

OS MATERIAIS INTELIGENTES E SUAS APLICAÇÕES*

SERGIO DE ALMEIDA OLIVEIRA**
Capitão de Mar e Guerra (RM1-FN)
MARCELO A. SAVI***
Professor Doutor

SUMÁRIO

Introdução
Ligas com memória de forma
Materiais piezoelétricos
Materiais magnetostrictivos
Fluidos eletromagnetorreológicos
Conclusões

INTRODUÇÃO

A natureza é a fonte de inspiração essencial para pesquisadores e engenheiros que tentam desenvolver sistemas e estruturas. Dentre os aspectos inspiradores, deve-

se destacar o comportamento adaptativo que fornece a capacidade de auto-regulação dos sistemas naturais.

Por meio da História, a tecnologia humana é sempre relacionada com materiais diferentes, e é possível reconhecer

* Extraído da Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro: “Modelagem Termomecânica de Ligas com Memórias de forma em um contacto tridimensional”.

** Doutor em Engenharia Mecânica. É aluno de pós-doutorado na UFRJ, onde desenvolve atividades de pesquisa.

*** Doutor em Engenharia Mecânica (1994). É professor da UFRJ (Departamento de Engenharia Mecânica, Coppe/Escola Politécnica), onde desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão.

as eras definidas por alguma invenção ou utilização de materiais: pedra e metal, por exemplo. Recentemente, os materiais inteligentes podem ser identificados como o estímulo de uma nova era. Basicamente, os materiais inteligentes possuem um acoplamento entre grandezas mecânicas e não mecânicas, que confere ao material um tipo especial de comportamento. Neste sentido, é possível imaginar inúmeras aplicações devido ao acoplamento de campos que, geralmente, não estão ligados.

A utilização dos materiais inteligentes na área tecnológica tenta explorar a ideia de construir sistemas e estruturas com comportamento adaptativo que tenham a capacidade de alterar propriedades, devido às mudanças ambientais, e serem reparados quando necessário.

Além do termo materiais inteligentes, também são usualmente empregados os termos materiais adaptativos, multifuncionais ou ativos. Lagoudas (2008) chamou de materiais ativos um subgrupo de materiais multifuncionais que apresentam sensibilidade e capacidade de atuação. Mas, em geral, é possível utilizar o termo materiais inteligentes a fim de expressar os materiais que apresentam acoplamentos entre campos físicos diferentes e, portanto, com características adaptativas que podem ser empregadas para adequar-se às mudanças ambientais.

Entre as muitas possibilidades, os materiais inteligentes podem ser classificados de acordo com as diferentes formas de acoplamento. Atualmente, os materiais mais utilizados são as ligas com memória de forma, os materiais piezoelétricos, os materiais magnetostrictivos e os fluidos eletromagnetorreológicos. Esses materiais têm a capacidade de mudar sua forma e rigidez, entre outras propriedades, por meio da imposição de temperatura ou de campos de tensão, de uma diferença de potencial, ou de um campo eletromagnético.

Variações desses materiais têm sido investigadas, aumentando ainda mais a aplicabilidade dos materiais inteligentes. Nesse sentido, podem-se mencionar as ligas ferromagnéticas e polímeros com memória de forma e as fibras óticas. Além disso, deve-se ressaltar a combinação de diferentes tipos de materiais compósitos híbridos. Recentemente, há uma tendência para a redução de dispositivos inteligentes para micro e nanoescala, como os chamados MEMS e NEMS (micro – ou nano – sistemas eletromecânicos).

Materiais inteligentes são usualmente utilizados como sensores e atuadores em estruturas ou sistemas inteligentes. A escolha do material adequado para cada aplicação depende de muitos fatores, e dois requisitos imprescindíveis no projeto devem ser destacados (Lagoudas, 2008): a densidade de energia de atuação e a frequência de atuação do material.

Este trabalho apresenta uma revisão sobre os principais materiais inteligentes e suas aplicações. A ideia é fornecer uma revisão abrangente, discutindo aplicações tecnológicas relatadas na literatura. Será feito um breve histórico sobre o desenvolvimento desses materiais, seus fenômenos físicos e algumas de suas aplicações. Os materiais inteligentes apresentados neste trabalho são as ligas com memória de forma, materiais piezoelétricos, materiais magneto-strictivos e fluidos eletromagnetorreológicos.

LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As ligas com memória de forma (SMAs) apresentam um acoplamento termomecânico que lhe dá a capacidade de recuperar uma forma previamente definida a partir de um processo de carregamento termomecânico apropriado. Quando há uma restrição

para a recuperação de forma, essas ligas promovem forças de restituição elevadas.

As SMAs são conhecidas desde 1930. Porém, somente em 1960 é que passou a existir interesse tecnológico a respeito do comportamento das SMAs. Em 1962, Buehler e colaboradores do Laboratório de Artilharia Naval dos Estados Unidos da América (EUA) descobriram o efeito memória de forma em uma liga de Ni-Ti, que começou a ser conhecido como Nitinol, como uma referência às letras iniciais do laboratório (NOL). Atualmente, as aplicações das SMAs estão se tornando bem conhecidas por diferentes campos da ciência e da engenharia.

As singulares propriedades das SMAs estão associadas com transformações de fase responsáveis por diferentes comportamentos termomecânicos dessas ligas. Basicamente, duas fases estão presentes nas SMAs: austenita e martensita. A fase austenítica é estável em altas temperaturas e em um estado livre de tensão, apresentando uma única variante. Por outro lado, a fase martensítica é estável a baixa temperatura em um estado livre de tensão, estando relacionada com inúmeras variantes. Uma transformação de fase pode ser induzida por tensão ou por temperatura. Quando a martensita é induzida por temperatura, é

chamada de martensita maclada (*twinned*), que tem 24 variantes que representam 24 subtipos com diferentes orientações cristalográficas. A formação martensítica induzida por tensão tende a mudar essas 24 variantes da martensita maclada em apenas uma variante, alinhada com a direção do carregamento de tensão, que é chamado martensita não maclada (*detwinned*).

A fim de apresentar as principais ideias por trás desses fenômenos, considere uma amostra das SMAs em alta temperatura. Nessa condição, a amostra tem fase austenítica, e uma carga mecânica pode induzir à transformação de fase em martensita não maclada. Retirada à carga mecânica, ocorre uma transformação de fase reversa na amostra. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do processo, juntamente com uma curva de tensão-deformação que representa o comportamento macroscópico do fenômeno pseudoelástico.

Considere agora uma temperatura mais baixa de tal forma que a amostra possui uma fase martensítica maclada estável. Quando submetida a um carregamento mecânico, ocorre um processo de reorientação, dando origem à formação da martensita não maclada. Quando o processo de carregamento-descarregamento estiver concluído, a amostra de SMA apresenta uma defor-

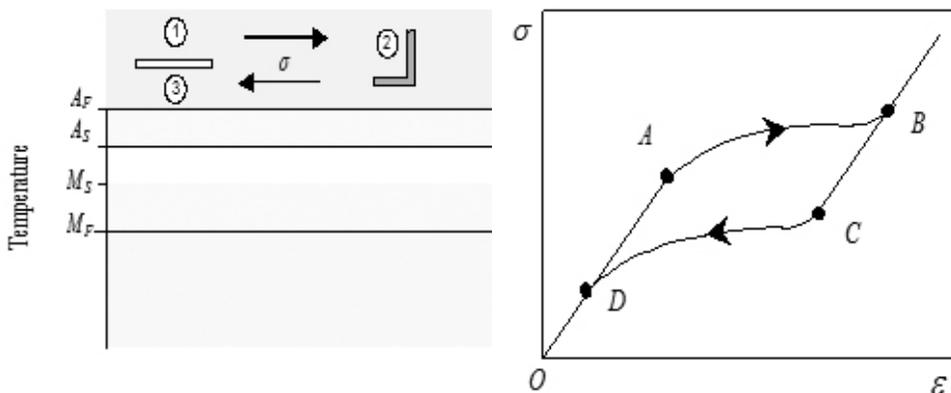


Figura 1 – Pseudoelasticidade (Paiva, 2004)

mação residual. Essa deformação residual pode ser recuperada por meio do aumento da temperatura que induz à transformação da fase martensita para austenita. Esse é o efeito de memória de forma. É importante observar que a variação da temperatura provoca uma alteração da forma, e a amostra recupera sua forma original. A relação entre o efeito pseudoelástico e o de memória de forma pode ser estabelecida a partir de um movimento do ciclo de histerese mostrado na curva de tensão-deformação da Figura 1. Uma vez que se diminui a temperatura da amostra, o laço de histerese se move para baixo também. A Figura 2 mostra uma imagem esquemática do fenômeno do efeito memória de forma, juntamente com a curva de tensão-deformação.

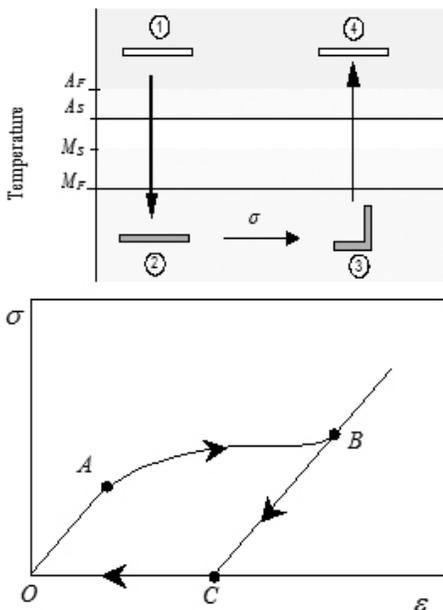


Figura 2 – Efeito memória de forma (Paiva, 2004)

O efeito de memória de forma reversível é outro fenômeno associado às SMAs. Basicamente, esse fenômeno é tal que a amostra tem uma forma no estado austenítico e outra no estado martensítico. A variação de temperatura produz uma mudança na forma da amostra,

sem qualquer carga mecânica. Esse fenômeno é uma consequência do treinamento da amostra de SMA. A Figura 3 mostra uma representação esquemática do efeito em duas vias.

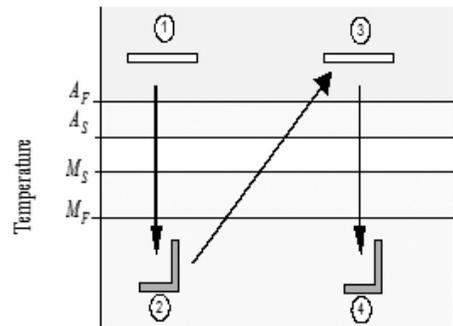


Figura 3 – Efeito de memória de forma reversível (Paiva, 2004)

Aplicações

As propriedades singulares das SMAs atraem o interesse tecnológico em diversos campos das ciências e da engenharia. Machado & Savi (2002, 2003) e Duering *et al.* (1999) apresentam uma visão geral das aplicações mais relevantes das SMAs dentro do campo biomédico. Aplicações biomédicas das SMAs tornaram-se bem-sucedidas, devido à característica não invasiva de dispositivos com SMAs e também devido à sua excelente biocompatibilidade. SMAs são usualmente empregadas em instrumentos cirúrgicos, cardiovasculares e ortopédicos e em aparelhos ortodônticos, entre outros usos.

Estruturas autoexpansivas constituem uma das principais aplicações das SMAs, como o filtro Simon e o *stent*. Na Figura 4, (a) e (b) têm uma sequência de imagens que ilustram o comportamento do filtro Simon quando introduzido no corpo humano em uma veia. Inicialmente, o filtro Simon está em uma condição deformada, contraído. Uma solução salina o mantém a baixa temperatura, permitindo a introdução no interior de uma veia. No momento em que

o filtro Simon estiver na posição desejada, cessa-se a solução salina, e a temperatura do corpo humano promove o aumento da temperatura que causa a expansão do filtro por meio da transformação de fase.

A utilização do Stent segue o mesmo procedimento do filtro de Simon, Figura 4(c). A Figura 4(d) apresenta grampos de SMAs utilizados. A ideia é colocar o grampo em uma configuração e, depois, aquecê-lo para

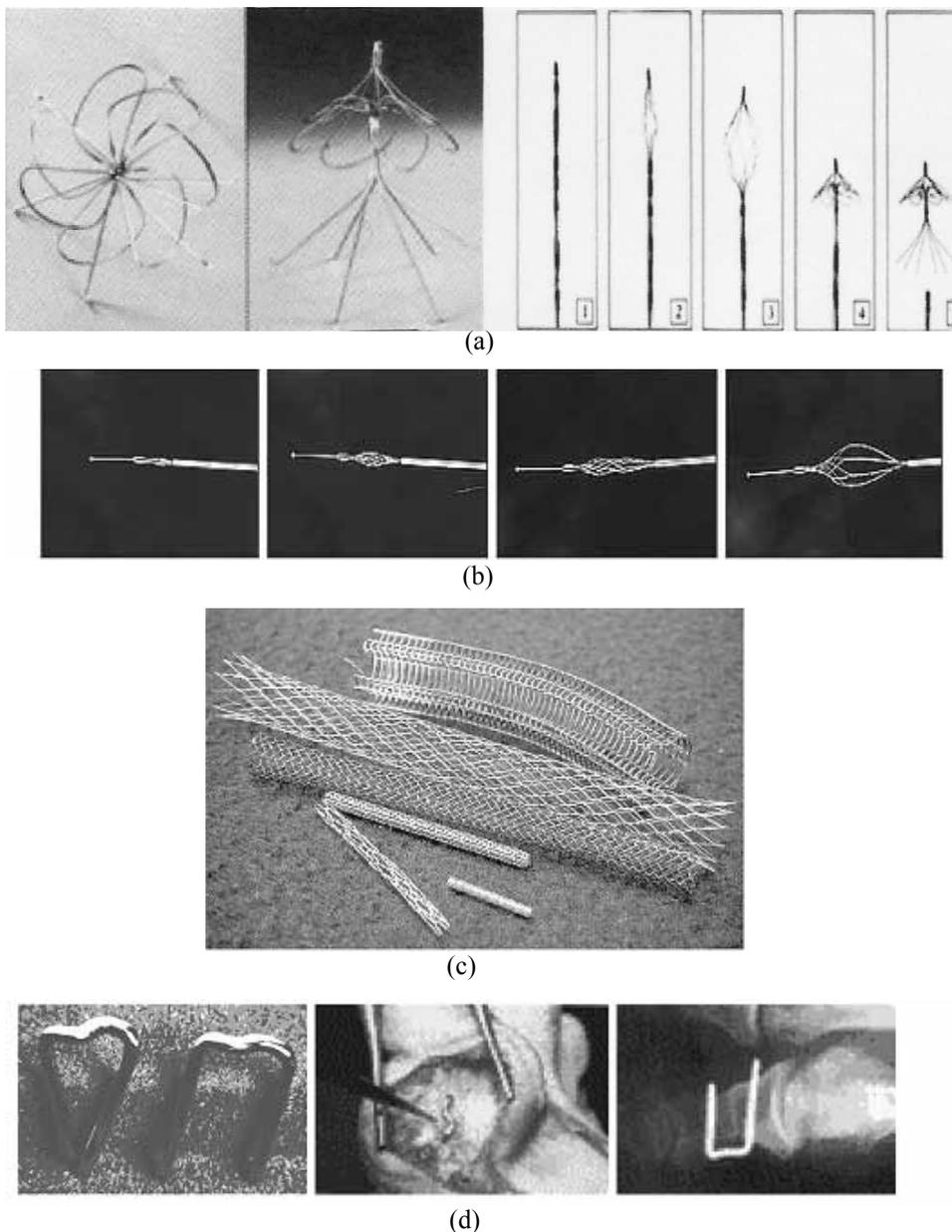


Figura 4 – Estruturas autoexpansivas (Machado & Savi, 2003)

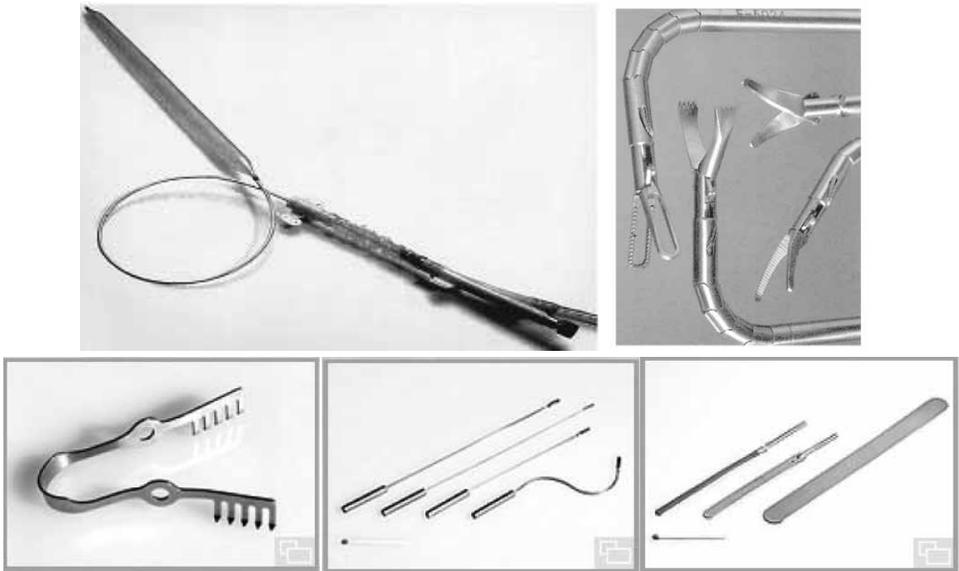


Figura 5 – Instrumentos cirúrgicos (Machado & Savi, 2003; Duering *et al.*, 1999)

que ele assuma uma nova configuração; a temperatura do corpo aquece-o e auxilia a recuperação óssea.

A Figura 5 apresenta alguns instrumentos cirúrgicos.

Paiva & Savi (2006) discutem algumas das aplicações de engenharia das SMAs. Mais uma vez, as estruturas autoexpansivas são largamente empregadas. A Figura 6 apresenta uma conexão de tubo conhecido como CryOfit,

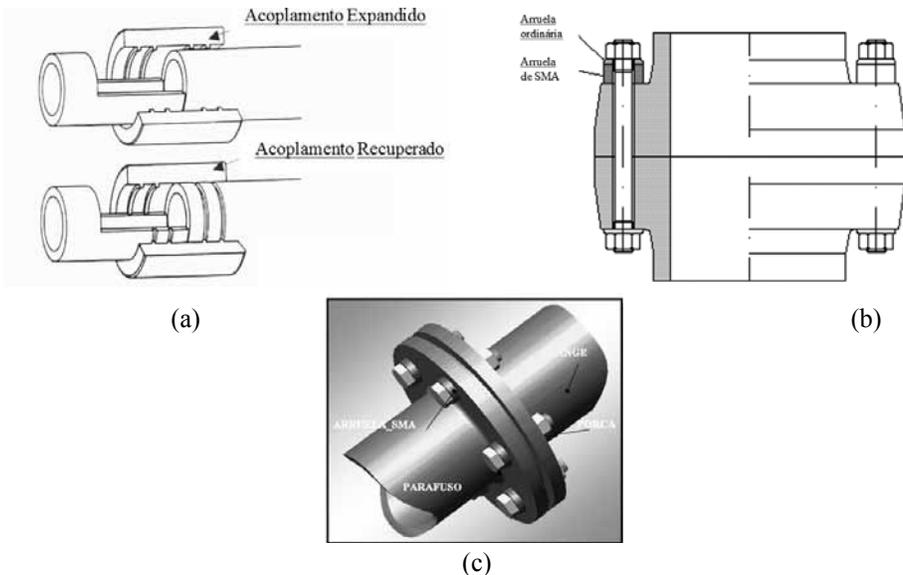


Figura 6 – (a) Acoplamento CryOfit SMA (Hodgson and Brown, 2000), (b) Dispositivo pré-carregado com SMA (SINTEF, 1999), (c) Dispositivos de acoplamentos

utilizada pela primeira vez no F-14 Usaf, tendo sido desenvolvida pela Raychem (2001). Além disso, a Figura 6 mostra também um conjunto de SMAs empregado em flanges.

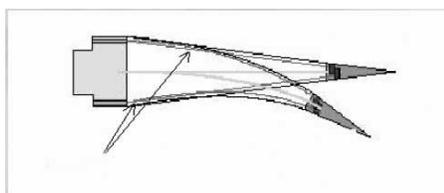
Outra aplicação interessante está relacionada às estruturas flexíveis multiatuadas que podem ser usadas em aerobarcos ou em asas de aviões (Figura 7(a)). Este tipo de utilização de SMAs substitue sistemas pneumáticos com inúmeras vantagens, como custo, tempo de manutenção e peso. Rediniotis *et al.* (2002) apresenta um protótipo de um hidrofólio que tenta imitar o movimento da cauda de um peixe. Fios atuadores de SMAs são externamente acionados por uma fonte elétrica, promovendo a mudança de forma (Figura 7(b)).

As SMAs também estão sendo utilizadas na robótica. Em essência, SMAs tentam imitar o movimento contínuo dos músculos. Essa ideia é explorada para a construção de próteses, que inclui mãos, braços e pernas. A Figura 8 mostra um protótipo de uma mão mecânica.



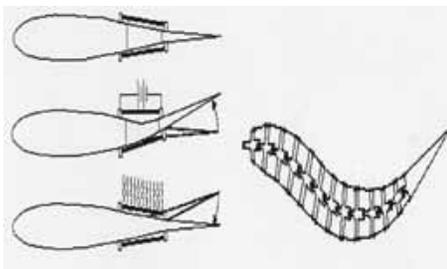
Figura 8 – Aplicações robóticas com SMAs (Robotic muscles, webdocs.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/muscle.html, 2012)

Aplicações dinâmicas constituem outra área importante dentro da engenharia em que as SMAs podem ser exploradas. De uma maneira geral, essas aplicações estão associadas tanto à dissipação adaptativa de energia, relacionada ao seu comportamento histerético, quanto às mudanças de suas propriedades mecânicas causadas pelas transformações de fase. Esses aspectos podem ser explorados tanto em um controle passivo-adaptativo quanto em um controle ativo. Um fator limitante para a concepção



FIOS DE SMA

(a)



(b)

Figura 7 – Estruturas flexíveis de SMAs multiatuadas – (a) Aircraft Maneuverability (webdocs.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/flap.html, 2012); (b) Rediniotis *et al.*, 2002

de novas aplicações é a velocidade de resposta das SMAS.

As respostas dinâmicas dos sistemas com elementos com memória de forma têm sido estudadas, mostrando um comportamento bastante complexo devido as suas características fortemente não-lineares. Essa riqueza de possibilidades inclui respostas periódicas, *quasi*-periódicas, caos e hipercaos (Savi *et al.*, 2002; e Savi *et al.*, 2008).

Uma alternativa interessante é explorar a elevada capacidade de dissipação das SMAs no impacto. Desta forma, é possível gerar um comportamento menos complexo, mudando radicalmente a resposta do sistema quando comparada com aquelas obtidas com um impacto elástico (Santos & Savi, 2009).

O uso de absorvedores dinâmicos de vibração consiste em um dispositivo de controle de vibração passivo que tem a finalidade de reduzir a vibração de um sistema primário submetido a uma excitação externa. O absorvedor é constituído de um oscilador secundário que, uma vez conectado ao sistema primário, é capaz de absorver energia de vibração do sistema primário. Uma alternativa para sistemas em que a frequência de forçamento varia ou tem algum tipo de incerteza é o conceito de um absorvedor de vibração adaptativo

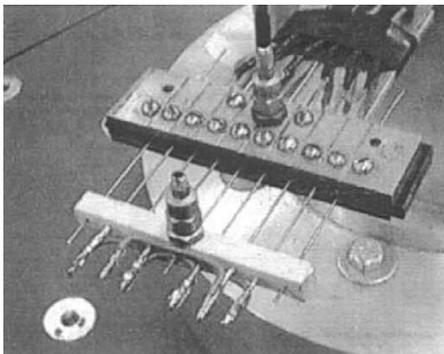


Figura 9 – Absorvedor de vibração adaptativo (Williams *et al.*, 2002)

(Ibrahim, 2008; Brennan, 2006). Savi *et al.* (2010) discutem o uso das SMAs em absorvedores de vibração e Williams *et al.* (2002) investigam um protótipo deste dispositivo (Figura 9).

O controle passivo-adaptativo de vibrações tem sido aplicado em pontes e outras estruturas civis incluindo aquelas submetidas a terremotos (Seadat *et al.*, 2002).

MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS

O fenômeno piezoelétrico é baseado na indução de um dipolo elétrico. Como consequência, essa classe de materiais apresenta um acoplamento eletromecânico recíproco. Em outras palavras, uma vez que um campo elétrico é aplicado, o material apresenta uma deformação mecânica; por outro lado, quando o material sofre uma carga mecânica, um potencial elétrico é gerado. Essa reciprocidade permite que esse tipo de material possa ser utilizado como sensores ou atuadores em estruturas inteligentes.

Os dois comportamentos presentes nos piezoelétricos são conhecidos como efeito direto, que transforma a tensão mecânica em uma fonte de voltagem, sendo típico dos sensores; e o efeito inverso, que converte uma fonte de voltagem externa em energia de deformação mecânica (deslocamento ou força), sendo típico dos atuadores.

A altas temperaturas, normalmente definidas acima da temperatura de Curie, o material é paraelétrico, não polarizado. Para baixas temperaturas, as moléculas sofrem uma mudança cristalográfica, originando dipolos orientados aleatoriamente em toda a estrutura (Figura 10(a)). A aplicação de um campo elétrico (polarização) tende a reorientar os dipolos elétricos em relação ao campo elétrico, levando a uma manifestação de dipolo elétrico em escala macroscópica (Figura 10b). Com a remoção do campo elétrico, os dipolos não retornam

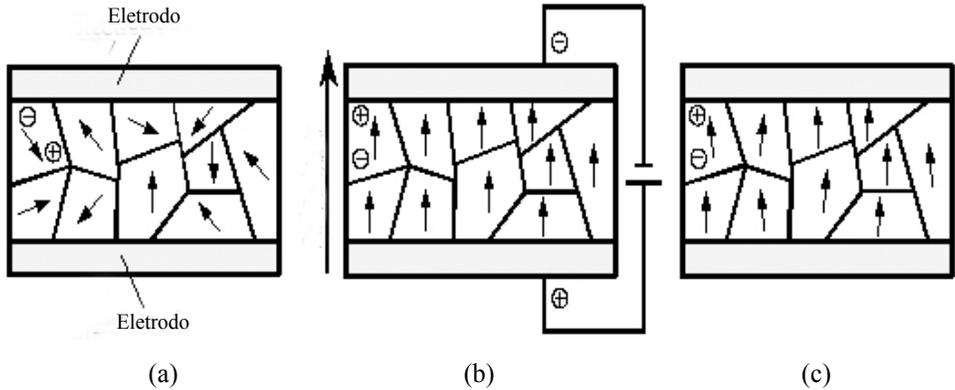


Figura 10 – Polarização para obter o efeito piezoelétrico:
 (a) orientação polar aleatória; (b) Polarização por meio de uma fonte de voltagem DC; (c) Polarização permanente depois da remoção da fonte de voltagem DC

à sua configuração original, permanecendo orientados (Figura 10(c)). Esse processo gera um corpo piezoelétrico permanente, com o eixo de polarização estabelecido.

Aplicações

Materiais piezoelétricos são frequentemente utilizados como sensores e atuadores para diversas finalidades. Aplicações como sensores são numerosas e estão relacionadas com a indústria aeroespacial, automobilística, robótica, entre outras tantas.

Nuffer & Bein (2006) apresentaram a utilização de acelerômetros piezoelétricos

em sensores de detonação para motores de combustão interna, sensores piezoelétricos para a detecção de desgaste e sensores de proximidade em carros. A Figura 11 apresenta a ideia dos sensores para detecção de desgaste.

A monitoração da integridade estrutural (*structural health monitoring*) é uma aplicação de piezoelétricos que vem conquistando muita notoriedade, especialmente nos setores aeronáutico e aeroespacial. Diversos estudos estão considerando o uso adequado dos sensores para identificação de danos. A correção de temperatura é um aspecto importante a ser considerado (Grisso & Imnan, 2010).

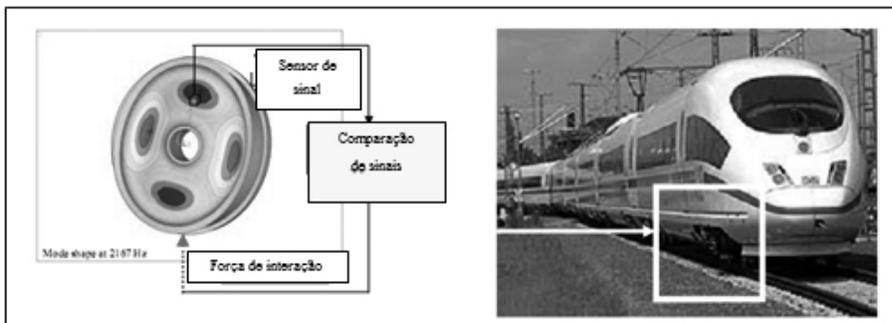


Figura 11 – Sensores piezoelétricos para detecção de desgaste (Nuffer & Bein, 2006). A ideia é monitorar as vibrações da roda, levando a uma avaliação do seu estado de desgaste

Quanto ao uso de piezoelétricos como atuadores, eles são normalmente utilizados para redução de vibração em situações em que se necessita de alta frequência e baixa carga.

A ideia de absorvedores dinâmicos de vibrações, discutida no contexto de aplicação de SMA, pode ser usada com materiais piezoelétricos. Uma das possibilidades é a conversão da energia de vibração mecânica em energia elétrica, que pode ser dissipada em um circuito elétrico adequado. Qiu *et al.* (2009) apresentaram uma visão geral da aplicação de piezoelétricos na redução de vibrações.

Nitsche & Gaul (2005) propuseram uma junta com elementos piezoelétricos que pode ser usada como um dispositivo semiativo para reduzir vibrações. A ideia é reduzir os efeitos de atrito, atenuando a vibração da estrutura (Figura 12).

A colheita de energia a partir de vibrações é outro campo de aplicação de materiais piezoelétricos. A ideia central é coletar energia disponível do ambiente em torno de um sistema e convertê-la em energia elétrica utilizável. Outras formas possíveis são geralmente associadas a variações térmicas, movimentos e energia eletromagnética. De uma maneira geral, esse tipo de aplicação pode transformar vibrações indesejáveis em energia utilizável, e os materiais piezoelétricos constituem o transdutor essencial para converter energia mecânica em elétrica.

Imnan e colaboradores desenvolveram diversos estudos mostrando o conceito da colheita de energia e a sua aplicabilidade em situações diferentes. A modelagem matemática e o uso de elementos finitos também foram abordados (Erturk & Imnam, 2008). Além disso, é importante destacar alguns estudos de comparação experimental entre vários atuadores de compósitos ativos para geração de energia (Sodano *et al.*, 2006). Aplicações aeronáuticas são de especial interesse, especialmente por evitar vibrações indesejáveis de aeronaves (De Marqui Jr & Erturk, 2013; Dias *et al.*, 2013).

Recentemente, há uma crescente utilização da tecnologia MEMS/NEMS (micro e nanosistemas eletromecânicos), que pode explorar o baixo consumo de energia em dispositivos eletrônicos à base de silício (Donelan *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009). Na literatura existem artigos de revisão que discutem as principais aplicações com uso de materiais piezoelétricos (Anton & Sodano, 2007; Sodano *et al.*, 2004).

A colheita de energia biomecânica é uma possibilidade de geração de eletricidade a partir de pessoas durante as atividades diárias, sendo uma alternativa promissora para as baterias que alimentam dispositivos portáteis (Li *et al.*, 2009). Há vários exemplos relacionados com esse tipo de aplicação, mas é importante destacar aqueles que exploram a caminhada das pessoas.

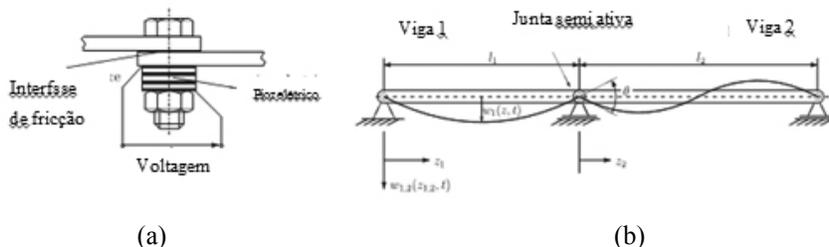


Figura 12 – Dispositivos para redução de vibrações: (a) Junta semiativa; (b) Viga com uma junta semiativa no centro (Nitsche & Gaul, 2005)

Neste sentido, é possível coletar a energia de vibração associada a movimentos de pessoas caminhando com mochilas (Feensta *et al.*, 2008), Figura 13. A Figura 14 mostra a utilização da colheita de energia da pressão dos pés para a transformação em energia elétrica, para ambientes públicos.

A concepção dos dispositivos de colheita de energia tem sido objeto de diversos estudos que propõem soluções para torná-los mais eficientes. Nesse contexto, a análise de diversas frequências de excitação e amplitudes de vibração tem um papel importante. Assim, os efeitos não lineares podem ser essenciais para tornar um dispositivo aplicável em uma determinada situação. Da Silva *et al.* (2013) investigaram o efeito do comportamento histerético piezoelétrico nos sistemas de colheita de energia a partir de vibrações.

MATERIAIS MAGNETOESTRICTIVOS

Os materiais magnetostrictivos apresentam um acoplamento entre os campos mecânicos e magnéticos. Eles podem ser definidos como materiais que têm uma alteração de forma devido a uma aplicação de um campo magnético. A história da magnetoestricção começou em 1840, quando James Prescott Joule (1818-1889) identificou uma mudança de comprimento em uma amostra de ferro sujeito a um campo magnético. Esse efeito ficou conhecido como efeito Joule, sendo o mecanismo mais comum empregado em atuadores magnéticos. O efeito inverso, quando um campo mecânico faz com que surja uma magnetização na amostra, é conhecido



Figura 13 – Colheita de energia a partir do caminhar de pessoas com mochilas (Feensta *et al.*, 2008)

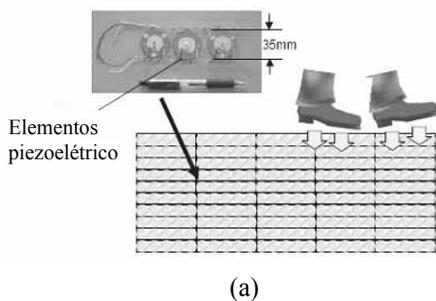


Figura 14 – Colheita de energia a partir de um piso: (a) Mecanismo de geração de energia por intermédio de uma caminhada; (b) Gerador de energia experimental a partir dos pés de passageiros por ocasião da saída da estação Norte Marunouchi, Tokyo

como efeito Villari, sendo normalmente utilizado para os sensores.

Inicialmente, as aplicações relacionadas com o efeito magnetoestrictivos foram receptores de telefone, hidrofones e osciladores, entre outros. A partir de 1970, as aplicações tiveram uma ampliação considerável devido às novas descobertas relacionadas a esses materiais. Recentemente, materiais como Terfenol-D e Metglass deram um novo impulso no uso dessas propriedades como sensores e atuadores.

A ideia básica por trás do comportamento magnetoestrictivo é que este tipo de material é dividido em domínios, cada um com uma polarização magnética uniforme. A aplicação de um campo magnético tende a promover o alinhamento desses domínios, mudando a forma do material. A Figura 15 mostra um desenho esquemático desses alinhamentos.

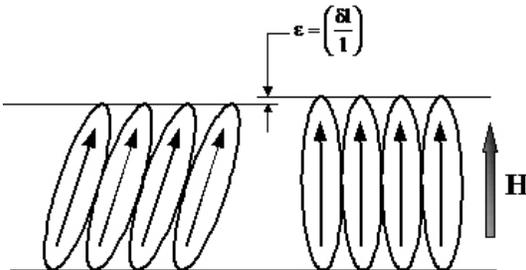


Figura 15 – Figura esquemática do fenômeno magnetoestrictivo

Aplicações

As aplicações relativas aos materiais magnetoestrictivos envolvem várias situações de atuação sem contato que podem ser imaginadas para produzirem diferentes tipos de movimentos. Em geral, é possível imaginar aplicações semelhantes às dos materiais piezoelétricos. Comparado ao PZT, o Terfenol-D tem mais força e pode ser utilizado em baixa voltagem. A Figura 16 apresenta um transdutor Terfenol-D indicado para aplicações industriais com o

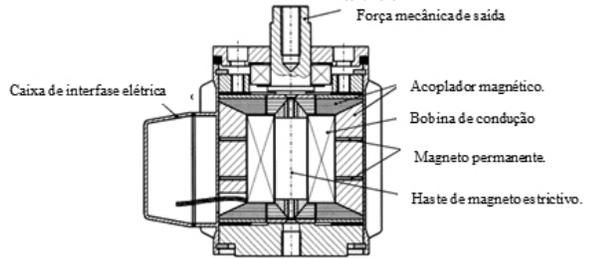


Figura 16 – Atuador Terfenol-D (Janocha, 2001)

objetivo de obter um posicionamento preciso de cargas pesadas e também o controle ativo de vibração.

Dispositivos magnetoestrictivos podem ser usados em conjunto com outras tecnologias convencionais, como pneumáticos e hidráulicos, possibilitando a construção de mecanismos eficientes. A Figura 17 apresenta uma bomba que combina atuação magnetoestrictiva e hidráulica para produção de um movimento linear (Olabi & Grunwald, 2008).

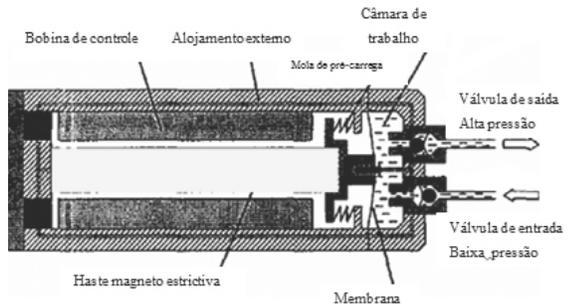


Figura 17 – Bomba magnetoestrictiva combinada com atuação hidráulica (Olabi & Grunwald, 2008)

Outro tipo de atuação semelhante aos materiais piezoelétricos é a usada em válvulas de injeção para motores de combustão interna, Figura 18 (Janocha, 2001).

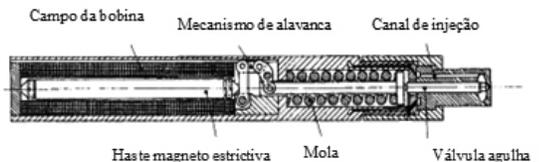


Figura 18 – Válvula magnetoestrictiva para motores de combustão interna (Janocha, 2001)

Esse dispositivo reduz o consumo de combustível e ruídos relacionados com o funcionamento do motor. Além disso, evita o controle de voltagem necessário para os dispositivos com materiais piezoelétricos.

O uso de películas finas é outra possibilidade de utilização relacionada com materiais magnetostrictivos (Olabi & Grunwald, 2008). A Figura 19 mostra um micromotor que gera movimentos lineares devido à película fina com características magnetostrictivas na superfície. Esse tipo de dispositivo tende a avançar para evitar o contato ao ser acionado por um campo magnético que produz vibrações com amplitudes de flexão de 10-20mm/s.

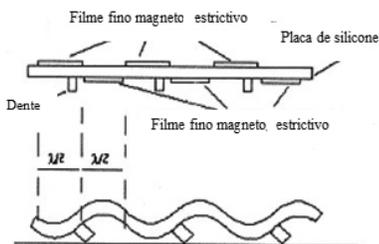


Figura 19 – Micromotor magnetostrictivo (Olabi & Grunwald, 2008)

FLUIDOS ELETROMAGNETORREOLÓGICOS

Os fluidos eletorreológicos (ER) e magnetorreológicos (MR) são conhecidos como fluidos controláveis. Eles apresentam um acoplamento entre os campos mecânico e elétrico ou magnético. Portanto, uma mudança em um campo elétrico ou magnético causa uma mudança no comportamento reológico mecânico.

O primeiro estudo sobre os fluidos ER foi em 1940 por Willis Winslow. Na mesma década, Jacob Rabinow (Rabinow, 1948, 1951), no National Bureau of Standards EUA, investigou os fluidos MR. Apesar de inúmeras pesquisas desenvolvidas entre 1940 e 1950, somente na década de 1990 este tipo de fluido obteve interesse comercial (Shtarkman, 1991;

Kordonsky, 1993; Weiss *et al.*, 1994; Carlson *et al.*, 1994; Carlson, 1994; Carlson, 2005).

Os fluidos ER e MR geralmente apresentam um comportamento newtoniano típico na ausência de campos eletromagnéticos. No entanto, quando submetidos a um campo elétrico ou magnético, o fluido muda seu comportamento, apresentando uma resposta não linear. Os fluidos ER e MR possuem as mesmas características. Portanto, vamos usar o termo geral de fluido ER-MR e, da mesma forma, tratar o campo aplicado, em geral, como um campo eletromagnético. Deve-se entender que o fluido ER é acionado por um campo elétrico, enquanto o fluido MR é acionado por um campo magnético.

Um fluido ER-MR é uma suspensão de sólidos que apresenta mudanças drásticas nas propriedades reológicas devido à aplicação de campos eletromagnéticos. Esse comportamento é denominado efeito eletromagnético, que está sendo relacionado para as disposições estruturais na suspensão. Antes da aplicação do campo eletromagnético, as partículas são distribuídas de forma aleatória. A aplicação do campo eletromagnético provoca uma orientação das partículas que altera a viscosidade do fluido. A Figura 20 apresenta

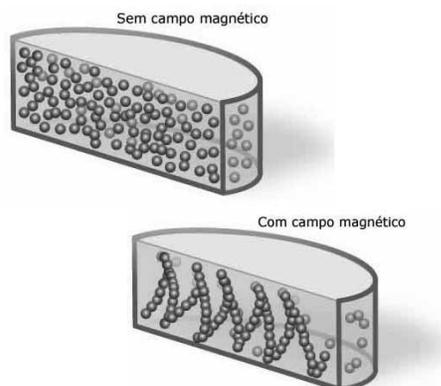


Figura 20 – Fluido eletromagnético: efeito da aplicação de um campo eletromagnético (<http://ciencia.hsw.uol.com.br/armadura-liquida2.htm>, 2013)

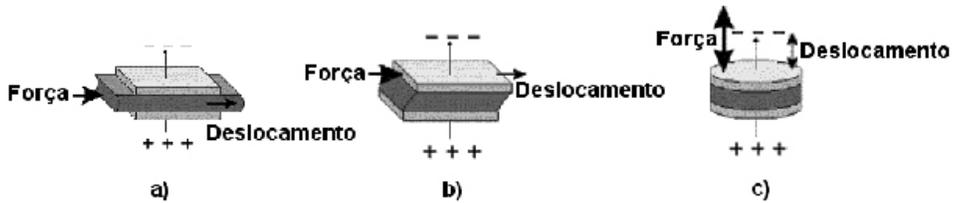


Figura 21 – Modos básicos de operação de um fluido ER-MR: (a) Modo de pressão; (b) Modo de cisalhamento; (c) Modo de compressão

um desenho esquemático do líquido antes e após a aplicação do campo.

Existem três modos de operação básicos relacionados aos dispositivos ER-MR: pressão induzida ou polos fixos, em que o líquido é forçado a fluir entre os polos magnéticos estacionários; corte direto ou movimento dos polos, em que uma força induz à tensão de cisalhamento por meio do fluido; e filme de aperto, em que o líquido é submetido a uma força de compressão, alterando a distância entre os polos magnéticos. A Figura 21 apresenta imagens esquemáticas relativas a cada modalidade de operação. Cada um desses modos está relacionado com diferentes aplicações. O modo da pressão induzida é usualmente empregado em válvulas e amortecedores. O modo de cisalhamento está associado às aplicações em freios e embreagens. O modo de compressão, por sua vez, está associado a alguns amortecedores de pequena amplitude de vibração. Contudo, esse modo não tem sido estudado com tanta ênfase como os dois primeiros.

Aplicações

Os fluidos MR-ER são essencialmente utilizados para construir amortecedores, freios e embreagens inteligentes que podem ser aplicados para diversos fins. As indústrias automobilística, aeroespacial e biomédica estão especialmente interessadas neste tipo de comportamento. A Figura 22 apresenta um amortecedor típico com fluido MR.

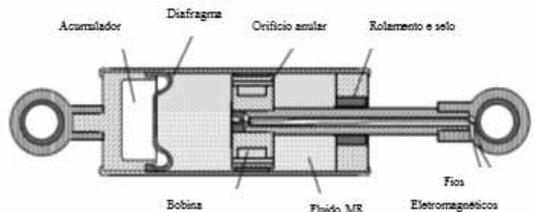


Figura 22 – Amortecedor MR (Costa, 2008)

Com relação à indústria automobilística, Prabakar *et al.* (2009) discutiram o controle semiativo de uma dinâmica de automóveis utilizando amortecedores MR. Olabi & Grunwald (2007) apresentaram a dinâmica do sistema por meio de um amortecedor MR como um elemento secundário na suspensão do carro.

A mesma ideia de amortecedores inteligentes pode ser aplicada em processos industriais. Carlson *et al.* (1995) discutiram os amortecedores MR que empregam controle ativo que permite imaginar diferentes possibilidades de aplicação, incluindo dispositivos de travamento (Figura 23). Usando a mesma ideia, aplicações de engenharia civil consideram o uso de amortecedores

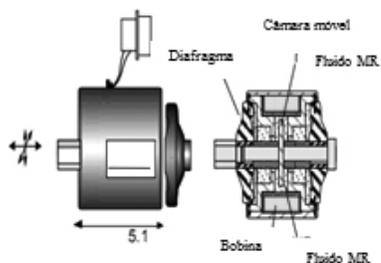


Figura 23 – Amortecedor de travamento (Carlson *et al.*, 1995)

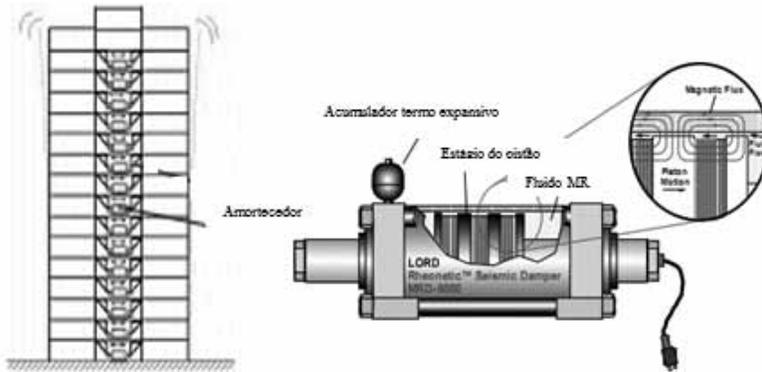


Figura 24 – Amortecedor de controle de abalo sísmico (Yang *et al.*, 2002)

MR para proteger estruturas submetidas a cargas sísmicas (Figura 24). Yang *et al.* (2002) discutiram respostas dinâmicas desse tipo de aplicação.

Aplicações biomédicas também empregam o conceito de amortecedores inteligentes a fim de reproduzir os movimentos das pernas humanas. Em geral, os amortecedores MR podem ser utilizados em próteses de joelhos para obter um caminhar mais natural. Carlson *et al.* (2001) apresentaram um protótipo do joelho com amortecedor MR.

Os fluidos ER-MR podem ser úteis para construir freios e embreagens. A ideia relacionada à embreagem é que ele permite um torque controlável. Kavlicoglu *et al.* (2002) discutiram um protótipo desse dispositivo que pode ser usado em motores (Figura 25).

Por outro lado, a utilização dos fluidos ER-MR na fabricação de freios faz com que a frenagem tenha uma atuação mais suave e com menor consumo de energia (Figura 26). Esse tipo de dispositivo tem a vantagem de ser de fácil operação, sendo aplicável em diversas situações (Carlson *et al.*, 1995).

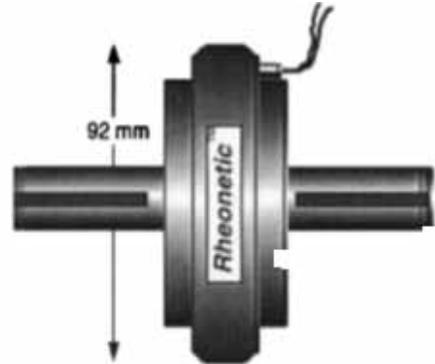


Figura 26 – Figura esquemática de um freio com fluido MR (Carlson *et al.*, 1995)

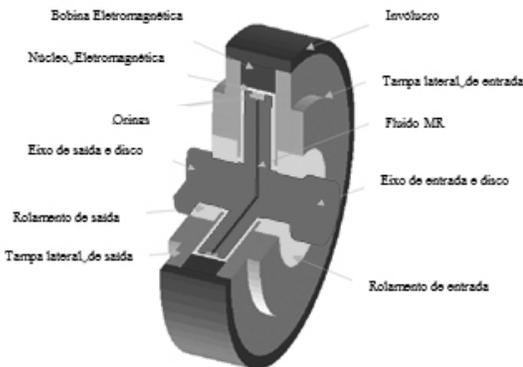


Figura 25 – Protótipo de embreagem com fluido MR (Kavlicoglu *et al.*, 2002)

CONCLUSÕES

Os materiais inteligentes constituem um novo paradigma de projeto que tem contribuído para sua aplicação em diversos setores do conhecimento humano. As inovações tecnológicas associadas são importantes, podendo definir a era dos materiais inteligentes. A utilização na medicina proporciona melhor qualidade de vida, permitindo cirurgias e tratamen-

tos pouco invasivos. Na engenharia, o uso dos materiais inteligentes garante maior segurança, conforto, durabilidade e ideias que não poderiam ser pensadas com os materiais convencionais. Todos esses conhecimentos e essas inovações podem ser levados para o setor militar, proporcionando avanços significativos. No Brasil, várias pesquisas e projetos são desenvolvidos utilizando o paradigma dos materiais inteligentes. Em especial, vale destacar o Instituto Nacional de Ciência

e Tecnologia em Estruturas Inteligentes em Engenharia (INCT-EIE), que congrega uma rede de pesquisadores do Brasil e do exterior. O Instituto tem difundido a ideia dos materiais inteligentes, e suas aplicações nas mais variadas áreas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio das Agências CNPq, Capes e Faperj e, através do INCT-EIE, o apoio do CNPq e da Fapemig.

CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:

<CIÊNCIA E TECNOLOGIA>; Ciência; Análise; Desenvolvimento; Energia; Engenharia; Estudo; Material; Pesquisa;

REFERÊNCIAS

- Anton, S. R.; Sodano, H.A., “A Review of Power Harvesting Using Piezoelectric Materials (2003-2006)”, *Smart Materials and Structures*, 16, R1, 2007.
- Brennan, M. J., “Some Recent Developments in Adaptive Tuned Vibration Absorbers/Neutralisers”, *Shock and Vibration*, v. 13, nºs 4-5, pp. 531-543, 2006.
- Carlson, J. D.; Chrzan M. J.; Raleigh N. C., “Magneto-rheological Fluid Dampers”, U.S. Patent 5, 277, 282. 1994, “Magneto-rheological Fluid Devices”, U.S. Patent 5, 284, 330, 1994.
- Carlson J. D.; Catanzarite D.M.; St. Clair K. A., “Commercial Magneto-Rheological Fluid Device”, 5th Int. Conf on Electrorheological Magneto-rheological Suspensions and Associated Technology, Sheffield, July, 1995.
- Carlson, J. D.; Matthis, W.; Toscano, J. R., “Smart Prosthetics Based on Magneto-rheological Fluid”, *Proceedings of Spie* 43:4.332-4.336, 2001.
- Carlson, J.D., “MR Fluids and Devices in The Real World”, *International Journal of Modern Physics B*, v. 19, nº 7-9, pp. 1.463-1.470, 2005.
- Costa, E. L. M., “Construção de um Dispositivo Amortecedor Magnetoreológico para uma Suspensão Activa”, Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- De Marqui Jr, C.; Ertuk, A., “Electroaeroelastic Analysis of Airfoil-based Wind Energy Harvesting using Piezoelectric Transduction and Electromagnetic Induction”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 24, p. 846-854, 2013.
- Dias, J. A. C.; De Marqui Jr, C.; Ertuk, A., “Hybrid Piezoelectric-inductive Flow Energy Harvesting and Dimensionless Electroaeroelastic Analysis for Scaling”, *Applied Physics Letters*, v. 102, p. 044101-044101-5, 2013.
- Donelan, J. M.; Li, Q.; Naing, V.; Hoffer, J. A.; Weber, D. J.; Kuo, A. D., “Biomechanical Energy Harvesting: Generating Electricity During Walking with Minimal User Effort”, *Science* (2008) v. 319, nº 5864, pp. 807-810, 2008.
- Duering, T.; Pelton, A.; Stockel, D., “An Overview of Nitinol Medical Applications”, *Materials Science and Engineering A* 273-275, pp. 149-160, 1999.
- Ertuk, A.; Inman, D. J., “Issues in Mathematical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters”, *Smart Materials and Structures*, v. 17, nº 6, pp. 065016, 2008.

- Feenstra, J.; Granstrom, J.; Sodano, H.A., "Energy Harvesting Through a Backpack Employing a Mechanically Amplified Piezoelectric Stack", *Mechanical Systems And Signal Processing*, v. 22, nº 3, pp. 721-734, 2008.
- Grisso, B.L.; Inman, D.J., "Temperature Corrected Sensor Diagnostics for Impedance-Based SHM", *Journal of Sound and Vibration*, v. 329, nº 12, pp. 2.323-2.336, 2010.
- Hodgson D. E. & Brown J. W., *Using Nitinol Alloys, Shape Memory Applications*, California, 2000.
- Ibrahim, R.A., "Recent Advances in Nonlinear Passive Vibration Isolators", *Journal of Sound and Vibration*, v. 314, nº 3, pp. 371-452, 2008.
- Janocha, H., "Application Potential of Magnetic Field Driven New Actuators", *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 91, nº 1-2, pp. 126-132, 2001.
- Kavlicoglu, B.; Gordaninejad, F.; Evrensel, C. A.; Cobanoglu, N.; Xin, M.; Heine, C.; Fuchs, A.; Korol, G., "A High-Torque Magneto-Rheological Fluid Clutch", *Proceedings of SPIE Conference on Smart Materials and Structures*, San Diego, March 2002.
- Kordonsky, W.I.; Gorodkin, S.P.; Demchuk, S.A., "Magnetorheological Control of Heat-Transfer", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 36, nº 11, pp. 2.783-2.788, 1993.
- Lagoudas, D.C., "Shape Memory Alloys, Modeling and Engineering Applications", Department of Aerospace Engineering Texas A&M University, Springer Science Business Media, LLC, 2008.
- Li, Q.; Naing, V.; Donelan, J.M., "Development of A Biomechanical Energy Harvester", *Journal of Neuro-Engineering and Rehabilitation*, v. 6, nº 22, 2009.
- Loureiro da Silva, L.; Savi, M. A.; Monteiro Jr, P. C. C.; Antoun Netto, T., "On the Effect of the Piezoelectric Hysteretic Behavior in the Vibration-Based Energy Harvesting", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 24, p. 1.278-1.285, 2013.
- Machado, L. G; Savi, M. A. "Aplicações Odontológicas das Ligas com Memória de Forma". *Revista Brasileira de Odontologia*, v. 59, nº 5, pp. 302-306, 2002.
- Machado, L. G; Savi, M. A., "Medical Applications of Shape Memory Alloys". *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*. v. 36, nº 6, pp. 302-306, 2003.
- Nitsche, R.; Gaul, L, "Smart Friction Driven Systems", *Smart Materials and Structures*, v. 14, nº 1, pp. 231-236, 2005.
- Nuffer, J.; Bein, T., "Application of Piezoelectric Materials in Transportation Industry", *Global Symposium on Innovative Solutions for the Advancement of the Transport Industry*, San Sebastian, Spain, October, v. 4, nº 6, 2006.
- Olabi, A. G. & Grunwald, A., "Design and Application of Magneto-rheological Fluid", *Materials & Design* v. 28, nº 10, pp. 2.658-2.664, 2007.
- Olabi, A. G. & Grunwald, A. "Design and Application of Magnetostrictive Materials", *Materials & Design*, v. 29, nº 2, pp. 469-483, 2008.
- Paiva, A.; Savi, M. A. "An Overview of Constitutive Models for Shape Memory Alloys", *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID56876, v. 2006, pp. 1-30, 2006.
- Paiva, A., "Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC – Rio, 2004.
- Prabakar, R.S.; Sujatha, C.; Narayanan, S., "Optimal Semi-Active Preview Control Response of a Half Car Vehicle Model with Magnetorheological Damper", *Journal of Sound and Vibration*, v. 326, nº 3, pp. 400-420, 2009.
- Qiu, J.; Ji, H.; Zhu, K., "Semi-Active Vibration Control Using Piezoelectric Actuators In Smart Structures", *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, v. 4, nº 3, pp. 242-251, 2009.
- Rabinow, J., "The Magnetic Fluid Clutch", *Electrical Engineering*, v. 67, nº 12, p. 1.167-1.167, 1948a.
- Rabinow, J., "Magnetic Fluid Torque and Force Transmitting Device", U.S. Patent 2, 575, 360, 1951.
- Rediniotis, O.K.; Wilson, L.N.; Lagoudas, D.C.; Khan, M. M., "Development Of A Shape-Memory-Alloy Actuated Biomimetic Hydrofoil", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 13, nº 1, pp. 35-49, 2002.

- Saadat, S.; Salichs J.; Noori, M.; Hou, Z.; Davoodi, H.; Bar-On, I.; Suzuki Y.; Masuda, A., "An Overview of Vibration and Seismic Applications of NiTi Shape Memory Alloy", *Smart Materials and Structures*, v. 11, nº 2, pp. 218-229, 2002.
- Santos, B.C; Savi, M.A., "Nonlinear Dynamics of a Nonsmooth Shape Memory Allo Oscillator", *Chaos, Solitons & Fractals*, v. 40, nº 1, pp. 197-209, 2009.
- Savi, M. A.; Paula, A. S.; Lagoudas, D. C., "Numerical Investigation of Adaptative Vibration Absorber Using Shape Memory Alloys", *Journal of Intelligent Material System and Structures*, v. 22, nº 1, pp. 67-80, 2010.
- Savi, M. A.; Pacheco, P. M. C. L.; Braga A. M. B., "Chaos in a Shape Memory Two-Bar Truss", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, v. 37, nº 8, pp. 1.387-1.395, 2002.
- Savi, M. A.; Sa, M. A. N.; Paiva, A.; Pacheco, P. M. C. L., "Tensile-Compressive Asymmetry Influence on Shape Memory Alloy System Dynamics", *Chaos, Solitons and Fractals*, v. 36, nº 4, pp. 828-842, 2008.
- Shtarkman, E. M., "Rheological Fluid Responsive to Magnetic Field: Comprises Reduced Carbonyl-Iron Particles, Silica Gel and Silicone Oil and Is Useful in Shock Absorbers", Patent Number(s): US4992190-A, Assignee: TRW INC, 1991.
- SINTEF, Shape Memory Alloys in Oil Well Applications, 1999.
- Sodano, H.A.; Lloyd, J.; Inman, D.J., "An Experimental Comparison Between Several Active Composite Actuators for Power Generation", *Smart Materials and Structures*, v. 15, nº 5, p. 1211, 2006.
- Sodano, H.A.; Inman, D.J.; Park, G., "A Review of Power Harvesting from Vibration Using Piezoelectric Materials", *The Shock and Vibration Digest*, v. 36, nº 3, pp. 197-205, 2004.
- Yang, R.; Qin, Y.; Li, C.; Zhu, G.; Wang, Z.L., "Converting Biomechanical Energy into Electricity by a Muscle-Movement-Driven Nanogenerator", *Nano Lett.*, v. 9, nº 3, pp. 1.201-1.205, 2009.
- Yang, G.; Spencer Jr, B. F.; Carlson, J. D.; Sain, M. K., "Large-scale MR Fluid Damper: Modeling and Dynamic Performance Consideration", *Engineering Structures*, v. 24, nº 3, pp. 309-323, 2002.
- Robotic Muscles, webdocs.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/muscle.html, 2012.
- Aircraft Maneuverability, webdocs.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/flap.htm, 2012.
- Weiss, K.D., Carlson, J.D.; Nixon, D.A., "Viscoelastic Properties of Magneto- and Electro-Rheological Fluids", *Journal of Intelligent Material System and Structures*, v. 5, nº 6, pp. 772-775, 1994.
- Willians, K; Chiu, G.; Bernhard, R., "Adaptive-Passive Absorbers Using Shape-Memory Alloys", *Journal of Sound and Vibration*, v. 249, nº 5, pp. 835-848, 2002.