

PROJETO BÁSICO DE UM ACOPLADOR PNEUMÁTICO

Leandro Alexis De Donato Paez
lealexis.paez@gmail.com

Resumo. O objetivo deste estudo é caracterizar a utilização de molas pneumáticas em aplicações veiculares e industriais (como atuadores ou isoladores de vibração) e ilustrar, com a apresentação de um projeto básico de um acoplador pneumático, os processos de projeto, fabricação e testes de um sistema que utiliza molas pneumáticas. Além de dissertar sobre a origem e evolução das molas pneumáticas, considerações teóricas de seu funcionamento e aplicações atuais, o trabalho engloba etapas de otimização de um sistema de acoplamento pneumático. Os desenhos do projeto são também especificados. As etapas de fabricação são determinadas, com considerações a respeito dos processos, máquinas utilizadas e dificuldades envolvidas. Uma seção conclusiva deverá sintetizar todos os conceitos utilizados e identificar as principais características do desenvolvimento do projeto.

Palavras chave: Suspensão a ar. Mola pneumática. Acoplador. Descarga de vagões. Engenharia mecânica.

1. Introdução

O intuito deste projeto é desenvolver uma atividade completa e de nível profissional na área de engenharia mecânica. Princípios e habilidades adquiridos ao longo destes anos na Escola Politécnica servirão de base para a realização de um trabalho conceitual com implicações práticas.

O tema do trabalho em questão foi levantado junto à empresa Dynamic Air, que projeta, fabrica e instala sistemas de transporte pneumático e também possui área de desenvolvimento de equipamentos especiais – que é justamente de onde surgiu a idéia para o trabalho.

Um dos equipamentos de estudo é chamado “*Boot Lift*”, que é, basicamente, um acoplador de acionamento pneumático para facilitar a descarga de material de caminhões/vagões em silos e transportadores. O sistema mecânico é constituído de uma pequena plataforma articulada que possui um bocal de borracha em sua parte superior (que irá realizar o acoplamento no bocal do caminhão/vagão), utilizando molas pneumáticas para sua elevação.

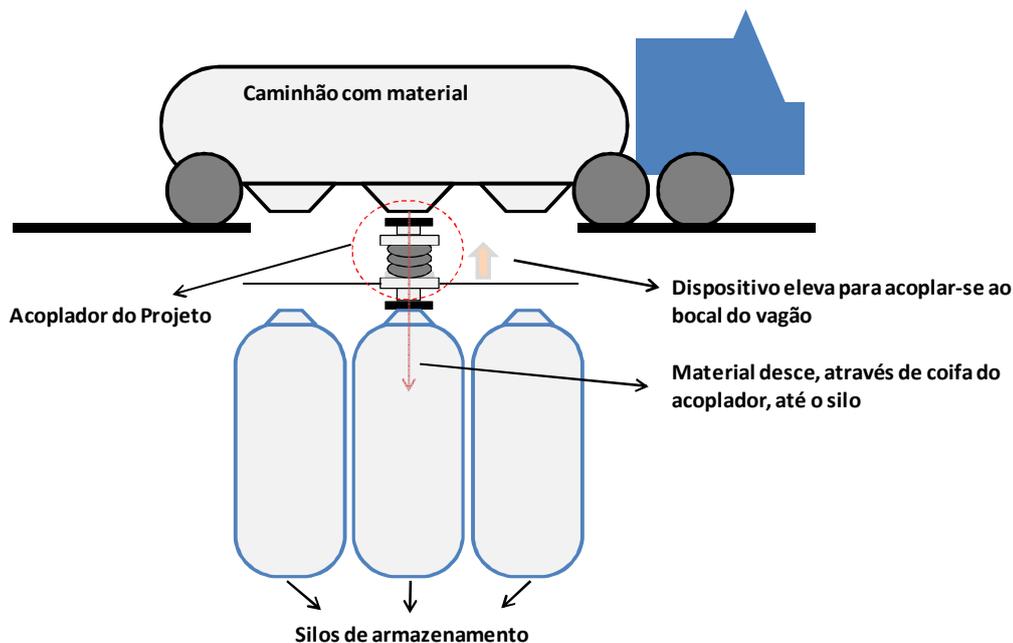


Figura 1. Exemplo de aplicação do acoplador: descarregamento de caminhão

Ao discutir o tema com profissionais da empresa, percebeu-se oportunidade de aperfeiçoamento de acopladores pneumáticos e também um interesse em analisar outras aplicações relevantes para molas pneumáticas.

Em síntese, o trabalho visa analisar a aplicabilidade atual de molas pneumáticas (como suspensões no setor automotivo, acopladores, atuadores, entre outros), rever o atual projeto do *Boot Lift Dynamic Air* (visando mapear possíveis melhorias e desenvolvimentos alternativos) e, por fim, realizar o projeto básico de um sistema otimizado de acoplamento com fabricação de um protótipo.

Inicialmente, descrevo a história e evolução das molas pneumáticas, que surgiram como um conceito para maximizar o conforto dos automóveis, substituindo as molas mecânicas. Características básicas das molas pneumáticas Firestone são descritas, assim como aplicações e sistemas substitutos (em geral, molas mecânicas, pistões pneumáticos e outros mecanismos). Depois, o projeto básico do “acoplador otimizado” é detalhado, com descrição dos subsistemas, suas funções e os cálculos realizados (além de desenhos de conjunto e outros detalhes). Uma comparação com o projeto atual *Dynamic Air* é feita, especialmente no que consiste a mecanismos alternativos implementados.

2. Molas pneumáticas

No início da década de 30, a fábrica Firestone de borracha e pneus iniciou a realização de testes para desenvolver e analisar o potencial de molas pneumáticas.

Entre 1935 e 1939, já existiam vários modelos de veículos americanos que estavam equipados com molas pneumáticas e eram intensamente testados para demonstrar os benefícios da utilização destas molas. A grande dificuldade, na época, era inserir as molas pneumáticas como elementos constituintes dos veículos produzidos em grande escala, uma vez que os custos para utilização de molas mecânicas eram consideravelmente menores. Além disso, algumas melhorias nas molas mecânicas helicoidais elevaram drasticamente o conforto, o que tornava menos justificável a utilização de um substituto de muito maior custo (apesar de que as molas pneumáticas ainda assim melhoravam substancialmente o conforto e estabilidade dos veículos).

Em 1938, o maior fabricante de trailers dos Estados Unidos se interessou pela utilização de molas pneumáticas para novos modelos de ônibus que estavam desenvolvendo. Trabalhando juntamente aos engenheiros da Firestone, os primeiros ônibus foram testados em 1944 e a evidente superioridade das suspensões a ar foi documentada. No começo da década de 50, após anos de intenso desenvolvimento do modelo, o ônibus com suspensão a ar finalmente teve sua produção iniciada. Este foi o marco para a posterior evolução e ampliação das molas pneumáticas.

Após evolução dos modelos e universalização de sua utilização, hoje não somente nos Estados Unidos as molas pneumáticas são extensivamente aplicadas (caminhões, ônibus, automóveis, atuadores industriais, isoladores de vibração), como também no Brasil sua presença é ampla: veículos pesados (caminhões, ônibus, metrô), indústria (como isoladores de vibração e atuadores) e também em veículos leves, sendo comum nos adeptos ao “*tuning*” de seus automóveis.

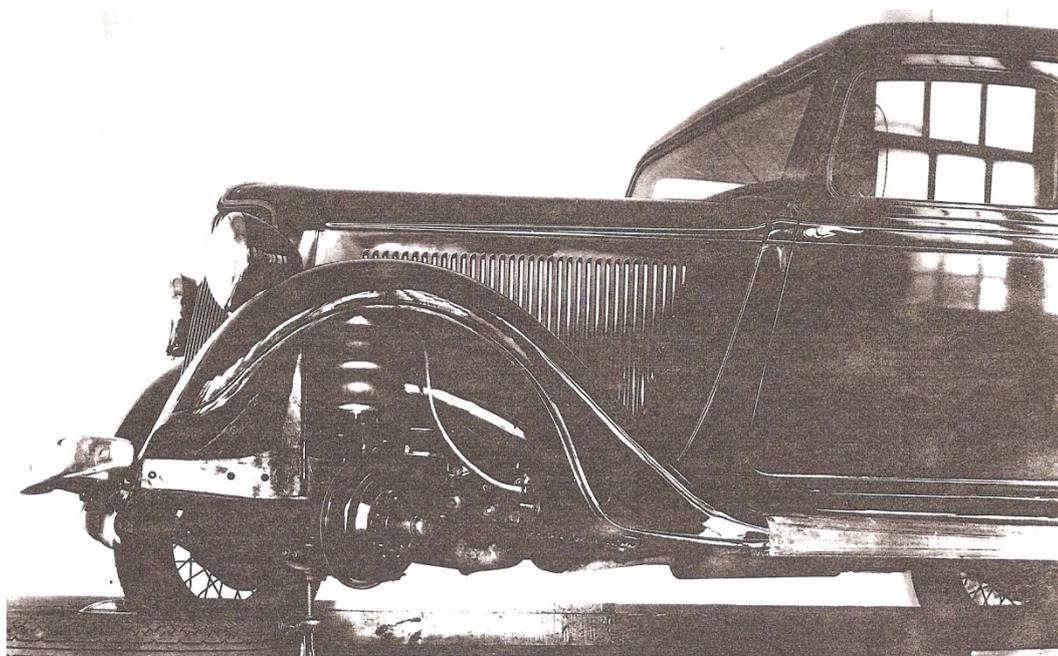


Figura 2. Automóvel Plymouth, de 1934, com molas pneumáticas (Firestone, 2007)

Nos dias de hoje, a indústria de caminhões é altamente mais eficiente do que antigamente. Devido à necessidade crescente de redução de custos, ao aumento do preço dos combustíveis e outras necessidades de mercado, é uma questão de sobrevivência para as transportadoras que sua frota seja eficiente.

Essa evolução propiciou às molas pneumáticas um ganho de escala significativo, à medida que elas garantem maior vida ao veículo, menores custos operacionais e menos falhas de circuitos eletrônicos caros (devido à minimização das vibrações na cabine). Outro fator importante é que veículos que utilizam suspensão a ar implicam menos danos aos produtos transportados, garantindo um transporte de maior qualidade.

Ainda nas vantagens de sua utilização, o conforto dos motoristas aumenta consideravelmente, elevando sua produtividade e satisfação, além de evitar parte dos acidentes por fadiga.

O investimento inicial para instalação de molas pneumáticas em caminhões pode ser elevado, porém o retorno é relativamente rápido, uma vez que os custos de manutenção e períodos de inatividade são reduzidos consideravelmente.

3. Características das molas pneumáticas

A borracha utilizada na mola é constituída de quatro camadas:

- Invólucro externo: Capa externa de borracha calandrada.
- Camada secundária: camada de borracha reforçada, com as fibras em direções com ângulos específicos em relação à camada primária.
- Camada primária: camada de borracha reforçada.
- Delineador interno: camada interna de borracha calandrada.

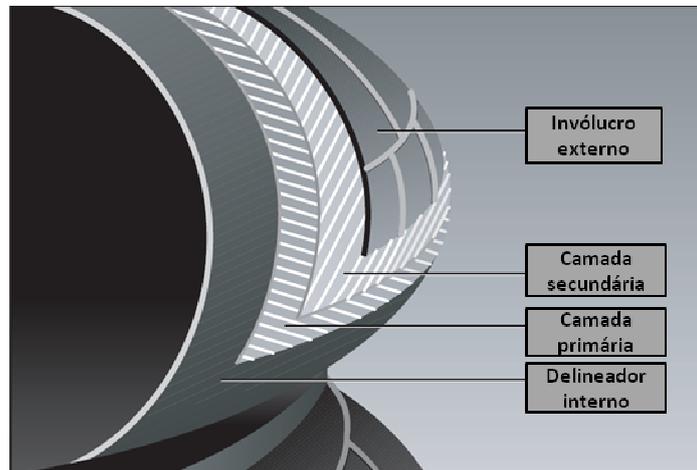


Figura 3. Subcamadas de uma mola pneumática (Firestone, 2007)

Esta é a composição padrão de molas pneumáticas Firestone – para pressões muito elevadas, quatro camadas de borracha reforçada são utilizadas. É importante ressaltar que o produto final deve ser completamente impermeável e resistir a pressões de projeto a serem determinadas. Em termos de desgaste do material, o principal fator para prolongamento da vida da mola é o ambiente operacional, uma vez que o interior é apenas exposto a ar comprimido. Para estimativa de vida útil, o principal cálculo a ser realizado baseia-se em analisar a fadiga provocada pela deformação típica de acionamento.

A entrada de ar é geralmente de 1/4" (6,35 mm), e situa-se no centro da placa superior. Uma porca-cega é utilizada como elemento de segurança, em caso de pressões muito acima de projeto venham a surgir dentro da mola. A placa superior é constituída de aço-carbono, e é fabricada e testada de maneira a garantir total vedação. O anel intermediário é feito de alumínio e serve para restringir a deformação no plano perpendicular ao eixo axial. A borracha composta é aquela formada por 4 camadas já apresentadas neste documento, e a placa inferior é idêntica à superior, porém sem a porca-cega e a entrada de ar.

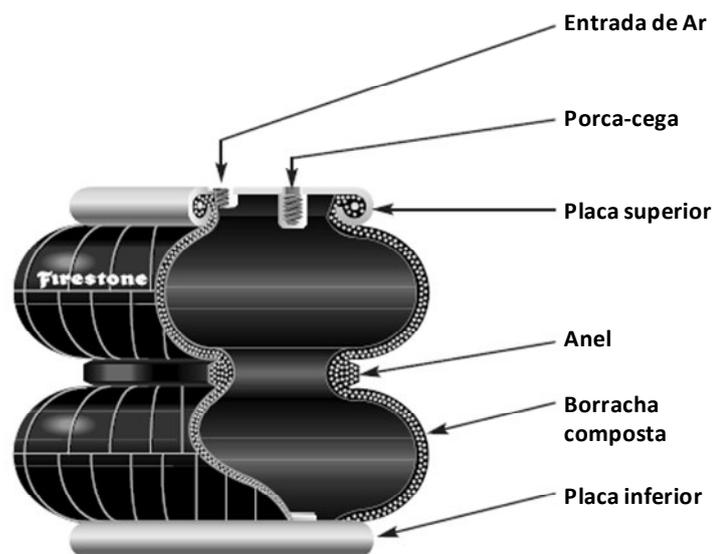


Figura 4. Componentes de uma mola pneumática de convolutas (Firestone, 2007)

Para um atuador, a força exercida pela mola pneumática é função de sua pressão interna e também de sua área efetiva, que varia de acordo com a extensão da mola.

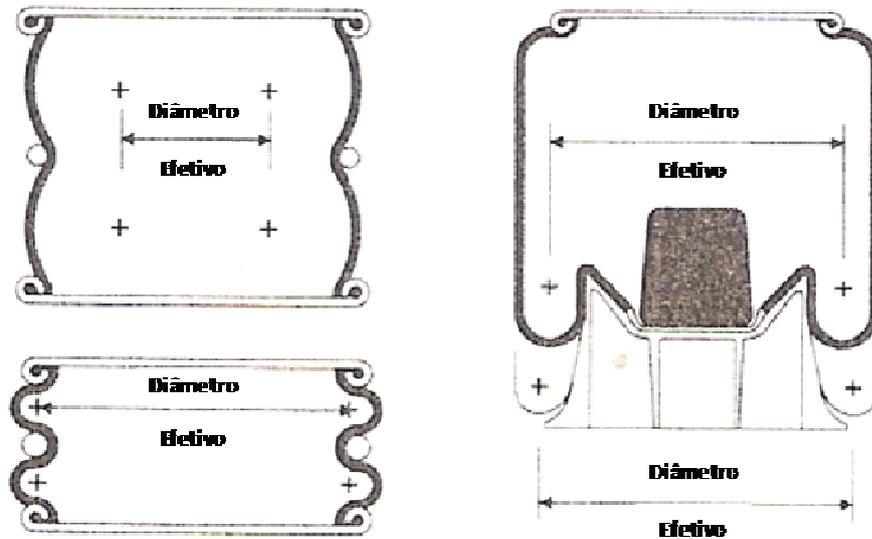


Figura 5. Área efetiva de molas pneumáticas: convolutas e manga reversível, respectivamente (Firestone, 2007)

A constante elástica é dada pela derivada da força pela deflexão na posição de equilíbrio da curva. Para pequenos incrementos ou deflexões, pode ser aproximada pela variação total da carga pela deflexão Eq.(1).

$$K = \frac{(L_c - L_s)}{(\Delta h_c + \Delta h_s)} \quad (1)$$

Em que:

- K = Constante elástica (Força por deflexão)
- L_c = Força na posição comprimida
- L_s = Força na posição estendida
- Δh_c = Variação de altura na compressão
- Δh_s = Variação de altura na extensão

$$K = P_{a1} \cdot \left[A_c \cdot \left(\frac{V_1}{V_c} \right)^{1,38} - A_s \cdot \left(\frac{V_1}{V_s} \right)^{1,38} \right] - 1,0 \cdot (A_c - A_s) \quad (2)$$

Em que:

- P_{a1} é a pressão absoluta na posição de equilíbrio
- V_1 é o volume na posição de equilíbrio
- V_c é o volume na posição L_c
- V_s é o volume na posição L_s

Como isoladoras de vibração, é necessário obter as frequências naturais das molas pneumáticas, a fim de se evitar ampliação do movimento vibracional. Portanto, pode-se calcular pela Eq.(3):

$$f \text{ (rpm)} = \frac{30}{\sqrt{d_s}} \quad (3)$$

4. Projeto do acoplador

A concepção básica de acopladores (não necessariamente pneumáticos) foi estruturada como uma solução para descarregar vagões de trens e caminhões graneleiros (que carregam negro de fumo, cal, e outros materiais a granel).

A transferência do material do caminhão para os silos da fábrica, em geral realizada mecanicamente, gera muita poeira (e conseqüentemente poluição atmosférica), além de desperdiçar material e utilizar mão de obra para operações não seguras (como rasgar *big bags* embaixo dos mesmos, abrir válvulas sob o caminhão, e outros).

Acopladores mecânicos já utilizam um sistema otimizado de descarga, porém necessitam de constante ajuste, uma vez que a carga no interior do caminhão varia, fazendo com que a posição de descarga também varie (a força exercida pela suspensão do veículo muda a posição de equilíbrio, devido à diminuição de carga).

Sistemas hidráulicos são uma boa alternativa para o acoplamento, porém dependem de uma série de fatores existentes na fábrica para seu funcionamento (tubulação com o fluido específico, bombas e atuadores hidráulicos). Quando comparados aos sistemas pneumáticos, os hidráulicos em geral são mais caros, possuem elevado desgaste (e, portanto, necessitam de maior manutenção) e ainda ocupam maior espaço. Isso sem mencionar a disponibilidade de linhas de ar comprimido na maioria das fábricas.

Ao analisar o projeto e o sistema *Dynamic Air* (2009), estabeleci algumas mudanças para otimizar o sistema:

- As barras articuladas do conceito atual são frágeis e o sistema de rolamentos utilizado para movimento horizontal não suporta qualquer carga perpendicular ao seu movimento (desenvolvi um sistema mais robusto, utilizando para isso o conceito do Mecanismo de Sarrus)
- O conceito atual utiliza quatro pares de molas em série, devido à necessidade de elevação uniforme do equipamento.
- Como na nova concepção o mecanismo permite apenas movimento em uma direção, irei utilizar apenas dois pares de molas em meu projeto.

Tais mudanças implicam em uma redução de custos de materiais (utiliza metade das molas em relação ao modelo existente) e adição de alguns processos de produção (chapas do mecanismo de Sarrus).

O mecanismo utilizado para garantir a correta elevação do sistema, como mencionado anteriormente, chama-se dispositivo de Sarrus. Ele garante apenas um grau de liberdade à estrutura, permitindo assim a utilização de dois pares de molas com segurança de que não haverá colapso do sistema.

O mecanismo foi inventado em 1853 por Pierre Frédéric Sarrus (matemático Francês, que lecionava na *University of Strasbourg*). O mecanismo é um dispositivo mecânico capaz de converter um movimento circular limitado em um movimento linear, sem a utilização de guias.

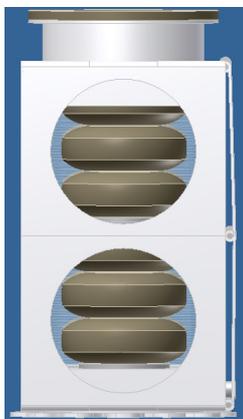


Figura 6. Vista lateral do acoplador pneumático

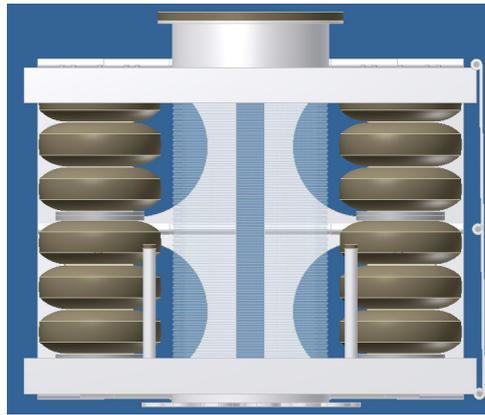


Figura 7. Vista frontal do acoplador pneumático

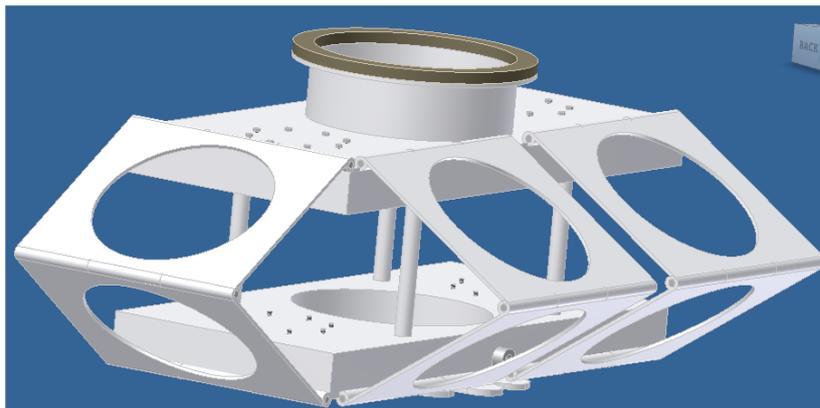


Figura 8. Vista isométrica do acoplador pneumático (molas não instaladas)

Tabela 1. Especificações do Sistema Projetado

Material	Aço Carbono
Massa total	~ 80 kg
Massa suportada pelas molas	~ 52 kg
Fluido de trabalho	Ar comprimido
Área efetiva das molas	0,04 m ²
Pressão interna máxima	5,6 bar (~ 5,6 atm)
Força na Pressão máxima	~ 23.000 N
Pressão interna sugerida	1 bar (~ 1 atm)
Força na Pressão sugerida	~ 4.000 N
Altura máxima	900 mm
Altura mínima	580 mm
Curso	320 mm
Largura máxima	780 mm
Largura mínima	450 mm
Comprimento máximo	1320 mm
Comprimento mínimo	1023 mm

5. Protótipo fabricado

Para ilustrar o funcionamento do mecanismo de Sarrus e também a operação de molas pneumáticas, um projeto simplificado foi desenvolvido, para que sua fabricação fosse viável e patrocinada pela *Dynamic Air* do Brasil.

Apenas uma mola foi utilizada, e o conceito foi reduzido e projetado com simetria.

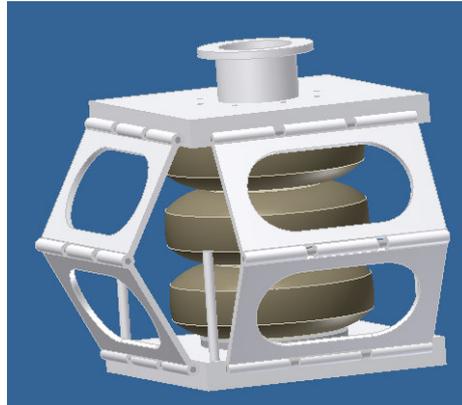


Figura 9. Vista isométrica do protótipo

Características do protótipo fabricado:

- Construído em chapa de Aço-Carbono de espessura 3/16" (~ 4,76 mm)
- Chapas cortadas na máquina *Hyperjet Flow* (utiliza jato de água com abrasivo de silicato)
- Furos para acoplamento da mola de 9,5 mm de diâmetro
- Entrada/saída de ar: meia-luva com rosca 1/4 NPT
- 2 válvulas esfera para controle de vazão (entrada/saída de ar)
- 1 conexão em T
- 1 mola pneumática de 3 convolutas modelo 3 (Firestone)
- 16 parafusos M8x1,25 de 15 mm (fixação das molas)
- Tubulação de 3/8" (~ 9,5 mm)
- Solda utilizada: TIG HF (metal de adição: aço inoxidável)

Etapas de fabricação:

- 1- Corte na máquina *Hyperjet Flow*: nesta etapa, o desenho de fabricação das chapas foi aberto no software da máquina *Hyperjet*, a qual realizou os cortes e furos necessários (levou 30 minutos para realizar o corte das chapas superior, inferior e as quatro chapas do mecanismo de Sarrus)
- 2- Conformação das chapas superior e inferior na dobradeira *Amada*
- 3- Corte dos tubos e pinos utilizados no mecanismo de Sarrus
- 4- Montagem do sistema, com posterior soldagem dos tubos da dobradiça nas respectivas chapas do mecanismo de Sarrus (o sistema é soldado em posição já montada para evitar desvios que podem prejudicar o funcionamento do conjunto)
- 5- Soldagem da meia-luva 1/4 NPT na chapa inferior
- 6- Soldagem dos fins-de-curso (tubos que suportam a estrutura quando a mola está despressurizada)
- 7- Soldagem do bocal com flange na tampa superior
- 8- Acabamento da peça (eliminação de rebarbas, pintura e secagem)
- 9- Montagem da mola pneumática e do sistema de válvulas de entrada e saída
- 10- Teste do conjunto: pressão de teste: 0,5 bar (~ 0,5 atm) gera uma força de aproximadamente 700 N

6. Montagem e testes

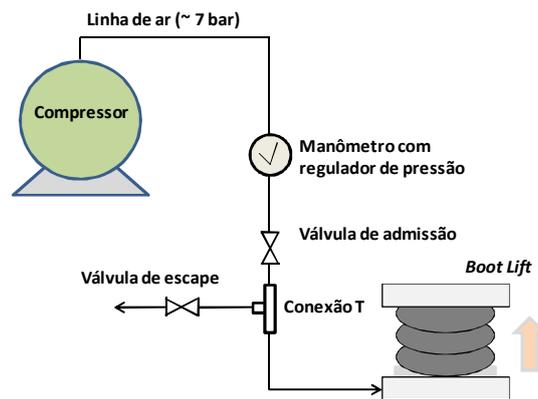


Figura 10. Sistema de entrada/saída de ar

Há apenas um orifício no sistema, o que leva a um sistema único de entrada/saída de ar. Para teste, utilizou-se um manômetro regulador de pressão (com regulagem de 0,5 bar [$\sim 0,5\text{atm}$]) ligado à linha de ar comprimido e também a uma válvula de admissão. Esta estava conectada a um conector T, que estava ligado também à entrada do *Boot Lift* e à válvula de saída (escape).

Os primeiros testes do sistema foram feitos utilizando-se a linha de ar comprimido disponível na fábrica da *Dynamic Air*. Uma pressão de 0,5 Bar ($\sim 0,5\text{atm}$) foi utilizada. O peso a ser levantado pela mola é próximo de 21 kg. O sistema foi perfeito em suas simulações, realizando movimento de ascensão praticamente plano (ou seja, os desvios foram mínimos, pois a estrutura de Sarrus impediu qualquer rotação ou movimento não linear do sistema).

Realizei testes também com uma pressão de 1 bar ($\sim 1\text{atm}$), e a estrutura conseguiu, facilmente e sem desvios, elevar uma pessoa de 80 kg (segundo cálculos utilizando a área efetiva da mola, a força máxima que pode ser exercida é da ordem de 1.400 N).

Para demonstrar o funcionamento do protótipo na Escola Politécnica, foi necessário obter um cilindro de ar comprimido com manômetro regulador de pressão de saída. O ar no interior do cilindro estava, inicialmente, a uma pressão de 150 psi (10,3 bar ou 10,3 atm) e volume de 5 litros (nessas condições). Em condições normais de temperatura e pressão, temos um volume de 50 litros ($0,05\text{m}^3$). Considerando-se que a mola tem um volume interno da ordem de 5 litros e opera com ar na pressão de 0,5 bar ($\sim 0,5\text{atm}$), teremos aproximadamente 20 a 25 ciclos de teste antes de acabar o ar comprimido no interior do cilindro.

7. Conclusões

O modelo projetado funcionou corretamente já nos primeiros testes, sem necessidade de adaptação ou correção. Apesar de projetar um sistema que utiliza o Mecanismo de Sarrus, muitas outras possibilidades de dispositivos e mecanismos existem para este caso.

A principal vantagem do novo mecanismo é a estabilidade do sistema – que já havia sido contestada pelos projetistas e caldeireiros que participaram da fabricação do primeiro modelo de *Boot Lift*. Como desvantagem, tem o fato de que esta estrutura é um pouco maior do que o antigo modelo, uma vez que as chapas do mecanismo dobram-se para fora da estrutura. Porém, como houve redução da largura devido à utilização de apenas dois pares de molas (anteriormente, usava-se 4), o espaço ocupado pelo sistema não foi significativamente alterado.



Figura 11. Foto do Protótipo



Figura 12. Foto do protótipo

7. Referências

- Firestone – Engineering Manual & Design Guide – Airstroke Actuators and Airmount Isolators – Unites States of America, 2007*
- Firestone –Aplicações de molas pneumáticas em suspensões de veículos e isoladores / atuadores industriais:*
<http://www.bfbr.com.br/fipil/CatProdConteudo.htm> - Acessado em: 18/04/2009.
- Dynamic Air – www.dynamicair.com / www.dynamicair.com.br – acessados em 16/04/2009.
- Shigley, Joseph E. – Projeto de Engenharia Mecânica – 7ª edição –Editora Bookman*
- Firestone –Airide Design Guide – United States of America, 2007*
- SAE Information Report** – 1ª Edição – Estados Unidos, 1988
- Thomas D. Gillespie – *Funamentals of Vehicle Dynamics – United States of America, 1992*
- Robert K. Vierck – *Vibration Analysis – Second edition – United States of America, 1979*
- Flow International Corporation - <http://www.flowcorp.com> - acessado em 15/11/2009
- Amada Global – www.amada.com – acessado em 15/11/2009
- Kone Indústria de Máquinas – www.kone.com.br – acessado em 15/11/2009
- Phoenix Ag - www.phoenix-ag.com - acessado em 17/04/2009
- Truck Spring - www.truckspring.com - acessado em 19/04/2009
- Goodyear - www.goodyear.com - acessado em 19/04/2009

PROJECT OF A PNEUMATIC COUPLER

Leandro Alexis De Donato Paez

lealexis.paez@gmail.com

Abstract. *The aim of this study is to characterize the utilization of air springs in vehicles and in the industry (as actuators or vibration isolators), and also illustrate, based on an engineering project of a pneumatic coupler, all the processes of design, construction and tests of a system using air springs. Besides discoursing about air springs origins and evolution, theoretical considerations about their functioning and actual applications, the work comprehends the stages of optimization of a pneumatic coupler. During the development of the work, a few changes have been made in order to evolve the project (introducing a new type of linkage for the elevation of the system). A prototype was built and demonstrated in the last presentation of the project.*

Keywords. *Air suspension. Air spring. Coupler. Discharge of wagons. Mechanical engineering.*