

UTILIZAÇÃO DE MOLAS DE TORÇÃO PARA REDUÇÃO DE TORQUE EM BARRAS DE PROTEÇÃO DOBRÁVEIS EM MICRO-TRATORES

GUILHERME DE MOURA¹, MARCOS TEIXEIRA², PAUL D. AYERS³, MURILO VOLTARELLI⁴, LETICIA TAVARES⁵

¹ Mestrando em Engenharia Agrícola (Mecanização Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, (31) 9 7181-2584, guilhermedemouraa@gmail.com

² Prof. Doutor, Engenharia Agrícola, Universidade Federal Fluminense, marcos_teixeira@id.uff.br

³ Prof. Doutor, Engenharia de Biosistemas, The University of Tennessee, Knoxville, pdayers@utk.edu

⁴ Prof. Doutor, Máquinas e Mecanização Agrícola, Universidade Federal de São Carlos, voltarelli.ufscar@gmail.com

⁵ Aluna de graduação, Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal Fluminense, leticiacmtavares@gmail.com

Apresentado no
XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2017
30 de julho a 03 de agosto de 2017 - Maceió - AL, Brasil

RESUMO: De acordo com a organização internacional do trabalho as operações envolvendo máquinas agrícolas encontram-se entre as três atividades com maior risco de acidente aos trabalhadores. O capotamento é a causa mais comum, representando 33% dos acidentes fatais. Existem normas que preveem a utilização de dispositivos visando garantir a segurança do operador, dentre os quais citamos as estruturas de proteção ao capotamento. Quando o trator opera em espaços confinados, como pomares e galpões, é comum o uso das Barras de Proteção Dobráveis (BPD). Objetivou-se neste trabalho caracterizar o esforço de elevação da BPD em micro-tratores, desenvolvendo instrumentação para validação do torque necessário para sua elevação e comparando os resultados obtidos aos valores recomendados pela norma (Código 6 - OECD). Quando verificado que os valores de torque quantificados encontravam-se acima dos recomendáveis pelos padrões da norma, molas de torção foram adotadas como solução para correção do torque. Verificou-se após novos ensaios a eficácia das molas na redução do torque. Constatou-se que a velocidade angular de acionamento da BPD não possui influência direta no torque necessário para sua elevação.

PALAVRAS-CHAVE: Capotamento, tratores agrícolas, acidentes em tratores.

COIL SPRING FOR TORQUE REDUCTION IN MICRO-TRACTORS FOLDABLE ROPS

ABSTRACT: According to the international labor organization, operations involving agricultural machinery are among the three activities with the highest risk of accidents to workers. Tractor rollover is the most common cause, accounting for 33% of the fatal accidents. There are standards that provide the use of safety devices to ensure the physical integrity of the operator, among which is worthy to mention the rollover protection structures (ROPS). When the tractor operates in confined spaces, such as orchards and sheds, the use of Foldable ROPS (FROPS) is common. The objective of this work was to characterize the effort to lift the FROPS in micro tractors, developing instrumentation to validate the torque required for its lifting, and comparing the results obtained with the values recommended by the standard (Code 6 - OECD). When verified that the torque values were above those recommended by the standards, torsion springs were adopted as a solution for torque reduction. The effectiveness of the springs in reducing the torque was confirmed after further testing. It was found that the FROPS angular velocity does not have a direct influence on the torque required for its lifting.

KEYWORDS: Tractor rollover, agricultural tractors, tractor accidents.

INTRODUÇÃO

O trator agrícola é a fonte de potencia mais importante do meio rural, contribuindo para o desenvolvimento e avanço tecnológico dos Sistemas Agrícolas de Produção (SAP), como única forma de garantir os ganhos de escala que se observam no Agribusiness mundial. Entretanto estudos recentes realizados pela Organização Internacional do Trabalho (OIT) mostraram que as atividades envolvendo maquinas agrícolas estão entre as três atividades que apresentam os maiores riscos para os trabalhadores (Monteiro, 2011).

Liu & Koc (2013) relatam que dentre as possíveis causas de acidentes envolvendo máquinas e tratores agrícolas a principal é o capotamento, e Hosta (2004) cita que o capotamento é responsável por 50% dos acidentes fatais no meio rural. No sentido de se evitar acidentes por capotamento aplicam-se normas de segurança, que preveem dispositivos tais como a estrutura de proteção ao capotamento (EPC) e o cinto de segurança. Ainda sendo comum a adoção de padrões internacionais, como melhores práticas, a exemplo do Código 6 da Organização de Cooperação para o Desenvolvimento Econômico (OECD) (2012).

Em um caso particular, onde o trator opera em espaços confinados tais como: pomares e galpões, foi difundido o uso das Barras de Proteção Dobráveis (BPD). Todavia, num contexto geral essas estruturas, apresentam peso excessivo e localizam-se à razoável altura do solo, levando o operador a preferir retornar a barra na sua posição superior, preferindo trabalhar com esta em sua posição inferior, doravante não prevenindo acidentes por capotamento. Uma solução viável para facilitar o árduo trabalho dos operadores ao manusearem a BPD seria a implementação de algum mecanismo auxiliar capaz de reduzir o torque necessário para movimentar a BPD, a exemplo de molas de torção.

Com este intuito, partindo-se do pressuposto que molas de torção possam atuar como mecanismo de auxílio mecânico no manuseio da barra de proteção dobrável, de modo a tornar a tarefa dos operares menos árdua, objetivou-se neste trabalho analisar o esforço de elevação de uma barra de proteção dobrável comumente encontrada em micro-tratores, comparando os valores de torque encontrados aos valores recomendados pela norma (CODE 6 – OECD). Além disso, ao verificar-se que os valores obtidos não estavam em conforme com a norma foi implementada solução para corrigir os desvios encontrados.

MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios laboratoriais ocorreram no laboratório de maquinas agrícolas da Universidade do Tennessee (EUA). O experimento utilizou um protótipo de trator do fabricante DEERE AND CO., esse protótipo (Figura 1) serve como base para os modelos 4120, 4320, 4520 e 4720.

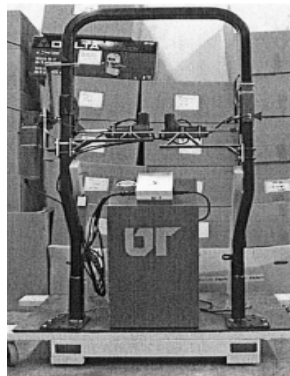


Figura 1 - Representação do protótipo de BPD utilizado para os ensaios laboratoriais.

A BPD estudada durante o experimento possui serial de identificação número 00544 e opera desde -40° até $+90^\circ$. É importante frisar que o modelo escolhido foi aprovado com êxito no enquadramento SAE J2194 (2009), referente à ensaios de estruturas de proteção contra o capotamento para tratores agrícolas sob rodas. Esse enquadramento é relevante para o experimento pois a OECD (norma adotada) requer este selo para que os testes do CÓDIGO 6 possam ser validados.

A metodologia adotada para aferir o torque inicial existente no na BPD e o torque final posterior à implementação das ações corretivas foi o sistema de medição de torque desenvolvido por Khorsandi et al. (2016). Esse sistema de medição é composto por um motor de engrenagem reversível, medidor de torque, acelerômetro de três eixos, data logger, plataforma, braço transferidor, controlador de velocidade, interruptor e bateria.

A bateria alimenta o motor (modelo Groschop PM801-PL73) que serve como fonte de potência para movimentar o braço transferidor, que transmite movimento para a seção móvel da BPD fazendo com que esta se locomova. Ao mesmo tempo, o acelerômetro de três eixos mede o ângulo entre a BPD e uma linha imaginária perpendicular ao eixo da seção fixa da BPD. O medidor de torque (modelo Omegadyne TQ420-2K) afere o torque aplicado pelo braço transferidor para movimentar a BPD. As informações são armazenadas no data logger (modelo Campbell Scientific CR23X) para posterior análise em computador. A velocidade de operação do sistema é controlado pelo controlador de velocidade (modelo IronHorse GSD1), e a direção de giro do motor é controlada por um interruptor.

Observa-se que a metodologia escolhida fornece os resultados na grandeza torque (Força x Braço de Aplicação), contrastando com as unidades estabelecidas no código 6 (Força). Contudo, essa diferença não será problema caso a geometria da BPD estiver bem definida. Para este experimento verificou-se com o auxílio do software CRPD (Computer-Based ROPS Design Program) que a distância entre o Centro de Gravidade (CG) da BPD e o centro da rótula é de 0,60 m. Portanto, para que possamos obter os limites máximos de torque aceitáveis devemos multiplicar a força máxima aceitável (norma) pela distância encontrada (0,60 m).

A bibliografia escolhida para nortear este experimento (código 6 da OECD) estabelece que a força máxima a ser exercida por um operador para erguer a BPD deve variar entre 50 N e 100 N, conforme apresentado na tabela 1, sendo esses valores função da posição do operador em relação ao trator (Figura 2). Logo os valores máximos de torque devem ser:

$$\text{Torque}_{\text{MAX I}} = 100 \text{ N} \times 0,60 \text{ m} = 60,0 \text{ N.m} \quad (1)$$

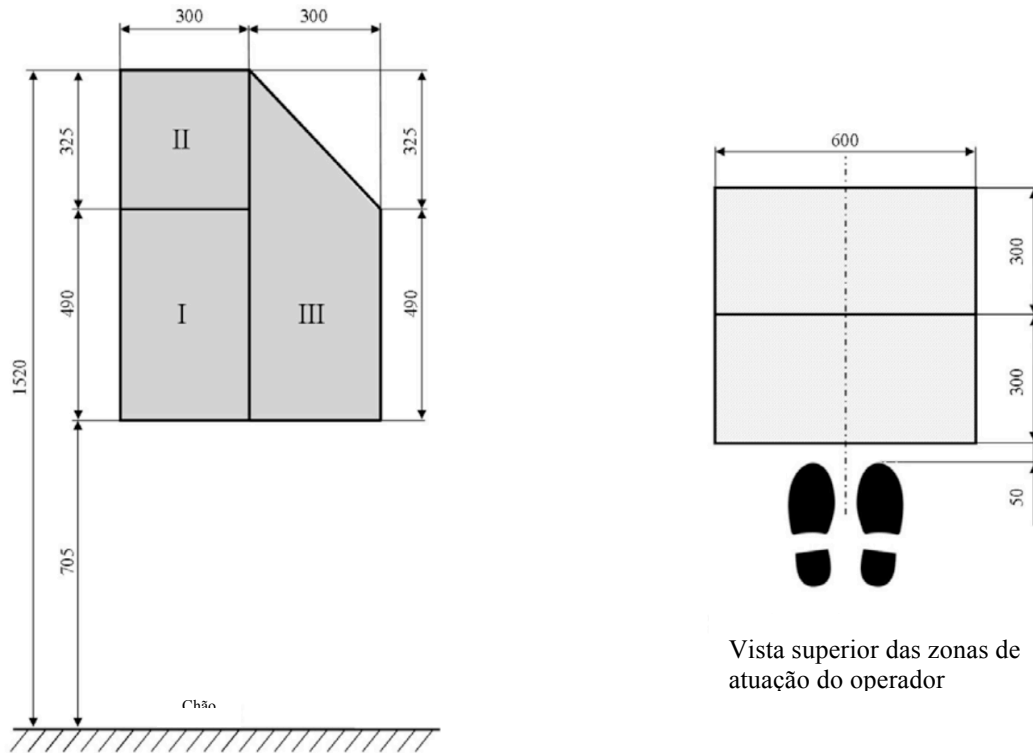
$$\text{Torque}_{\text{MAX II}} = 75 \text{ N} \times 0,60 \text{ m} = 45,0 \text{ N.m} \quad (2)$$

$$\text{Torque}_{\text{MAX III}} = 50 \text{ N} \times 0,60 \text{ m} = 30,0 \text{ N.m} \quad (3)$$

O primeiro termo presente nas equações, é referente a força aplicada e varia em função da zona de atuação do operador. O segundo termo, que é referente ao braço de aplicação da força (distância entre o CG da BPD e a rótula) é fixo e equivale a 0,60 m.

Tabela 1 - Força máxima aceitável para manusear a BPD como função da zona de operação em que o operador se encontra (CODE 6 – OECD, 2012)

Zona de Atuação	Força Máxima (N)
I	100
II	75
III	50



Vista lateral das zonas de atuação do operador

Vista superior das zonas de atuação do operador

Figura 2 - Delimitação das zonas de operação da BPD (OECD, 2012).

Essas zonas de operação foram definidas pela OECD tomando como base um operador do sexo masculino de baixo porte ou operador do sexo feminino de porte médio que trabalha de pé e necessita erguer ou rebaixar uma barra de rolagem. A unidade de todas as medidas apresentadas é milímetros.

Visando enquadrar os valores de torque referentes à elevação da BPD aos valores previstos na norma foi proposto a implementação de um conjunto composto por 4 molas de torção, instaladas em pares em cada uma das extremidades da parte fixa da barra de proteção dobrável, conforme ilustrado na Figura 3. Foi estudado que este tipo de mola é capaz de absorver energia ao ser comprimida (rebaixamento da BPD) e liberar energia ao ser relaxada (elevação da BPD), constituindo excelente opção para redução do torque.

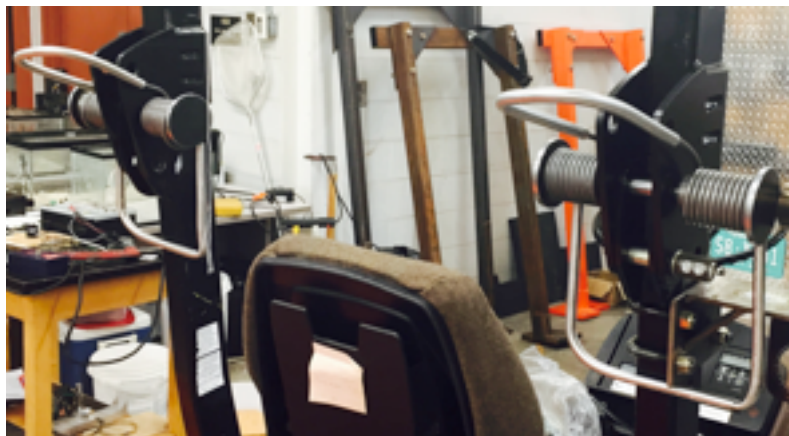


Figura 3 - Conjunto de molas de torção instalado em pares em cada das extremidades da parte fixa da barra de proteção dobrável.

O dimensionamento das molas de torção foi realizado através de um modelo matemático implementado em planilha eletrônica tendo como base as equações 4 a 9, baseadas na lei de HOOKE (1678).

$$S = 32 \times 10^{-6} \times Q / (\pi \times d^3) \quad (4)$$

$$Q = R \times T \quad (5)$$

$$R = 10^9 \times E \times d^4 / (3888 \times n \times D) \quad (6)$$

$$P = Q / M \quad (7)$$

$$DI = D - 2d \quad (8)$$

$$L = d \times n \quad (9)$$

Em que:

S: Tensões provenientes do momento fletor (MPa);

Q: Torque aplicado (N.m);

d: Espessura do fio (m);

R: Constante da mola (N.m. \cdot σ^{-1});

T: Deflexão ($^\circ$);

E: Módulo de elasticidade do material (MPa);

n: Número de espiras;

D: Diâmetro médio da espira (m);

DI: Diâmetro interno da espira (m);

P: Força (N);

M: Braço de alavanca (m);

L: Comprimento da mola (m).

A resolução do modelo foi possível graças ao auxílio do pacote computacional Solver (Add-in do ExcelTM). As variáveis de entrada do modelo são restrições impostas pelo sistema:

- Restrição 1: $0,0254 \text{ m} \leq DI \leq 0,0381 \text{ m}$;
- Restrição 2: $60^\circ \leq T \leq 135^\circ$;
- Restrição 3: $0,0015875 \text{ m} \leq d \leq 0,0079375 \text{ m}$;
- Restrição 4: $0,06477 \text{ m} \leq L \leq 0,1190625 \text{ m}$;
- Restrição 5: $M \geq 0,3048 \text{ m}$;
- Restrição 6: $Q \geq 11,30 \text{ N.m}$.

Tais restrições são limitações físicas (o comprimento L da mola não pode ultrapassar 0,12 m, caso contrário a mola não caberá no local destinado para sua instalação) ou técnicas, como o torque Q mínimo suportado pela mola.

Para medição do torque foram aplicados dois tratamentos, referentes à velocidade angular com que a BPD foi erguida (4 RPM e 10 RPM). Os resultados apresentam-se em forma gráfica, comparando os valores reais de torque medido com os limites específicos preconizados na norma da OECD – CODE 6. Para comprovar a eficácia da solução proposta e implementada, o conjunto foi novamente submetido a ensaios de medição de torque.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 representa as duas repetições iniciais para determinação do torque.

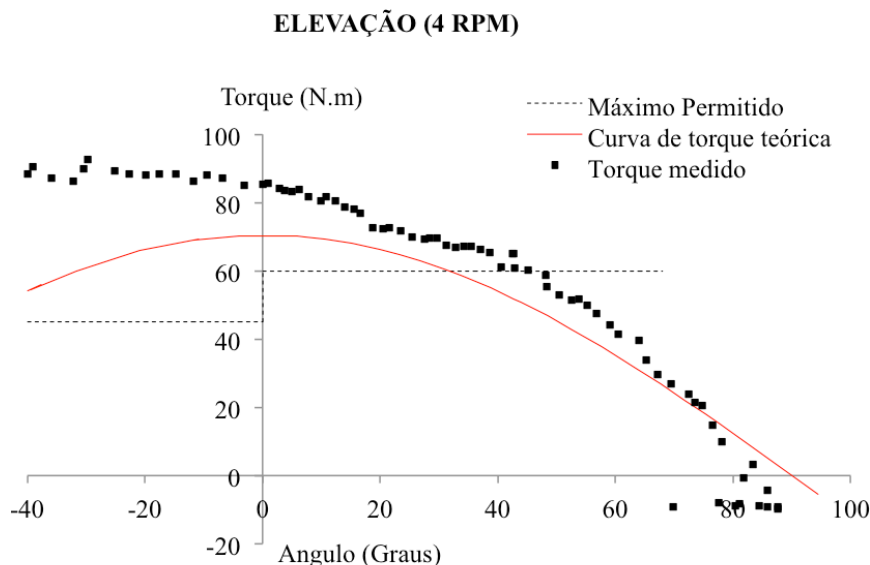


Figura 4a - Resultados provenientes do ensaio de elevação da Barra de Proteção Dobrável à velocidade angular de 4 RPM.

Analisando-se os resultados apresentados na figura 5a observa-se que de uma maneira geral o torque necessário para erguer a BDP é superior ao esforço recomendado pelo código 6 da OECD, sobretudo na zona de operação II (-40° a 0°), onde valores máximos aceitáveis são mais críticos. Nota-se ainda que há relevante desacordo entre os valores de torque teóricos (curva vermelha) e os valores de torque medidos no ensaio. Uma provável explicação para essa discrepância é a ocorrência de fricção entre a superfície da BDP e os pinos de união entre as partes fixas e móveis da BDP (Rótula).

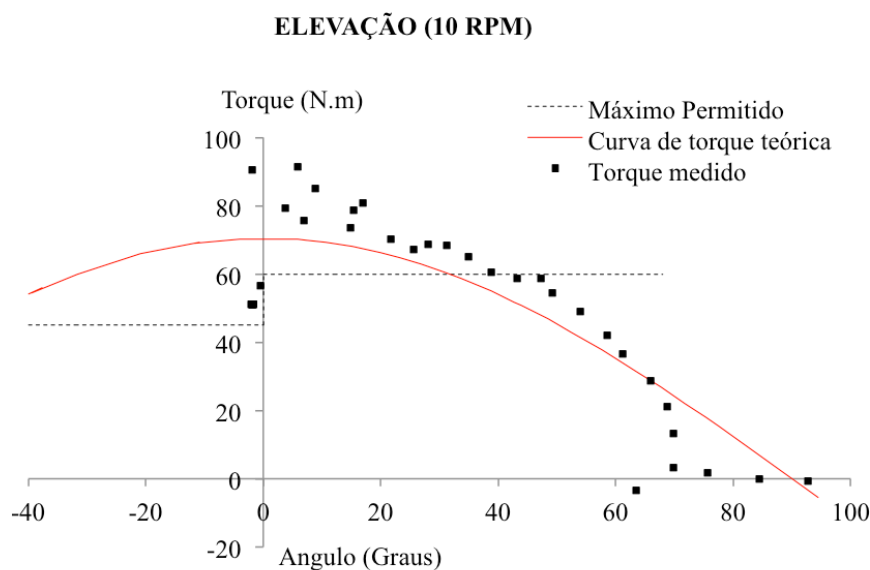


Figura 4b - Resultados provenientes do ensaio de elevação da Barra de Proteção Dobrável à velocidade angular de 10 RPM.

Constata-se que a velocidade angular para elevar a BPD não apresentou influencia direta no torque, uma vez que os dados apresentados na figura 5b possuem comportamento semelhante aos dados apresentados na figura 5a.

Após a realização de todos os ensaios de torque ficou comprovado experimentalmente que o torque necessário para erguer a BDP é superior aos limites impostos pelo código 6 da OECD, corroborando os resultados encontrados por Khorsandi et al. (2016) e Ayers et al. (2016).

Após analisar os elementos dimensionados pelo modelo implementado em planilha eletrônica e confronta-los com os produtos disponíveis no mercado verificou-se que não existiam elementos comerciais compatíveis com os indicados pelo modelo. Portanto foi indicada a aquisição e implementação do conjunto de molas que mais se assemelhasse a resposta original fornecida pelo software, atentando-se para que o conjunto escolhido não extrapolasse nenhuma das restrições estabelecidas no modelo original. As características técnicas do conjunto de molas adquiridas e seus respectivos esforços encontram-se nas tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Características técnicas da Mola de Torção adquirida e posteriormente implementada.

Elemento	Valor	Unidade
Diâmetro Médio (D)	5,56	cm
Deflexão (T)	65	°
Braço de Alavanca (M)	30,48	cm
Número de espiras (n)	12,50	-
Constante da Mola (R)	0,30	N.m. ^{o-1}
Módulo de Elasticidade (E)	207	MPa
Espessura do fio (d)	7,94	mm

Tabela 3 - Esforços Resultantes característicos da mola de torção adquirida.

Esforços	Valor	Unidade
Tensão Momento Fletor (S)	402,7	MPa
Torque (Q)	19,79	N.m
Força (P)	6,49	N

A Figura 5 ilustra a comparação do torque requerido para erguer a BPD sem o mecanismo auxiliar ao operador e após a implementação do conjunto de molas:

COMPARAÇÃO DO TORQUE PARA ELEVAÇÃO DA BPD (4 RPM)

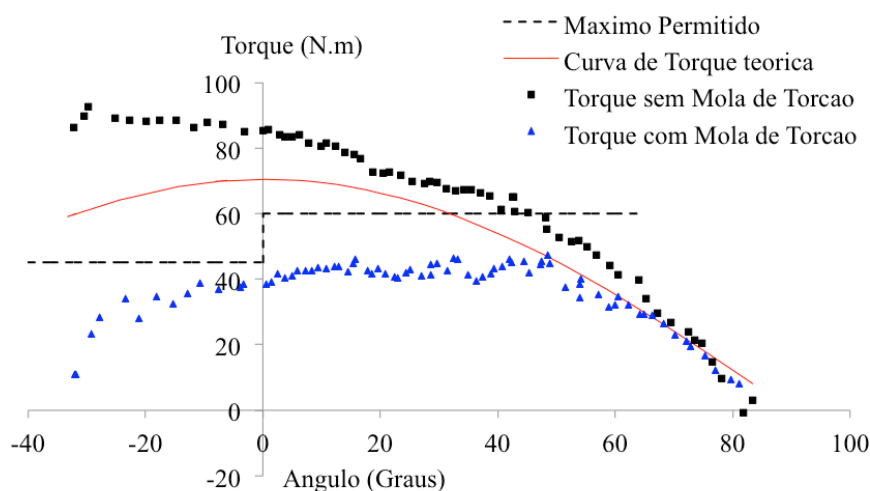


Figura 5a - Comparação de resultados após implementação da mola (4 RPM)

Nota-se que a implementação do conjunto de molas reduziu de maneira significativa o torque requerido para erguer da BPD, além disso, observa-se que os novos valores de torque (pontos azuis) apresentam-se abaixo dos valores máximos recomendados pelo código 6 da OECD.

COMPARAÇÃO DO TORQUE PARA ELEVAÇÃO DA BPD (10 RPM)

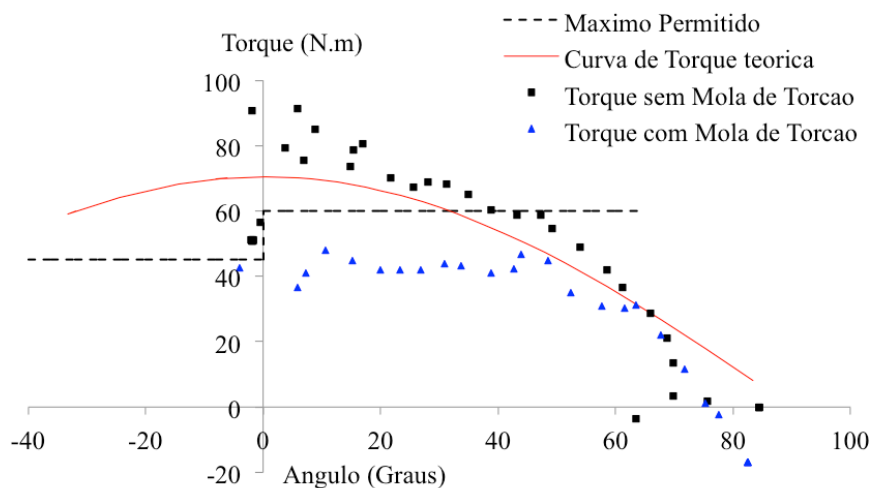


Figura 5b - Comparação de resultados após implementação da mola (10 RPM)

Novamente é possível concluir que a implementação do conjunto de molas atua na redução do torque requerido para erguer da BPD. Além disso, mais uma vez a velocidade angular para elevar a BPD não apresentou influencia direta no torque.

CONCLUSÕES:

Verificou-se que o conjunto de molas de torção mostrou-se eficaz para reduzir o torque requerido para manusear a barra de proteção dobrável em ângulos inferiores a 60°, reduzindo em quase 40% os valores recomendados pelo código 6 da OECD.

A velocidade angular com a qual se opera a barra de proteção dobrável apresenta pouca ou nenhuma influência no torque requerido.

AGRADECIMENTOS:

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro. À equipe de pesquisadores da Universidade do Tennessee pela oportunidade oferecida.

REFERÊNCIAS:

AYERS P.; KHORSANDI F.; WANG X.; ARAUJO, G. M. **Rops Design To Protect Operators During Tractor Rollovers**. In: ISTVS 2016 Detroit – 8th Americas Conference. 2016.

HOOKE R, 1678. **Ut Tensio, Sic Vis**. In: The University of Michigan (1958). Handbook of Mechanical Spring Design. Ann Arbor, ASSOCIATED SPRING CORPORATION, p34-40.

HOSTA, 2004. **Tractor Stability – National Safe Tractor and Machinery Operation Program**. HOSTA Task Sheet 4.12. Disponível em: <<http://www.nstmop.psu.edu/tasksheets/4.12%20Tractor%20Stability.pdf>>. Acessado em 27/03/2017.

KHORSANDI F.; AYERS P.; JACKSON D.; Wilkerson J. 2016. **The Effect of Speed on Foldable Rops Actuation Forces**. Journal of Agricultural Safety And Health p. 285-298. DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/Jash.22.11752>

LIU, B.; KOC, A. B. **A mobile application for tractor rollover detection and emergency reporting**. Computers and Electronics in Agriculture 98: 117-120, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.08.002>

MONTEIRO, L. A. **Acidentes com tratores agrícolas**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará-UFC Núcleo de Ensaios de Máquinas Agrícolas do semiárido-NEMASA. Disponível em: <<<http://www.grupocultivar.com.br/noticias/artigo-acidentes-com-tratores-agricolas>>>. Acessado em 07/11/2016.

ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT (OECD). **OECD Standard Code for the Official Testing of Front Mounted Roll-Over Protective Structures on Narrow-Track Wheeled Agricultural and Forestry Tractors: CODE 6**. Paris, 2012.

SAE. (2009). **Roll-Over Protective Structures (ROPS) for wheeled agricultural tractors**. SAE J2194. SAE International.