



## ANÁLISE TÉRMICA DE UM ACOPLAMENTO MAGNETO-REOLÓGICO PARA UM JOELHO DE PRÓTESES E EXOESQUELETOS

### Thermal Analysis of a Magneto-Reological Coupling for knee Protheses and Exoskeletons

Rafael Batista de Oliveira (1); Lucas de Amorim Paulo (2); Raphael Milanezi de Andrade (3)

(1) Estudante de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.

(2) Estudante de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.

(3) Dr. Prof. Eng. Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória - ES, Brasil.

Email para Correspondência: rafaldell10@gmail.com; (P)Rafael Batista de Oliveira, apresentador

**Resumo:** Fluido magneto-reológico (MR) são soluções coloidais que têm suas propriedades reológicas controladas por um campo magnético induzido e podem apresentar até 50% do seu volume de partículas magnetizáveis. Os dispositivos com fluido MR têm sido muito utilizados em próteses de joelho por apresentarem elevada capacidade de torque, baixo peso e consumo de energia. Por outro lado, a estabilidade, o controle e a vida útil de fluidos MR dependem criticamente de suas características térmicas. Quando um certo limite de temperatura é atingido, os aditivos do fluido se deterioram rapidamente e a viscosidade do fluido de base muda, provocando alterações irreversíveis do fluido MR. Este trabalho apresenta uma análise térmica transiente de um acoplamento MR para próteses e exoesqueletos operando em dois regimes distintos: deslizamento crítico, que ocorre durante atividades como descer escadas; e regime sem deslizamento, que ocorre durante a caminhada comum. A tensão de cisalhamento e o deslizamento resultante causam geração de calor, aumentando a temperatura do fluido durante a operação. Foi feita análise térmica transiente para verificar o nível de aquecimento do acoplamento, usando método de elementos finitos através do software ANSYS com base no modelo em CAD 3D do acoplamento MR. Os resultados indicam que no caso de deslizamento crítico o acoplamento aumenta a temperatura rapidamente podendo causar danos ao fluido se a operação nessa condição for prolongada.

*Palavras chaves:* Fluido MR; acoplamento MR; análise térmica transiente; prótese; exoesqueleto.



**Abstract:** Magneto-rheological (MR) fluids are colloidal solutions that have their rheological properties controlled by an induced magnetic field and it can presents up to 50% of their volume of magnetizable particules. MR fluid devices have been widely used in knee prostheses because they have high torque capacity, low weight and energy consumption. On the other hand, the stability, control and life of MR fluids depends critically on their thermal characteristics. When a certain temperature limit is reached, the fluid additives quickly deteriorate and the viscosity of the base fluid changes, causing irreversible changes of the MR fluid. This paper presents a transient thermal analysis of a MR coupling for prostheses and exoskeletons operating on two different conditions: critical slip regime, which occurs during activities such as going down stairs; and no-slip regime, which occurs during walking ground. The shear stress and the resulting slip cause heat generation, increasing the MR fluid temperature during operation. A transient thermal analysis was performed to check the heating level of the coupling, using finite element method through ANSYS software based on the 3D CAD model of the MR couplin. The results indicate that, on critical slip regime, the coupling increases temperature rapidly and can cause damage to the fluid if the operation in that condition is prolonged.

*Keywords: MR Fluid; MR coupling; transient thermal analysis; prosthesis; exoskeleton.*

## 1 INTRODUÇÃO

Os fluidos magneto-reológicos (MR) são soluções coloidais compostas por partículas magnetizáveis misturadas a um fluido transportador, geralmente à base de minerais ou à base de silicone (Chen et al., 2015). Quando o fluido é submetido a um campo magnético, as partículas começam a formar estruturas colunares paralelas às linhas de fluxo magnética, alterando as propriedades reológicas do fluido, tendo como principal propriedade alterada a tensão limite de escoamento, que pode atingir valores na ordem de kPa. O tempo para formar as estruturas colunares é da ordem de milissegundos (Yang, 2001).

As propriedades do fluido MR dependem fortemente da temperatura de operação (Chen et al., 2015). O fluido transportador tem sua viscosidade alterada de acordo com a variação de temperatura, o que resulta numa variação da tensão limite de cisalhamento do fluido MR. São adicionados aos fluidos MR, aditivos para diminuir a taxa de sedimentação e aumentar a dispersão de partículas no fluido transportador. Estes aditivos também são sensíveis à variação de temperatura, alguns são decompostos a cerca de 100 ° C, se tornando um limitante de operação do fluido MR. Para contabilizar essas mudanças de propriedades com a temperatura, Chen et al. (2015) propôs uma configuração experimental para avaliação de uma transmissão MR (que funciona no modo cisalhamento do fluido MR) sob diferentes temperaturas, obtendo um conjunto de curvas para torque e temperatura com diferentes entradas de corrente. Zipster et al (2001) propôs uma configuração experimental que analisa o fluido MR no modo de fluxo sob diferentes temperaturas. Wang et al (2014) fez uma caracterização completa do fluido MR sob diferentes temperaturas. Lee et al (2015) explicou o aumento de temperatura da variável indutor para o fluido MR sob fonte de tensão pulsada de alta frequência. A variação, principalmente devido à corrente de Foucault, tem influência na elevação da temperatura do fluido MR.

Como o fluido MR tem temperatura de operação limitada, a análise térmica dos componentes MR tem uma grande importância em quase todas as aplicações. Kowol e Pilch (2015) analisaram o aumento de temperatura em uma embreagem MR no estado de deslizamento total, que é o estado mais perigoso para o fluido MR no modo de cisalhamento. Wang et al (2013) propôs um método de resfriamento de água para dissipação para um freio MR de alto torque e Wang et al (2015) investigou a distribuição da temperatura do freio MR e das mudanças irreversíveis do fluido causadas pelo calor.

Neste artigo, a distribuição de temperatura de um acoplamento MR de baixo peso e alto torque é analisada sob duas condições de operação: Primeiro, quando o atuador de Joelho é usado em um caso que não ocorre deslizamento, como por exemplo, durante uma caminhada no solo, onde a geração de calor é causada apenas pelo efeito Joule em sua bobina. Segundo, quando o atuador de Joelho é usado em um caso que ocorre deslizamento, como no ato de descer escadas, onde nessa situação o torque requerido é

maior que o torque induzido pela embreagem e a geração de calor é causada pelo efeito Joule em sua bobina e por atrito entre os discos e o fluido MR. Como a geração de calor causada pelo atrito é muito maior, a condição de deslizamento total é a condição mais crítica entre as duas análises.

## 2 ACOPLAMENTO MR

A Figura 1 mostra o acoplamento MR. A operação do acoplamento se dá através de uma corrente aplicada na bobina (03, 04) consistindo de um núcleo de aço carbono SAE 1020, um enrolamento de cobre e uma tampa de alumínio, responsável por gerar o campo magnético. Esse conjunto é conectado aos discos internos de aço (07) e ao suporte interno (02). Os discos externos (06) são conectados à cobertura em alumínio (08), no qual a mesma está conectada ao suporte superior (01). O fluido MR preenchem os espaços entre os discos internos e externos. O núcleo da bobina e os discos laterais (05) direcionam o campo magnético para o fluido MR. Sob o campo magnético, o fluido começa a se comportar como um semi-sólido. Este comportamento leva a um aumento significativo do atrito nos discos e, conseqüentemente, do torque de saída (Andrade et al. 2018).

O fluido escolhido é o MRF-140DG fornecido pela corporação LORD.

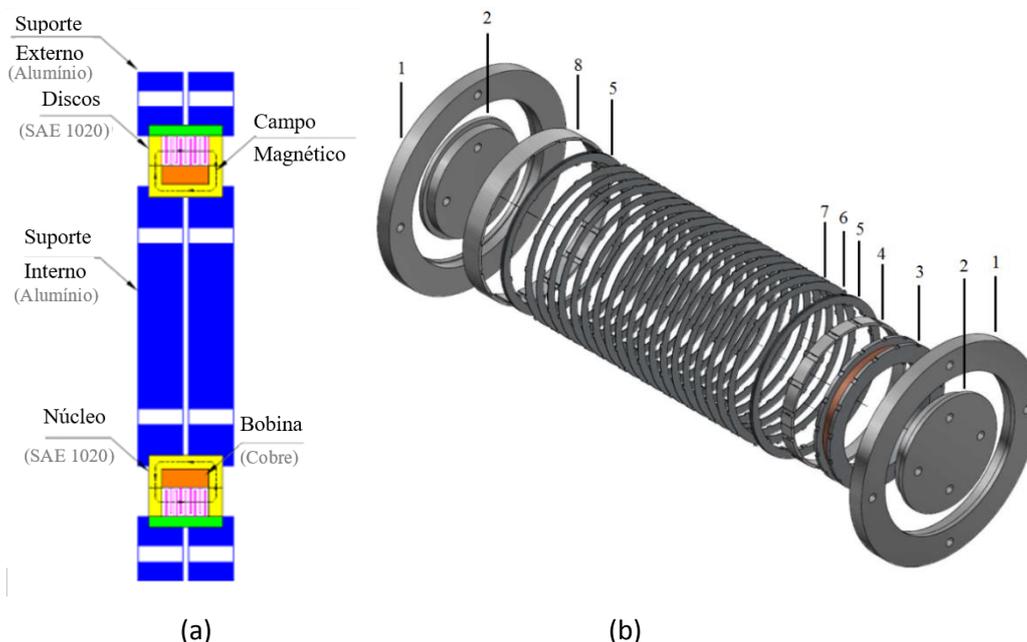


Figura 1. Acoplamento MR. (a) visão esquemática. (b) Visão explodida do acoplamento MR

## 3 METODOLOGIA

A variação de temperatura do acoplamento MR é avaliada através de uma análise de elementos finitos. O ANSYS Workbench 19.1 é empregado para a análise térmica

transiente. Na condição de deslizamento crítico, quase toda a energia de entrada no fluido MR é convertida em energia térmica (Kowol e Pilch, 2015). A equação (1) apresenta a perda de potência de escorregamento volumétrico, assumindo que toda perda de potência de escorregamento é convertida em geração de calor (Wang et al., 2015).

$$\dot{\Phi} = \frac{T\Delta\omega}{V} \quad (1)$$

Onde  $\Delta\omega$  é a velocidade angular;  $T$  é o torque induzido pela embreagem;  $V$  é o volume do fluido MR

A perda de energia elétrica da bobina é aplicado através do efeito Joule. A equação (2) apresenta a perda de potência elétrica volumétrica.

$$\dot{\Phi}_C = \frac{I^2 R_C}{V_C} \quad (2)$$

Onde  $I$  é a corrente da bobina;  $R_C$  é a resistência da bobina;  $V_C$  é o volume da bobina. O coeficiente de convecção natural adotado para a superfície estática é  $h_s = 9,7 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$  (Wang et al., 2015). A temperatura inicial é de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Como o acoplamento possui uma simetria cilíndrica, foi usado um modelo de 1/360 do acoplamento como apresentado na Figura 2, para otimizar o tempo de processamento. A malha foi gerada usando o método MultiZone para criar elementos hexaédricos. Os controles de malha foram então aplicados para criar diferentes tamanhos de elementos para obter uma precisão aceitável dos resultados nas áreas mais importantes. Foi feito o teste de malha, onde é possível observar que o erro relativo entre um passo de aproximadamente 7600 nós é menor que 0,01% comparado ao passo de aproximadamente 21000 nós. O tamanho dos elementos usados na simulação varia de 0,5 mm, na região do fluido MR, a 2 mm, nos suportes, resultando em 7600 nós aproximados para um rápido processamento.

A embreagem opera com um torque médio de 40,0 N.m e a corrente na bobina necessária para criar o campo magnético para atingir o torque médio é de 1,25 A. A simulação foi avaliada em um tempo máximo de 1.000s para a simulação com deslizamento e um tempo de 10.000s para a simulação sem deslizamento, tempo necessário para atingir o regime permanente da simulação.

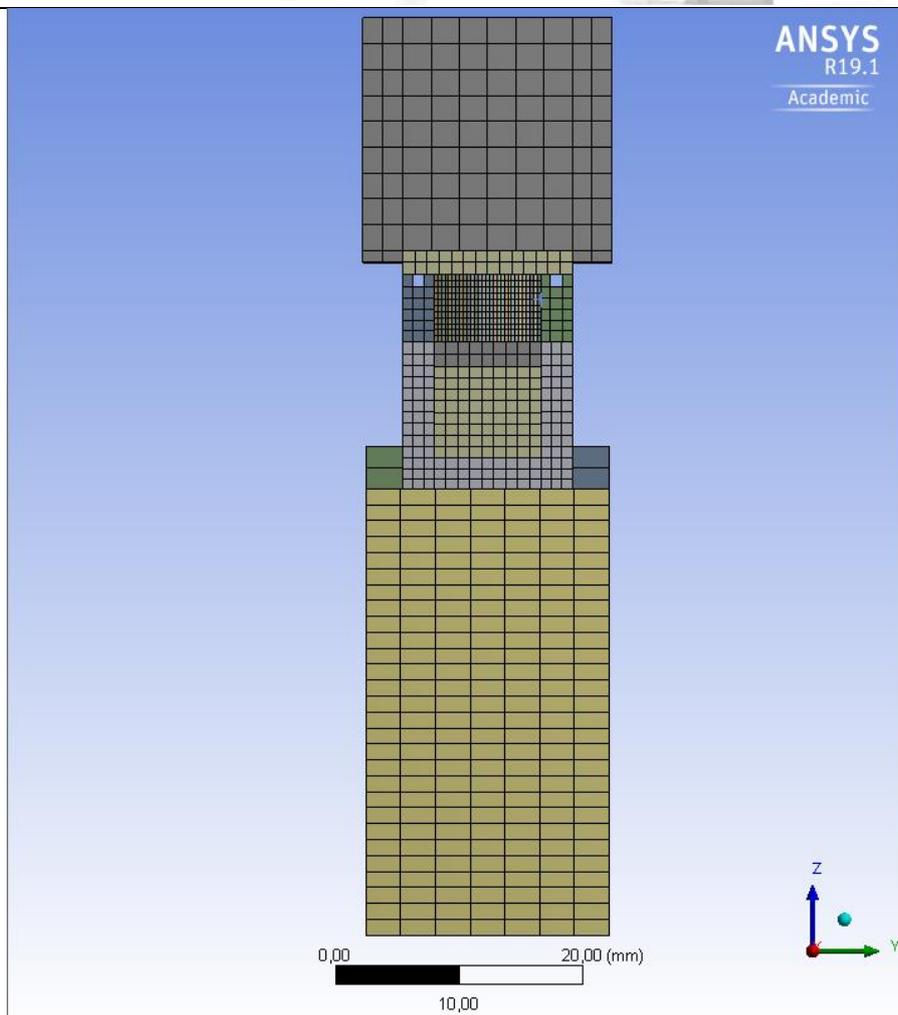
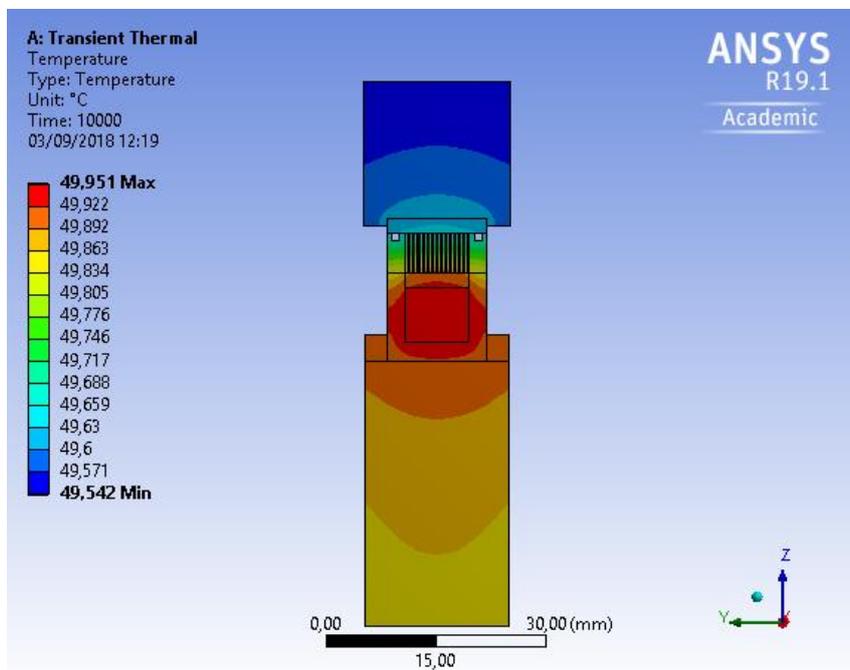


Figura 2. Malha usada na simulação. A dimensão dos elementos varia de 0,5 mm, na região do fluido MR, a 2 mm, nos suportes, resultando em 7600 nós.

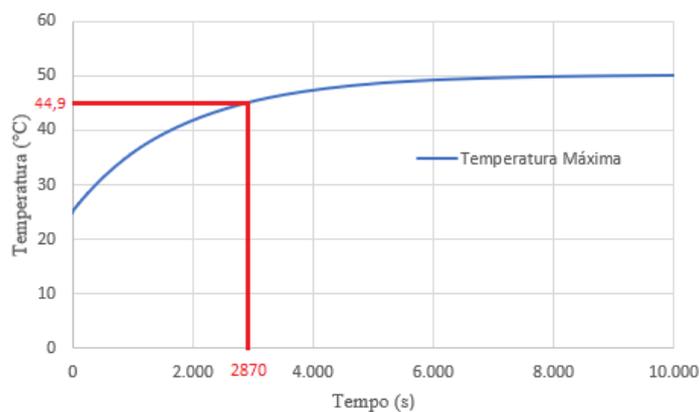
## 4 RESULTADOS

A distribuição de temperatura no acoplamento é analisada sob duas condições de operação:

## 4.1 Operação do acoplamento sem deslizamento



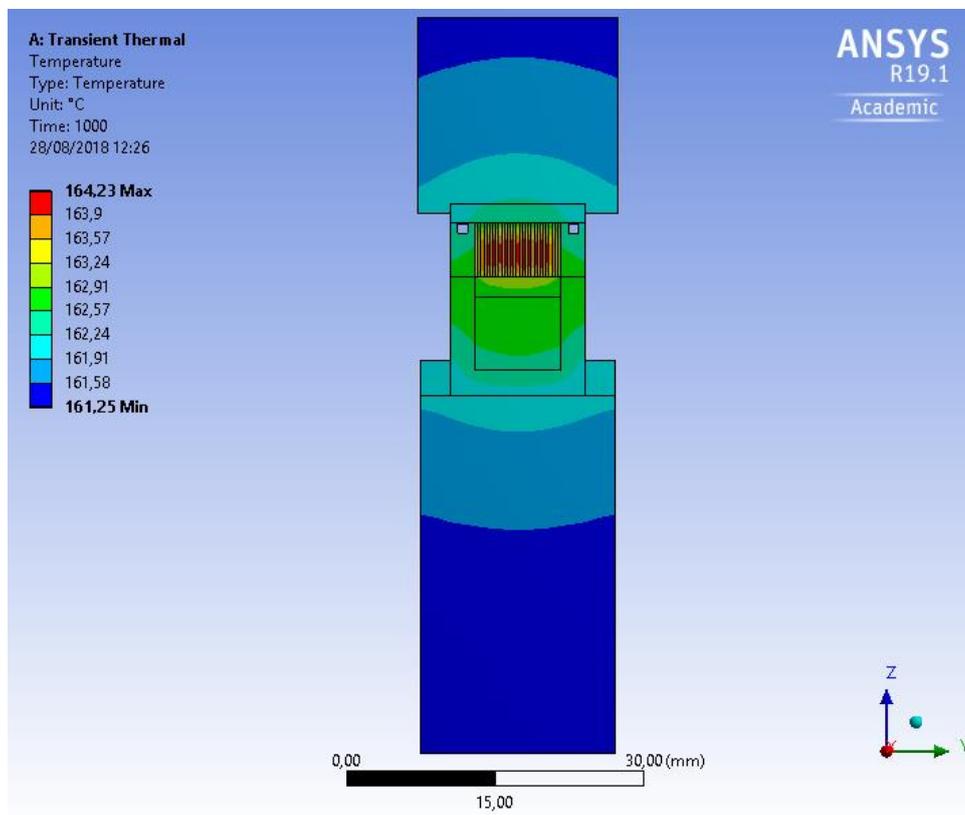
(a)



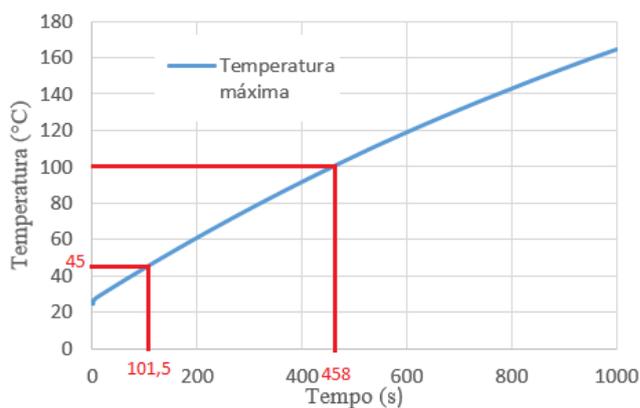
(b)

Figura 3. Análise térmica transiente para o regime de operação sem deslizamento. (a) distribuição de temperatura após 10.000s de operação. (b) variação da temperatura máxima durante a simulação.

## 4.2 Operação do acoplamento com deslizamento



(a)



(b)

Figura 4. Análise térmica transiente para o regime de operação de deslizamento crítico. (a) distribuição de temperatura após 1.000s de operação. (b) variação da temperatura máxima durante a simulação.

## 5 CONCLUSÃO E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados na Figura 3, referentes à condição de operação sem deslizamento, indicam que este regime de operação não causa nenhuma deterioração ao fluido. A Figura 3 (a) mostra a distribuição da temperatura após 10.000s de operação, tempo para alcançar o regime permanente. As temperaturas mais altas (aproximadamente 50 °C) são observadas na bobina e regiões próximas, uma vez que a geração de calor ocorre na bobina devido ao efeito Joule. A Figura 3 (b) mostra a variação da temperatura na região da bobina com o tempo. Percebe-se que a temperatura após 2.870s é danosa à pele, atingindo um valor de aproximadamente 45°C (Moritz e Henriques Jr., 1947). Considerando que a velocidade média de caminhada é de 1,0 m/s. Essa condição só seria atingida em uma caminhada longa em torno de 3 Km.

Com relação à Figura 4, referente à condição de deslizamento crítico, a região com a maior temperatura é a interface disco-fluido. Isso é esperado, já que a maior geração de calor ocorre nessa região. A temperatura máxima após 1.000s de operação é de 164,23°C. A Figura 4 (b) mostra a variação da temperatura máxima do fluido MR com o tempo. Como mencionado acima, a temperatura máxima para o fluido MR empregado na embreagem é de 100°C. Essa temperatura máxima é superada em cerca de 458 segundos. Embora a folha de dados de fluido MR sugira uma faixa de temperatura de -40°C a 150°C, em muitos casos o fluido MR diminui sua tensão de cisalhamento sob campo magnético em temperaturas de cerca de 100°C devido à deterioração dos aditivos (Chen et al., 2015). Considerando que a temperatura máxima para contato prolongado com a pele humana é de 45°C (Moritz e Henriques Jr., 1947), a condição de deslizamento crítico pode se tornar danosa à pele a partir de 101 s de operação nesta condição.

Com base nos resultados apresentados é possível afirmar que a condição de deslizamento crítico deve ser evitada. Uma vez que essa condição vai acontecer apenas em casos específicos como descer escadas e rampas e sentar. Espera-se que o tempo de operação nessa condição não seja prolongado. Por outro lado, os resultados em regime de operação sem deslizamento indicam que nenhum dano é causado ao fluido, porém se a operação for prolongada por mais de 47 minutos e sem interrupção, a temperatura da superfície do acoplamento pode ser danosa à pele.



## REFERÊNCIAS

- Andrade, R. M.; Leal Junior, A. G. ; Alves, L. H. D. ; Bento Filho, A. ; Barbosa, M. P. . Digital Prototyping of a Magnetorheological Knee for Prostheses and Exoskeletons. In: 23rd International Congress of Mechanical Engineering - COBEM, 2015, Rio de Janeiro.
- Andrade, R. M.; Storch, A. P.; Bento Filho, A; Vimieiro, C. B. S; Barbosa, M. P., Análise Térmica de um Atuador Magneto-Reológico para Joelho de Próteses e Exoesqueletos de Membros Inferiores, IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2016, Fortaleza, Ceará
- Andrade, R. M, Bento Filho, A. , Vimieiro, C. B. S., Pinotti, M. Optimal design and torque control of an active magnetorheological prosthetic knee. 2018. Smart Mater. Struct. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aadd5c>
- Cestari, M., Sanz-Merodio, D., Arevalo, J. C., Garcia, E., “An Adjustable Compliant Joint for Lower-Limb Exoskeletons”, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 20, NO. 2, APRIL 2015.
- Chen, S., Huang, J., Jian, K., Ding, J., 2015, Analysis of Influence of Temperature on Magnetorheological Fluid and Transmission Performance, Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 1-7.
- Dong, S. F., Lu, K. Q., Sun, J. Q. and Rudolph, K., 2006, A prototype rehabilitation device with variable resistance and joint motion control, Med. Eng. Phys., 28, 348–55;
- Goffer, A., Tamari, O., 2013, Motorized Exoskeleton Unit, US Patent Application, Pub. No.: US 2013/0253385 A1.
- Jafari, A., Tsagarakis, N. G., Caldwell, D. G., “A Novel Intrinsically Energy Efficient Actuator With Adjustable Stiffness (AwAS)”, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS, VOL. 18, NO. 1, FEBRUARY 2013.
- Kapti, A.O., Yucenur, M.S., 2006. Design and control of an active artificial knee joint. Mechanism and Machine Theory 41, 1477–1485.
- Kavlicoglu, B. M., Gordaninejad, F., Evrensel, C., Fuchs, A. and Korol, G., 2006, A semi-active magnetorheological fluid limited slip differential clutch, Trans. ASME, J. Vib. Acoust., 128, 604–10;
- Kowol, P., Pilch, Z., 2015, Analysis of the magnetorheological clutch working at full slip state, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 91, 108-111.
- Lauwerys, C., Swevers, J. and Sas, P., 2002, Linear control of car suspension using nonlinear actuator control, Proceedings do ISMA2002, Leuven-Bélgica;
- Lee, H.Y., Kang, I. M., Shon, C.H., Lee, S.H., 2015, Characteristics of temperature rise in variable inductor employing magnetorheological fluid driven by a high-frequency pulsed voltage source, Journal of applied physics, 17D508.



- Martinez-Villalpando, E. C., Her, H., 2009, Agonist-antagonist active knee prosthesis: A preliminary study in level-ground walking, *J.Rehabilitation Res. Development*, 46, 361-374;
- Moritz, A. R., Henriques Jr., F. C., 1947, Studies of thermal injuries: II The relative importance of time and surface temperature in the causation of cutaneous burns. *AM J Pathol*; 23:695-720.
- Nguyen, Q. H. and Choi, S. B., 2010, Optimal design of an automotive magnetorheological brake considering geometric dimensions and zero-field friction heat, *Smart Mater. Struct.*, 19, 115024;
- Riener, R., Rabuffetti, M., Frigo, C., 2002. Stair ascent and descent at different inclinations. *Gait Posture* 15, 32–44.
- Sung, K. G., and Choi, S. B., 2008, Effect of an electromagnetically optimized magnetorheological damper on vehicle suspension control performance, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 222, 2307–19;
- Wang, D., Zi, B., Zeng, Y., Hou, Y., Meng, Q., 2014, Temperature-dependent material properties of the components of magnetorheological fluids, *J Mater Sci*, 49, 8459–8470.