.

Este trabalho seguiu algumas técnicas de projeto atuais sendo dividido em quatro fases: projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. Cada fase mostra-se bem definida quanto aos seus objetivos não acontecendo, porém, em uma cronologia exata.

Na busca de informações, os usuários/clientes/consumidores assim como sua necessidade já eram preestabelecidos, agilizando as primeiras etapas do processo de projeto.

Durante o desenvolvimento do protótipo, pôde-se observar que a metodologia de projeto utilizada, bem como o *QFD* como ferramenta de auxílio no projeto, contribuíram para indicar uma das possíveis soluções além de direcionar e orientar o projetista.

Este trabalho teve como principal limitação a carência de informações detalhadas relativas ao funcionamento, geometria, materiais ou construção dos diversos simuladores. As informações apresentadas no Estado da Arte, basicamente, são oriundas de artigos publicados no International Conference on Accelerated Pavement Testing que ocorreu entre os dias 18 a 20 de outubro de 1999 em Reno, Nevada.

8. SUGESTÕES PARA CONTINUIDADE DESTE TRABALHO

Visando aprimorar ainda mais as qualidades do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS são apresentadas algumas sugestões para a continuidade deste trabalho:

- Complementar a análise dinâmica com os valores dos parâmetros confirmados;
- Expandir o número de alternativas de solução;
- Otimizar a estrutura;
- Estudar a possibilidade de substituir o sistema de aplicação de carga hidráulico por pneumático;
- Tentar monitorar a carga no eixo (células de carga o mais próximo possível do eixo);
- Estudar a possibilidade de executar o movimento simultâneo de descida e subida das rodas durante a aceleração e desaceleração do sistema visando diminuir o período do ciclo, aumentando assim a produtividade do equipamento;
- Executar este projeto.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdallah, I., Nazarian, S., Melchor-Lucero, O., Ferregut, C., 1999. “*Validation of Remaining Life Models Using Texas Mobile Load Simulator*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS13-10a, Reno, Nevada.
- Akao, Y., 1996. “*Introdução ao Desdobramento da Qualidade*”. Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.
- Albano, J.F., 1998. “*Efeito da Variação da Carga por Eixo, Pressão de Inflação e Tipo de Pneu na Resposta Elástica de um Pavimento*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Amorim, Fred Lacerda, 1996. “*Desenvolvimento de um Implemento para Abertura e Adubação de Sulcos no Plantio Direto*”. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Artobolevsky, Ivan I, 1975. “*Mechanisms in Modern Engineering Design*”. Volumes I e II, Mir Publishers, Moscow.
- Back, Nelson, 1983. “*Metodologia de Projeto de Produtos Industriais*”. Editora Guanabara Dois, Florianópolis.
- Beer, F. P., Johnston, E. R, 1991. “*Mecânica Vetorial para Engenheiros – Cinemática e Dinâmica*”, 5ª edição, Makron Books, São Paulo.
- Bonnot, Jacques, 1996. “For Full Scale Accelerated Testing Of Pavements At Nantes”, **The LCPC Circular Teste Track**, Nantes.
- Brown, S.F., Brodrick, B.V., 1999. “*25 Years’ Experience With the Pilot-Scale Nottingham Pavement Test Facility*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS6-7 Reno, Nevada.
- Chen, Dar-Hao, Lin, Huang-Hsiung, 1999. “*Development of an Equation To Predict Permanent Deformation*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS13-10b, Reno, Nevada.
- Chollet, H. M, 1996. “*Mecânicos de Automóveis – O Veículo*”. Hemus Editora Limitada, São Paulo.
- Cole, L.W., Sherwood, J., Qi, X., 1999. “*Accelerated Pavement Testing of Ultrathin Whitetopping*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS1c2, Reno, Nevada.
- Conference CD, 1999 “Accelerated Pavement Testing – 1999 International Conference”. Reno, Nevada.
- CSIR, 1998. “*HVS 98*”. CD demonstrativo.

- F. Sass, Ch. Bouché, A. Leitner, 1979. “*Dubbel – Manual do Engenheiro Mecânica*”, Quinto e Sexto Volume, Hemus, São Paulo.
- Firestone, 1997. “*Firestone Airstroke Actuadores*”. Firestone Industrial Products Company, Estados Unidos.
- Galal, K.A., Hua, J., White, T.D., 1999a. “*Analysis Of Accelerated Pavement Tests*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS8-7, Reno, Nevada.
- Galal, K.A., White, T.D., 1999b. “*INDOT-APT Test Facility Experience*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS8-4, Reno, Nevada.
- Gillespie, T.D., 1992. “*Fundamentals of Vehicle Dynamics*”. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale.
- Gramsammer, J.C., Kerzreho, J.P., Odeon, H., 1999. “*The LCPC’s A.P.T. Facility - Evaluation of Fifteen Years of Experimentations*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS1-5, Reno, Nevada.
- Gueler, G.F., 1994. “*Relatório Técnico Comparativo*” Transpex Transportadora, São José dos Campos.
- Hall, Allen S., Holowenko, Alfred R., Laughlin, Herman G. Tradução: Paulo Murilo da Rocha, 1977. “*Elementos Orgânicos de Máquinas*”. McGraw-hill do Brasil, São Paulo.
- Harvey, J. Long, F., Prozzi, J.A., 1999. “*Application of Cal/Apt Results to Long Life Flexible Pavement Reconstruction*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS3-2, Reno, Nevada.
- Hugo, F., Fults, K., Chen, D.H., Smit, A.F., Bilyeu, J., 1999a. “*An Overview of the TxMLS Program and Lessons Learned*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS3-4, Reno, Nevada.
- Hugo, F., Smit, A.F., Epps, A., 1999b. “*A Case Study of Model APT in the Field*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS6-6, Reno, Nevada.
- Hugo, F., Smit, A.F., Warren, P., 1998. “*Report On Apt Data Survey*” University of Texas, Austin.
- Jost, K., 2000. “Separated at birth”, *Automotive Engineering International*, vol. 108 (10), pp. 94 – 97
- Juinall, R. C. Marshek, K. M, 1991. “*Fundamentals of Machine Component Design*”. John Wiley & Sons, second edition, New York.
- Kekwick, S.V., Theyse, H.L., Kleyn, E.G., 1999. “*Development of a Long-Term Accelerated Pavement Testing Programme and Structural Design Models*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS1-0, Reno, Nevada.

- Kuo, S.S., Armaghani, J.M., Scherling, D. 1999. *‘Development of an Equation To Predict Permanent Deformation’*. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS1-2 Reno, Nevada.
- Lucchesi, Domenico, 1986. *“Corso di Tecnica Automobilistica”*. Volume secondo, Editore Ulrico Hoepli Milano, Milano.
- Lynch, L., Janoo, V., Horner, D., 1999. *‘U.S. Army Corps of Engineers Experience with Accelerated and Full-Scale Pavement Investigations’*. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS1-2, Reno, Nevada.
- Matti, H., Jari, P., Pekka, H., 1999. *“HVS-NORDIC, Results from the First Year in Finland”*. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS2-4 Reno, Nevada.
- Medina, Jacques, 1997. *“Mecânica dos Pavimentos”*. Editora UFRJ, Rio de Janeiro.
- Ministerio del Ejercito y la Fuerza Aerea de los EUA, 1970. *“Manual de Automoviles y Vehiculos Motorizados”*. Compañia Editorial Continental, SA., Mexico.
- Molenaar, A.A.A., Groenendijk, J., van Dommelen, A., 1999. *‘Development of Performance Models From APT’*. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS2-1, Reno, Nevada.
- Newcomb, D.E., Engstrom, G., Van Deusen, D.A., Siekmeier, J.A., Timm, D.H., 1999. *“Minnesota Road Research Project: A Five-Year Review of Accomplishments”*. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS4-2, Reno, Nevada.
- Nielsen, Carsten Bredahl, 1999. *‘Accelerated Testing Of Permanent Deformation In Hot Rolled Asphalt Concrete Overlaid With Rut Resistant Asphalt Wearing Courses’*. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS8-2, Reno, Nevada.
- Nokes, W.A., Stolarksi, P.J., Monismith, C.L., Harvey, J.T., Coetzee, N., Rust, F.C., 1996. *“Establishing the Caltrans Accelerated Pavement Testing (CAL\|APT) Program”*. 75th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington.
- Núñez, W.P., Ceratti, J.A., Gehling, W.Y.Y., 1999. *“Full-Scale Load Tests in Southern Brazil”*. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS7-1, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Núñez, Washington Peres, 1997. *“Análise Experimental de Pavimentos Rodoviários Delgados com Basaltos Alterados”*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Odermatt, N., Janoo, V., Magnusson, R., 1999. *“Analysis of Permanent Deformation in Subgrade Material Using a Heavy Vehicle Simulator”*. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS11-5, Reno, Nevada.
- Pahl, G. & Beitz, W., 1988. *‘Engineering Design: a Systematic Approach’*. Springer-Verlag, Berlin.
- Pinches, M. J., Ashby, J. G, 1989. *“Power Hydraulics”*. Prentice Hall, Cambridge.

- Ponticel, P., 2000. "Heavy challenges for heavy trucks", **Automotive Engineering International**, vol. 108 (11), pp. 117 – 121.
- Popov, E.P., 1978. "**Resistência dos Materiais**". Terceira edição, Prentice Hall, Rio de Janeiro.
- PRO-TEC, 1976a. "**Desenhista de Máquinas**". Terceira edição, São Paulo.
- PRO-TEC, 1976b. "**Projetista de Máquinas**". Quinta edição, São Paulo.
- Pugliesi, Márcio, 1951. "**Manual Completo do Automóvel**". Hemus, São Paulo.
- Rao, Singiresu S., 1995. "**Mechanical Vibrations**". Third edition, Addison-Wesley Publishing Company, New York.
- Roesler, J.R., Harvey, J., Hung, D., Plessis, L., Bush, D., 1999. "**Evaluation of Longer-Life Concrete Pavements for California using Accelerated Pavement Testing**". International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS2-3, Reno, Nevada.
- Ruiz, Aurelio, 1999. "**The Cedex Full Scale Test Track**". International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS8-8, Reno, Nevada.
- Rust, F.C., Kleyn, E.G., Kekwick, S.V., Sadzik, E., 1996. "**The Impact of The Heavy Vehicle Simulator (HVS) Test Programme on Road Pavement Technology and Management**". 75th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington.
- Saarelainen, S., Onninen, H., Kangas, H., Pihlajamaki, J., 1999. "**Full-Scale Accelerated Testing of a Pavement on Thawing, Frost-Susceptible Subgrade**". International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS8-3 Reno, Nevada.
- Schwamb, Peter, Merrill, Allyne L., James, Walter H., Doughtie, Venton F., 1962. "**Nociones de Mecanismos**". Aguilar, S.A. de Ediciones, Madrid.
- Sharp, K.G., Johnson-Clarke, J.R., Fossey, D.W., 1999. "**A Review of the Australian ALF Program**". International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS1-1, Reno, Nevada.
- Sherwood, J., Qi, X., Romero, P., Stuart, K.D., Thomas, N.L., Naga, S., Mogawer, W., 1999. "**Full-Scale Pavement Fatigue Testing From FHWA Superpave Validation Study**". International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS3-1, Reno, Nevada.
- Shigley, Joseph E., 1986. "**Standard Handbook of Machine Design**". McGraw-hill Book Company, New York.
- Shigley, Joseph E., 1988. "**Elementos de Máquinas**". Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro.
- Shutao, M., Liufu, H., Daoxin, W., Jinan, S., Yongqi, Li. 1997-1999. "**The Performance of Stabilized Base Pavements Under Accelerated Loading**". International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS8-1, Reno, Nevada.

- Steven B.D., Pont, J.J., 1999. “*Suspension Dynamics and Pavement Wear*”. Transit NZ, CAPTIF Research Facility, Nova Zelândia.
- Steven B.D., Pont, J.J., Pidwerbesky, B.D., 1996. “*The Influence of Vehicle Dynamics on Pavement Life*”. Nova Zelândia.
- Steven, B.D., Pont, J.J., Pidwerbesky, B.D., Arnold, G., 1999. “*Accelerated Dynamic Loading of Flexible Pavements At Captif*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS2-3, Reno, Nevada.
- Steyn, W.J. vdM., Beer, M., Preez, W. Du, 1999. “*Simulation of Dynamic Traffic Loading for Use in Accelerated Pavement Testing (Apt)*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper GS1-4, Reno, Nevada.
- Todeschini, H., Batista, V.J., 2000. “*Projeto do Sistema Mecânico que Execute o Deslocamento Longitudinal do Simulador para Teste Acelerado de Pavimentos Rodoviários*”. XI Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte, Gramado.
- Turtschy, J.C., Sweere, G., 1999. “*Long Term Pavement Performance Modeling based on Accelerated Pavement Testing*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS13-6. Reno, Nevada.
- Ullman, David G., 1992. “*The Mechanical Design Process*”. McGraw-hill, Inc., New York.
- Vijayanath, B.K., Wu, Z., Hossain, M.H., Gisi, A.J., 1999. “*Instrumentation of the Superpave Test Sections at the Kansas Accelerated Testing Laboratory*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS4-4, Reno, Nevada.
- Wignall, A., Kendrick, P.S., Ancill, R., 1991. “*Roadwork – Theory and Practice*”. Newnes, Third Edition, Scotland.
- Williams, R.C., Romero, P., Stuart, K. D., 1999. “*Comparison of Superpave Shear Test Results to WesTrack Performance*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS13-11, Reno, Nevada.
- Yeo, R.E.Y., Sharp, K.G., Moffatt, M.A., Vertessy, N.J., Johnson-Clarke, J.R., 1999. “*The Performance of In-Situ Stabilized Marginal Sandstone Pavements*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS11-3, Reno, Nevada.
- Yuan, D., Nazarian, S., Chen, D.H., McDaniel, M., 1999. “*Use of Seismic Methods in Monitoring Pavement Deterioration During Accelerated Pavement Testing with TxMLS*”. International Conference on Accelerated Pavement Testing, Paper CS12-3, Reno, Nevada.

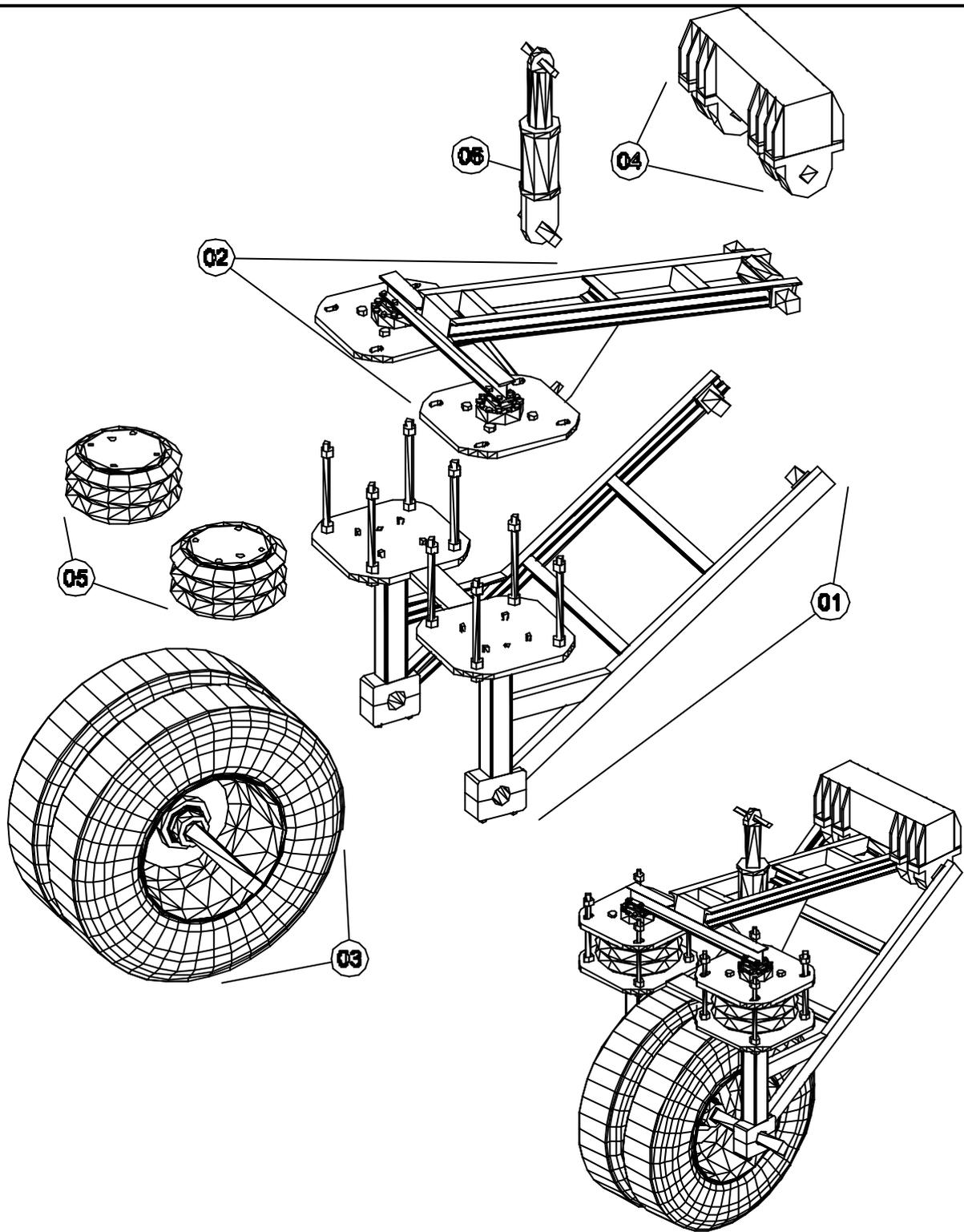
Apêndice I

Páginas encontradas na Internet utilizadas neste trabalho.

Capítulo 2.3.1	<ul style="list-style-type: none"> ➤ http://www.transit.govt.nz/about_transit/captif.html ➤ http://civl.canterbury.ac.nz/res/publish/research/96/A33.htm ➤ http://civl.canterbury.ac.nz/res/Hiways.html
Capítulo 2.3.2	<ul style="list-style-type: none"> ➤ http://www.lcpc.fr/LCPC/Moyens.equipements/Equipements/Manege.fatigue/ctt.html
Capítulo 2.3.3	<ul style="list-style-type: none"> ➤ http://www.cedex.es/carreteras/carreteras_ing
Capítulo 2.3.4	<ul style="list-style-type: none"> ➤ http://www.westrack.com
Capítulo 2.3.5	<ul style="list-style-type: none"> ➤ http://www.utexas.edu/depts/ctr/mls/index.html
Capítulo 2.3.6	<ul style="list-style-type: none"> ➤ http://www.eng.uts.edu.au/~philipm/cv/rta/alf/alf.htm
Capítulo 2.3.7	<ul style="list-style-type: none"> ➤ http://vbk.ct.tudelft.nl/LINTRACKhome/home.htm ➤ http://www.utexas.edu/depts/ctr/mls/index.html
Capítulo 2.3.8	<ul style="list-style-type: none"> ➤ http://www.engg.ksu.edu/CEDEPT/research/labs/at1.html
Capítulo 2.3.9	<ul style="list-style-type: none"> ➤ http://pavement.wes.army.mil/ ➤ http://www.dot.ca.gov/dist07/announc/susie_info.htm ➤ http://www.utexas.edu/depts/ctr/mls/index.html
Capítulo 2.6.3	<ul style="list-style-type: none"> ➤ http://www.firestoneindustrial.com/airide.htm ➤ http://www.firestone.com.br/fipil/index.html ➤ http://www.goodyear.fr/us/airsprings/index.html

Apêndice II

Desenhos detalhados do sistema de aplicação de carga do Simulador de Tráfego UFRGS-DAER/RS.



06	Cilindro hidráulico	01		COMERCIAL
05	Molas pneumáticas	02	Mod. 339/Base tipo2	FRESTONE
04	Conjunto de ligação com o carro	01		
03	Conjunto da rodado	01		
02	Conjunto viga articulada	01		
01	Conjunto garfo articulado	01		
peça	denominação	quant.	material	observação

SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁFEGO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

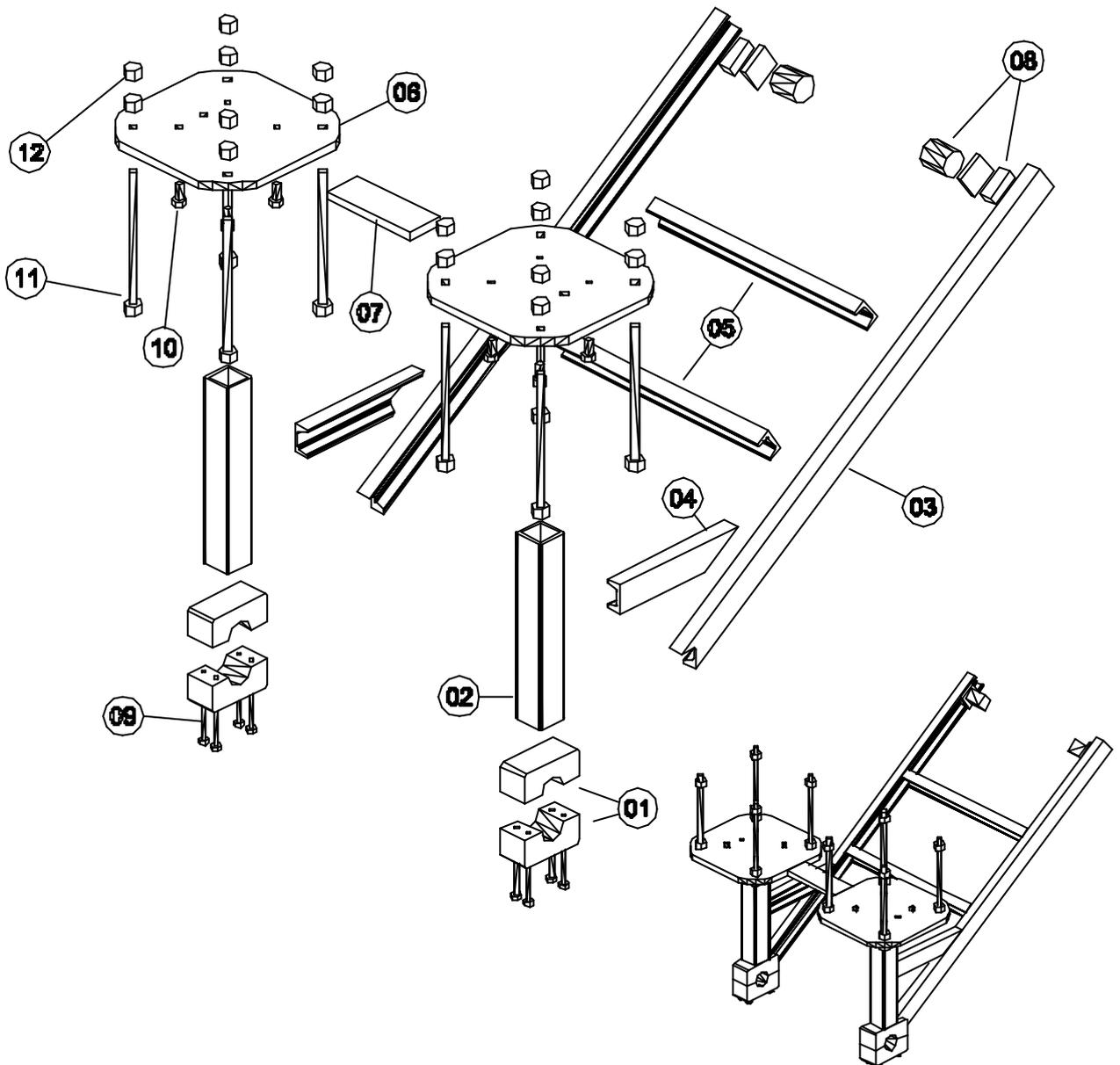
Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: *****

Unidade: milímetros

0-00



12	Porcas do Eixo	16		COMERCIAL
11	Ferrusca do Eixo	08		COMERCIAL
10	Parafuso (3/8 - 16) fixação da mola	08		COMERCIAL
09	Ferrusca Fixação do Eixo	08		COMERCIAL
08	Conjunto fixação manual	02	aço ABNT 1020	
07	Reforço do garfo	01	aço ABNT 1020	PERFL U 5"x1.1/2"
06	Base inferior da mola	02	aço ABNT 1020	ESPESSURA 7/8"
05	Reforço da guia do garfo	02	aço ABNT 1020	PERFL U 5"x1.1/2"
04	Reforço da coluna	02	aço ABNT 1020	PERFL U 5"x1.1/2"
03	Guia do garfo	02	aço ABNT 1020	PERFL U 5"x1.1/2"
02	Coluna	02	aço ABNT 1020	
01	Conjunto fixação do eixo	02	aço ABNT 1020	
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO GARFO ARTICULADO



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

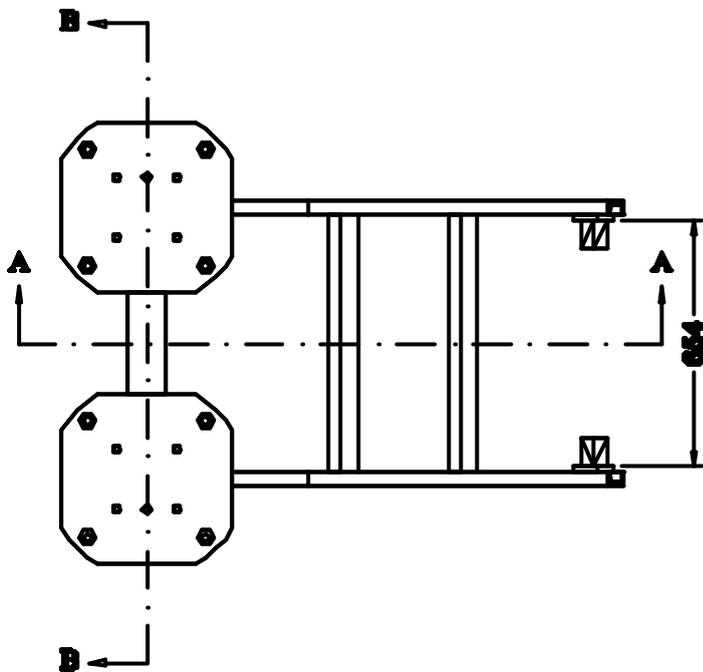
Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: *****

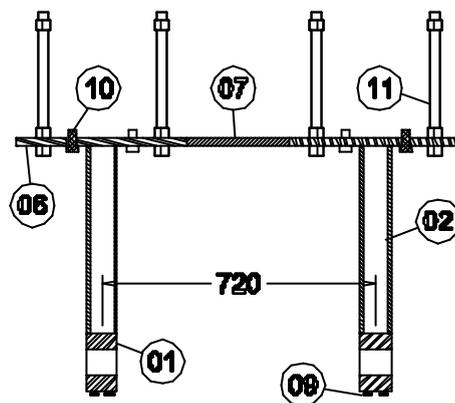
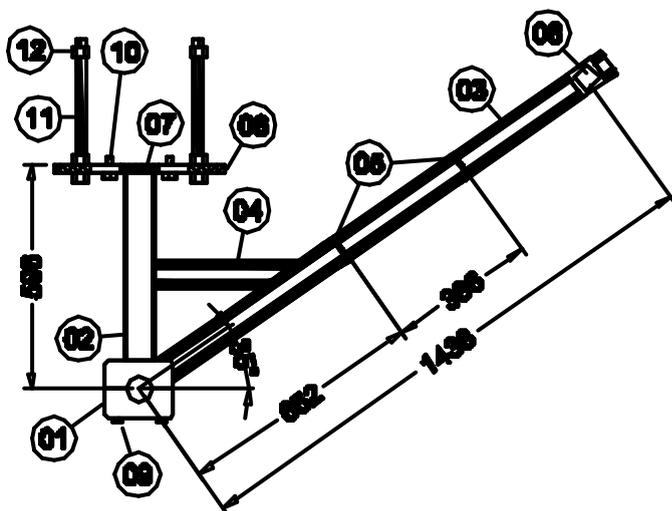
Unidade: milímetros

1-00



CORTE A

CORTE B



12	Forças do Eixo	16		COMERCIAL
11	Ferragens do Eixo	08		COMERCIAL
10	Parafuso (M8 - 10) fixação da mola	08		COMERCIAL
09	Ferragens Fixação do Eixo	08		COMERCIAL
08	Conjunto fixação manual	02	aço ABNT 1020	
07	Reforço do garfo	01	aço ABNT 1020	PERFL U 5"x1.1/2"
06	Base inferior da mola	02	aço ABNT 1020	ESPESSURA 7/8"
05	Reforço da guia do garfo	02	aço ABNT 1020	PERFL U 5"x1.1/2"
04	Reforço da coluna	02	aço ABNT 1020	PERFL U 5"x1.1/2"
03	Guia do garfo	02	aço ABNT 1020	PERFL U 5"x1.1/2"
02	Coluna	02	aço ABNT 1020	
01	Conjunto fixação da base	02	aço ABNT 1020	
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO GARFO ARTICULADO



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

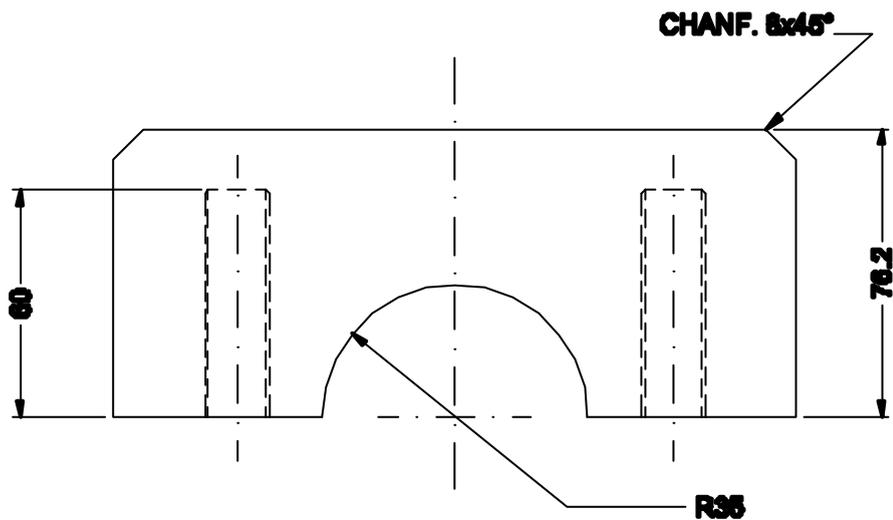
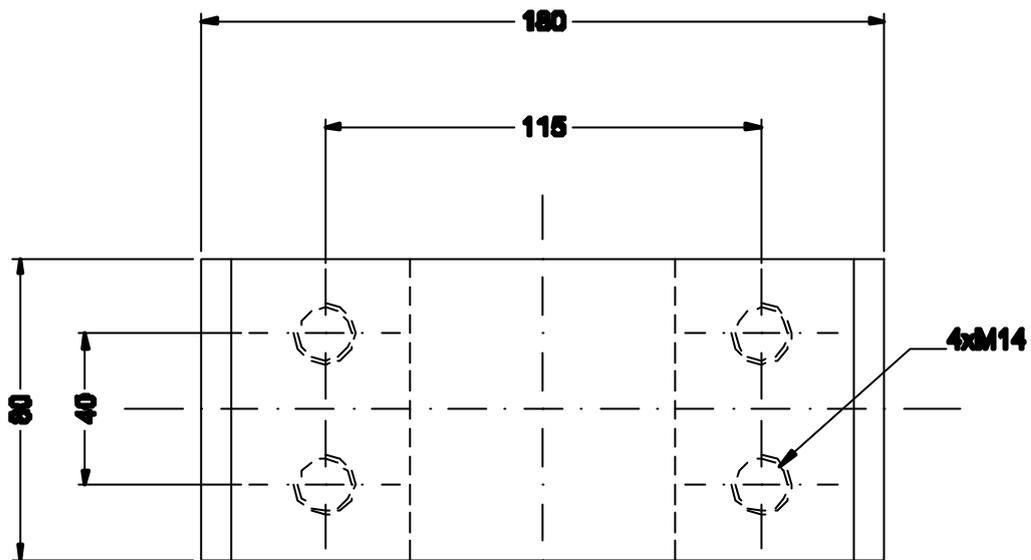
Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: 1 : 20

Unidade: milímetros

1-00



01-A	Flange do eixo parte superior	02	esp ABNT 1020	
01	Conjunto flange do eixo			
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO CARPO ARTICULADO

UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS
OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

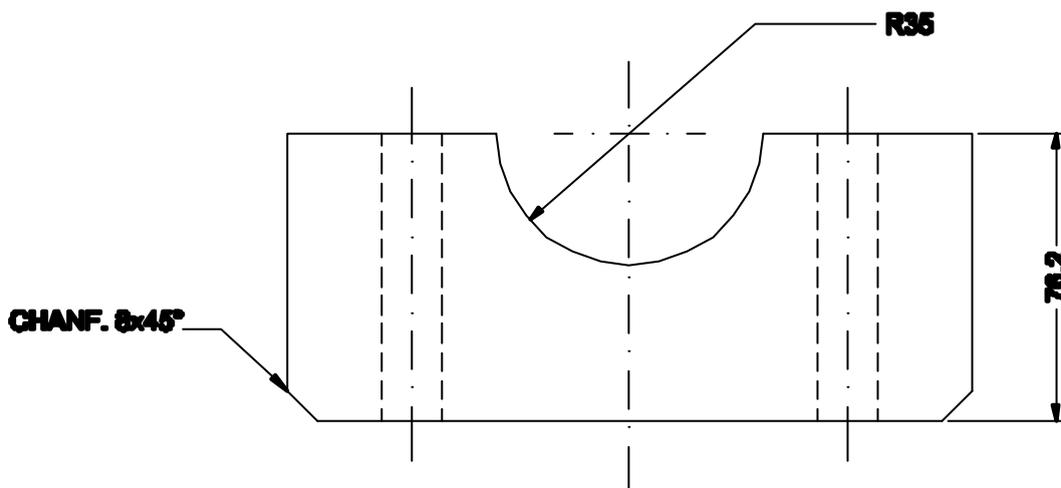
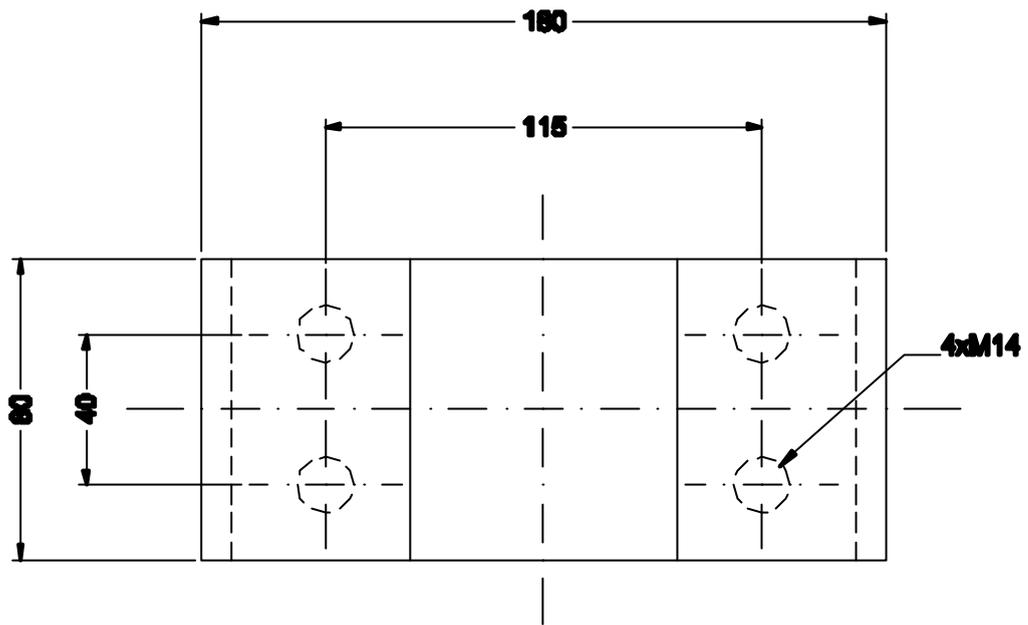
Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: 1 : 2

Unidade: milímetros

1-01



01-B	Fração do eixo parte inferior	02	esp ABNT 1020	
01	Conjunto fração do eixo			
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO CARPO ARTICULADO

UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

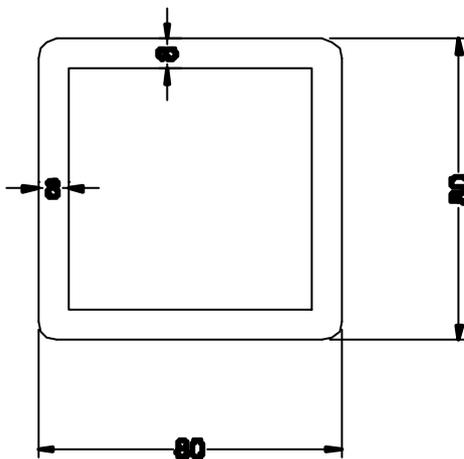
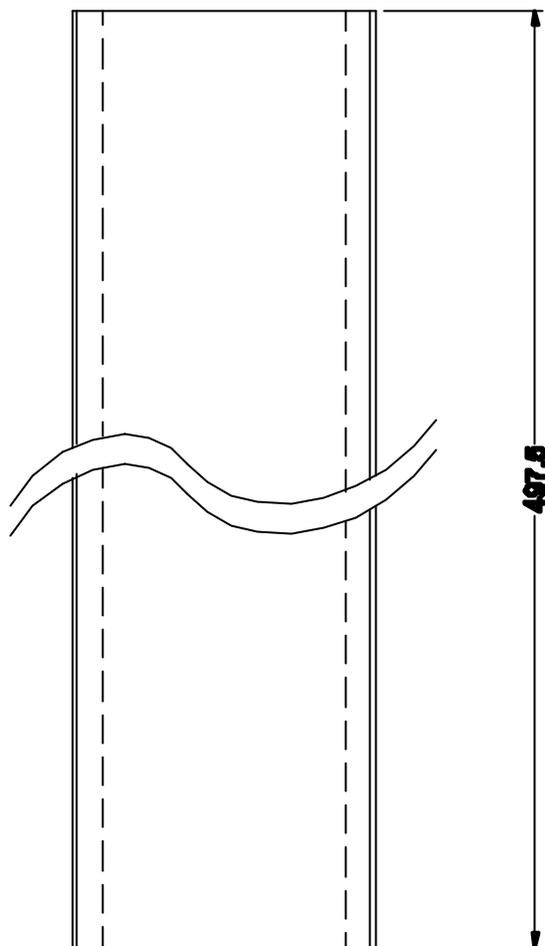
Visto:

Data: outubro de 2001.

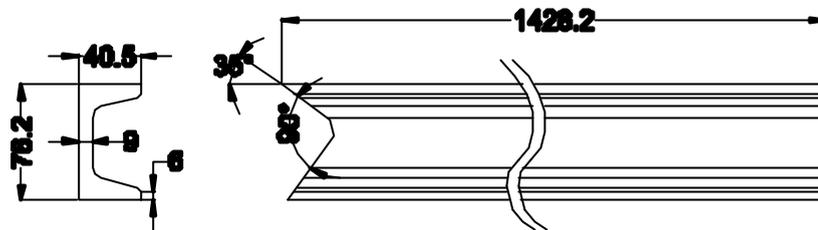
Escala: 1 : 2

Unidade: milímetros

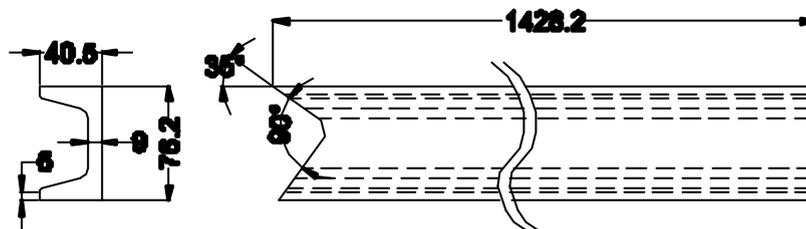
1-01



02	Coluna	02	esp AINT 1020	
peça	denominação	quant.	material	observação
CONJUNTO CARPO ARTICULADO				
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> ⊕ UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA ⊕ </div>				
SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS				
GPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial				
Nome: HUMBERTO TODESCHINI		Visto:		1-02
Data: outubro de 2001.		Escala: 1 : 2		
			Unidade: milímetros	



Peça 03-B Guia do garfo - Esquerda



Peça 03-A Guia do garfo - Direita

03-B	Guia do garfo - Esquerda	02	aço ABNT 1020	PERFL U 2"x1.1/2"
03-A	Guia do garfo - Direita	02	aço ABNT 1020	PERFL U 2"x1.1/2"
03	Guia do garfo			
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO GARFO ARTICULADO



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS
OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

Visto:

Data: outubro de 2001.

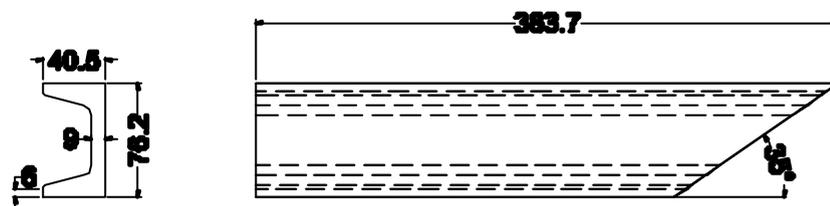
Escala: **1 : 5**

Unidade: **milímetros**

1-03



Peça 04-B Reforço da coluna - Esquerdo



Peça 04-A Reforço da coluna - Direito

04-B	Reforço da coluna - Esquerdo	01	aço ABNT 1020	PERFL U 2"x1.1/2"
04-A	Reforço da coluna - Direito	01	aço ABNT 1020	PERFL U 2"x1.1/2"
04	Reforço da coluna			
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO CARPO ARTICULADO



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS
OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

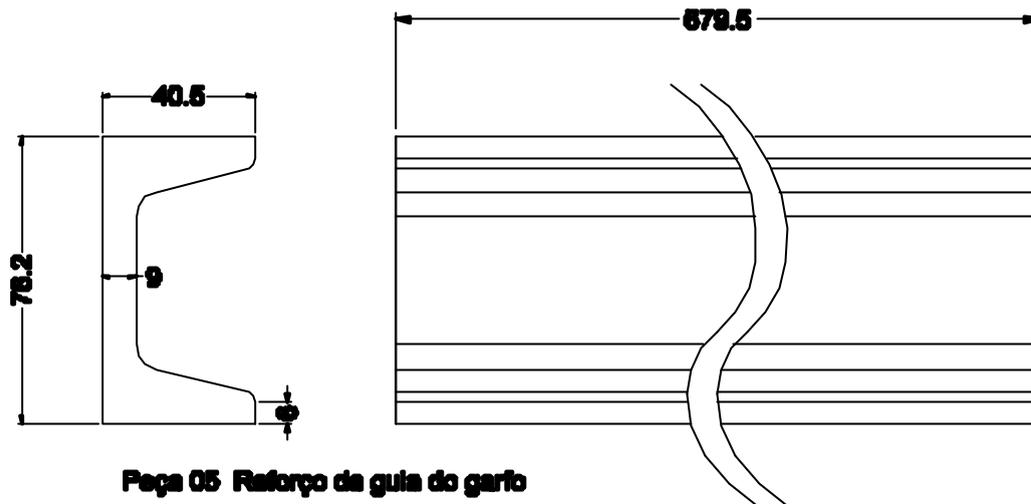
Visto:

Data: outubro de 2001.

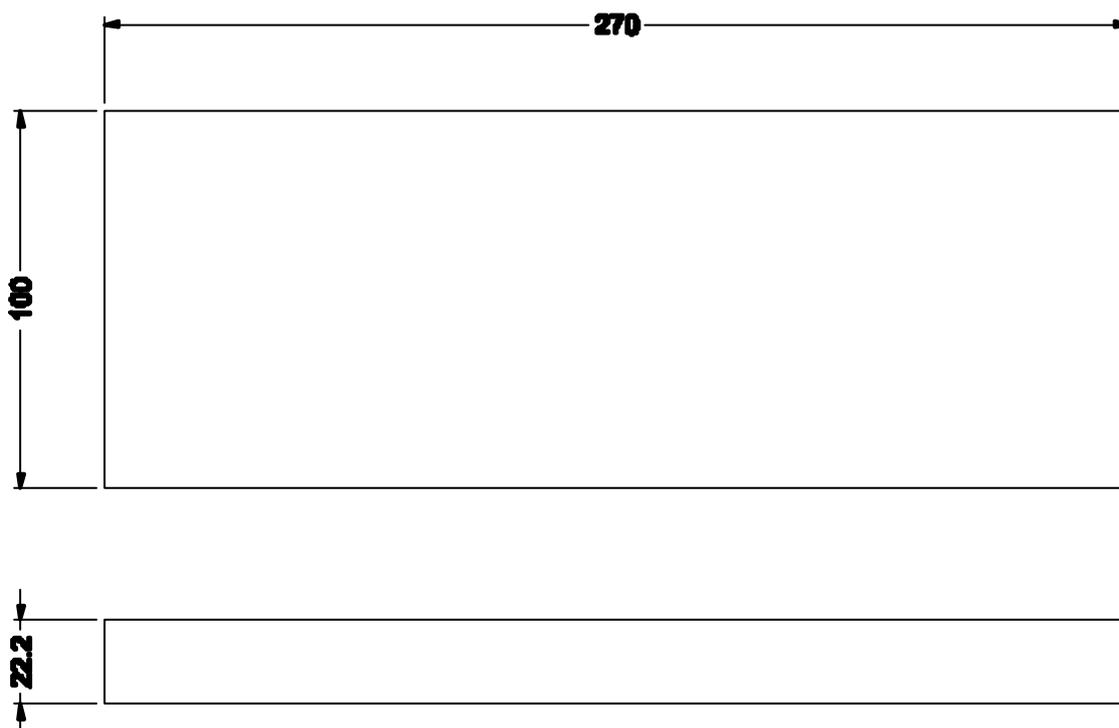
Escala: **1 : 5**

Unidade: **milímetros**

1-04



Peça 05 Reforço da guia do garfo



Peça 07 Reforço do garfo

07	Reforço do garfo	01	aco A9NT 1020	ESPESSURA 7/8"
06	Reforço da guia do garfo	02	aco A9NT 1020	PERFL U 3"x1.1/2"
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO GARFO ARTICULADO

UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

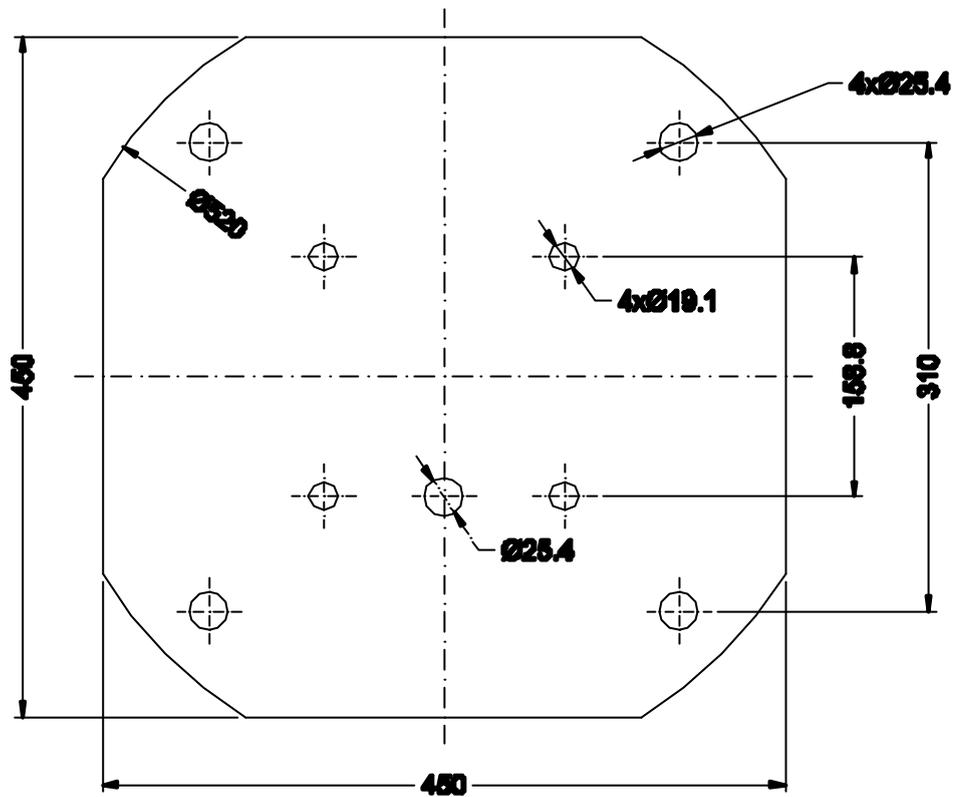
Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: **1 : 2**

Unidade: **milímetros**

1-05



01	Base inferior da mesa	02	esp ABNT 1020	ESPESSURA 7/8"
qtd	denominação	quant.	material	observação

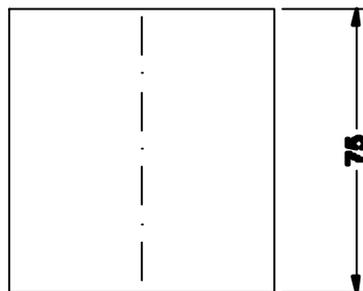
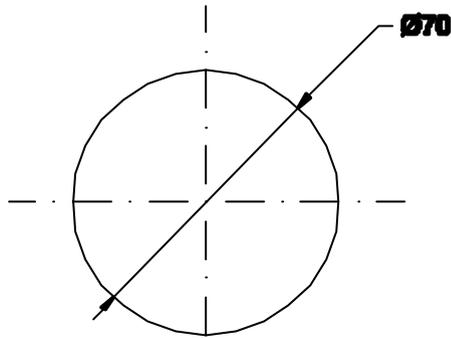
CONJUNTO CARPO ARTICULADO

UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA

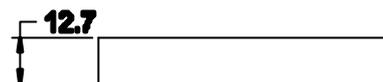
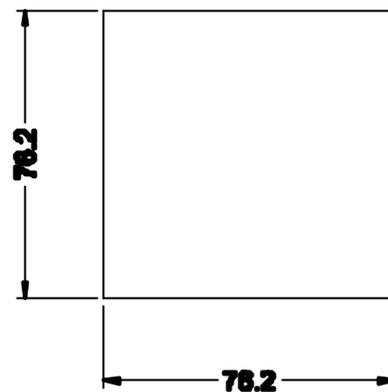
SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

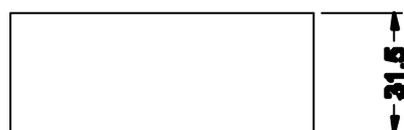
Nome: HUMBERTO TODESCHINI	Visto:	1-06
Data: outubro de 2001.	Unidade: milímetros	



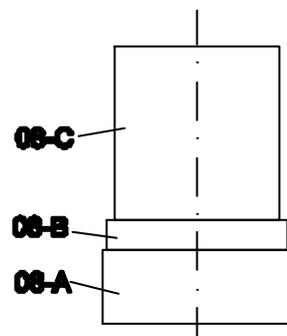
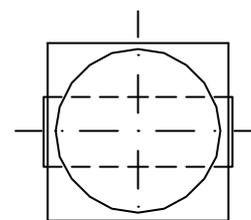
Peça 08-C Fixação mancal - Pino



Peça 08-B Fixação mancal - Base



Peça 08-A Fixação mancal - Reforço



Conjunto fixação mancal - (a/ escala)

08-C	Fixação mancal - Pino	02	aco ABNT 1020	
08-B	Fixação mancal - Base	02	aco ABNT 1020	ESPESSURA 1/2"
08-A	Fixação mancal - Reforço	02	aco ABNT 1020	
08	Conjunto fixação mancal			
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO CARPO ARTICULADO



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

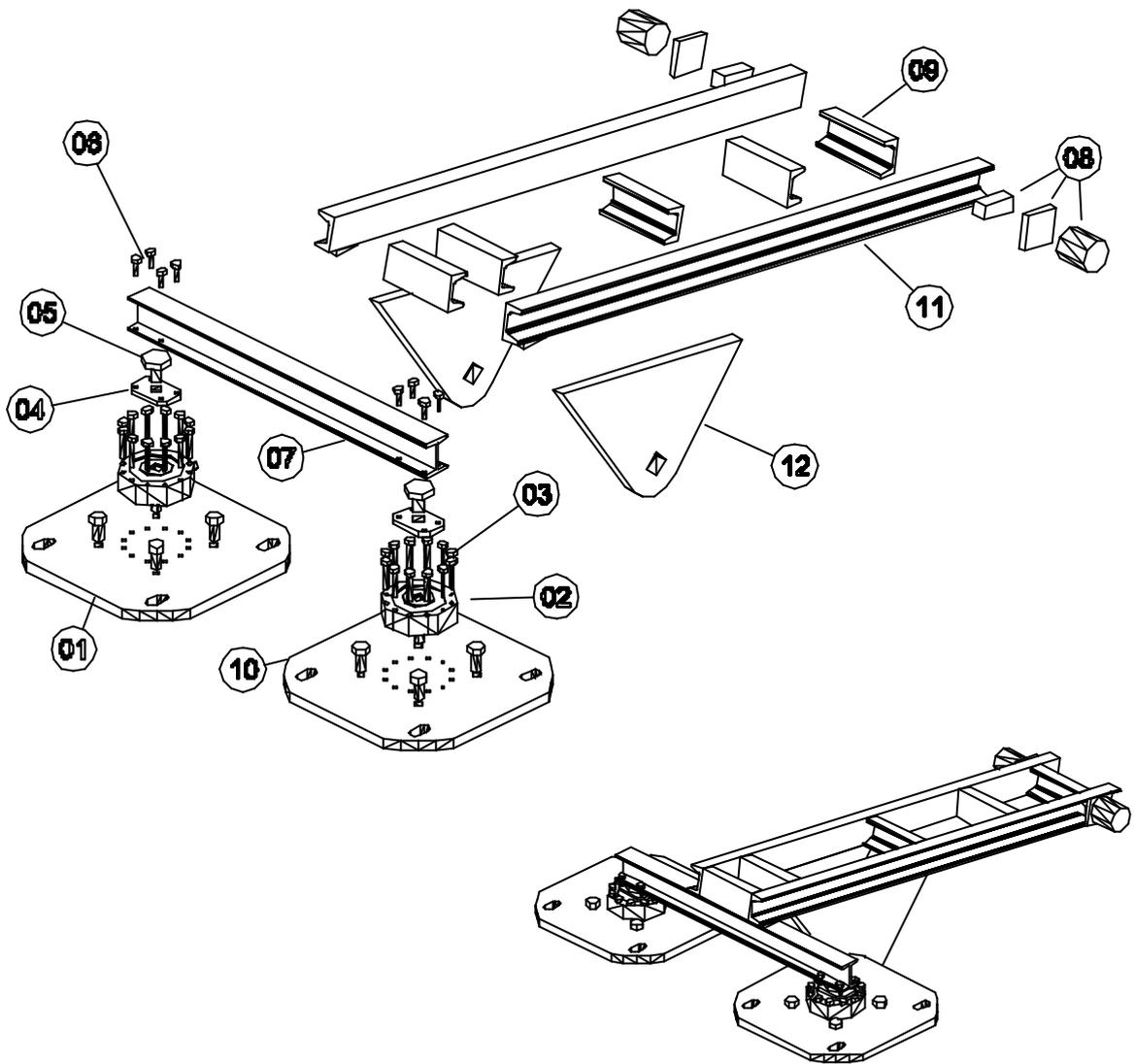
Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: 1 : 2

Unidade: milímetros

1-07



12	Chapa fixação inferior do cilindro	02	aço ABNT 1020	ESPESSURA 1"
11	Viga articulada	02	aço ABNT 1020	PERFL U 8"x1.1/2"
10	Parafuso (3/8 - 16) fixação da moela	08		COMERCIAL
09	Reforço viga articulada	05	aço ABNT 1020	PERFL U 5"x1.1/2"
08	Conjunto fixação manual	02	aço ABNT 1020	COMERCIAL
07	Viga I	01	aço ABNT 1020	PERFIL I 3"x2.3/8"
06	Parafuso (10 x 1,5) fixação da chapa	06		COMERCIAL
05	Parafuso (30 x 2) fixação da célula de carga	02		COMERCIAL
04	Chapa fixação célula de carga	02	aço ABNT 1020	
03	Parafuso (10 x 1,5) fixação da célula de carga	24		COMERCIAL
02	Célula de carga	02	Modelo 3174	Labov Products
01	Base superior da moela	02	aço ABNT 1020	ESPESSURA 7/8"
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO VIGA ARTICULADA



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

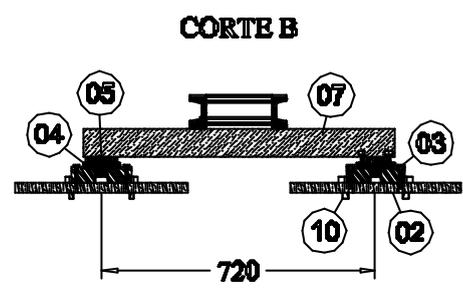
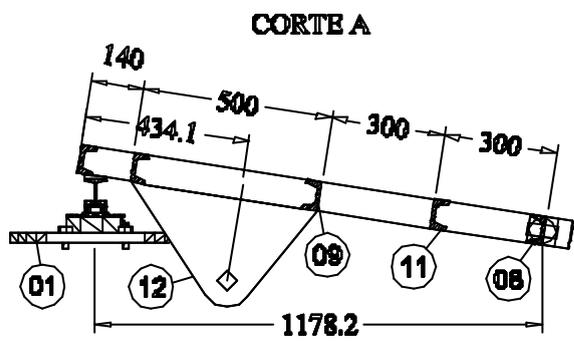
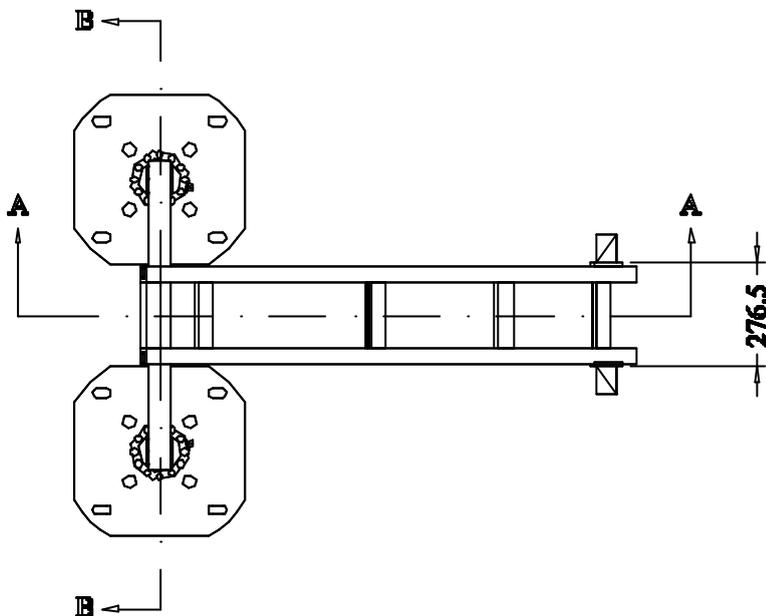
Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: *****

Unidade: milímetros

2-00



12	Chapa fixação inferior do cilindro	02	aço ABNT 1020	ESPESSURA 1"
11	Viga articulada	02	aço ABNT 1020	PERFL U 8"x1.1/2"
10	Parafuso (3/8 - 16) fixação da moela	06		COMERCIAL
09	Reforço viga articulada	05	aço ABNT 1020	PERFL U 5"x1.1/2"
08	Conjunto fixação manual	02	aço ABNT 1020	COMERCIAL
07	Viga I	01	aço ABNT 1020	PERFIL I 3"x2.3/8"
06	Parafuso (10 x 1,5) fixação da chapa	06		COMERCIAL
05	Parafuso (30 x 2) fixação da célula de carga	02		COMERCIAL
04	Chapa fixação célula de carga	02	aço ABNT 1020	
03	Parafuso (10 x 1,5) fixação da célula de carga	24		COMERCIAL
02	Célula de carga	02	Modelo 3174	Labov Products
01	Base superior da moela	02	aço ABNT 1020	ESPESSURA 7/8"
qtd.	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO VIGA ARTICULADA

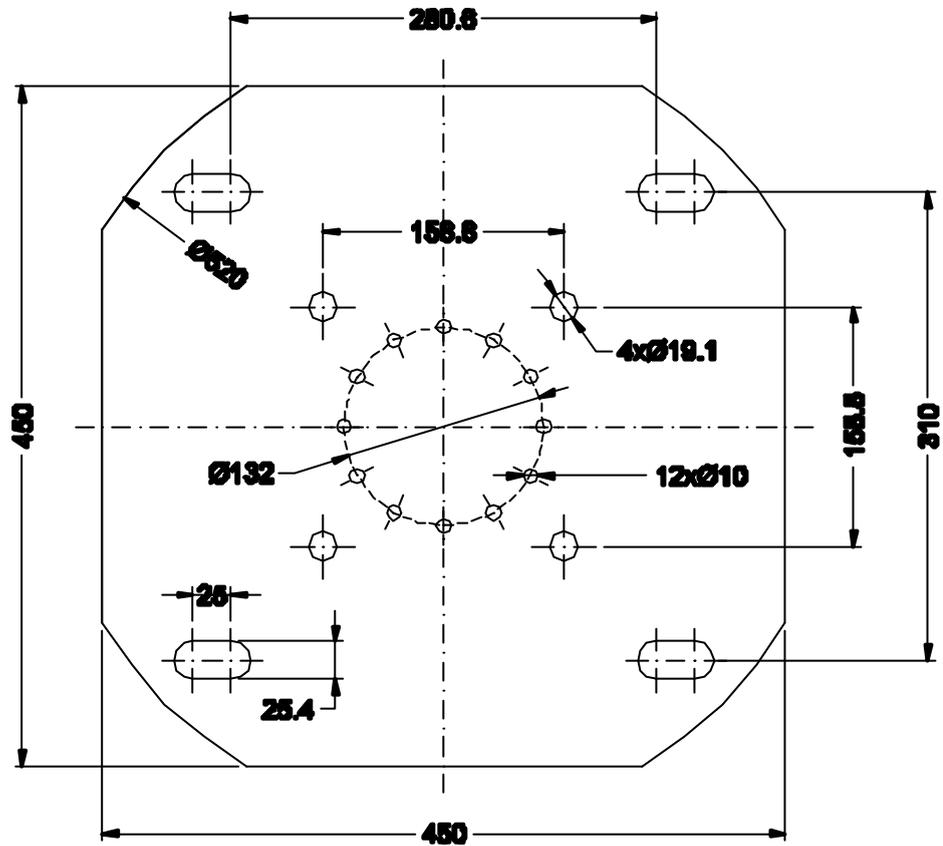
UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: HUMBERTO TODESCHINI	Visto:
Data: outubro de 2001.	Unidade: milímetros

2-00



01	Base superior da mesa	02	seg ABNT 1020	ESPESSURA 7/8"
qtd	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO VIGA ARTICULADA

UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

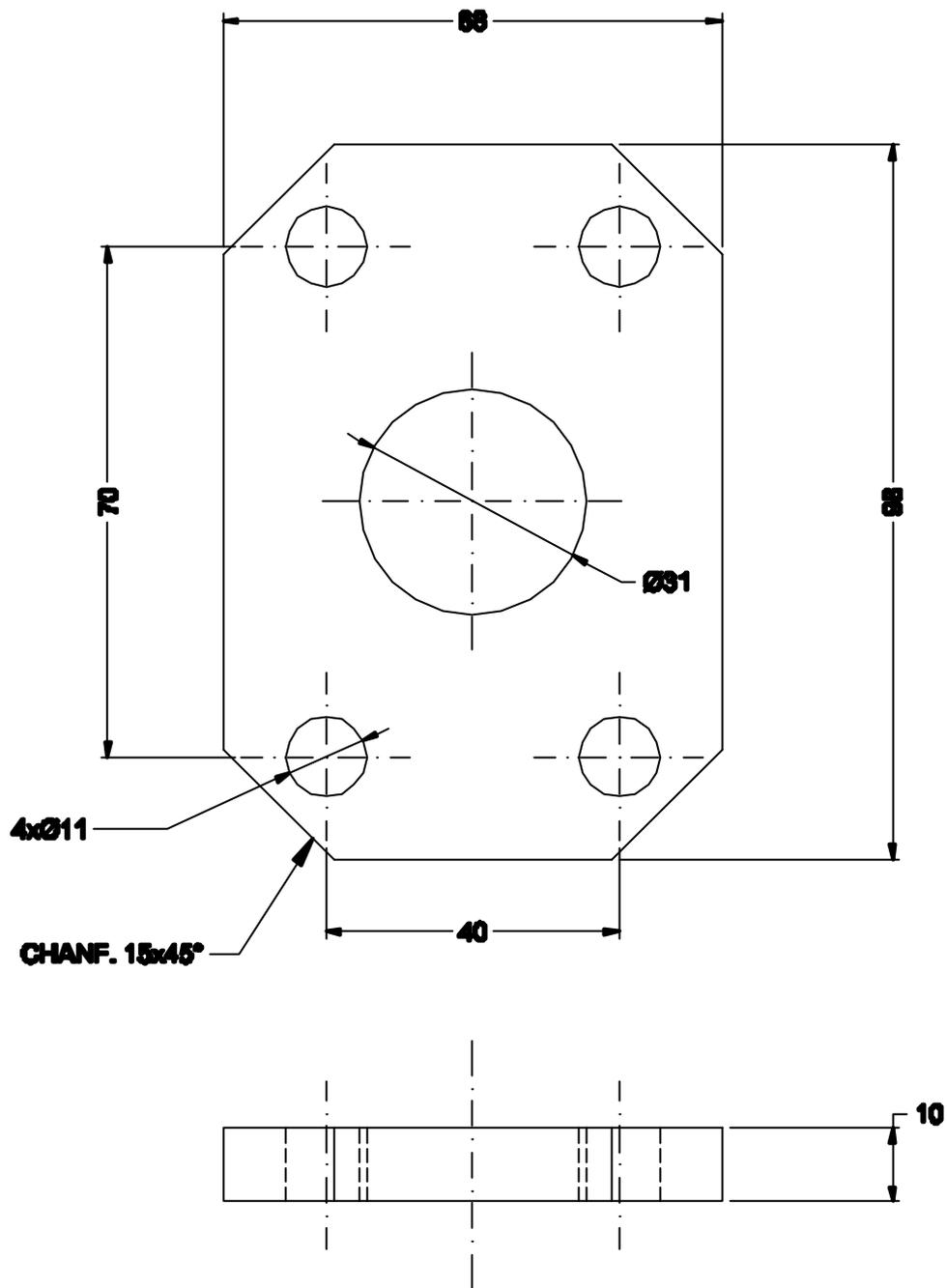
Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: **1 : 5**

Unidade: **milímetros**

2-01



qtde	denominação	quant.	material	observação
------	-------------	--------	----------	------------

CONJUNTO VIGA ARTICULADA

UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS
OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

Visto:

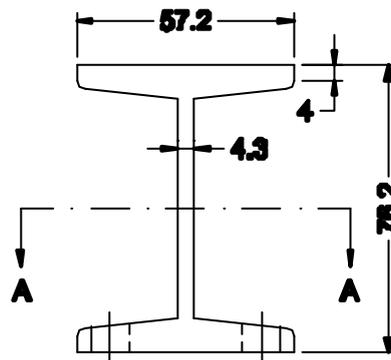
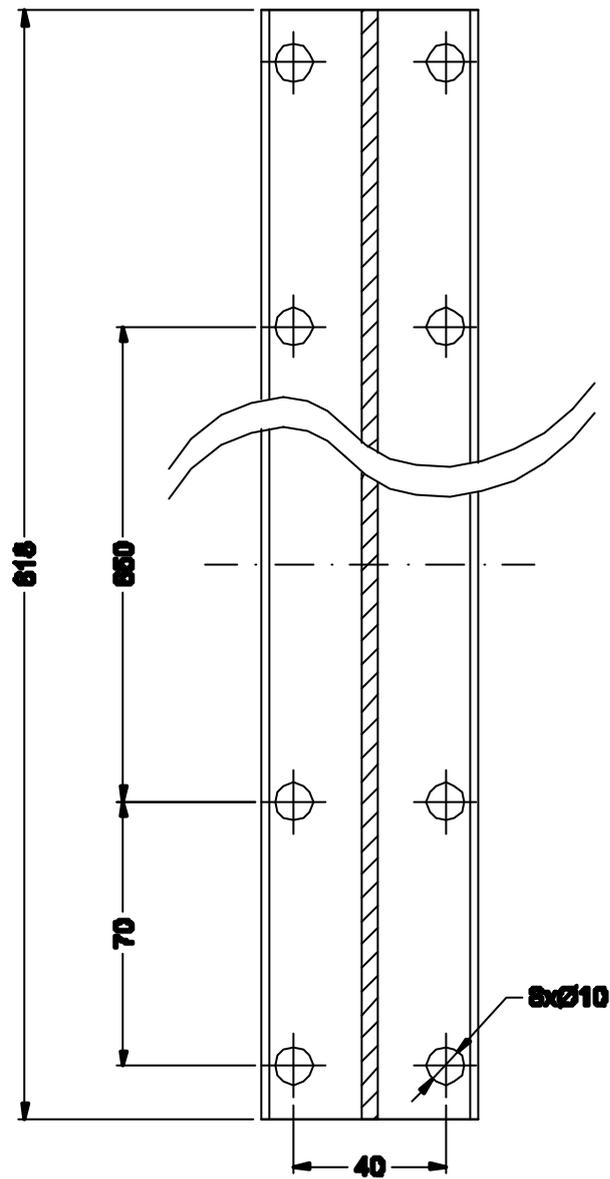
Data: outubro de 2001.

Escala: 1 : 1

Unidade: milímetros

2-02

CORTE A



IT	Viga I	01	seg ABNT 1020	PERFIL I 8x2,315"
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO VIGA ARTICULADA



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS
OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

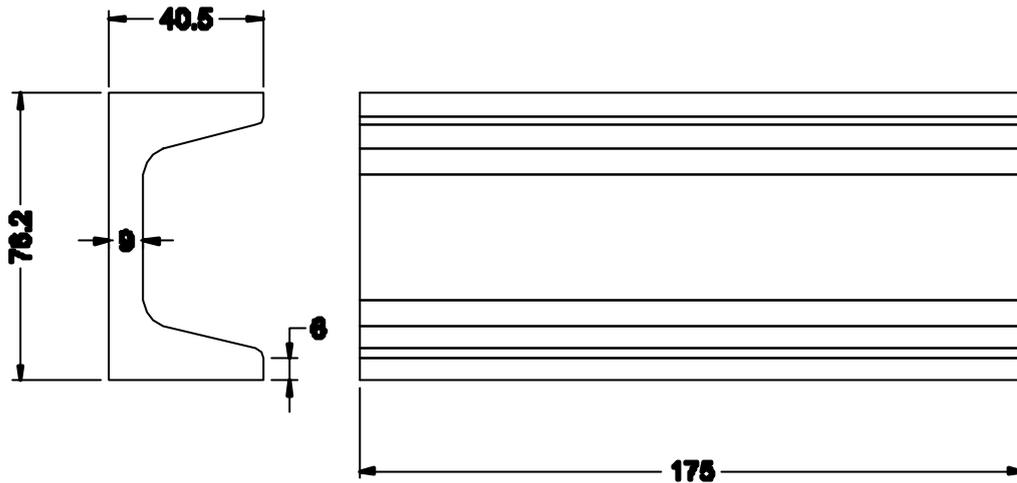
Visto:

Data: outubro de 2001.

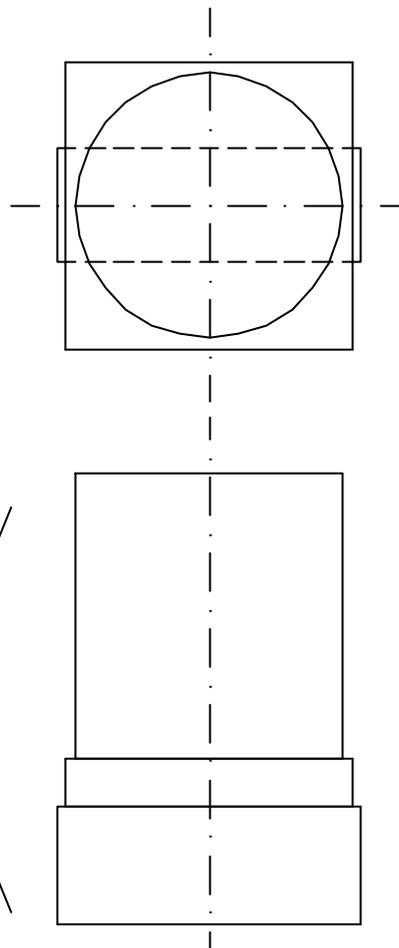
Escala: **1 : 2**

Unidade: milímetros

2-03



Peça 09 Reforço viga articulada



Peça 08

Peça 08 Conjunto fixação manual
 Idêntica à peça 08 do
 Conjunto Garfo Articulado

09	Reforço viga articulada	05	esp ABNT 1020	PERFL U 8"x1.1/2"
08	Conjunto fixação manual	02	esp ABNT 1020	
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO VIGA ARTICULADA

UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: HUMBERTO TODESCHINI

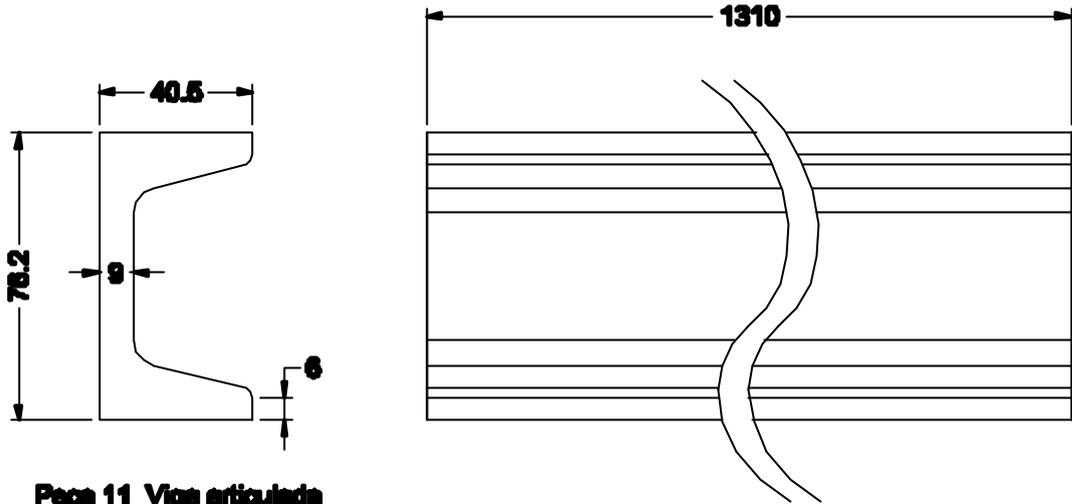
Visto:

Data: outubro de 2001.

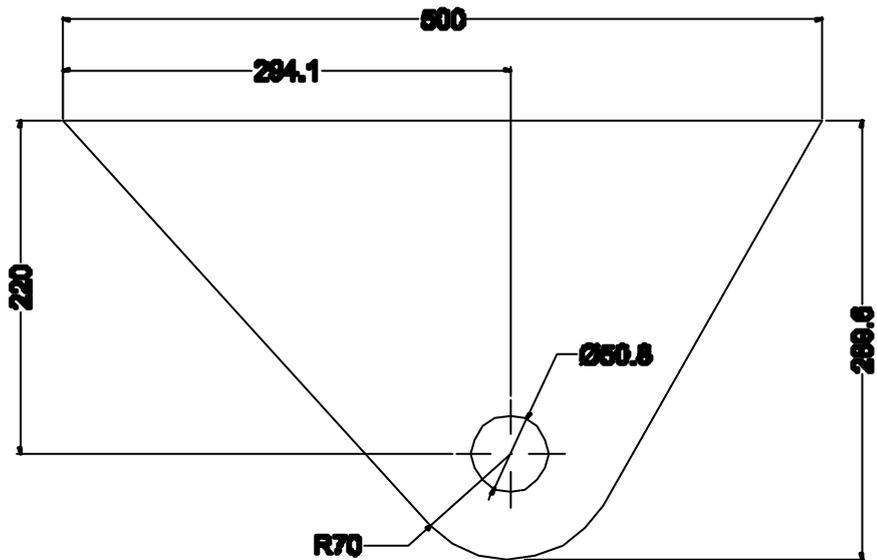
Escala: 1 : 2

Unidade: milímetros

2-04



Peça 11 Viga articulada
Escala 1 : 2



Peça 12 Chapa fixação inferior do cilindro
Escala 1 : 5

12	Chapa fixação inferior do cilindro	02	aco AINT 1020	ESPESURA 1"
11	Viga articulada	02	aco AINT 1020	PERFL U 3"x1.1/2"
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO VIGA ARTICULADA



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

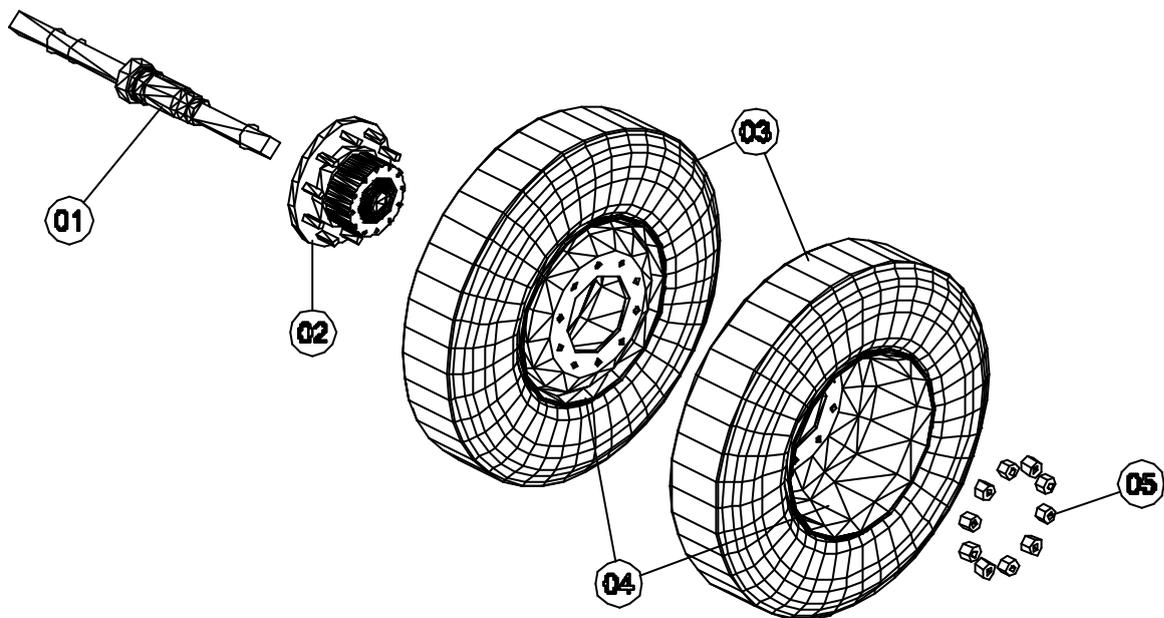
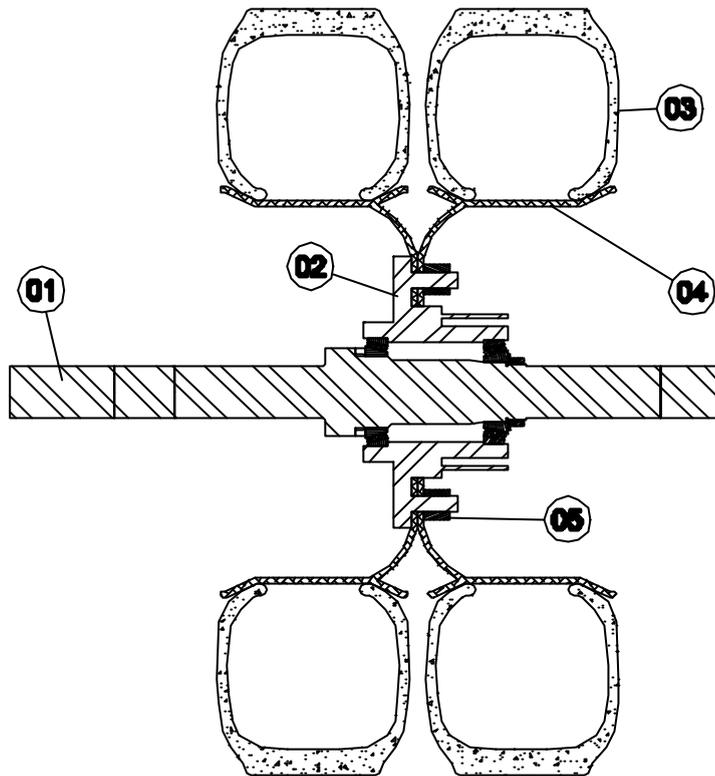
Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: 1 : 2 e 1 : 5

Unidade: milímetros

2-05



03	Forca fixação do eixo	10		COMERCIAL
04	Aro R20	01 ou 02		COMERCIAL
03	Pneu 10,0 R20	01 ou 02		COMERCIAL
02	Conjunto eixo de roda	01		COMERCIAL
01	Eixo	01	esp AINT 4340	
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO DO RODADO



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

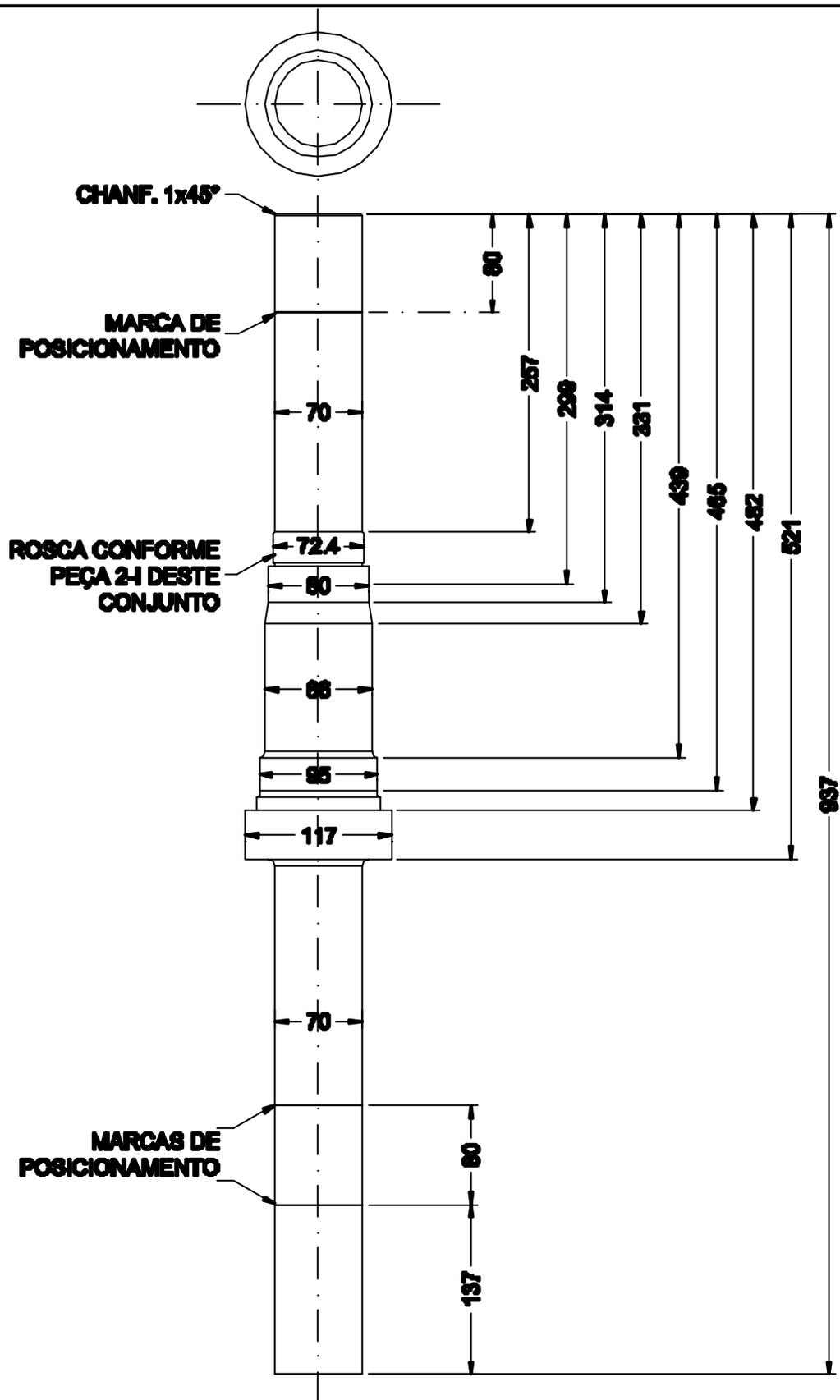
Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: 1 : 10

Unidade: milímetros

3-00



01	Ebo	01	esp ABNT 1020	
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO DO RODADO



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

Visto:

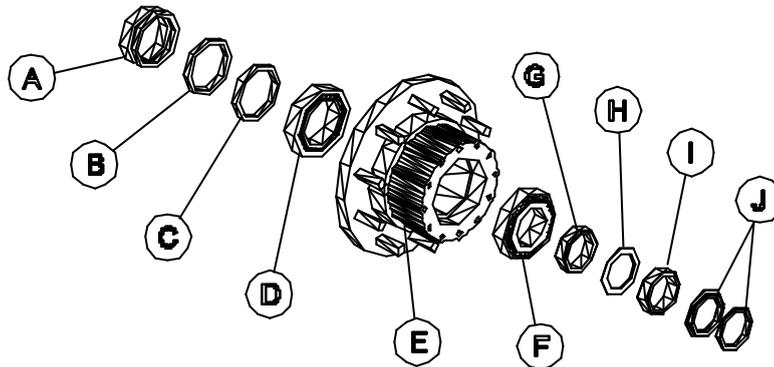
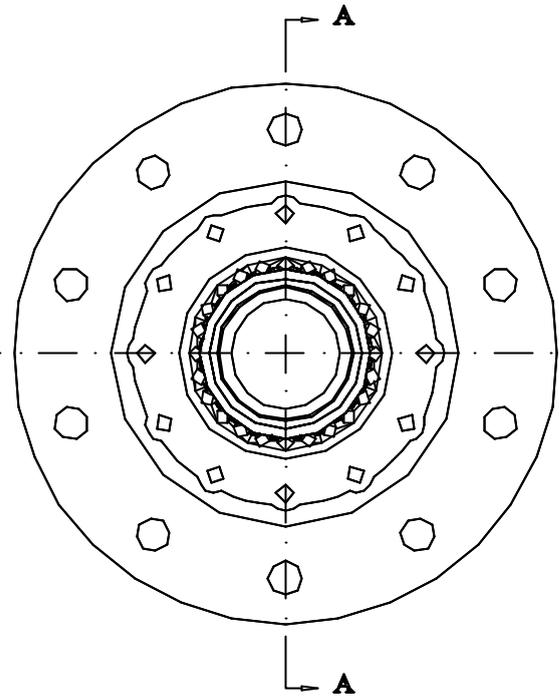
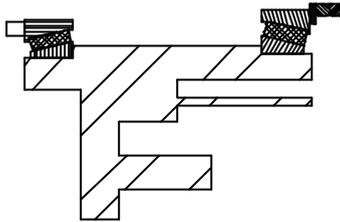
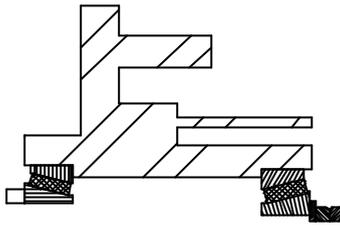
Data: outubro de 2001.

Escala: **1 : 5**

Unidade: **milímetros**

3-01

CORTE A



02-J	Retentores	02	TAB 3080331	VOLVO Mod. EDCN.12
02-I	Forca	01	TAB 191178	VOLVO Mod. EDCN.12
02-H	Arruela trava	01	TAB 191179	VOLVO Mod. EDCN.12
02-G	Forca	01	TAB 324685	VOLVO Mod. EDCN.12
02-F	Jogo de rolamento externo	01	TAB 6889594	VOLVO Mod. EDCN.12
02-E	Cabo roda traseira do disco	01	TAB 3159586	VOLVO Mod. EDCN.12
02-D	Jogo de rolamento interno	01	TAB 6889583	VOLVO Mod. EDCN.12
02-C	Retentor interno	01	TAB 6884308	VOLVO Mod. EDCN.12
02-B	Anal espaçador	01	TAB 1576308	VOLVO Mod. EDCN.12
02-A	Colar de disco	01	TAB 302946	VOLVO Mod. EDCN.12
02	Conjunto eixo de roda			
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO DO RODADO



UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA



SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

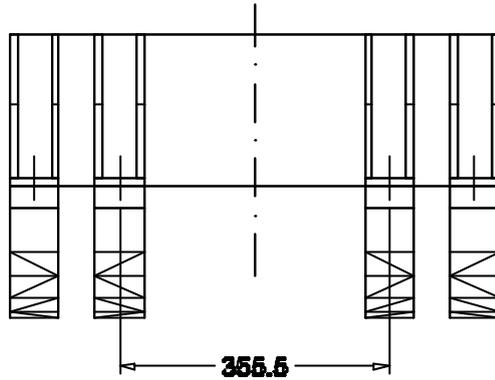
Visto:

Data: outubro de 2001.

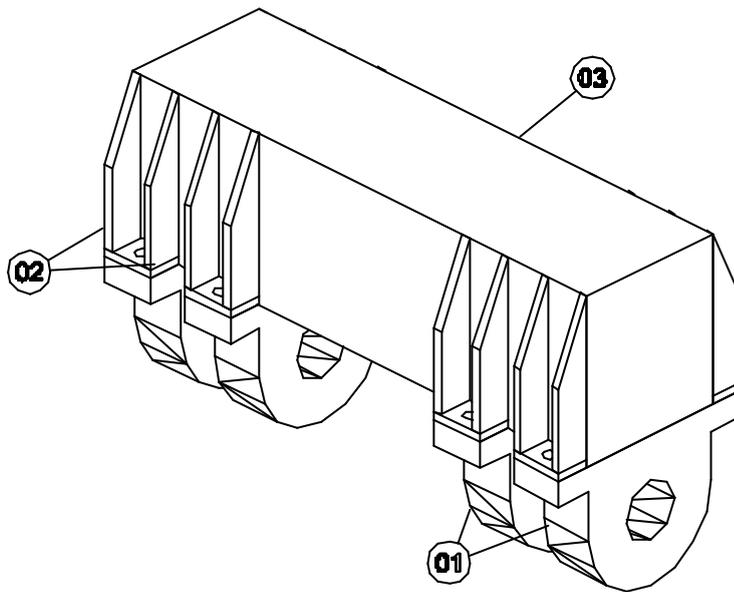
Escala: *****

Unidade: milímetros

3-02



Fazer aletas de fixação para os dois novos mancais idênticos as existentes



03	Suporte do carro	01		EXISTENTE
02	Aletas de fixação dos mancais	04		
01	Mancais	04		
peça	denominação	quant.	material	observação

CONJUNTO DE LIGAÇÃO COM O CARRO

UFRGS ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA DE APLICAÇÃO DE CARGA DO SIMULADOR DE TRÁPESO UFRGS-DAER/RS

OPFAI - Grupo de Projeto, Fabricação e Automação Industrial

Nome: **HUMBERTO TODESCHINI**

Visto:

Data: outubro de 2001.

Escala: **1 : 10**

Unidade: **milímetros**

4-00

Apêndice III

Neste apêndice estão as características da mola pneumática utilizada recolhidas do manual do fabricante. Para este caso utiliza-se a faixa de altura de 150 mm (5,9 in.) até 250 mm (9,8 in.) sob qualquer pressão, de acordo com o ensaio.

333

Firestone

AIRSTROKE AIRMOUNT

Description		Order No.
Style 333	Blind nuts, 1/4 NPT	WO1-358-7845
	Blind nuts, 3/4 NPT	WO1-358-7842
Two Ply Bellows	Blind nuts, 1/4 NPT, bumper	WO1-358-7838
	Button head steel bead ring	
	1 7/8 bolts, nuts, washers	WO1-358-7830
	Rubber bellows only	WO1-358-7019
Assembly weight.....		24.6 lbs.
Force to collapse to minimum height (@ 0 PSIG).....		65 lbs.

Static Data 8695

SEE PAGE 12 for instructions on how to use chart.

NOTE: This part is also available with bead rings (rather than end plates.) SEE PAGE 8.

Dynamic Characteristics at 14.70 in. Design Height (Required for Airmount isolator design only)				
Volume @ 100 PSIG = 1,786 in ³			Natural Frequency	
Gage Pressure (PSIG)	Load (lbs.)	Spring Rate (lbs/in.)	CPM	HZ
40	3,282	685	86	1.43
60	5,167	933	80	1.33
80	7,000	1,179	77	1.28
100	8,940	1,425	75	1.25

Force Table (Use for Airstroke * actuator design)						
Assembly Height (in.)	Volume @ 100 PSIG (in ³)	Pounds Force				
		@20 PSIG	@40 PSIG	@60 PSIG	@80 PSIG	@100 PSIG
16.0	1,904	1,338	2,866	4,524	6,241	8,062
14.0	1,718	1,706	3,478	5,388	7,325	9,338
12.0	1,507	1,981	3,955	6,083	8,200	10,405
10.0	1,274	2,208	4,376	6,698	9,003	11,400
8.0	1,022	2,389	4,733	7,220	9,710	12,278
6.0	754	2,574	5,087	7,724	10,396	13,139
4.0	473	3,049	5,871	8,787	11,827	14,918

Apêndice IV

O pavimento

O principal objetivo da existência de uma estrutura para vias pavimentadas é obter um meio de reduzir a sollicitação ou pressão causadas pela carga das rodas a valores abaixo dos que a estrutura pode suportar [Wignall, et al., 1991]. Como pode ser visto na Figura 9.1 as tensões geradas em um pavimento, quando sollicitado ciclicamente, leva o revestimento asfáltico ou camada cimentada a ruptura por fadiga [Medina, J., 1997], muitas vezes prematura devido as incontrolláveis variações sazonais e diárias de temperatura e umidade do subleito e das misturas asfálticas.

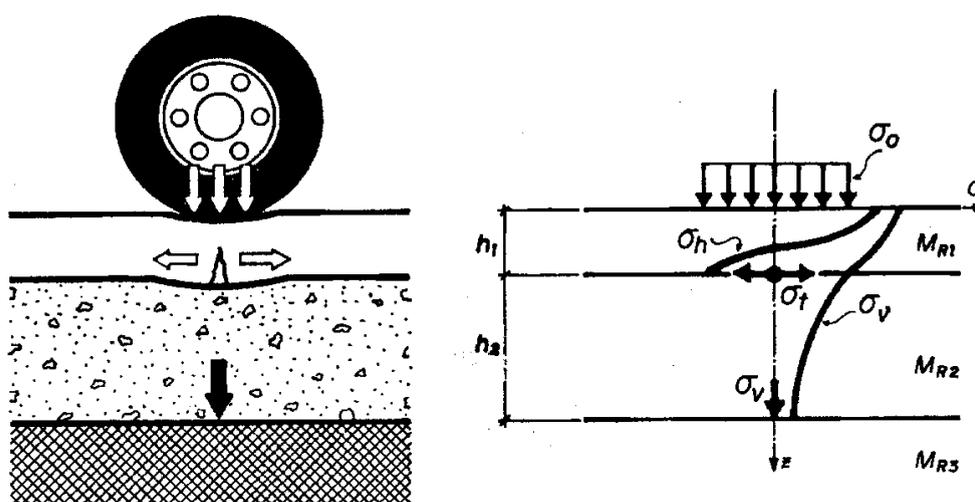


Figura 9.1 - Tensões em um pavimento.

Seguem trechos do livro “Mecânica dos Pavimentos” [Medina, 1997] sobre Terminologia e Classificação de pavimentos:

“A atual norma brasileira de pavimentação, NBR-7207/82 da ABNT proveio da norma ‘Terminologia e classificação de pavimentação’, TB-7, de 1953, revista em 1969. Nela se encontra a definição:

O pavimento é uma estrutura construída após terraplanagem e destinada, econômica e simultaneamente, em seu conjunto, a:

- a) resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego;
- b) melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança;
- c) resistir aos esforços horizontais que nela atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento.”

De acordo, ainda, com a TB-7:

“*Subleito* é o terreno de fundação do pavimento ou revestimento”.

“*Sub-base* é a camada corretiva do subleito, ou complementar à base, quando por qualquer circunstância não seja aconselhável construir o pavimento diretamente sobre o leito obtido pela terraplanagem”.

“*Base* é uma camada destinada a resistir e distribuir os esforços verticais oriundos dos veículos sobre a qual se constrói um revestimento”.

“*Revestimento* é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a econômica e simultaneamente:

- a) a melhorar as condições de rolamento quanto a comodidade e segurança;
- b) a resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento”.

“Consideram-se tradicionalmente, duas categorias de pavimentos:

- 1) Pavimento flexível – constituído por um revestimento betuminoso sobre uma base granular ou de solo estabilizado granulometricamente;
- 2) Pavimento rígido – constituído por placas de concreto (raramente é armado) assentes sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária.

Quando, sob o revestimento betuminoso, tem-se uma base cimentada, o pavimento é dito semi-rígido. Considera-se o pavimento reforçado de concreto asfáltico sobre placa de concreto como pavimento composto”.

“As cargas máximas legais (em Kgf) segundo a lei nº 7408 (de 1985) nas rodovias brasileiras vêm indicadas – “sem multa” e “com multa” – a seguir:

- eixo simples, rodas simples5.250 e 5.750
- eixo simples, rodas duplas10.500 e 11.500
- eixo tandem duplo17.850 e 19.350
- eixo tandem triplo26.700 e 29.030
- peso total do veículo47.250”

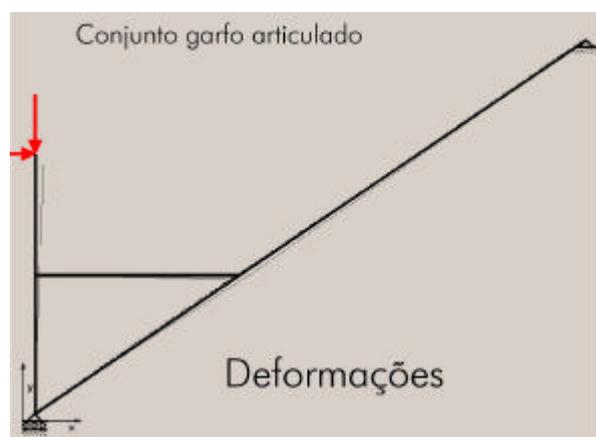
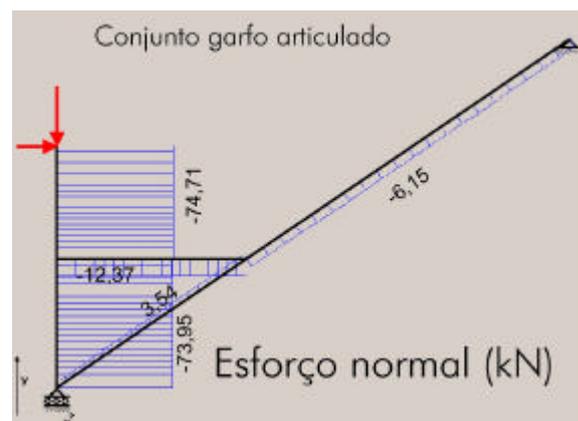
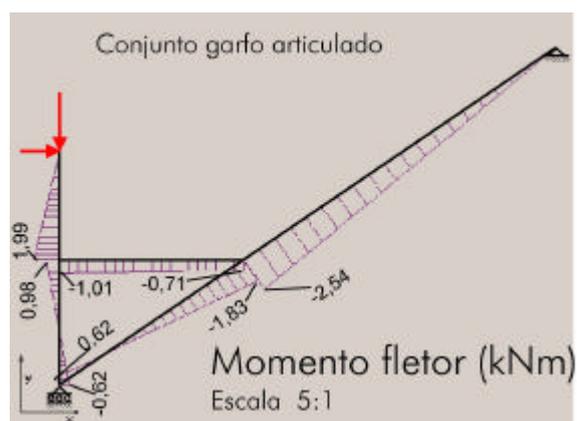
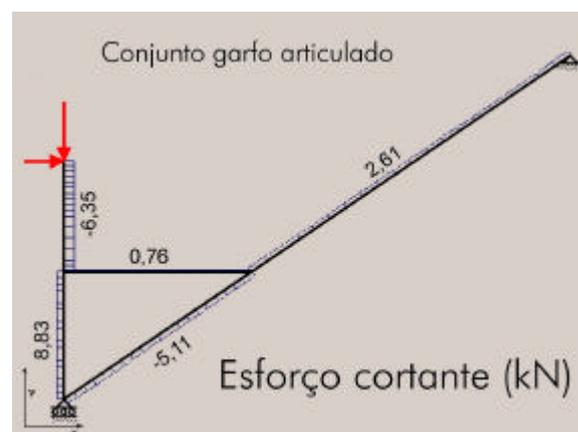
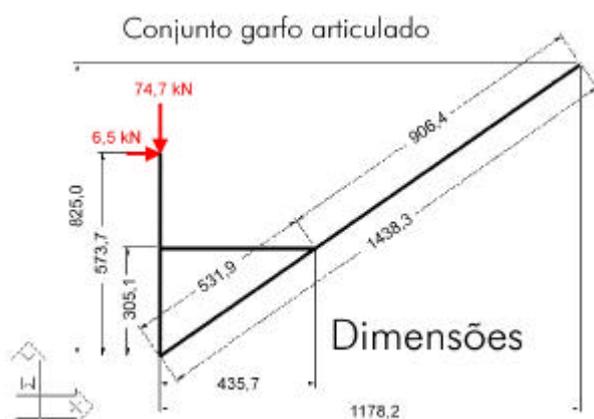
Com relação ao tráfego Medina, (1997) diz que “é muito variado quanto ao tipo de veículos e cargas transportadas. Uma das dificuldades no dimensionamento de pavimentos é a previsão da evolução do tráfego ao longo do tempo e a avaliação do poder de destruição, de modo comparativo, que exercem as várias cargas a diferentes níveis de repetição.”

Apêndice V

Diagramas de corpo livre, de esforços normais e momentos cortantes e fletores.

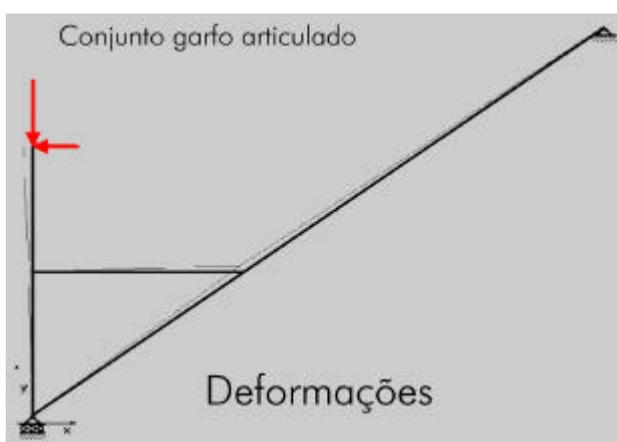
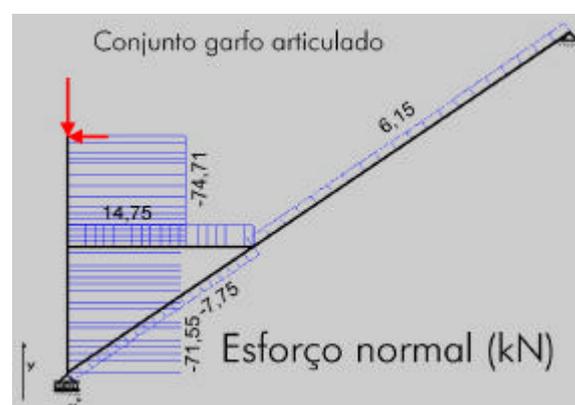
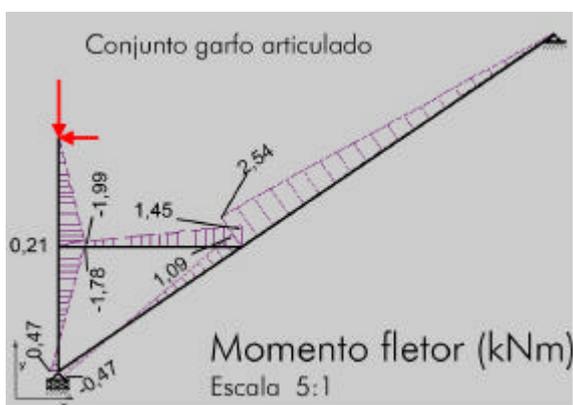
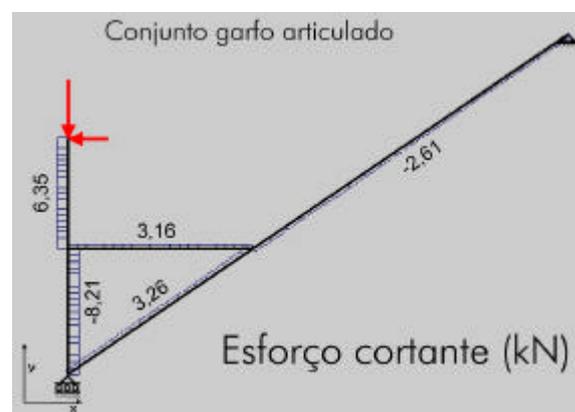
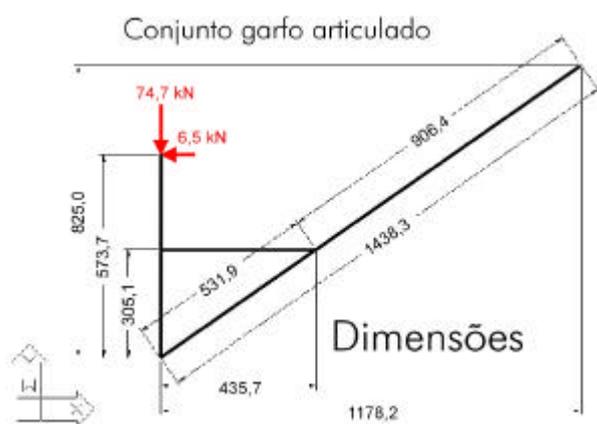
Garfo articulado

Carga inclinada para (frente).

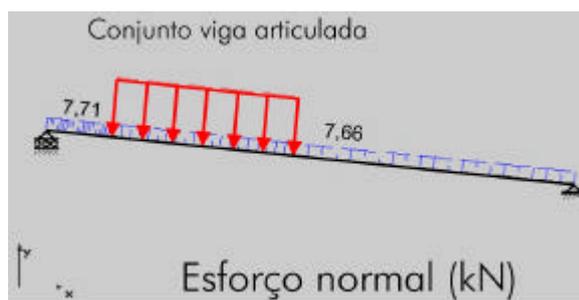
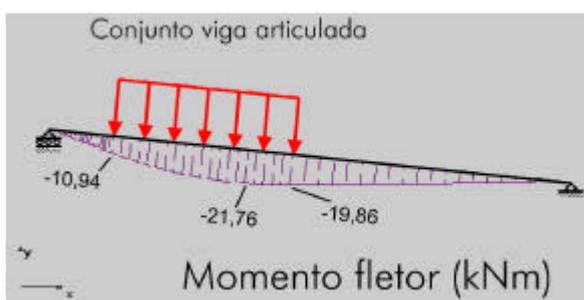
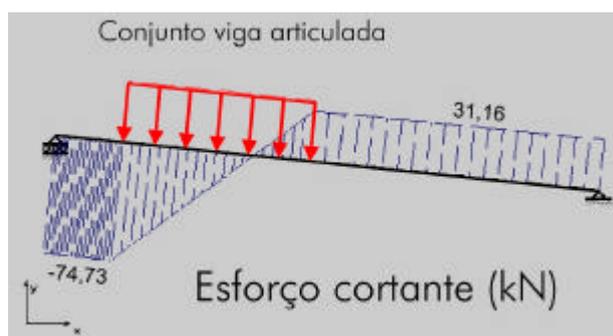
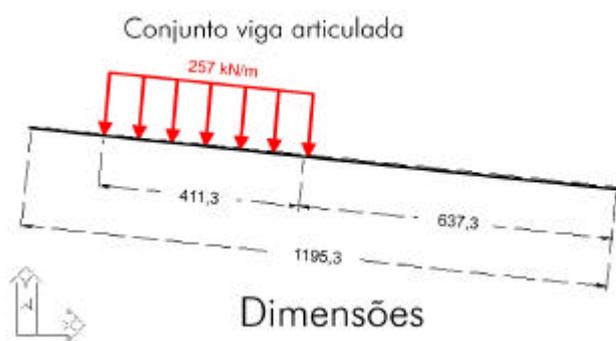


Garfo articulado

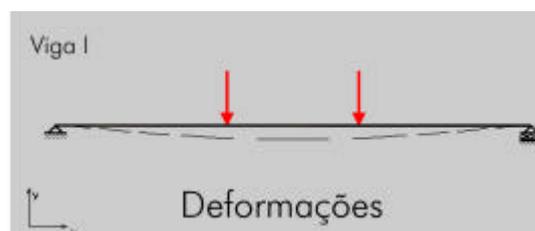
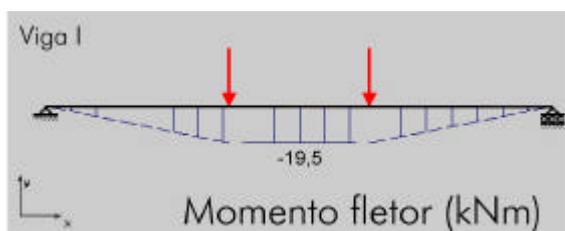
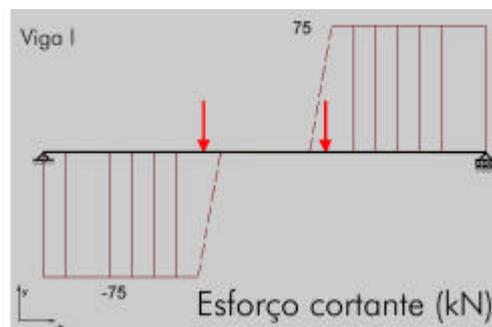
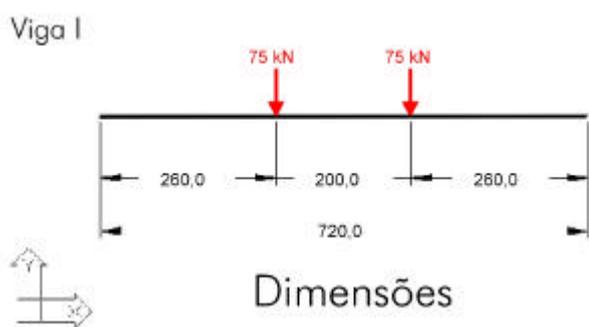
Carga a esquerda (para trás).



Viga articulada



Viga I



Apêndice VI

- A frequência de excitação do piso: onda senoidal de amplitude 0,05 m e período igual a 1 metro a 20 km/h. $F(t) = y = Y \sin(\omega t + \phi)$

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

$$\omega = 34,9 \text{ Hz}$$

Onde ω é a frequência excitadora do sistema.

- Massa suspensa do sistema aproximadamente 380 kg.
- As constantes de rigidez das molas pode ser visto no Apêndice III fornecidas pelo fabricante, de acordo com a pressão das mesmas.
- A constante de rigidez dos pneus foi estimada em 2500 kN/m.

ω_n é a frequência natural, m a massa suspensa, k a constante de rigidez equivalente das molas e pneus, r a razão das frequências e α o índice de amortecimento do sistema. ϕ a fase.

- Para $\alpha = 0,1$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad \frac{X}{Y} = \left\{ \frac{1 + (2\alpha r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\alpha r)^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \phi = \tan^{-1} \left[\frac{2\alpha r^3}{1 + (4\alpha^2 - 1)r^2} \right]$$

Na tabela os valores encontrados para as diferentes pressões das molas.

P molas (Psi)	k_m (kN/m) (2x)	k_e (kN/m)	ω_n (rad/s)	r	X (mm)
40	120,0	2740	84,9	0,411	0,0583
60	163,4	2826	86,3	0,404	0,0580
80	206,2	2912	87,5	0,399	0,0578
100	249,6	2999	88,8	0,393	0,0576

Esta análise indica que o sistema não entrará em ressonância e responde conforme o esperado.