

Uma abordagem dos Fluidos Magneto-Reológicos e suas aplicações tecnológicas e o mercado mundial

An approach to Magneto-Rheological Fluids and their technological applications

Una aproximación a los Fluidos Magnetorreológicos y sus aplicaciones tecnológicas

Recebido: 04/06/2024 | Revisado: 18/06/2024 | Aceitado: 19/06/2024 | Publicado: 22/06/2024

Karine Fortunato Silva Barbosa¹

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7583-7126>

Universidade Federal de Itajubá, Brasil

E-mail: karinefortunatob@gmail.com

Resumo

O objetivo deste trabalho é apresentar documentos publicados na literatura sobre fluidos magneto-reológicos (FMRs), relatórios de 3 empresas multinacionais atuantes no mercado de (FMRs), apontando: consumo por países, fornecimento, segmentos por tipo, por setor, *CAGR* (uma das formas mais utilizadas pelo mercado para analisar o retorno potencial de um investimento), e o potencial em termos financeiros que este mercado almeja alcançar até 2031. Os fluidos magneto-reológicos, são materiais pertencentes a classe da Ciência de Materiais, e classificados como sendo Materias Inteligentes e compósitos. Geralmente eles são preparados na forma de pasta, com óleo ou água, partículas magnéticas que têm um diâmetro médio de vários micrômetros. O (FMR) pode ser reversivelmente controlado por um campo magnético e tem a capacidade de modificar seu estado de líquido para semissólido em milissegundos, tornando-o atrativo para aplicações tecnológicas. Partindo de Rabinow (1947), diversos autores vêm desenvolvendo estudos no campo de (FMRs) nas diversas áreas de engenharia, medicina e robótica de forma integrada, inclusive pesquisadores tem sintetizado fluidos magneto-reológicos em laboratórios externos e internos (Universidades), e apresentado avanços significativos para futuras aplicações comerciais. A coleta de dados para esse trabalho é pautada em uma pesquisa documental, qualitativa com revisão narrativa. O mercado mundial dos fluidos magneto-reológicos vem apresentando grande destaque ao longo da última década, como pontos negativos: alto custo de investimento em relação a outros fluidos, escassez de matéria-prima, falta de conhecimento técnico do consumidor em relação as propriedades avançadas do material para aplicações tecnológicas.

Palavras-chave: Fluidos magneto-reológicos; Reversivelmente controlados; Aplicações tecnológicas; Mercado mundial.

Abstract

The objective of this work is to present documents published in the literature on magnetorheological fluids (FMRs), reports from 3 multinational companies operating in the (FMRs) market, pointing out: consumption by countries, abundantly, segments by type, by sector, *CAGR* (a of the ways most used by the market to analyze the potential return on an investment), and the potential in financial terms that this market aims to achieve by 2031. Magnetorheological fluids are materials belonging to the Materials Science class, and classified as Intelligent Matters and Composites. Generally they are arranged in paste form, with oil or water, magnetic particles that have an average diameter of several micrometers. The (FMR) can be reversibly controlled by a magnetic field and has the ability to change its state from liquid to semi-solid in milliseconds, making it attractive for technological applications. Starting from Rabinow (1947), several authors have been developing studies in the field of (FMRs) in the various areas of engineering, medicine and robotics in an integrated manner, including researchers who have synthesized magnetorheological fluids in external and internal laboratories (Universities), and presented recent advances for future commercial applications. Data collection for this work is based on qualitative, documentary research with narrative review. The world market for magnetorheological fluids has been very prominent over the last decade, with negative points being: high investment cost in relation to other fluids, scarcity of raw materials, lack of technical knowledge on the part of the consumer in relation to the advanced properties of the material consumer for technological applications.

Keywords: Magnetorheological fluids; Reversibly controlled; Technological applications; Marketplace worldwide.

¹ Mestranda na Universidade Federal de Itajubá, Brasil.

Resumen

El objetivo de este trabajo es presentar documentos publicados en la literatura sobre fluidos magnetorreológicos (FMR), informes de 3 empresas multinacionales que operan en el mercado (FMR), señalando: consumo por países, en abundancia, segmentos por tipo, por sector, CAGR (una de las formas más utilizadas por el mercado para analizar el potencial retorno de una inversión), y el potencial en términos financieros que este mercado pretende alcanzar para 2031. Los fluidos magnetorreológicos son materiales pertenecientes a la clase de Ciencia de Materiales, y clasificados como Materias Inteligentes y Compuestos. Generalmente se disponen en forma de pasta, con aceite o agua, partículas magnéticas que tienen un diámetro promedio de varios micrómetros. El (FMR) puede controlarse de forma reversible mediante un campo magnético y tiene la capacidad de cambiar su estado de líquido a semisólido en milisegundos, lo que lo hace atractivo para aplicaciones tecnológicas. A partir de Rabinow (1947), diversos autores han venido desarrollando estudios en el campo de los (FMRs) en las diversas áreas de la ingeniería, la medicina y la robótica de manera integrada, incluyendo investigadores que han sintetizado fluidos magnetorreológicos en laboratorios externos e internos (Universidades). Y presentó avances recientes para futuras aplicaciones comerciales. La recolección de datos para este trabajo se basa en una investigación documental cualitativa con revisión narrativa. El mercado mundial de fluidos magnetorreológicos ha sido muy destacado durante la última década, siendo los puntos negativos: alto costo de inversión en relación con otros fluidos, escasez de materias primas, falta de conocimiento técnico por parte del consumidor en relación a las propiedades avanzadas. del consumidor de materiales para aplicaciones tecnológicas.

Palabras clave: Fluidos magnetorreológicos; Controlado reversiblemente; Aplicaciones tecnológicas; Mercado a nivel mundial.

1. Introdução

Inicialmente o uso dos fluidos magneto-reológicos destacaram-se em amortecedores e similares, porém, nas últimas décadas, com o aumento da tecnologia e estudos, diversos autores vêm através da literatura abordando-os em diferentes campos.

Segundo *Mezger* (2014), em 1948 *Jacob Rabinow* publicava seu primeiro artigo sobre o efeito magneto-reológico. Tornou-se então o precursor da magneto-reologia, porém anteriormente, em 1947, um primeiro modelo de embreagem fora projetado por ele como segue na Figura 1.

Jacob Rabinow (1910- 1999), nascido em *Kharkiv* (Ucrânia), emigrou com sua família para os Estados Unidos (*Nova York*). Ele cresceu no *Brooklyn* e frequentou o *City College of New York*, engenheiro e inventor, teve 230 invenções patenteadas nos Estados Unidos (EUA), incluindo diversos dispositivos tecnológicos e 70 patentes fora dos (EUA). *Rabinow* recebeu muitos méritos e fez diversas participações em instituições educacionais e científicas, rádio e televisão, atuou também como curador em um conselho de Ciências- *Science Service*, depois conhecido como *Society for Science & the Public*².

Conforme arquivos da *Nist National Institute of Standards and Technology* (2005), a invenção (embreagem de partículas magnéticas) de *Rabinow* era vinculado ao de mísseis guiados no *National Bureau of Standards*, o governo dos Estados Unidos detinha a patente dentro do país. Porém, em junção com o seu irmão *Joseph* registrou patentes em outros países, onde suas ideias foram aceitas e propagadas pelo mundo.

² *Society for Science*: foi fundada em 1921 pelo jornalista *Edward W. Scripps* e pelo zoólogo *William Emerson Ritter*; sob o nome de "*Science Service*", com o objetivo de informar o público sobre as últimas descobertas e realizações científicas.

Figura 1 - Primeiro modelo de laboratório de embreagem.



Fonte: *NIST Virtual Museum; National Institute of Standards and Technology*, <https://web.archive.org/web/20150910033446/http://www.nist.gov/>, (2005).

Segundo *Nist National Institute of Standards and Technology* (2005), essa embreagem de partículas magnéticas apresentava um design simples, controle preciso do torque, suave desempenho e vida útil longa. Algumas empresas de automóveis na Europa e Japão, como *Subaru e Renault*³, adotaram a invenção para uso nos automóveis, também no controle de aviações, e para disco rígido, que foi inventado em (1951), e após alguns anos comercializado pela empresa *IBM*, o *IBM 305 RAMAC* foi o primeiro HD (1957), com armazenamento de até 5 MB, modelo experimental de dispositivo de memória magnética de disco entalhado conforme Figura 2.

Figura 2 - Modelo Experimental de Dispositivo de Memória Magnética de Disco Entalhado: *Jacob Rabinow* (1951).



Fonte: *NIST Virtual Museum; National Institute of Standards and Technology*, <https://web.archive.org/web/20150910033446/http://www.nist.gov/>, (2005).

1.1 Fluidos Magneto-reológicos

Os fluidos magneto-reológicos, são materiais compósitos, constituem a classe de materiais inteligentes com diâmetros da ordem de 100nm – 100µm e mais comumente na faixa de 1 – 20µm. Segundo Oliveira e Savi (2013), o uso dos materiais inteligentes na área tecnológica, tem o objetivo de arquitetar sistemas e estruturas adaptáveis, de forma que suas propriedades possam ser alteradas de acordo com mudanças ambientais.

O (FMR) é também classificado como fluido funcional, uma vez que sua viscosidade (η) pode ser reversivelmente

³ *Subaru e Renault*. A *Subaru* - em escrita japonesa *katakana* スバル, é uma empresa automobilística japonesa, fundada em 1953, subsidiária do grupo industrial *Fuji Heavy Industries Co.,Ltda*. A *Renault S.A.* - é uma empresa francesa, que fabrica veículos, fundada em 1899. Produz automóveis pequenos e médios, vans, ônibus e caminhões.

controlada por um campo magnético.(RABINOW⁴ 1948, apud KANDA *et al.*, 2019, p.1). O fator preponderante em relação ao uso e aplicação de fluidos magneto-reológicos, é o fato da viscosidade (η) poder ser controlada através de um campo magnético, em *off state*- sem campo, *on state*- com aplicação de um campo magnético. Essa reversibilidade para a ciência e tecnologia é de grande valia.

Na equação 1, a viscosidade denota a tensão de cisalhamento(τ) sobre taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), resistência ao movimento de fluid de uma material, unidade em [Pa.s].

Na equação 2 a (τ) denota a força por unidade da área cisalhante que é preciso para manter o escoamento do fluido, unidade em [Pa].

Na equação 3 a ($\dot{\gamma}$) denota o grau de deformação e o gradiente de velocidade, unidade em [s^{-1} ou 1/s].

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \text{ Equação 1}$$

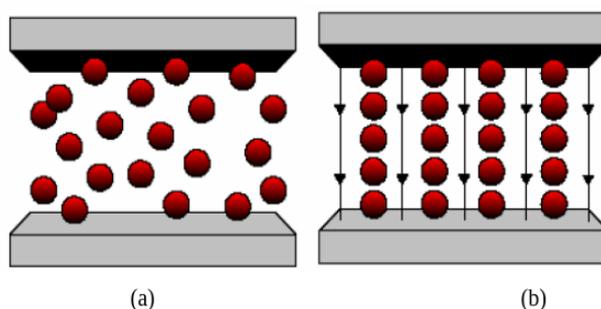
$$\tau = \frac{F}{A} \text{ Equação 2}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} = \frac{dy}{dt} \text{ Equação 3}$$

Segundo *Sánchez- Alonso et. al.*, (2020), os (FMR) são preparados combinando 3 componentes principais: fluido base, partículas magnetizáveis (fase dispersa) e aditivos estabilizantes.

Segundo *Mezger* (2014), os (FMRs) compreendem partículas magneticamente polarizáveis suspensas em um fluido transportador. Com a aplicação de um campo magnético, as partículas organizam-se na direção do campo formando uma cadeia. É válido ressaltar que a resistência da estrutura aumenta de acordo com a intensidade do campo magnético aplicado, observe a Figura 3.

Figura 3 - Efeito da aplicação de um campo magnético em um fluido magneto-reológico:(a) Ausência de campo magnético; (b) Presença de campo magnético.



Fonte: STUTZ (2005).

Segundo Guerreiro e Batocchio (s.d) os fluidos magneto-reológicos (FMR) apresentam mudanças em suas propriedades, como: viscosidade, escoamento de matéria, fluxo de material, quando submetidos a um campo magnético induzido.

Tratando-se de fluxo do fluido e/ou viscosidade aparente, eles apresentam mudança, e sem a aplicação de um campo

⁴ Rabinow, J. J.; "The Magnetic Fluid Clutch," *J. AIEE Trans.*, 67, 1308–1315 (1948).

magnético, os fluidos magneto-reológicos comportam-se aproximadamente como fluidos-Newtonianos, equação 4, porém são fluidos não-Newtonianos seguindo o ajuste com Lei de Potências *Power Law*, conforme Equação 5.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \text{ Equação 4}$$

$$\tau = K(\dot{\gamma})^n \text{ Equação 5}$$

Ashtiani et al., (2015), afirma em seu trabalho: [...] que a principal característica desses fluidos é a capacidade de mudar do estado líquido para o estado semissólido com tensão de escoamento controlável apenas alguns milissegundos após a aplicação de um campo magnético. O baixo efeito magneto-reológico e a instabilidade dos (FMRs) são os problemas mais importantes contra a ampla aplicação da tecnologia de (FMRs) nas indústrias modernas. Vários métodos têm sido propostos e utilizados por pesquisadores para melhorar o efeito magneto-reológico e também a estabilidade desses fluidos.

1.2 Modelo de Bingham

Segundo *Barnes* (1999, p.5), *Eugene Cook Bingham* atribuiu uma das leis não-Newtonianas mais marcantes da Reologia (Modelo de *Bingham*) e viscosidade plástica.

Os plásticos de *Bingham* relacionam-se linearmente, por tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação e/ou taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$). Atingindo uma tensão inicial, o fluido se comporta como sólido estaticamente, e com aplicação de uma força (F) flui, podendo correlacionar esse modelo ao comportamento dos fluidos magneto-reológicos.

Quando submetido a um campo magnético, o fluido magneto-reológico funciona como o plástico ideal ou plástico de *Bingham*, *Andrade* (2018), *Wang & Hou* (2013). Considerando a tensão de cisalhamento total do fluido magneto-reológico para *Bingham*, tem-se a Equação 6:

$$\tau_{MR} = \tau_{\gamma} + \eta_{MR} \dot{\gamma} \text{ Equação 6}$$

Sendo (τ_{MR}), tensão de cisalhamento de fluidos magneto-reológicos, (τ_{γ}) tensão limite de escoamento do fluido, variando em função do campo magnético aplicado, (η_{MR}) é a viscosidade dinâmica do fluido magneto-reológico e ($\dot{\gamma}$) a taxa de cisalhamento do escoamento.

O objetivo deste trabalho é apresentar documentos publicados na literatura sobre fluidos magneto-reológicos (FMRs), relatórios de 3 empresas multinacionais atuantes no mercado de (FMRs), apontando: consumo por países, fornecimento, segmentos por tipo, por setor, *CAGR* (uma das formas mais utilizadas pelo mercado para analisar o retorno potencial de um investimento), e o potencial em termos financeiro que este mercado almeja alcançar até 2031.

2. Metodologia

Esta pesquisa apresenta metodologia de carácter documental conforme (*Sousa & Alves*, 2021).

[...] *revisões narrativas são publicações amplas, apropriadas para descrever e discutir o desenvolvimento ou o "estado da arte" de um determinado assunto, sob ponto de vista teórico ou contextual.* (*Rother*, 2007).

A pesquisa qualitativa, em geral, ocorre no ambiente natural com coleta direta de dados e o pesquisador é o principal

instrumento (Pereira *et. al.*, 2018, p.67).

Portanto, documental, qualitativo com revisão narrativa. Uma busca sistemática foi feita em base de dados do Google, Google Acadêmico, Portal de Periódicos CAPES, as palavras mais buscadas foram: fluidos magneto-reológicos e o mercado mundial; fluidos magneto-reológicos e engenharia; síntese de fluidos magneto-reológicos, fluidos magneto-reológicos e aplicações tecnológicas.

Livros (Barnes *et. al.*, 1989; Steffe, 1996; Goodwin & Hughes, 2008; Mezger, 2014; Bretas e D'Ávila, 2005), artigos produzidos por autores que estudam fluidos magneto-reológicos (Bombard, 2005, 2015, 2021, 2023 e 2024 (em parceria com outros autores); Sousa, 2019; 2020; Rocha, 2021; 2024; Manuel, 2023) e no mundo (Modesto *et. al.*, 2006, 2008; Vikram *et. al.*, 2015; Ashtiani *et. al.*, 2015; Kanda *et. al.*, 2019; Aruna *et. al.*, 2019; Roupec *et. al.*, 2017, 2021; Hu *et. al.*, 2014; Zhang *et. al.*, 2016; Morillas *et. al.*, 2016; Sánchez-Alonso *et. al.*, 2020), com destaque a Universidade Federal de Itajubá- MG, pesquisador Prof. Dr. José Antonio Faria Bombard, no qual vem desempenhando pesquisas encontradas na literatura neste campo desde 2005.

3. Resultados e Discussão

Conforme o relato de alguns autores na literatura, apenas no ano de 1990, o (FMR) passou a ser comercializado, diversos pesquisadores contribuíram para o avanço dos fluidos magneto-reológicos.

As pesquisas e aplicações não ficaram apenas no campo de amortecedores, ou um disco rígido como propôs Rabinow em 1951. Os estudos avançaram para a área de Engenharia (controles semiativos de estruturas e vibrações sísmicas), Aeroespacial, Medicina, Robótica, Óptica e Tecnológica. Observe o Quadro 1.

Quadro 1 - Algumas aplicações tecnológicas dos fluidos magneto-reológicos em diversas áreas encontradas na literatura.

Aplicações tecnológicas dos fluidos magneto-reológicos	
Áreas	Aplicações
Engenharias	Automotiva (embreagens, amortecedores); Civil (controle de impactos de abalos sísmicos); Mecânica (motores diversos, ponte pênsil); Apetrechos militares (armas bélicas, metralhadora, coletes a prova de balas); Aeronáutica e aeroespacial (<i>fuselagem, dispositivos amortecedores e isoladores de vibrações, dispositivos redutores de ruídos das turbinas, chevrons de geometria variável, que modificam o perfil de saída dos gases de exaustão variando sua turbulência e consequentemente o nível de ruído, sistema de asa telescópica ou flexível, trem de pouso retrátil, ou ainda componentes dos motores a jato e da fuselagem, atuadores e aero-estruturas</i>) (MANZO <i>et al.</i> ; MABE <i>et al.</i> , 2005, 2011, apud MORAES, 2021); Eletrônicos (disco rígido).
	Aplicação de micro atuadores ou em forma de músculos artificiais; Materiais biomecânicos usados na área biomédica; Miniaturização da plataforma de hardware, até o acréscimo de inteligência artificial "A.I" no sistema integrado, com atributos de pequenas (Jani <i>et al.</i> , 2013).
Síntese	Laboratorial (fluidos magneto-reológicos, elastômeros); Industrial (patentes de fluidos magneto-reológicos, <i>Lord Corporation; QED Technologies International; Liquids Research Limited; Arus MR Tech; CK Materials Lab, etc.</i>)
Medicina e Próteses	Fisioterapia (aparelhos); Próteses transfemorais; Músculos artificiais; Outros tipos de próteses (como já citado no campo da biomecânica).

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

3.1 Aplicações Tecnológicas

3.1.1 No campo da Engenharia, suspensões e freios automotivos

Segundo Torres (2016), o conceito de suspensões semiativas foi apresentado por *Karnopp et. al.*, (1974), em seguida por outros autores.

Lai e Lia-o (2002) estudaram um sistema de suspensão chamado “um único grau de liberdade”, no qual um grau se refere a movimento, um amortecedor de fluido magneto-reológico com finalidade de controle vibracional.

Moura (2003), estudou os fundamentos sobre suspensões veiculares passivas, utilizando amortecedores com fluido magneto-reológicos. *Tusset* (2008), propôs um controle de suspensão veicular utilizando o amortecedor magneto-reológico (MR).

3.1.2 No campo da Engenharia, controle de semiativos, abalos sísmicos e pontes pênsil

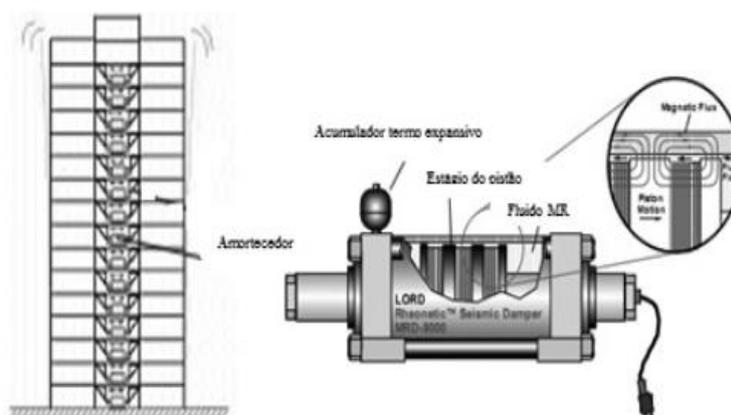
Mahmoodi (1969) foi o primeiro a aplicar amortecedores viscoelásticos na engenharia estrutural no antigo edifício do *World Trade Center* (WTC), em *Nova York, EUA*.

O amortecedor magneto-reológico (MR) é um dispositivo de controle semiativo inteligente que gera força em resposta à velocidade e tensão aplicada. Consequentemente, o controle semiativo usando amortecedores magneto-reológicos são dispositivos poderosos que aproveitam as vantagens dos dispositivos passivos com os benefícios do controle ativo. Além disso, eles são inerentemente estáveis, confiáveis, e relativamente rentáveis; eles requerem pequeno poder de ativação. (*Karamodin et al.*, 2008).

Os autores, *Karamodin et al.*, (2008), em Pequim na China propuseram um método para controle sísmico *Model Predictive Control (MPC)*- Modelo de Controle Preditivo, contendo amortecedores magneto-reológicos, esse modelo integra uma classe de algoritmos com capacidade de cálculos, otimizando o comportamento futuro de uma planta utilizado na Engenharia Civil, capaz até mesmo de prever mudanças no tempo, favorecendo o seu funcionamento.

Xu e Li (2012), apresentaram um sistema para obtenção de controle a impactos sísmicos, com aplicação real, observe a Figura 4.

Figura 4 - Amortecedor de fluido magneto-reológico para controle de abalo sísmico.



Fonte: *Yang et. al.* (2002).

Autores diversos, *Kervin* (1959), *Ross et. al.*, (1959), entre outros a partir de 1950 iniciaram estudos com fluidos magneto-reológicos, citados por eles como amortecedores do tipo viscoelásticos, com objetivo análogo ao de abalos sísmicos, afirma Moraes (2021).

Amortecedores viscosos instalados no estádio de *basebol* em *Seattle* (EUA), são um reforço muito usado para casos de cargas sísmicas, segundo Moutinho (2007) a possibilidade de instalação não compromete a arquitetura estrutural, observe a Figura 5.

Figura 5 - Amortecedores viscosos instalados no estádio de basebol em Seattle, EUA.



Fonte: Adaptado de Moraes, apud Barbosa (2024),

Bombard (2005) em seu trabalho sobre suspensões e fluidos magneto-reológicos ressalta as pontes pênsil no lago Dongting, província de Hunan, China. A ponte pênsil tem alguns cabos de aço que servem como sustentação e contam com um par de amortecedores (FMR) impedindo vibrações, observe a Figura 6A e 6B. Existem outras pontes no mundo que usam essa tecnologia.

Figura 6 - Pontes pênsil no lago *Dongting*, província de *Hunan*, China. A) Ponte mais antiga, B) Ponte mais atual.



Fonte: <http://portuguese.people.com.cn/n3/2018/0202/c309806-9423176.html> acesso em 15 de maio, 2024.

Figura 7 - Detalhe de amortecedor magneto- reológico (observe a área circulada).



Fonte: Adaptado de Bombard (2005) apud Barbosa (2024).

3.1.3 No campo da engenharia, para apetrechos militares

Equipamentos militares com dispositivos baseados em fluidos magneto-reológicos, como tanques e veículos, um destaque é o exército dos Estados Unidos (EUA), que utiliza coletes militares, com blindagem contendo (FMRs) resistente a balas. (Bombard, 2005; Anjos, 2019).

3.1.4 No campo da medicina

Uma aplicação inovadora, é o uso de pernas mecânicas, as próteses oferecem maior conforto e flexibilidade para amputados transfemorais. A prótese *Rheo Knee* (Ossur, Islândia) observe na Figura 8. Segundo *Pillai et. al.5*, (2011 apud Andrade, 2018, p.33) um micro controlador e um fluido (MR) são usados para controlar resistência do movimento na articulação do joelho. “Um ajuste fino dos parâmetros de balanço e apoio podem ser completados pelo fisioterapeuta através de um assistente pessoal digital.” (*Smith et al.*, 2005⁶, apud Andrade, 2018, p.33).

Figura 8 - Prótese tansfemoral Rheo Knee com fluido(MR).



Fonte: *Ossur*, Islândia, (2018).

⁵ *Pillai, M. V., Kazerooni, H., Hurwicz, A.*, (2011). Design of a Semi-Active Knee-Ankle Prosthesis.. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2011, Shanghai, China.

⁶ *Smith, D., Margrit, R. M., Roy, K. D., Elliot, S. B.*, (2005). Outcome Assessment of a MR Microprocessor-Controlled Knee. *Microprocessor Knee Symposium – American Academy of Orthotists & Prosthetists*.

Na Universidade Técnica de Budapeste, Hungria, pesquisa-se o efeito (MR) de géis de polímeros reticulados e hidrofílicos, intumescidos com ferro fluidos aquosos, que mudam sua forma e enrijecem sob ação de um campo magnético. (Szabó *et. al.*⁷, 1998, apud Bombard, 2005, p.25).

Segundo Szabó *et. al.*,⁸ (1999 apud Bombard, 2005) um grupo também de Budapeste trabalha com pesquisas de géis de polímeros para reprodução de músculos artificiais.

Na medicina ocorre um encontro de diversos campos, a robótica é muito aplicada em materiais com princípio de concepção biomecânica e biomédica, Moraes (2021).

3.1.5 No campo da sintetização dos fluidos magneto-reológicos

Há muitos anos vêm sendo desempenhados estudos teóricos e laboratoriais em fluidos magneto-reológicos utilizando-se de aditivos tixotrópicos, com o objetivo de buscar estabilidade, retardo de sedimentação destes e otimização em seu uso. Vários trabalhos tem sido propostos com o emprego de aditivos gelificantes de óleo de poli(alfa-olefina) e com outros componentes como alternativa a deterioração rápida nos fluidos magneto-reológicos. (Bombard, 2005, 2012, 2015, 2016, 2019, 2020, juntamente com outros autores em 2021, 2023, 2024).

É necessário que na ausência de um campo magnético nos (FMR) seja evitado o aumento de viscosidade decorrente da agregação das partículas. Diversos autores Bombard (2005, 2015, 2016, 2019, 2024; Modesto *et. al.*, 2006, 2008; Morillas *et al.*, 2015, Ashtiani *et. al.*, 2014; Sanchez-Alonso *et. al.*, 2020; Roupec *et. al.*, 2017, 2021; Aruna *et. al.*, 2019; Sousa, 2019, 2020; Rocha, 2021, 2024), fizeram testes experimentais e caracterizações reológicas com diferentes agentes tixotrópicos em fluidos magneto-reológicos para estudos científicos com o objetivo de apresentar uma empregabilidade mais vantajosa.

[...] usando aditivos estabilizantes para não agregação das partículas, e aditivos tixotrópicos retardando a sedimentação do pó magnético (sílica pirogênica hidrofílica ou hidrofóbica, poli(vinil-pirrolidona), argilas organomodificadas. (BOMBARD, 2005).

E ainda, para Sanchez-Alonso *et. al.*, (2020), o fluido base se comporta como um transportador que abrange as partículas magnetizáveis em suspensão que desencadeia o efeito magnetoreológico. Já os aditivos são usados no preparo para conter a sedimentação e agregação destas partículas.

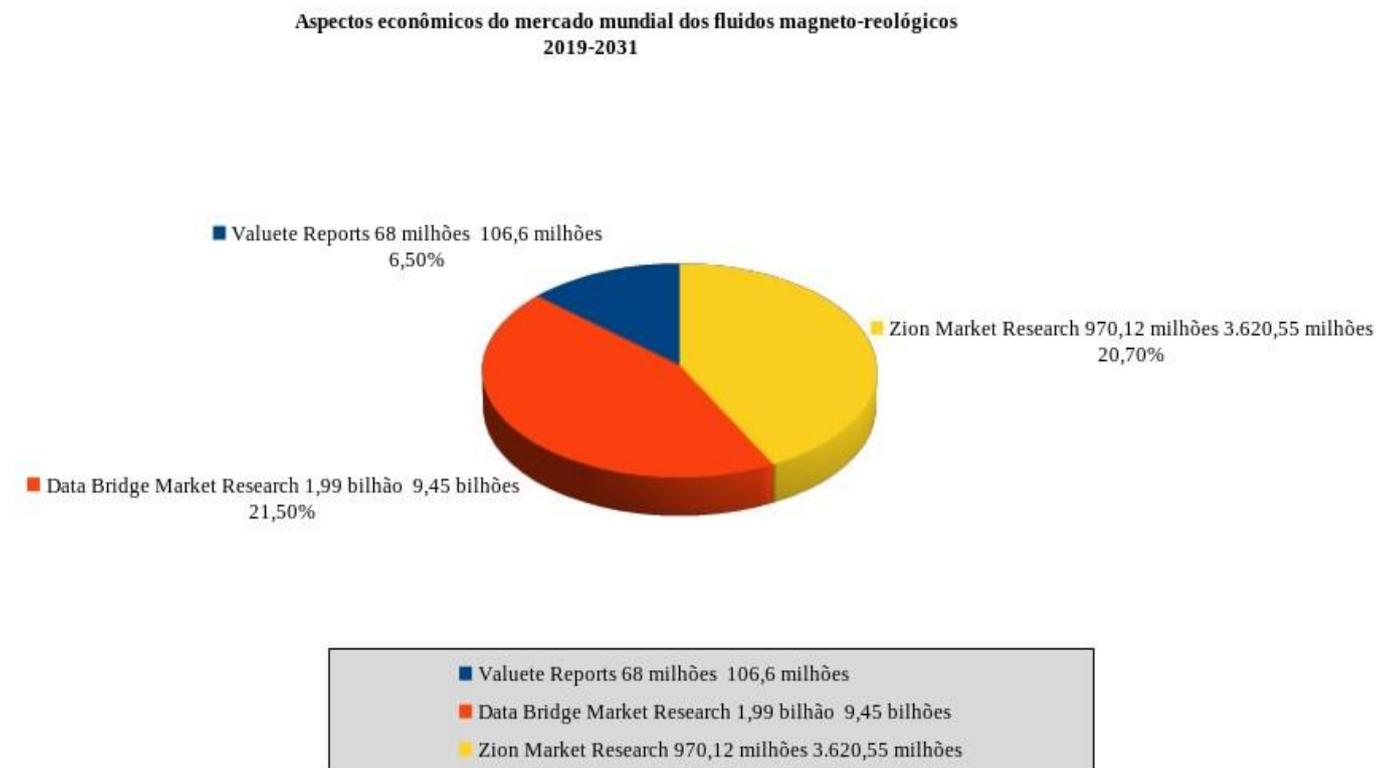
3.2 Mercado mundial dos fluidos magneto-reológicos

Apontando para o aspecto econômico, segundo informações retiradas dos sites de algumas empresas no campo de (FMRs) que tem apresentado crescimento exponencial nos últimos anos. Na literatura até o presente momento existem poucas informações sobre os registros do mercado econômico mundial dos fluidos magneto-reológicos em específico. As informações referentes a “mercado” para esta pesquisa foram encontradas nos sites das próprias empresas.

⁷ Szabó D., Szeghy G. and Zríny M., (1988). “Shape transition of magnetic field sensitive polymer gels”, *Macromolecules* 31 : 6541 – 6548.

⁸ Szabó D. and Zríny M., (2000). “Muscular contraction mimiced by magnetic gels'”, em: 7 th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions - Honolulu, Hawaii, USA, 19 - 23 Julho de 1999, Editor: R. Tao, World Scientific.

Figura 9 - O gráfico pizza aponta aspectos econômicos do mercado mundial e sua avaliação e estimativa de alcance. 3 empresas multinacionais no ramo de fluidos magneto-reológicos estão representadas.



A empresa *Valute Reports*, com sede nos EUA o tamanho global do mercado de fluidos magneto-reológicos, pretende alcançar até 2030 (US\$ milhões). Este mercado foi avaliado em (US\$ 68 milhões) em 2023 e está previsto alcançar até 2030 (US\$ 106,6 milhões), e *Compound Annual Growth Rate* - CAGR⁹ de 6,5% entre o período 2024 a 2030.

A empresa *Data Bridge Market Research* com sedes nos EUA e Reino Unido analisa que o mercado global de fluidos magneto reológicos foi avaliado em (US\$ 1,99 bilhão) e atingirá (US\$ 9,45 bilhões) até 2031, crescendo a um CAGR de 21,5% entre período de previsão de 2024 a 2031.

A empresa *Zion Market Research*, com sedes em USA/Canada, Pacífico da Ásia, *Maharashtra*, Índia publicou um relatório sobre a demanda global pelo mercado de fluidos magneto-reológicos, que foi estimada em aproximadamente (US\$ 970,12 milhões) em 2019, e deverá gerar receita em torno de (US\$ 3.620,55 milhões) até o final de 2026, crescendo a um CAGR de cerca de 20,7. % entre 2020 e 2026.

Os principais investidores conforme o site dessas empresas no mercado de fluidos magneto-reológicos estão na Europa, América do Norte e Índia, e o maior consumo conforme Tabela 1.

⁹ O CAGR é a taxa de crescimento anual composto, é uma das formas mais utilizadas pelo mercado para analisar o retorno potencial de um investimento.

Tabela 1 - Mercado de consumo de fluidos magneto-reológicos mundiais.

Maior consumo global por Região
América do Norte (EUA, Canadá) ; Europa (Alemanha, França, Reino Unido, Itália, Rússia) ; Ásia-Pacífico (China, Japão, Coreia do Sul, Taiwan) Sudeste da Ásia (Índia) ; Oriente Médio e África (Países do Golfo, África do Sul, Restante do Oriente Médio e África); América Latina (México, Brasil) .

Fontes: Dados adaptados dos sites das empresas *Valuete Reports*, *Data Bridge Market Research* e *Zion Market Research* (2024).

Os relatórios das empresas, segundo a *Zion Market Research* disponibilizados fornecem dados quantitativos e qualitativos do mercado dos fluidos magneto-reológicos mundial para auxiliar desenvolvedores a considerar decisões pertinentes aos fluidos magneto-reológicos. Baseado nessas informações, observe a Tabela 2.

Tabela 2 - Segmentos por tipo e aplicação usados em fluidos magneto-reológicos.

Segmento por Tipo	Segmento por Aplicação
Óleo de Silício; Óleo mineral; Óleo de Hidrocarboneto Sintético; Óleo de parafina; Óleo hidráulico; Outros.	Elétrica e Eletrônica; Automotivo; Construção Militar e Defesa; Médicos; Outros.

Fontes: Dados adaptados da *Zion Market Research* (2024), apud Barbosa(2024).

Do segmento por tipo, conforme Tabela 2, o Óleo de Hidrocarboneto Sintético, vem apresentando maior participação, sendo superior a 98%, no segmento de aplicação, observe também na Figura 10.

O óleo de hidrocarboneto sintético, é composto por óleos hidrocracoados e poliafolefinas (PAO)- o óleo PAO, muito citado por diversos autores. Esses produtos à base de óleo mineral são desprovidos de radicais livres ou impurezas. Eles exibem excepcional resistência à oxidação e atingem níveis de viscosidade notáveis.

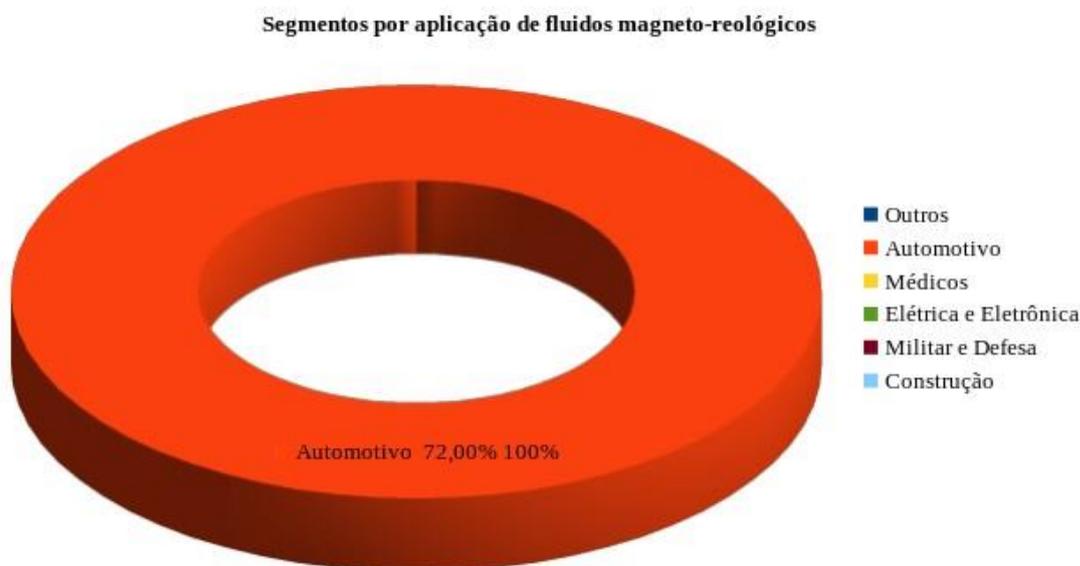
Figura 10 - O gráfico pizza aponta os segmentos usados na formulação dos fluidos magneto-reológicos e o óleo de Hidrocarboneto sintético se destaca em maior porcentagem de consumo.



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Conforme Tabela 2, o segmento com maior aplicação dos fluidos magneto-reológicos é na área automotiva, observe a Figura 11, onde o setor automotivo é superior a 72% em relação aos demais.

Figura 11 - O gráfico pizza aponta segmentos por aplicação dos fluidos magneto-reológicos e o setor automotivo aponta maior porcentagem de consumo mundial.



Fonte: Dados da pesquisa (2024).

As empresas que vem se mostrando mais atuantes no mercado mundial de fluidos magneto-reológicos são:

Tabela 3 - As empresas que vem se mostrando mais atuantes no mercado mundial de fluidos magneto-reológicos.

Empresas atuantes no mercado de fluidos magneto-reológicos
<i>Kolektor Group;</i> <i>MRF Engineering;</i> <i>QED Technologies International;</i> <i>Ioniqa Technologies;</i> <i>Liquids Research Limited;</i> <i>CK Materials Lab;</i> <i>ArProDEC;</i> <i>Industrial Metal Powders;</i> <i>Arus MR Tech e Lord Corporation;</i> entre outras.

Fontes: Dados adaptados da *Zion Market Research* (2024), apud Barbosa (2024).

4. Conclusão

Em meio as considerações feitas neste artigo demonstrando os fluidos magneto-reológicos (FMRs) como um material promissor para inovações e aplicações, na literatura (em dissertações, teses, artigos e revistas) há registros mais frequentes destes nas últimas décadas.

Em aplicações tecnológicas, um grande destaque é a engenharia biomédica, medicina aliada a robótica, simulação computacional e inteligência artificial. Próteses de pernas mecânicas, mostrando grande eficácia para pessoas com amputação trans-femoral que inclusive já existem patentes *Rheo Knee (Ossur, Islândia)* e outras.

Na indústria aeroespacial voltado especialmente para aeronaves, o fornecimento de (FMRs) são muito usados para aplicação de sistemas de trilho de pouso de aeronaves.

Outro destaque, são as sínteses de fluidos magneto-reológicos estudados desde Rabinow (1951), e por diversos autores e pesquisadores no Brasil, com destaque a Universidade Federal de Itajubá pelos pesquisadores (Bombard, 2005, 2015, 2021, 2024; Sousa, 2019; 2020; Rocha, 2021; 2024; Manuel, 2023) e no mundo (*Modesto et. al.*, 2006, 2008; De Vicente et. al., 2011, *Vikram et. al.*, 2015; *Ashtiani et. al.*, 2015; *Kanda et. al.*, 2019; *Aruna et. al.*, 2019; *Roupec et. al.*, 2017, 2021; *Hu et. al.*, 2014; *Zhang et. al.*, 2016; *Morillas et.al.*, 2016), e muito outros autores vem ganhando destaque em publicações e apontando um grande potencial internamente, seja em Universidades e externamente, seja em laboratórios e para aplicações tecnológicas e industriais.

A parte importante da síntese desses materias em laboratórios de Universidades, é no sentido de que o estudo de novos aditivos pode fornecer maiores informações sobre estabilidade e durabilidade dos (FMRs) com a intenção de novas descobertas que tem ocorrido a cada dia e maior custo-benefício.

Os países desenvolvidos em ambas as regiões, como os EUA, o Canadá, a Alemanha, etc., estão a fazer enormes investimentos para o desenvolvimento de novas tecnologias, o que, por sua vez, deverá impulsionar ainda mais este mercado no futuro.

Os relatórios gerados pelas empresas são muito valiosos para que os clientes e consumidores de fluidos magneto-reológicos observem os lançamentos de produtos, as regiões geográficas onde as empresas atuam, inovações tecnológicas no mercado e muitas outras informações ligadas a regulamentações e receitas.

Por uma perspectiva negativa: 1) escassez de matéria-prima; 2) o alto custo para implementação dos (FMRs) em relação a outros fluidos impede a sua adesão por empresas; 3) falta de conhecimento técnico sobre aplicações e benefícios dos (FMRs).

Em trabalhos futuros, uma sondagem voltada para matéria-prima dos (FMRs) e as razões pelas quais essa escassez é causada, é um estudo pertinente a ser abordado. Seja a escassez causada pela falta do produto bruto que a constitui (pó de ferro, óleo ou água, aditivo tixotrópico), ou pelo fluido já sintetizado fornecido por laboratórios ou empresas. O preço do ferro carbonila(o) costuma ser mais elevado que os demais materiais constituintes para síntese do (FMR).

Segundo Bombard (2005) outros pós de ferro já foram testados, mas quanto a custo benefício e magnetismo, o ferro carbonila(o) apresenta-se mais vantajoso. O pó de ferro carbonila(a), já era utilizado por Rabinow (1948) no preparo de suspensões (MR), e ainda ressalta o ferro carbonila(o) para formulação de (FMR), fabricante BASF (Alemanha) em seus trabalhos.

Agradecimentos

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Ministério da Educação) pela bolsa de Mestrado concedida, ao PPGCEM (Programa de Pós- Graduação de Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Itajubá-MG) e Prof. Dr. Antonio José Faria Bombard por sempre ceder parte do seu tempo para esclarecer minhas dúvidas.

Referências

- Aruna, M. N., Rahman, M. R., Joladarashi, S. & Kumar, H., (2019). Influence of additives on the synthesis of carbonyl iron suspension on rheological and sedimentation properties of magnetorheological (MR) fluids. In: *Mater. Res. Express* 6 086105.
- Andrade, R. M. (2018). *Joelho magneto-reológico para próteses transfemorais: prototipagem digital, fabricação e identificação experimental*. (Tese de Doutorado). UFMG- Universidade Federal de Minas Gerais- MG. <http://hdl.handle.net/1843/>.
- Anjos, P. H. A. (2019). *Formação de padrões em fluidos viscosos confinados*. (Tese Doutorado), Universidade Federal de Pernambuco. CCEN. Física. Recife.
- Ashtiani, M., Hashemabadi, S. H. & Ghaffari, A., (2015). "A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization", *J. Magnetism Magn. Materials*, 374, 716-730. 10.1016/j.jmmm.2014.09.020.
- Barnes, H. A., Hutton, J. F. & Walters, K., (1989). *An Introduction to Rheology*. Elsevier Science Publishers B.V. All rights reserved. 0-444-87140-3.
- Barnes, H. A. (1999). The yield stress: a review or 'π'-everything flows?. In: *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 81(11-2), 133-78. <https://doi.org/10.1016/S0377-https://www.sciencedirect.com/>
- Bombard, A. J. F. (2005). *Suspensões Magneto-Reológicas de pós de ferro carbonilo: um estudo da influência das propriedades magnéticas e do tamanho das partículas*. (Tese de Doutorado). Universidade Estadual de Campinas.
- Bombard, A. J. F., Antunes, L. S. & Gouvea, D., (2009). Redispersibility in magnetorheological fluids: surface interactions between iron powder and wetting additives *J. Phys.: Conf. Series* 149 012038
- Bombard A. J. F., & De Vicente, J., (2012). Boundary lubrication of magnetorheological fluids in PTFE/Steel point contacts *Wear* 296 484–90.
- Bombard, A. J. F., & De Vicente, J.: (2012). Thin-film rheology and tribology of magnetorheological fluids in isoviscous-EHL contacts. *Tribol.Lett.* 47, 149–162.
- Bombard, A. F. J., Gonçalves, F. R., Morillas, J.R., & De Vicente, J. (2014). Magnetorheology of dimorphic magnetorheological fluids based on nanofibers. *Smart Materials and Structures*, 23(12). 10.1088/0964-1726/23/12/125013.
- Bombard, A. J.F., Gonçalves, F. R., Shahrivar, K., Ortiz, A. L. & De Vicente, J. (2015). *Tribological behavior of ionic liquid-based magnetorheological fluids in steel and polymeric point contacts*. *Tribology International*. 81, 309-20. <https://doi.org/10.1016/j.tribol.2015.05.010>.
- Bretas, R. E. S. & D'Avila, M. A., (2005). " *Reologia de polímeros fundidos*" (2a ed.), Edufscar.
- DBMR Nucleus Solutions Data Bridge Market, (2024). <https://www.databridgemarketresearch.com/pt/reports/global-magneto-rheological-fluids-market>
- De Vicente, J., V., Klingenberg, D. J., & Roque H. Á., (2011). "Magnetorheological fluids: a review", *Soft Matter*, 7(8), 3701-3710. 10.1039/c0sm01221a
- Garcia, M. J., & Wickenheiser, E. A. (2005)., " *Horner GC. Design of a shape-memory alloy actuated macro-scale morphing aircraft mechanism* ", 232–40.
- Global Magnetorheological Fluid Market Research Report, (2024). <https://reports.valuates.com/market-reports/QYRE-Auto-32H1538/global-magnetorheological-fluid>.
- Goodwin, J., W., & Hughes, R., W., (2008). *Rheology for Chemists An Introduction*, (2a ed.), Edition Published by The Royal Society of Chemistry,

Thomas Graham House, Science Park, Milton Road, Cambridge CB4 0WF, UK. Registered Charity Number 207890

Guerreiro, D. J. & Batocchio (s.d). A., Estudo, *Caracterização e Potencial de Aplicação do Fluido Magneto-reológico: Magneto reológico - Amortecedores Inteligentes -Fluido*. Unicamp.

Hu, Z., Yan, H., Jianjian, Y., Xuemei, W., Rongsheng, Y., (2014). Effect of Components on Friction Property of Carbonyl Iron-Based Magnetorheological Fluid. *Journal for Science & Engineering (Springer Science & Business Media B.V.)*, Arabian, 39(10), 7355. 10.1007/s13369-014-1358-2

Jani, J. M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A., (2013). “A Review of Shape Memory Alloy Research, Applications and Opportunities.” In: *Materials and Design*. 56 (2014)1078-1113.

Kanda, M., Kaide, A., Saeki, T., & Tochigi, H., (2019). Preparation and Rheology of Magnetorheological Fluid Using Six Kinds of Fumed Silica as Stabilizing Additives <https://doi.org/10.1051/mateconf/202133302006>.

Karamodin, A.; Kazemi, H. H. & Akbarzadeh, M.R. (2008). Semi-active control of structures using neuro-predictive algorithm for mr dampers. *Structural Control and Health Monitoring*, 278.

Karnopp, D., Crosby, M. J., & Harwood, R., (1974). Vibration control using semi-active force generators. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, American Society of Mechanical Engineers*, 96(2), 619–626.

Kervin, Jr. E. M., (1959). “Damping of Flexural Waves by a Constrained Viscoelastic Layer”. In: *Journal of Acoustical Society of America*, 31(7), 952-962.

Lai, C. Y., & Liao, W.-H., (2002). Vibration control of a suspension system via a magnetorheological fluid damper. *Journal of Vibration and Control, SAGE Publications*, 8(4), 527–547.

Mabe, J. H., Cabell, R., & Butler, G., (2005). “Design and control of a morphing chevron for takeoff and cruise noise reduction, In: *Proceedings of the 26th Annual AIAA Aeroacoustics Conference, Monterey, CA, EUA*.

Mabe, J. H., Calkins, F. T., Bushnell, G. S., Bieniawski, S. R., (2011). “Aircraft systems with shape memory alloy (SMA) actuators, and associated methods”. In: *US Patent 7878459B2*, The Boeing Co.

Modesto, T. L.L., Zugaldía, A., González-Caballero, F., & Durán, J. D. G., (2006). Sedimentation and Redispersion phenomena in iron-based magnetorheological fluids, *J. Rheol.* 50, 543–560 <https://doi.org/10.1122/1.2206716>.

Modesto, T. L.L., Ana, G.R., Juan, D. G. D., & Fernando, G. C., (2008). “Preparation and Characterization of Iron-Based Magnetorheological Fluids Stabilized by Addition of Organoclay Particles”, *Langmuir*, 24(14), 7076–7084.

Mahmoodi, P., (1969). “Structural Dampers”, In: *Journal of Structural Division, ASCE*, 95(ST8), 1661-1672.

Mahmoodi, P., (1972). “Structural Dampers”, In: *Journal of Structural Engineering, ASCE*, (96), 1661-1672.

Manuel, J. G. F., Bombard, A. J. F., & Weeks, E. R., (2023). Effect of polydispersity in concentrated magnetorheological fluids. *Smart Materials and Structures*, Editora IOP Publishing, 32(4), 045014.

Manzo, J., Garcia, E., & Wickenheiser, A., (2005). “Horner GC. Design of a shape-memory alloy actuated macro-scale morphing aircraft mechanism”, 232–40.

Mezger, T. G. (2014). *The Rheology Handbook*. (4a ed.), Hanôver: Vincentz Network, European Coatings Library.

Moraes, Y. J. O., (2021). *Controle passivo de vibrações em sistema estrutural utilizando molas superelásticas: Comparação entre técnicas e análise da influência de variáveis*. (Tese de Doutorado), 254f. L:1.

Morais, J., Gil, de M., Santos, C., Campos, C., A., & Candeias, P., (2017). “Shape Memory Alloy Based Dampers for Earthquake Response Mitigation” In: *Structural Integrity Procedia*. 5, 705 – 712.

Morillas, J. R., Bombard, A.J.F., & Vicente, R., (2016). Preparation and characterization of magnetorheological fluids by dispersion of carbonyl iron microparticles in PAO/1-octanol, *Smart Mater. Struct.* 25 015023. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/25/1/015023>.

Moura, E. D. A. (2003). *Estudo de Suspensões Passivas, Semi-Ativa MR e Ativa*. (Dissertação Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais.

Moutinho, C. M. R., (2007). “*Controle de Vibrações em Estruturas de Engenharia Civil*”. (Tese de Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal: FEUP, p.394.

Oliveira, S. de A., & Savi, M. A., (2013). *Os Materiais Inteligentes e suas aplicações*. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro: “Modelagem Termomecânica de Ligas com Memórias de forma em um contexto tridimensional”.

Pereira A. S. et al. (2018). Metodologia da pesquisa científica. UFSM.

Pillai, M. V., Kazerooni, H., & Hurwicz, A., (2011). Design of a Semi-Active Knee-Ankle Prosthesis., *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Shanghai, China.

Rabinow, J. J., (1948). “The Magnetic Fluid Clutch,” *J. AIEE Trans.*, 67, 1308–1315.

Rocha, J. H. R. (2021). *Avaliação de argilas organomodificadas e dispersantes no Preparo de suspensões magnetoreológicas*. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal de Itajubá-MG.

- Rocha, J. H. R., J. G. F. Manuel., & Bombard., A. J. F. (2024). Synthetic oil gels with organoclays in the formulation of magnetorheological fluids. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 10.1177/1045389X241238781.
- Ross, D., Ungar, E. E. & Kervin Jr, E. M., (1959). "Damping of Plate Flexural Vibrations by Means of Viscoelastic Layer". In: *Structural Damping: ASME*, New York, USA, 49-99.
- Roupec, J., Berka, P., Mazůrek, I., Strecker, Z., Kubík, M., Macháček, O & Andani, M. T., (2017). A novel method for measurement of MR fluid sedimentation and its experimental verification. Article in *Smart Materials and Structures* 10.1088/1361-665X/aa83f2.
- Roupec, J., Michal, L., Strecker, Z., Kubík, M., Macháček, O. & Choi, H. J., (2021). *Smart Mater. Struct.* 30 027001. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abd345>.
□
- Rother, E. T., (2007). Revisão sistemática x revisão narrativa. *Acta paul. enferm.* 20 (2). <https://doi.org/10.1590/S0103->.
- Sánchez-Alonso, M. A., Camporredondo-Saucedo, J. E., Castruita-Ávila, L.G., Equihua-Guillén, F., García-Lara, A. M., & Muñoz-Zertuche, A. A., (2020). "Magnetorheological fluids: synthesis, properties and applications", In: *Journal of Engineering Sciences Respuetas*, 25(1), 184-194, <https://doi.org/10.22463/0122820X.2436>.
- Sousa, S. R. G., Santos, M. P., & Bombard, A. J. F., (2019). Magnetorheological gel based on mineral oil and polystyrene-b-poly(ethene-co-butadiene)-b-polystyrene", *Smart Mater. Struct.*, 28, 105016.
- Smith, D., Margrit, R. M., Roy, K. D. & Elliot, S. B. (2005) Outcome Assessment of a MR Microprocessor-Controlled Knee. Microprocessor Knee Symposium – *American Academy of Orthotists & Prosthetists*.
- Sousa, S. R. G., Leonel, A. & Bombard, A. J. F. (2020). *Smart Mater. Struct.* 29 055039(16pp). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab6abe>.
- Sousa, S. R. G., & Bombard, A. J. F., (2019). "Redispersibility and its relevance in the formulation of magnetorheological fluids", in: *Magnetorheological Materials and their Applications*, S. B. Choi and W. H. Li, Eds. London: The Institution of Engineering and Technology, 2019, pp. 1-18.
- Sousa, S. R. (2019). *Magneto Reologia: Caracterização de Fluidos e Géis*, (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Itajubá-MG.
- Sousa, A. S.; Oliveira, G. S.; & Alves, L. H., (2021). A pesquisa bibliográfica: princípios e fundamentos. *Cadernos da Fucamp*, 20(43). <https://revistas.fucamp.edu..>
- Steffe, J. F., (1996). *Rheological Methods in food process engineering*, 2.ed. Ed. Freeman Press, East Lansing, Michigan State, USA. p.418.
- Szabó, D., Szeghy, G., & Zríny, M., (1998). "Shape transition of magnetic field sensitive polymer gels", *Macromolecules* 31, 6541 – 6548.
- Szabó D. & Zríny M., (2000). "Muscular contraction mimiced by magnetic gels' ", em: 7 th International Conference on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions - Honolulu, Hawaii, USA, 19 - (23 Julho de 1999), Editor: R. Tao, *World Scientific*.
- The National Institute of Standards and Technology (NIST) is an agency of the U.S. Department of Commerce.(2005). Disponível em: <https://web.archive.org/web/20150910033446/http://www.nist.gov/>.
- Torres, T. R., (2016). *Controle Preditivo aplicado a um modelo não linear de suspensão automotiva semiativa com amortecedor magneto-reológico*. (Dissertação de Mestrado), Salvador.
- Tusset, Á. M., (2008). *Controle Ótimo Aplicado em Modelo de Suspensão Veicular Não-linear Controlada através de Amortecedor Magneto-reológico*. (Tese de Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Vikram, G. K., Kolekar, S. & Madivalar, C., (2015). Preparation of Magnetorheological Fluids Using Different Carriers and Detailed Study on Their Properties/ *American Journal of Nanotechnology*, 6(1), 7.15
- Wang, D. & Hou, Y., (2013). Design and experimental evaluation of a multidisk magnetorheological fluid actuator. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24, 640.
- Xu, L.-h. & Li, Z.-x., (2012). Semi-active predictive control strategy for seismically excited structures using mrf-04k dampers. *Journal of Central South University, Springer*, 19, 2496–2501.
- Zhang, P., Lee, K. H. & Lee, C. H. (2016). Friction behavior of magnetorheological fluids with different material types and magnetic field strength. *Chin. J. Mech. Eng.* 29, 84–90. <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.1126.139>
- Zion Market Research, (2024). <https://www.zionmarketresearch.com/report/magneto-rheological-fluid-market>