



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

MECANISMO AMASSADOR DE LATINHAS DE ALUMÍNIO BASEADO NO PRINCÍPIO BIELA-MANIVELA

Luís Augusto Magalhães Antoniacomi¹, luisantoniacom@hotmail.com
Pedro de Freitas Jacob², pedrojacob@ibest.com.br
André João de Souza³, ajsouza@ufrgs.br

¹Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, Curso de Engenharia Mecânica, Rod. MT 270, km 06 – Bairro Sagrada Família – CEP: 78735-910 – Rondonópolis, MT.

²Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Curso de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121 - CAMPUS SANTA MÔNICA, Bloco 1M, UBERLÂNDIA - MG, CEP 38400-902.

³Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC, Rua Sarmento Leite, 425 – Centro – CEP: 90050-170 – Porto Alegre, RS.

Resumo: O escopo do trabalho é apresentar o protótipo de um mecanismo articulado biela-manivela cuja aplicação envolve o amassamento/compactação de latas de alumínio descartadas. Para tanto, foram executados testes de compressão em amostras destas latas para a determinação da capacidade de acionamento do motor. Também foi efetuada a análise metrológica das latas para a determinação correta das dimensões dos componentes do mecanismo. A proposta baseia-se nas análises cinemática e dinâmica, sendo a primeira constituída da determinação de deslocamentos, velocidades e acelerações de certos pontos no mecanismo, e a segunda composta de reações, momentos, forças e energias atuantes no protótipo. Tendo em vista o enfoque ecológico do projeto (reciclagem de materiais), todo o mecanismo foi feito a partir de sucata.

Palavras-chave: mecanismo biela-manivela, análise cinemática, análise dinâmica, reciclagem.

1. INTRODUÇÃO

É crescente o número de pessoas e cooperativas que se dedicam diariamente à coleta e reciclagem de latas de alumínio que foram utilizadas no envase de bebidas e posteriormente descartadas. Depois do oxigênio e do silício, o alumínio é o elemento químico mais abundante na crosta terrestre (8,13 %). Por ser abundante, deveria ser de custo reduzido. Entretanto, devido à sua elevada afinidade com o oxigênio, não é fácil encontrá-lo como substância elementar, mas sim em formas combinadas tais como óxidos ou silicatos. Assim, o custo de produção do alumínio puro é elevado e consome muita energia (elétrica ou térmica) e muita bauxita. Daí vem o fato de ser economicamente viável reciclá-lo: fica menos dispendioso que produzi-lo a partir das substâncias encontradas na natureza (Arte Viva, 2009).

A disciplina “Dinâmica das Máquinas” do curso de “Engenharia Mecânica” da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) propõe o desenvolvimento de um dispositivo utilizando os conceitos de cinemática e dinâmica de mecanismos articulados. Tendo em vista a facilidade de transportar e armazenar as latas quando compactadas, o trabalho propõe o projeto e a construção de um protótipo em escala real baseado no mecanismo biela-manivela para o amassamento das mesmas. Serão apresentados os resultados das análises cinemáticas e dinâmicas do protótipo, além dos cálculos de dimensionamento e desenho de projeto.

Segundo Santana (2009), biela-manivela é um mecanismo que transforma um movimento de rotação em um movimento de translação (ou vice-versa). O exemplo mais comum pode ser visto no motor de combustão interna de um automóvel, no qual o movimento linear do pistão, produzido pela explosão da gasolina, é transmitido para a biela e se transforma em movimento circular no virabrequim.

A Figura (1) mostra o desenho esquemático de um mecanismo genérico biela-manivela composto de uma biela BC de comprimento b cuja extremidade C é deslocada ao longo de uma reta (eixo das abscissas), enquanto que o ponto B, articulado à manivela AB, descreve uma circunferência de raio d (comprimento da manivela). A extremidade C está articulada ao pistão que é deslocado entre guias. O pistão P descreve um movimento de translação oscilatório – similar ao harmônico simples sobre o eixo “x”; a manivela gira em torno do ponto A; a biela apresenta movimento plano geral (translação + rotação).

A modelagem matemática das equações de movimento para um mecanismo de biela-manivela consiste de um sistema de equações não-lineares das relações cinemáticas (deslocamentos, velocidades e acelerações) e dinâmicas (forças e momentos) do mecanismo. De maneira geral, o processo de modelagem segue os seguintes passos:

1. Descrição do modelo físico de um sistema: aspectos relevantes ao estudo desejado, com hipótese e simplificação.
2. Obtenção das equações que descrevam matematicamente o comportamento cinemático e dinâmico do sistema.
3. Resolução analítica e/ou numérica das equações resultantes com o objetivo de estimar o comportamento do sistema.
4. Modificação do modelo, se necessário, e usá-lo para proposta de análise e projeto.

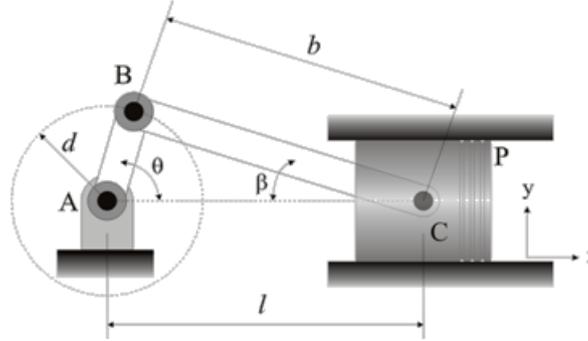


Figura 1. Desenho esquemático de mecanismo biela-manivela genérico

O uso de modelagem matemática no projeto de mecanismos é prática comum, permitindo o desenvolvimento de sistemas mecânicos com a redução de custos e tempos de projeto, e a otimização das características de desempenho. Este envolve todos os aspectos do projeto e, em particular, o movimento. Através do estabelecimento de hipóteses simplificadas e da aplicação de leis físicas apropriadas, as equações de movimento são obtidas para representar os aspectos importantes do comportamento do sistema mecânico a ser estudado.

Enfocando a importância da reciclagem de materiais, o protótipo foi concebido inteiramente a partir de sucata. Fica evidente que o uso do mecanismo é viável somente a catadores e pequenas cooperativas, visto que sua função é apenas diminuir o volume individual das latas a fim de facilitar seu transporte e armazenamento.

2. METODOLOGIA

2.1. Análise Cinemática

Define-se a análise cinemática como um estudo das relações entre os deslocamentos, velocidades e acelerações do mecanismo. Adotou-se como hipótese simplificadora para a realização dos cálculos o mecanismo como sendo planificado e posicionado na horizontal de acordo com a Fig. (1) indicada anteriormente.

Para a determinação das equações matemáticas, os comprimentos fixos $d = 58$ mm e $b = 280$ mm, os valores da posição angular θ e da velocidade angular ω_{AB} da manivela (a rotação é constante; portanto, a aceleração angular $\alpha_{AB} = 0$) são conhecidos. Assim, a análise cinemática do movimento resume-se em determinar:

2.1.1. O deslocamento l , Eq. (1), a velocidade \bar{v}_P , Eq. (2), e a aceleração \bar{a}_P do pistão P.

$$l(\theta) = b - \frac{d^2}{4b} + r \left(\cos(\theta) + \frac{d}{4b} \cos(2\theta) \right) \quad (1)$$

$$V_P(\theta) = d \cdot \omega_{AB} \left(\sin(\theta) + \frac{d}{2b} \sin(2\theta) \right) \quad (2)$$

$$a_P(\theta) = d \cdot \omega_{AB}^2 \left(\cos(\theta) + \frac{d}{b} \cos(2\theta) \right) \quad (3)$$

2.1.2. O ângulo β , Eq. (4), a velocidade angular $\bar{\omega}_{BC}$, Eq. (5), e a aceleração angular $\bar{\alpha}_{BC}$, Eq. (6), da biela BC.

$$\beta(\theta) = \sin^{-1} \left(\frac{d}{b} \cdot \sin(\theta) \right) \quad (4)$$

$$\omega_{BC}(\theta) = \frac{\cos(\theta)}{\sqrt{\frac{b^2}{d^2} - \sin^2(\theta)}} \cdot \omega_{AB} \quad (5)$$

$$\alpha_{BC}(\theta) = \frac{\sin(\theta)}{\sqrt{\frac{b^2}{d^2} - \sin^2(\theta)}} \left(\frac{\cos^2(\theta)}{\frac{b^2}{d^2} - \sin^2(\theta)} - 1 \right) \cdot \omega_{AB}^2 \quad (6)$$

2.1.3. A velocidade \vec{v}_B , Eq. (7), e a aceleração \vec{a}_B , Eq. (8), do pino articulado B.

$$\vec{V}_B(\theta) = \vec{\omega}_{AB} \times \vec{r}_{AB}(\theta) \quad (7)$$

$$\vec{a}_B(\theta) = \vec{\omega}_{AB} \times \vec{V}_B(\theta) \quad (8)$$

Onde:

$$\vec{r}_{AB}(\theta) = d. [(\cos(\theta))\hat{i} + (\sin(\theta))\hat{j}] \quad (9)$$

2.1.4. A velocidade \vec{v}_{CG} , Eq. (10), e a aceleração \vec{a}_{CG} , Eq. (11), no centro de gravidade da biela BC.

$$\vec{V}_{CG}(\theta) = \vec{\omega}_{BC} \times \frac{\vec{r}_{BC}(\theta)}{2} \quad (10)$$

$$\vec{a}_{CG}(\theta) = \vec{a}_p + \vec{a}_{BC}(\theta) \times \frac{\vec{r}_{BC}(\theta)}{2} + \vec{\omega}_{BC}(\theta) \times \left(\vec{\omega}_{BC}(\theta) \times \frac{\vec{r}_{BC}(\theta)}{2} \right) \quad (11)$$

Onde:

$$\vec{r}_{BC}(\theta) = b. [-(\cos(\beta(\theta)))\hat{i} + (\sin(\beta(\theta)))\hat{j}] \quad (12)$$

2.2. Análise Dinâmica

A análise dinâmica por sua vez é definida como uma análise das relações entre esforços, reações e momentos envolvidos no movimento do mecanismo. As equações de equilíbrio dinâmico são descritas para cada uma das barras usando o diagrama de corpo livre do mecanismo. Como produto final do método, obtém-se as equações de movimento e as reações dinâmicas, além do torque transmitido e a potência necessária do motor de acionamento. O atrito nas articulações do mecanismo será desconsiderado no estudo da análise dinâmica.

Partindo-se do pistão P, onde está aplicada a força L (força mínima requerida para o amassamento da lata de alumínio – vide item 2.5) a ser superada, determina-se o torque necessário para movimentar o mecanismo que é, nesse caso, acionado na manivela. A componente da força peso, assim como as reações de apoio decorrentes desta força serão desconsideradas, visto que o mecanismo encontra-se na horizontal. Para tanto, a partir da análise dos diagramas de corpo livre, determinam-se:

2.2.1. As forças atuantes no pistão P:

A Figura (2) mostra o diagrama de corpo livre no pistão. A força F_{43} (N) é a reação da camisa do pistão, enquanto que a força F_{23} (N) = F_{32} (N) é a reação no pino C no par pistão-biela.

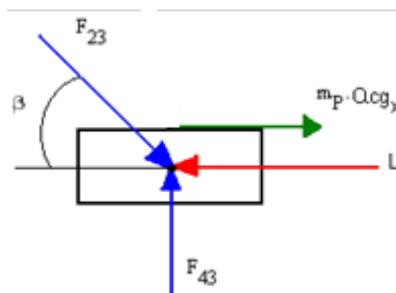


Figura 2. Diagrama de corpo livre do pistão p

$$\sum F = m. a_g \quad (13)$$

$$F_{23}(\theta). \cos(\beta(\theta)) - L = m_p. a_c(\theta) \quad (14)$$

$$F_{43}(\theta) - F_{23}(\theta). \sin(\beta(\theta)) = 0 \quad (15)$$

2.2.2. As forças atuantes na biela BC:

A Figura (3) mostra o diagrama de corpo livre na biela. A força F_{32} (N) = F_{23} (N) é a reação no pino C no par pistão-biela, enquanto que a força F_{12} (N) = F_{21} (N) é a reação no pino B no par biela-manivela.

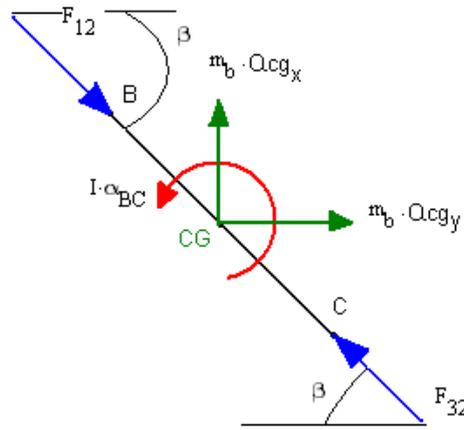


Figura 3. Diagrama de corpo livre da biela BC

2.2.2.1. Determinação do momento de inércia da biela:

A biela utilizada no projeto tem a geometria de um paralelepípedo, Fig. (4). O momento de inércia de um paralelepípedo de massa m_b e de lados a , e e f relativo a um eixo perpendicular a uma de suas faces tem a forma:

$$I_{g_b} = \frac{m_b}{12} (e^2 + f^2) \quad (16)$$

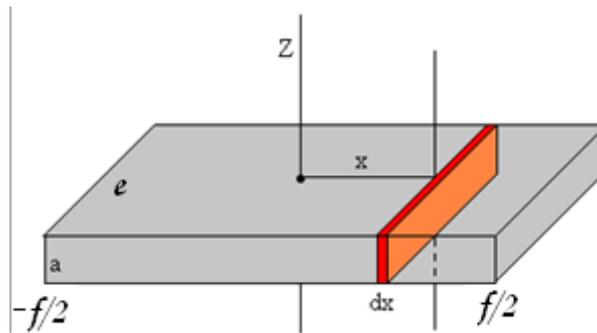


Figura 4. Esquema de um paralelepípedo de massa m_b e de lados a , e e f .

2.2.2.2. Aplicação do Princípio de d'Alembert:

$$\sum M = I \cdot \alpha_{BC} \quad (17)$$

$$M_{F_{12}}(\theta) + M_{F_{32}}(\theta) = I_{g_b} \cdot \alpha_{BC}(\theta) \quad (18)$$

2.2.2.3. Cálculo da força resultante no pino B:

$$\sum F = m \cdot a_g \quad (19)$$

$$F_{12}(\theta) \cdot \cos(\beta) - F_{32}(\theta) \cdot \cos(\beta) = m_b \cdot a_{g_x}(\theta) \quad (20)$$

$$F_{32}(\theta) \cdot \sin(\beta) - F_{12}(\theta) \cdot \sin(\beta) = m_b \cdot a_{g_y}(\theta) \quad (21)$$

Onde:

$$M_{F_{12}}(\theta) = -F_{12x}(\theta) \cdot \frac{r_{BCy}(\theta)}{2} + F_{12y}(\theta) \cdot \frac{r_{BCx}(\theta)}{2} \quad (22)$$

$$M_{F_{32}}(\theta) = -F_{32x}(\theta) \cdot \frac{r_{BCy}(\theta)}{2} + F_{32y}(\theta) \cdot \frac{r_{BCx}(\theta)}{2} \quad (23)$$

Sendo que:

$$r_{BCy}(\theta) = r_{BC} \cdot \sin(\beta(\theta)) \quad (24)$$

$$r_{BCx}(\theta) = r_{BC} \cdot \cos(\beta(\theta)) \quad (25)$$

2.2.3. As forças atuantes na manivela AB

2.2.3.1. Determinação do torque necessário para movimentar o mecanismo

A Figura (5) esquematiza o diagrama de corpo livre da manivela D.

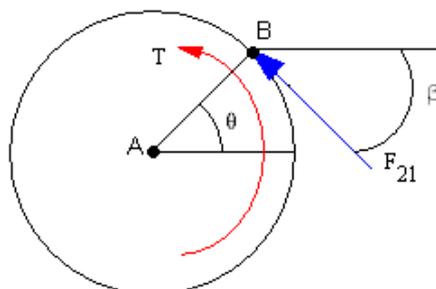


Figura 5. Diagrama de corpo livre da manivela D

O torque necessário para movimentar o mecanismo é calculado através de:

$$Tq(\theta) = F_{21x}(\theta) \cdot r_{AB_y}(\theta) + F_{21y}(\theta) \cdot r_{AB_x}(\theta) \quad (26)$$

A potência necessária do motor de acionamento do mecanismo é dada pela equação:

$$P(\theta) = Tq(\theta) \cdot \omega_{AB}(\theta) \quad (27)$$

2.3. Análise das Dimensões da Lata

Como todo produto industrial, as latas de alumínio também estão sujeitas a uma variação dimensional devido a fatores tais como defeitos em equipamentos que as produzem ou possíveis impactos sofridos pela mesma. Visando obter uma maior confiabilidade nas medidas do mecanismo, uma avaliação metrológica destas latas fez-se necessária. Considerou-se a estimativa dos erros sistemáticos e aleatórios respectivamente através da tendência e da repetitividade, tomando-se uma amostra de 15 latas e adotando uma confiabilidade de 95% nas medições de altura e diâmetro.

2.4. Ensaio de Compressão das Latas

Com a finalidade de se determinar o motor de acionamento a ser utilizado, fez-se necessário primeiro encontrar a força mínima L necessária para amassar as latas de alumínio [vide Fig. (2)]. Dentro desta proposta, foram feitos ensaios de compressão em quatro diferentes latas. A Figura (6) mostra a forma como os referidos ensaios foram executados.



Figura 6. Foto do ensaio de compressão em uma lata de alumínio

3. RESULTADOS

Os cálculos efetuados foram realizados em função da variação do ângulo θ de 0 a 2π (rad), com a versão 8 do software comercial MathCAD.

3.1. Análise Cinemática

As curvas do deslocamento l (m), da velocidade v_P (m/s) e da aceleração a_P (m/s²) do pistão, em função do ângulo θ (rad), são mostradas no gráfico da Fig. (7).

As curvas do ângulo β (rad), da velocidade ω_{BC} (rad/s) e da aceleração α_{BC} (rad/s²) da biela são ilustradas no gráfico da Fig. (8).

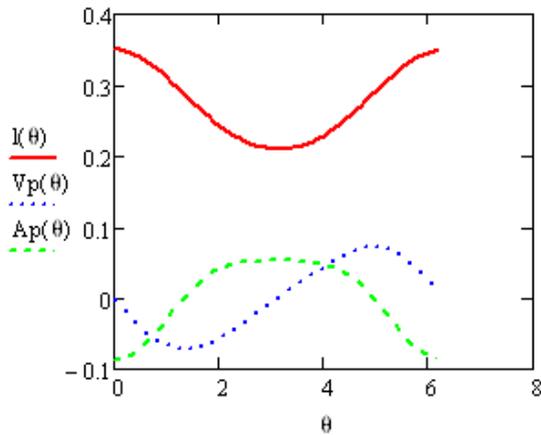


Figura 7. Análise cinemática do pistão P

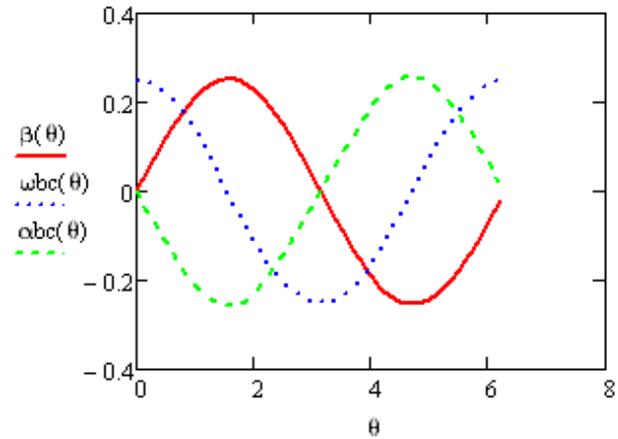


Figura 8. Análise cinemática da biela BC

As curvas da velocidade v_B (m/s) e da aceleração a_B (m/s²) do pino articulado B estão representadas no gráfico da Fig. (9). A velocidade angular ω_{AB} (rad/s) da manivela é de 1,26 rad/s ou 12 rpm [conforme mostra a Fig. (15)].

As curvas da velocidade v_{CG} (m/s) e da aceleração a_{CG} (m/s²) no centro de gravidade (CG) da biela são vistas no gráfico da Fig. (10).

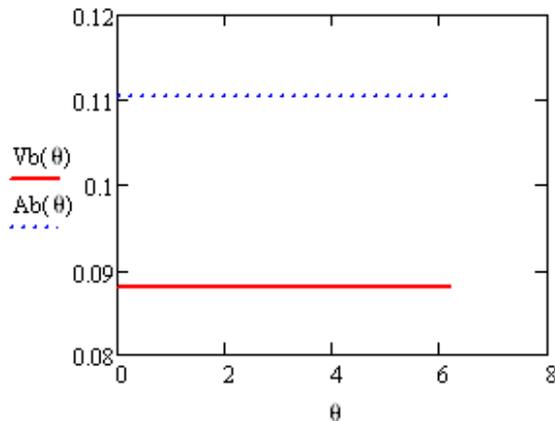


Figura 9. Análise cinemática do ponto B

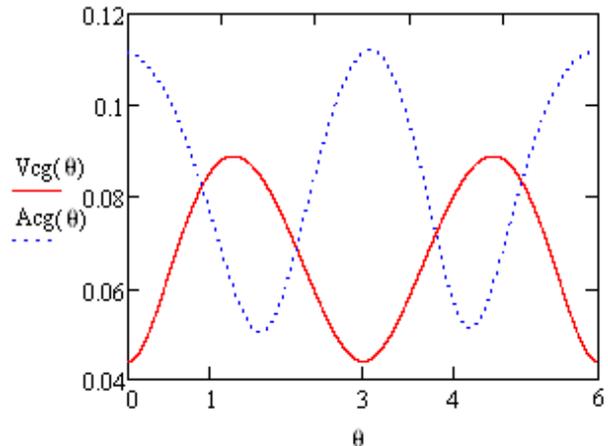


Figura 10. Análise cinemática do CG da biela BC

3.2. Análise Dinâmica

Através dos dados obtidos pelo ensaio de compressão das latas de alumínio, determinou-se a força mínima requerida para que a mesma seja deformada a ponto de passar pelo orifício da camisa do pistão: $L = 133,81$ kgf (ou 1,31 kN), vide Fig. (11). A partir desta força determinam-se todos os esforços atuantes no mecanismo.

A Figura (12) ilustra o gráfico das forças atuantes no pistão e a Fig. (13) o das forças atuantes na biela.

O torque é utilizado na seleção do motor de acionamento do mecanismo, calculado pelo produto entre a intensidade da máxima força F_{21} (N) e o comprimento d (m) da manivela. Assim, o valor do torque mínimo requerido na seleção do motor, conforme Fig. (14) foi $T_q = 96,65$ N·m.

Neste projeto foi utilizado um motor de limpador de pára-brisa de ônibus. A Figura (15) apresenta as curvas para a seleção da velocidade angular para este tipo de motor. Cruzando os valores, adota-se uma rotação para o motor de acionamento da manivela de aproximadamente 12 rpm.

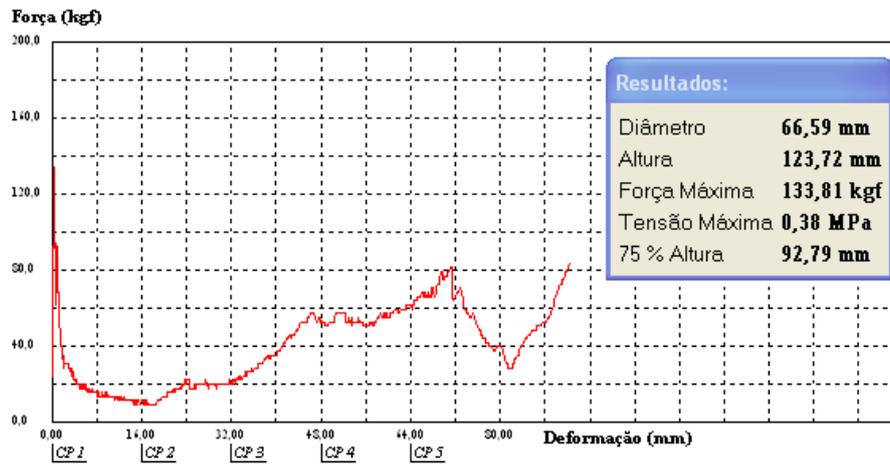


Figura 11. Gráfico da força mínima requerida ao amassamento

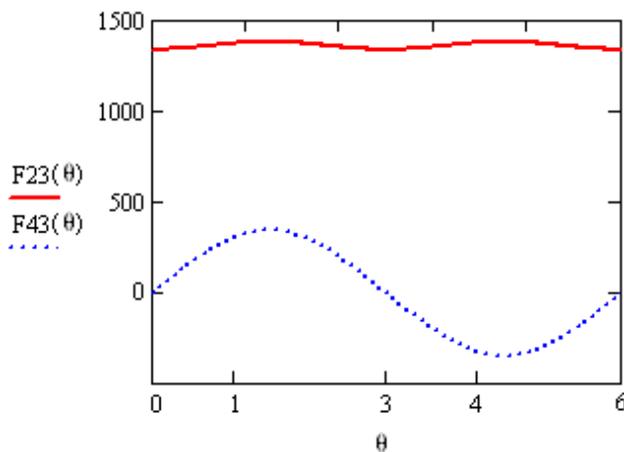


Figura 12. Forças atuantes no pistão P

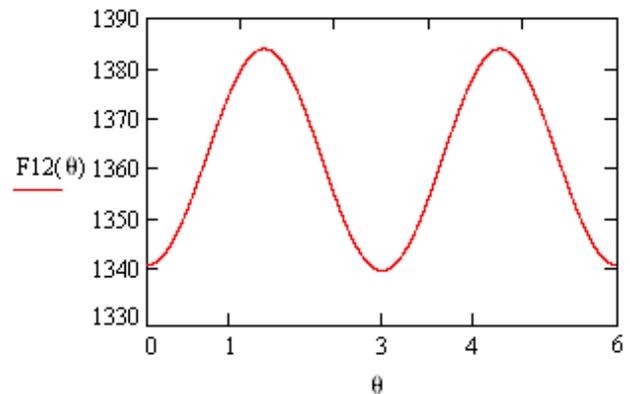


Figura 13. Forças atuantes na biela BC

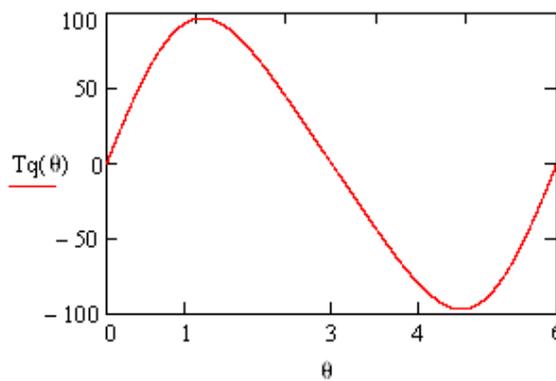


Figura 14. Torque requerido pelo sistema

Tendo-se determinado a velocidade angular do motor de acionamento, determina-se a potência requerida pelo sistema, de acordo com o gráfico da Fig. (16). O valor mínimo da potência necessária ao mecanismo é $P_{ot} = 121,5 \text{ W}$.

As dimensões finais obtidas nas medições, de 15 amostras de latas de alumínio, foram:

- Altura = $(123,09 \pm 0,15) \text{ mm}$
- Diâmetro = $(66,23 \pm 0,06) \text{ mm}$

Tais valores foram utilizados como medidas base no projeto e confecção do protótipo.

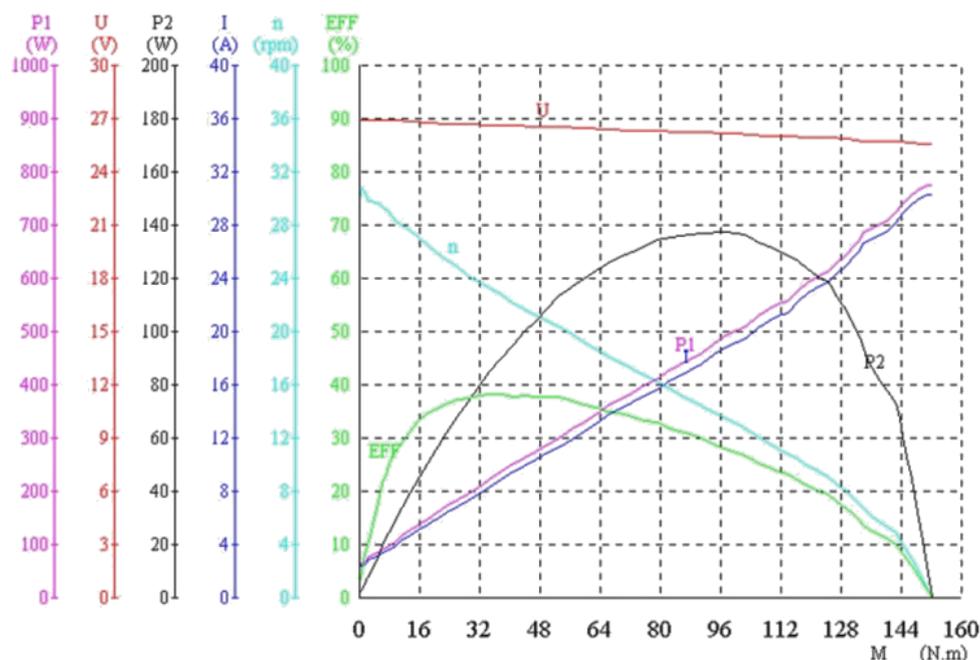


Figura 15. Gráfico usado na seleção da rotação para o motor de limpador de pára-brisa

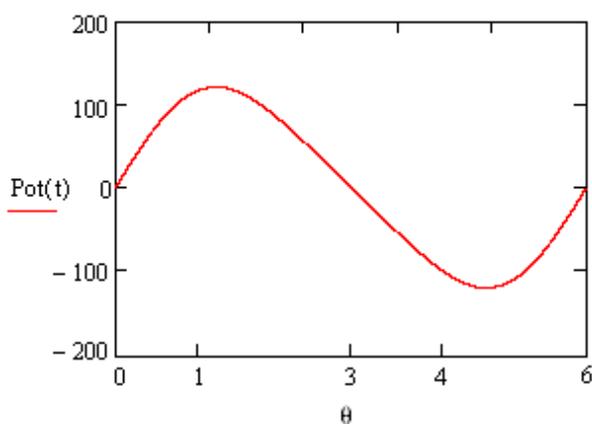


Figura 16. Potência requerida pelo sistema

4. CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Após a definição da geometria e dimensões do protótipo realizou-se a construção e montagem do mesmo. A modelagem geométrica inicial em 3D é apresentada na Fig. (17) e a fotografia do protótipo final construído na Fig. (18).

A manivela (1) é acionada pelo motor (7). Esta por sua vez transfere o movimento à biela (2), fazendo com que esta desloque o pistão (3). O compartimento (4) serve de reservatório de latas, ou seja, funciona como um recarregador do mecanismo. A lata por sua vez cairá na camisa (5), onde será amassada pelo pistão (3) e é expelida, por gravidade, pelo orifício (8). Todo o sistema é fixado à base (6).

5. CONCLUSÕES

A proposta do desenvolvimento deste protótipo pela disciplina “Dinâmica das Máquinas” do curso de “Engenharia Mecânica” da UFMT possibilitou a aplicação dos conhecimentos teóricos no desenvolvimento de um mecanismo prático, utilizando conceitos importantes e essenciais de engenharia, o que resultou em um aumento significativo na qualidade do aprendizado, pois garantiu um aprimoramento simultâneo no aluno do raciocínio lógico e da criatividade.

A representação dos resultados através de softwares computacionais facilitou a visualização e a interpretação do comportamento do mecanismo biela-manivela, permitindo que sejam feitas comparações e modificações e assim aperfeiçoando o processo de escolha da melhor configuração para a aplicação.

Tal mecanismo é uma alternativa viável para catadores e pequenas cooperativas, pois a função deste é apenas diminuir o volume das latas, e assim, possibilitar o armazenamento de uma quantidade muito maior por estes. Visto os valores de forças e torques requeridos, a escolha de sucata para sua confecção torna-se totalmente viável.

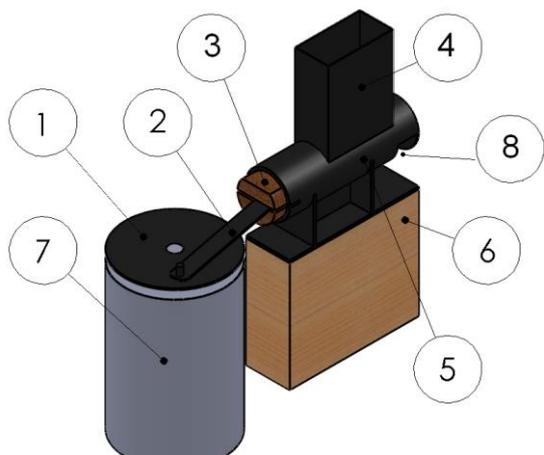


Figura 17. Modelo inicial do protótipo

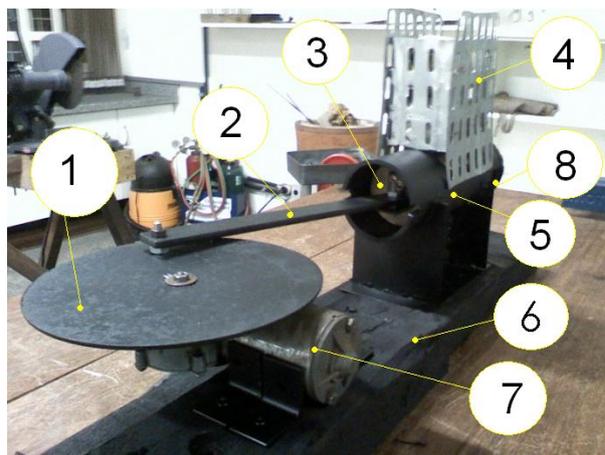


Figura 18. Foto do protótipo final

6. REFERÊNCIAS

- Arte Viva, “Aspectos Benéficos e Maléficos na Reciclagem de Alumínio”, Disponível em, <http://artenativa.fm/MaisArteMenosReciclagem/tabid/60/Default.aspx>, acesso em 26 de junho de 2009.
- Santana, Everton de, “Movimento de um pistão”, Disponível em, <http://www.fisica.ufs.br/CorpoDocente/egsantana/oscilaciones/biela/biela.htm>, Acesso em 26 de junho de 2009.
- Shigley, J. E., 1984, “Elementos de Máquinas”, Vol. 1, Ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, pg. 1-20.
- Nieman, G., 1971, “Elementos de Máquinas”, Vol. 1, Ed. Edgar Blucher LTDA, São Paulo, Brasil, pg. 1-10.
- Uicker Jr, John J., Pennock, Gordon R., shigley, Joseph E., 2003, “Theory of machines and mechanisms”, 3^a ed. Oxford University, New York, pg. 607.
- Mabie, H.H., 1980, “Cinemática dos Mecanismos”, 2^a Ed., Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro.

ALUMINUM CAN CRUSHER MECHANISM BASED ON SLIDER-CRANK PRINCIPLE

Luís Augusto Magalhães Antoniacomi¹, luisantoniacom@hotmail.com
Pedro de Freitas Jacob², pedrojacob@ibest.com.br
André João de Souza³, ajsouza@ufrgs.br

¹ Federal University of Mato Grosso (UFMT), Mechanical Engineering Course, MT 270 Road – km 06, Sagrada Família District, Zip Code 78735-910, Rondonópolis, MT.

² Federal University of Uberlândia – UFU, Mechanical Engineering Course, Av. João Naves de Ávila, 2121 – Santa Monica Campus, Building 1M, Uberlândia – MG. Zip Code 38400-902.

³ Federal University of Rio Grande do Sul – UFRGS, Mechanical Engineering department – DEMEC, Sarmento Leite Street, 425 – Downtown – Zip Code 90050-170 – Porto Alegre, RS.

Abstract: The paper scope is present a slider-crank mechanism prototype for crushing discarded aluminum cans. For this, it was executed compression tests in some cans for determine the capability of motor for action system. Also it was effectuated the metrological analysis of cans for correct determination of mechanism components dimensions. This purpose is based on the kinematic and dynamic analysis; the first for determine displacements, velocities and accelerations of certain points in the mechanism; the second for calculate reactions, moments, forces and energies acting on the prototype. Given the ecological approach of the project (material recycling), the whole mechanism was made from scrap.

Keywords: slider-crank mechanism, kinematic analysis, dynamic analysis, recycling.