



MECANISMO DE UM SISTEMA DE AMORTECIMENTO PUSHROD

Cristhian Allan Cansi, cc001301@fahor.com.br
Diego Roberto Mayer, dm001346@fahor.com.br
Fabiano Cassol, fabiano@fahor.com.br
Marcos Antônio Lenz, ml001341@fahor.com.br

FAHOR, Avenida dos Ipês, 565, Horizontina-RS, Brasil

Resumo: Novas tecnologias na área automobilística são atrativos para empresas que buscam inovar e, desejam garantir excelência no setor de carros de alta velocidade. No entanto, as inovações tecnológicas vêm tornando-se o diferencial competitivo para o mercado atual do século XXI. Com isso, novos conceitos de amortecimento estão sendo desenvolvidos, como o de sistema de amortecimento pushrod. Assim, destaca-se que o presente artigo mediante estudos teóricos, tem como objetivo apresentar o estudo do grau de liberdade através dos métodos de Gruebler e Kutzbach e, além disso, calcular o posicionamento do sistema de quatro barras. Tendo em vista o melhor entendimento do mecanismo, foi desenvolvido através do software de CAD, o SolidWorks, um protótipo. Posteriormente foi fabricado e montado o mecanismo de amortecimento pushrod.

Palavras-chave: Mecanismo, pushrod, amortecimento, protótipo, movimento

1. INTRODUÇÃO

Mecanismos e máquinas são empregados desde a antiguidade pelo homem. Norton (2009) cita que os antigos egípcios construíram máquinas para poder construir as pirâmides e outros monumentos. O homem buscava substituir e facilitar o esforço humano, desenvolvidos principalmente na agricultura, caça, pescaria e etc, ou também, em armas e assim por diante. Conforme a necessidade humana, as evoluções nesta área foram avançando principalmente no campo da indústria, como em metalúrgicas, montadoras e outros.

O sistema de amortecimento pushrod foi desenvolvido primeiramente para os carros de formula 1, oferecendo maior performance dinâmica. De acordo com a empresa Lamborghini, esse sistema de amortecimento permite uma conduta mais confiável, com maior estabilidade lateral, o que garante conforto e segurança absoluta, mesmo em altas velocidades, pois o carro adere a linha perfeita da curva. Os amortecedores não estão montados nas rodas, mas está conectado na estrutura interna da carroceria, posicionados transversalmente. Além do mais, a combinação deste sistema, a manobra é mais sensível e fácil para manejar em altas velocidades. Assim, a ligação rígida no chassi do carro, melhora a precisão e a reação espontânea dos amortecedores (HANLON, M., 2011).

Um mecanismo é um dispositivo ou um conjunto de elementos de máquinas ligados de tal maneira a produzir um movimento específico. Os mecanismos podem ser subdivididos de acordo com algumas aplicações: mecanismos são elementos mecânicos, pneumáticos, hidráulicos, elétricos ou combinados (GRILLO, N. L., s.d.). Já Norton (2009) define um mecanismo como um dispositivo que transforma qualquer movimento em algum padrão desejado e, de maneira geral, desenvolve forças de baixa intensidade e transmite pouca potência. Exemplos de mecanismo comuns são: o relógio analógico, a cadeira dobrável, o guarda-chuva e outros.

Norton (2009) cita ainda que, uma máquina contém mecanismos que são projetados para transmitir potências significativas e fornecer forças significativas. Exemplos comuns de máquina são: o liquidificador, o câmbio de um automóvel, moto e etc. Segundo o mesmo autor, não existe uma divisão exata do que é um mecanismo e do que é uma máquina. Mecanismos e máquina podem ser diferenciados em grau. Caso as forças atuantes ou o nível de energia do aparelho tem algum valor ou significância, considera-se como uma máquina, caso contrário, adota-se como um mecanismo. Entretanto, há uma definição útil de mecanismo, é um sistema de elementos de máquinas ou dispositivos unidos e organizados para transmitir movimento, de maneira pré-determinada. Para as máquinas, o sistema de elementos de máquinas ou dispositivos unidos são organizados para transmitir movimento e energia de maneira pré-determinada.

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivos abordar através de estudos teóricos, o estudo do grau de liberdade através dos métodos de Gruebler e Kutzbach e a análise de posicionamento do mecanismo de quatro barras. O desenvolvimento do mecanismo realizou-se por meio do software SolidWorks. O sistema de amortecimento foi projetado e montado através do conceito pushrod de amortecimento, o qual se baseia principalmente em um movimento vertical e de compressão (push).



**4ª Semana Internacional de
Engenharia e Economia FAHOR**
Horizontina - RS - Brasil
5 a 7 de Novembro de 2014



2. ESTUDO DE MECANISMOS

2.1 Graus de Liberdade (GDL)

Segundo Norton (2009), para determinar o Grau de Liberdade geral de qualquer mecanismo, deve ser considerado o número de elos e juntas, bem como as interações entre eles. O Grau de Liberdade de qualquer conjunto de elos pode ser previsto após um estudo sobre a condição de Gruebler. Esse raciocínio leva a seguinte equação:

$$M=3L-2J-3G$$

Sendo que:

L= número de elos do mecanismo

J = número de juntas

G = número de elos fixo do mecanismo

Norton (2009) ainda cita, que qualquer mecanismo real, mesmo se mais de um elo da cadeia cinemática estiver fixado, o efeito líquido será criar um elo fixo maior, de ordem superior, por poder ter somente um plano fixo. O valor de J na equação de Gruebler deve indicar todas as juntas no mecanismo. Para isto, é menos confuso então se utilizar a modificação de Kutzbach na equação de Gruebler.

$$M=3(L-1)-2J_1-J_2$$

Sendo que:

L=número de elos

J₁=número de juntas com um GDL

J₂=número de juntas com dois GDL

2.2 Tipos de Movimentos

Grillo (S.D) descreve que o movimento plano de um corpo rígido é definido como o movimento no qual as trajetórias de todos os seus pontos são paralelos a um plano fixo. Há dois casos particulares de movimentos planos: a translação e a rotação em torno de um eixo fixo. O movimento geral plano pode ser decomposto numa translação mais uma rotação.

Já Norton (2009), fala em um terceiro tipo de movimento. O movimento complexo, que é a combinação da rotação mais a translação. A rotação possui um centro de rotação que não apresenta movimento com relação à estrutura “estacionária” de referência. Todos os outros pontos do corpo descrevem arcos ao redor daquele centro. Já para a translação, todos os pontos do corpo descrevem caminhos paralelos. A linha de referência desenhada no corpo muda a posição linear, mas não muda a orientação angular. Movimento complexo como já descrito, é a combinação simultânea de rotação e translação. Qualquer linha de referência desenhada no corpo mudará a posição linear e a orientação angular. Pontos no corpo terão caminhos não paralelos e haverá, a cada instante, um centro de rotação que mudará de localização constantemente.

2.3. Análise de Posições

Para Norton (2009), a análise gráfica de posição é bastante simples, entretanto, a análise de posição por aproximação algébrica é mais complexa para se resolver sendo que, a grande maioria destes problemas é resolvida através de softwares. Pode-se usar a aproximação gráfica para determinar posição, velocidade e aceleração dos elos de saída, mas deve-se gerar uma solução gráfica independente para cada posição escolhida.

2.3.1. Análise gráfica da posição de mecanismos

Norton (2009) afirma que um mecanismo de quatro barras, tem um 1GDL (grau de liberdade), ou seja, necessitasse somente um parâmetro para definir a posição de todos os outros elos. Usualmente, o parâmetro escolhido é o ângulo 2, desta maneira, os ângulo 2 e 3 poderão ser encontrados. Os comprimentos dos elos são conhecidos. A análise deste problema é trivial, pois se utiliza apenas a trigonometria colegial. Ao desenhar o mecanismo com o compasso, régua e transferidor para a angulação 2, será necessário apenas medir os ângulos dos elos 3 e 4 com o transferidor. Todos os ângulos dos elos são medidos do eixo X no sentido anti-horário. Na figura 1, um sistema local de eixos XY, paralelo ao sistema global XY, deve ser criado no ponto A para a medição do ângulo 3. A precisão dessa solução gráfica se limitará pela habilidade do desenhista e pela exatidão das ferramentas de desenho.

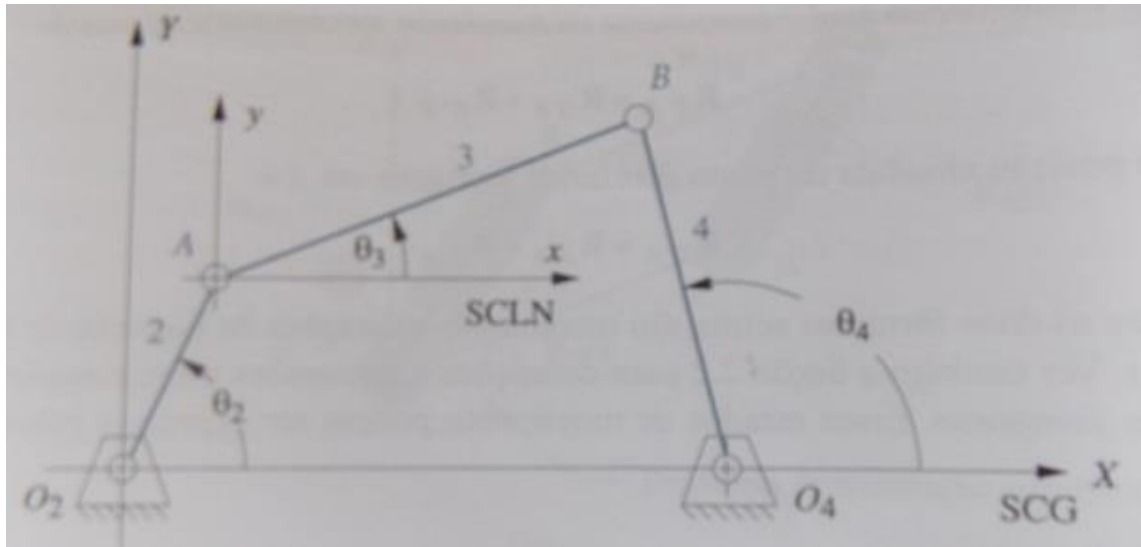


Figura 1: Medidas dos ângulos no mecanismo de quatro barras

A figura 2 ilustra a construção gráfica ou uma solução gráfica da posição, com os quatro elos a, b, c e d, e o ângulo 2. O elo 1 é o elo terra e, o elo 2 é o elo de entrada, esses dois elos no sistema de coordenada global XY estabelecem o ângulo 2. O compasso deve ser ajustado em escala para o comprimento do elo 3, logo, deve-se traçar um arco com esse raio até o final do elo 3, ou ponto A. Assim, ajusta-se o compasso com a medida em escala do elo 4, e o segundo arco deve ser traçado até o final do elo 1, ou ponto O4. Para esses dois arcos, dois pontos de interseção em B e B' definem as duas soluções para o posicionamento do mecanismo, onde o mecanismo poderá ser denominado circuito aberto ou cruzado.

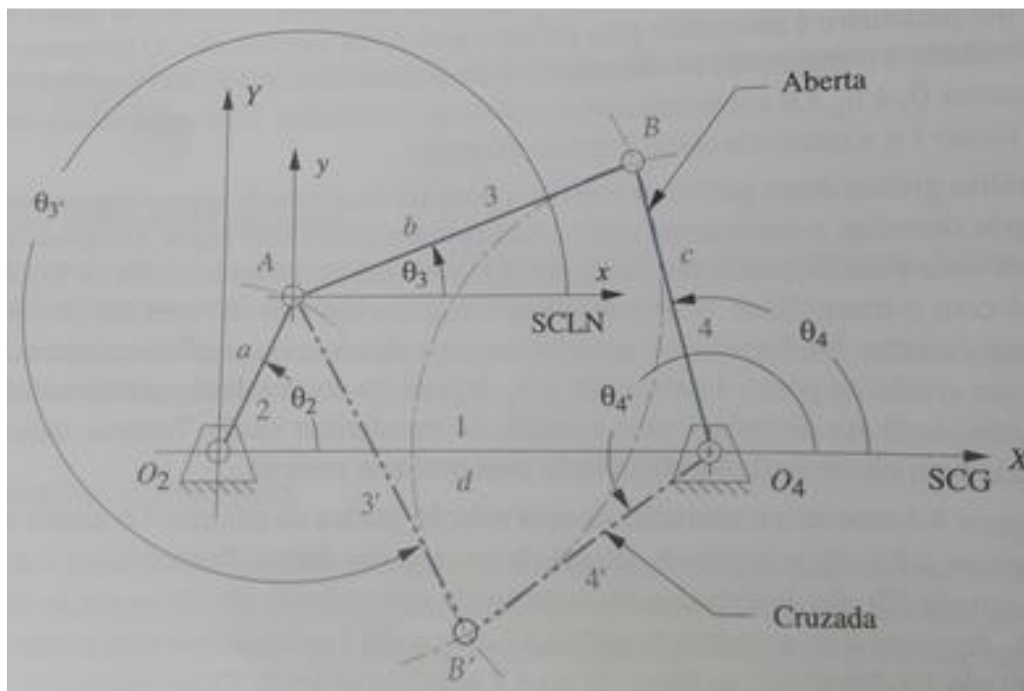


Figura 2: Solução gráfica da posição das configurações aberta e cruzada do mecanismo de quatro barras.

3. METODOLOGIA

O protótipo do Sistema de amortecimento pushrod foi projetado e desenvolvido através da disciplina de Mecanismos.

3.1. Materiais

Para construção do protótipo de sistema de amortecimento pushrod, foram necessários os seguintes materiais:

- 4 (quatro) chapas de aço SAE 1020, com medidas de 6,35mm x 15mm x 120mm;
- 1 (uma) chapa de aço SAE 1020, com medidas de 6,35mm x 15mm x 140 mm;
- 1 (uma) chapa de aço SAE 1020, com medidas de 6,35mm e com forma de um triângulo equilátero de 80mm;
- 2 (dois) retalhos de chapa de aço SAE 1020, de espessura 6,35mm;
- 1 (uma) barra redonda de aço SAE 1020, de diâmetro 12 mm e comprimento de 110mm;
- 14 (quatorze) porcas auto-frenantes, arruelas e parafusos M6;
- 1 (uma) mola de compressão helicoidal de comprimento máximo de 75 mm;
- 1 (uma) bucha de diâmetro 6 mm;
- 1 (uma) tubo quadrado de 20mm x 20mm x 1,5mm, com comprimento de 1240 mm;
- 1 (um) contra pino;
- Tinta preta e prata.

3.2. Ferramentas

Para a fabricação e montagem final do sistema de amortecimento pushrod, foram necessárias algumas ferramentas para dar forma aos elementos do conjunto, sendo assim:

- Software de CAD/CAM Solidworks;
- 1 (uma) Furadeira;
- 1 (uma) Broca de diâmetro 6 mm;
- 1 (um) Soldador Mig/Mag;
- 1 (um) Arco de serra de cortar metais;
- 1 (uma) Esmeriladora;
- 1 (um) Torno universal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o melhor entendimento do mecanismo, as imagens ilustram desde o desenvolvimento do mecanismo no software SolidWorks até a fabricação e montagem final. O desenvolvimento do mecanismo através do SolidWorks foi importante, pois existem poucas fontes bibliográficas e especificações do mesmo. O estudo se abrange na análise dos graus de liberdade, tanto do método de Gruebler quanto do método de Kutzbach. Além disso, foi calculada a análise do posicionamento de um mecanismo de quatro barras.

4.1. Desenvolvimento do mecanismo de sistema de amortecimento pushrod

Na figura 3, o amortecedor está em percurso máximo, ou seja, está em repouso. A figura 4 ilustra o amortecedor em percurso máximo. O percurso do amortecedor muda conforme mudarmos algumas dimensões do mecanismo.

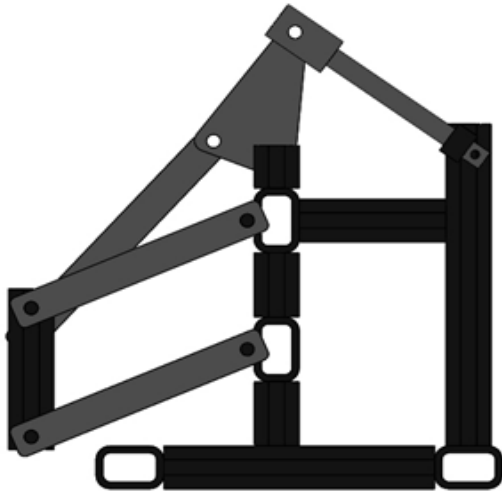


Figura 3: Vista lateral do protótipo do mecanismo de sistema de amortecimento pushrod.

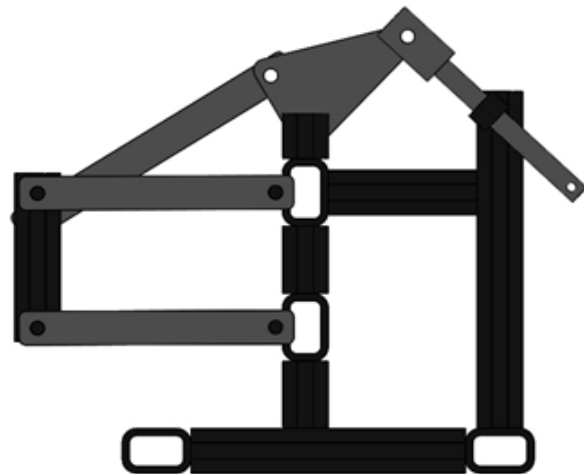


Figura 4: Vista lateral do protótipo do mecanismo de sistema de amortecimento pushrod com seu percurso máximo permitido.

Variando as dimensões do elo triário, o percurso do amortecedor varia conseqüentemente, ou seja, ao reduzir a medida entre os furos da junta fixa do suporte e, o elo central acoplado ao elo em forma de “C”, o percurso do amortecedor é máximo, caso contrário, é mínimo. Após o desenvolvimento e estudo do protótipo virtualmente, as peças foram manufaturadas e montadas, conforme a figura 5 e 6 a seguir:



Figura 5: Vista lateral do protótipo do mecanismo de sistema de amortecimento pushrod.

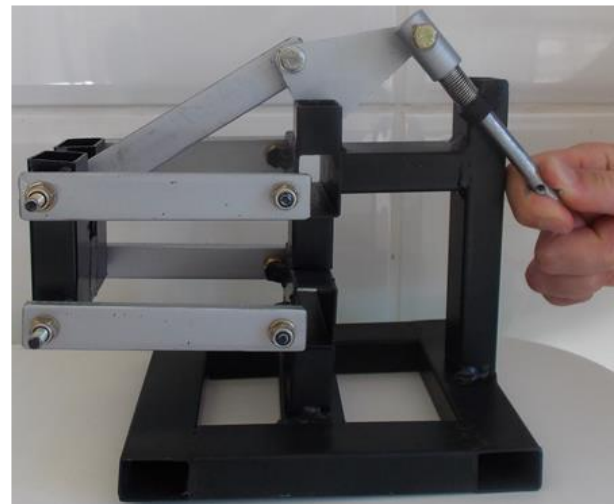


Figura 6: Vista lateral do protótipo do mecanismo de sistema de amortecimento pushrod com seu percurso máximo permitido.

4.2. Estudo dos graus de liberdade

Para o estudo deste mecanismo, foi necessário dividi-lo em 3 partes, conforme a figura 7. A figura 8, o sistema de quatro barras na parte 1 é equivalente para a parte 2. Já a figura 9, representa a parte 3.

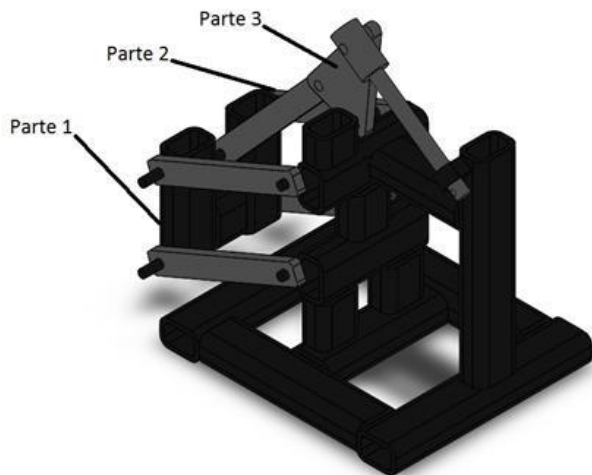


Figura 7: Divisão do mecanismo (parte 1, 2 e 3) para análise dos graus de liberdade.

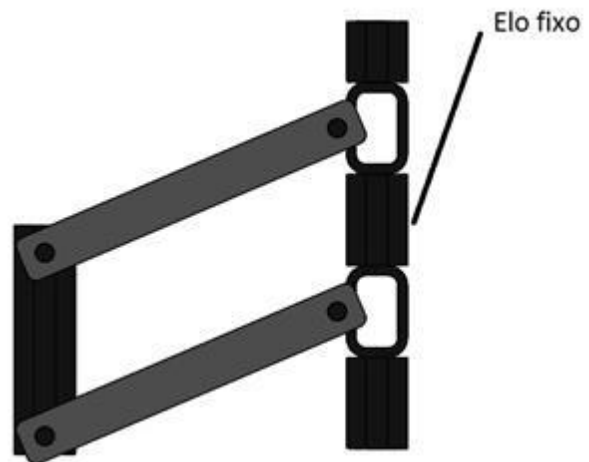


Figura 8: Vista lateral do protótipo do mecanismo de sistema de amortecimento pushrod. Parte 1 e 2.

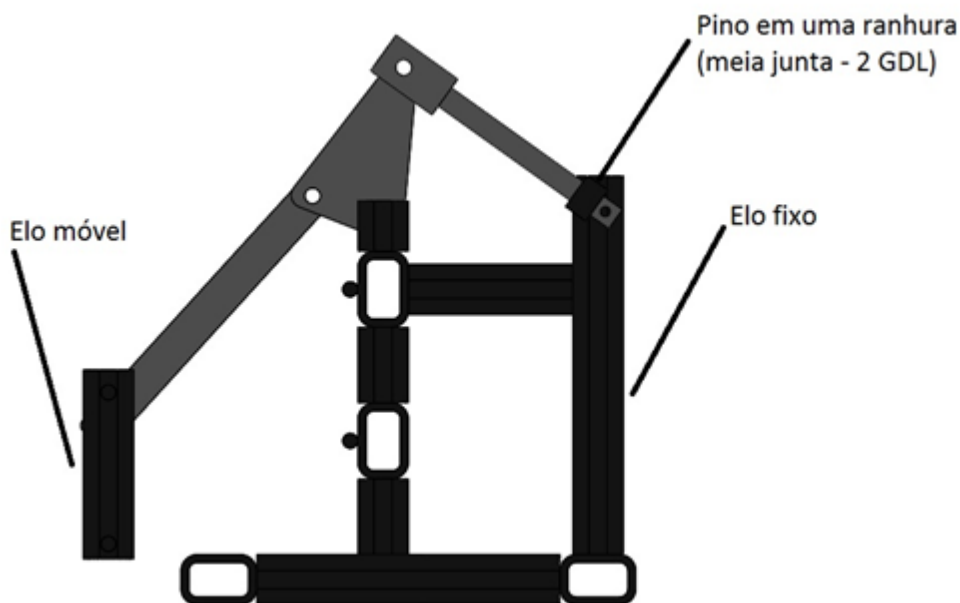


Figura 9: Vista lateral do protótipo de mecanismo de sistema de amortecimento pushrod. Parte 3.

4.2.1. Método de Gruebler

A parte 1 e 2, o mecanismo representado é de quatro barras. Desta maneira, o elo fixo não é considerado, logo o número total de elos é 3. Para o número de juntas, é considerado cada união, sendo entre elos, o que resulta em 4 juntas. Já o número de elo fixo é igual à zero. A análise da parte 3, considerando os componentes da vista frontal, o mecanismo é composto por um elo móvel, elo fixo (todo mecanismo que está em preto, forma o elo fixo), elo do acoplamento do elo em forma de “C”, elo triário e, o amortecedor. Logo, o número de elos é 4. O número de juntas é 4,5, pois o pino em uma ranhura é considera como uma meia junta. Neste mecanismo não existe elo fixo.

Parte 1 e 2:

$$M = 3L - 2J - 3G$$

$$M = 3X3 - 2X4 - 3X0$$

$$M = 9 - 8$$

$M = 1$ ou 1 GDL, então é um mecanismo.

Parte 3:

$$M = 3L - 2J - 3G$$

$$M = 3X4 - 2X4,5 - 3X0$$

$$M = 12 - 9$$

$M = 3$ ou 3 GDL, então é um mecanismo.

4.2.2. Método de Kutzbach

Através dos dois métodos, Gruebler e Kutzbach, os resultados teoricamente são os mesmos. Na parte 1 e 2, agora o elo fixo é contado junto, resultando em 4 elos. O número de juntas com 1GDL, são 4, pois o elo paralelo ao elo fixo, pode ser posicionado pelas coordenadas x ou y ou algum ângulo, os dois outros elos anexados no elo fixo, necessitam de uma só variável, no caso o ângulo. Números de juntas com 2GDL é zero. Para a parte 3, o elo fixo faz parte do sistema, resultando no número de 5 elos. Já o número de juntas com 1GDL, é 4, o elo triário, o amortecedor, o elo que acopla o elo em forma de “C”, sendo o último, um elo que necessita de coordenadas x ou y ou algum ângulo. Neste caso, existe uma junta que tem 2 GDL, é o elo móvel, pois o mesmo necessita de duas coordenadas ao mesmo tempo, uma coordenada x ou y ou ângulo e outra coordenada x ou y ou ângulo.

Parte 1 e 2

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2$$

$$M = 3(4 - 1) - 2X4 - 0$$

$$M = 9 - 8$$

M = 1 ou 1 GDL, então é um mecanismo.

Parte 3:

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2$$

$$M = 3(5 - 1) - 2X4 - 1X1$$

$$M = 12 - 8 - 1$$

M = 3 ou 3 GDL, então é um mecanismo

3.3. Análise de posicionamento

3.3.1. Análise de posicionamento com o amortecedor estendido

Pretende-se encontrar os ângulos 3 e 4, a localização destes ângulos podem ser observados na figura 2. O elo d, é o elo terra, o ângulo de referência é 2 e é formado pelo elo terra e pelo elo de saída, cujo valor é 115° , tais informações estão na figura 10:

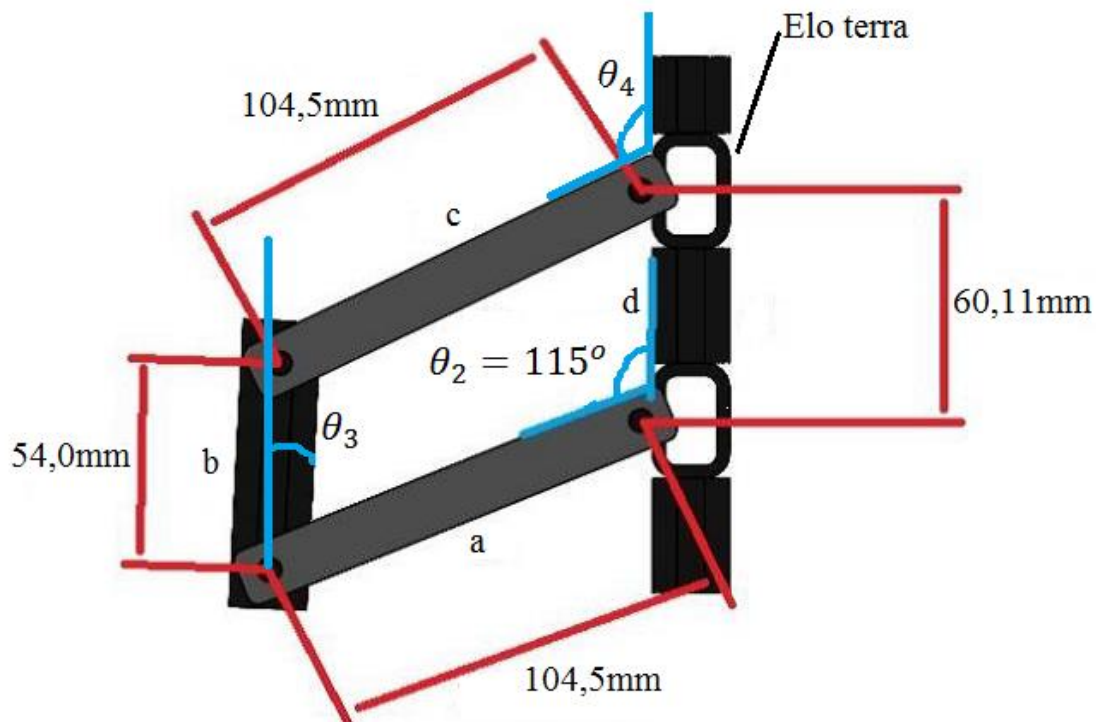


Figura 10: Mecanismo de quatro barras.

$$A_x = a * \cos \theta_2$$

$$A_x = 104,5 * \cos 115^\circ$$

$$A_x = -44,5\text{mm}$$

$$A_y = a * \sin \theta_2$$

$$A_y = 104,5 * \sin 115^\circ$$

$$A_y = 94,709\text{mm}$$

$$S = \frac{a^2 - b^2 + c^2 - d^2}{2(Ax - d)}$$

$$S = \frac{104,5^2 - 54^2 + 104,5^2 - 60,11^2}{2(-44,164 - 60,11)}$$

$$S = -73,5185\text{mm}$$

$$P = \frac{A_y^2}{(Ax - d)^2} + 1$$

$$P = \frac{A_y^2}{(Ax - d)^2} + 1$$

$$P = \frac{94,709^2}{(-44,164 - 60,11)^2} + 1$$

$$P = 1,825$$

$$R = (d - S)^2 - c^2$$

$$R = (60,11 - (-73,4185))^2 - 104,5^2$$

$$R = 6909,61\text{mm}^2$$

$$Q = \frac{2Ay(d - S)}{Ax - d}$$

$$Q = \frac{294,709(60,11 - (-73,4185))}{-44,164 - 60,11}$$

$$Q = -242,56\text{mm}$$

$$B_y = \frac{-Q \pm \sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P}$$

$$B_y = \frac{+246,56 \pm \sqrt{(-242,56)^2 - 41,825 * 6909,61}}{2 * 1,825}$$

$$B_y = \frac{242,56 \pm 91,625}{3,65}$$

$$B_y = 91,557\text{mm}; B_y = 41,352\text{mm}$$

$$B_x = S - \frac{2AyB_y}{2(Ax - d)}$$

$$B_x = -73,4185 - \frac{2(94,709 * 91,557)}{2(-44,164 - 60,11)}$$

$$B_x = 9,74\text{mm}; B_x = -35,707\text{mm}$$



**4ª Semana Internacional de
Engenharia e Economia FAHOR**
Horizontina - RS - Brasil
5 a 7 de Novembro de 2014



$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{By - Ay}{Bx - Ax}$$
$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{91,557 - 94,709}{9,74 - (-44,164)}$$
$$\theta_3 = -3^\circ, 35'$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{42,352 - 94,709}{-35,707 - (-44,164)}$$
$$\theta_3 = -6^\circ, 31'$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \frac{By}{Bx - d}$$
$$\theta_4 = \tan^{-1} \frac{91,557}{9,74 - 60,11}$$
$$\theta_4 = 61^\circ, 18' + 180^\circ$$
$$\theta_4 = 118^\circ, 82'$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \frac{41,352}{-35,707 - 60,11}$$
$$\theta_4 = -23^\circ, 34' + 180^\circ$$
$$\theta_4 = 156^\circ, 66'$$

Para o sistema aberto, os respectivos valores dos ângulos são: $\theta_3 = -6^\circ, 31'$ e $\theta_4 = 156^\circ, 66'$. Considerando o sistema cruzado, os valores dos ângulos são: $\theta_3 = -3^\circ, 35'$ e $\theta_4 = 156^\circ, 66'$. Analisando estas informações, os resultantes da análise de posicionamento de um mecanismo de quatro barras com o do desenho do SolidWorks, as informações foram plausíveis, comprovando a veracidade dos cálculos desenvolvidos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir dessa maneira que, o mecanismo de amortecimento pushrod ainda é uma tecnologia desconhecida e que, carece de referências bibliográficas e estudos. Esse sistema de amortecimento é utilizado hoje em motos, denominado sistema de amortecimento pro-link (funcionamento similar), e nos carros pushrod, empregado em carros que requerem alta dinâmica, que são desenvolvidos por empresas que fabricam carros de alta velocidade, como a Lamborghini, Ferrari, Koenigssegg, e carros de Formula 1.

Durante o estudo ficou claro a importância de vários outros estudos que podem envolver esse sistema de amortecimento, como a análise de forças, vibrações e dimensionamentos. O comprimento do percurso do amortecedor pode ser alterado quando a dimensão do elo triário for mudado, por exemplo, ao reduzir a medida da distância dos furos entre a junta fixa no suporte e, o elo central acoplado ao elo em forma de "C", o percurso do amortecedor é máximo, do contrário, o percurso é mínimo.

De forma geral, os objetivos foram alcançados, sendo que, os estudos foram focados para a disciplina de mecanismo. O trabalho abrangeu os estudos do grau de liberdade (método de Gruebler e Kutzbach) e a análise de posicionamento. Para a análise dos graus de liberdade, os dois métodos, Gruebler e Kutzbach, os resultados foram iguais, tanto para a parte 1 e 2 quanto para a parte 3. Os resultados foram satisfatórios para um melhor entendimento do mecanismo pushrod, além da aplicação prática dos cálculos lecionados em sala de aula.



**4ª Semana Internacional de
Engenharia e Economia FAHOR**
Horizontina - RS - Brasil
5 a 7 de Novembro de 2014



AGRADECIMENTOS

Agradecimentos aos acadêmicos integrantes do grupo, por todo apoio e dedicação que tiveram um com os outros, para que se pudessem completar os objetivos do presente trabalho.

Ao professor Fabiano Cassol, pelo seu tempo dedicado para nos orientar neste projeto.

Aos nossos amigos de faculdade, que de alguma forma também ajudaram para a conclusão deste trabalho.

6. REFERÊNCIAS

GRILLO, N. L. (s.d.). **Mecanismos: elementos de cinemática e dinâmica**. Disponível em: <http://www.cronosquality.com/aulas/mecanismos.pdf>. Acesso em: 26 jun 2014

HANLON, M. (2011). **Lamborghini introduces pushrod suspension to series production**. Disponível em: <http://www.gizmag.com/lamborghini-introduces-pushrod-suspension-to-series-production/17666/> Acesso em: 03 nov 2014.

NORTON, R. L. **Cinemática e dinâmica dos mecanismos**. Editora: Artmed Editora S.A. 1 ed. pag. 23-50, 2009.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

MECHANISM OF A PUSHROD DAMPING SYSTEM

Cristhian Allan Cansi, cc001301@fahor.com.br
Diego Roberto Mayer, dm001346@fahor.com.br
Fabiano Cassol, fabiano@fahor.com.br
Marcos Antônio Lenz, ml001341@fahor.com.br

FAHOR, Avenida dos Ipês, 565, Horizontina-RS, Brasil

***Abstract.** New technologies in the automotive area are attractive to companies that seeking for innovations and want to ensure excellence at high-speed car industry branch. However, technological innovations are becoming the competitive differentiator for today's market in XXI century. Therefore, new concepts of damping have been develop, as the pushrod damping system. Thus, the present article emphasized theoretical studies, having the objective to present the study of the degree of freedom by methods of Gruebbler and Kutzbach and, furthermore, calculate the position of the four-bar system. In order to better understanding of the mechanism, was developed by CAD software, SolidWorks, a prototype. Afterwards, the pushrod damping mechanism was manufactured and assembled.*

***Keywords:** Mechanism, pushrod, damping, prototype, movement*