

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

**UMA NOVA FRONTEIRA DA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL 4.0:
*SMART MATERIALS***

CAIO CEZAR SANTOS BARBOSA ALVES

SÃO CARLOS -SP
2022

UMA NOVA FRONTEIRA DA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL 4.0: *SMART MATERIALS*

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Dr. Márcio Raymundo Morelli.

São Carlos-SP
2022

RESUMO

Ao longo do desenvolvimento econômico e produtivo, passamos por algumas revoluções que alteraram os cursos da sociedade e meios produtivos. No momento, estamos passando por uma quarta Revolução Industrial, a qual une meios físicos, digitais e até mesmo biológicos. Uma das engrenagens desse sistema consiste no uso de dispositivos inteligentes, como sensores e atuadores, que preferencialmente consigam gerar autonomia ao funcionamento dos sistemas e equipamentos, que são os *smart materials*. Dentro deste contexto, o presente trabalho, por meio de uma revisão bibliográfica, destrinchou questões básicas sobre os principais *smart materials*, seus mecanismos físico-químicos de funcionamento, seus fatores de composição, de processamento, suas propriedades e aplicações, além de tendências futuras. Tais classes de materiais são: ligas com efeito de memória, piezoelétricos, eletrostritores, fibras ópticas e magnetostrictivos;

Palavras-chave: *Smart Materials*. Indústria 4.0. Ligas com efeito de memória. Piezoelétricos. Eletrostritores. Fibras Ópticas. Magnetostrictivos.

ABSTRACT

Throughout economic and productive development, we went through some revolutions that have changed the course of society and productive means. We are currently undergoing a fourth industrial revolution, which unites physical, digital and even biological means. One of the gears of this system is the use of intelligent devices, such as sensors and actuators, which preferably manage to generate autonomy in the operation of systems and equipment, which are the smart materials. Within this context, the present working paper, through a bibliographic review, unraveled a summary of the main basic questions, and the physicochemical mechanisms for their functioning, composition factors, processing, properties and applications, as well as future trends. Such classes of materials are: alloys with memory effect, piezoelectric, electrostrictors, optical fibers and magnetostrictors;

Keywords: Smart Materials. Industry 4.0. Alloys with memory effect. Piezoelectric. Electrostrictors. Optical Fibers. Magnetostrictors.



ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (TCC)

NOME: Caio Cezar Santos Barbosa Alves

RA: 558150

TÍTULO: Uma nova fronteira da revolução industrial 4.0: smart materials

ORIENTADOR(A): Prof. Dr. Marcio Raymundo Morelli

CO-ORIENTADOR(A):

DATA/HORÁRIO: 18/04/2022, 15h

BANCA – NOTAS:

	Monografia	Defesa
Prof. Dr. Marcio Raymundo Morelli	10,0	10,0
Prof. Dr. Fernando Manuel Araújo Moreira	10,0	10,0
Média	10,0	10,0

Certifico que a defesa de monografia de TCC realizou-se com a participação a distância dos membros Prof. Dr. Marcio Raymundo Morelli e Prof. Dr. Fernando Manuel Araújo Moreira e depois das arguições e deliberações realizadas, os participantes à distância estão de acordo com as informações redigidas nesta ata de defesa.

Prof. Dr. Marcio Raymundo Morelli

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Principais inovações da indústria 4.0.....	13
Figura 2: Classes de materiais de acordo com uso em sensores e atuadores.....	16
Figura 3: Ilustração esquemática da transformação de fases e histerese na liga NITI-SMAs.....	19
Figura 4: Representação esquemática dos fenômenos ocorridos durante a histerese termomecânica da SMA, mostrando o material em escala macro e uma representação aproximada da microestrutura.....	20
Figura 5: Diagrama de tensão-temperatura de acordo com os domínios de fase austenita e martensita.....	21
Figura 6: Gráfico contendo a porcentagem de setores em que as SMA são aplicadas e estudadas de Janeiro de 1990 à Setembro de 2013, no primeiro gráfico, patentes registradas nos EUA e no segundo, publicações científicas.....	28
Figura 7: Representação do mecanismo de efeito piezoelétrico direto e indireto...	30
Figura 8: Estrutura cristalina BaTiO ₃ . Na primeira imagem, é a sua configuração acima da T _c , enquanto na segunda, temos a figura demonstrando abaixo da T _c	31
Figura 9: Curva de histerese polarização x campo elétrico num material ferroelétrico.....	32
Figura 10: células unitárias de uma estrutura do tipo Perovskita ABO ₃ , respectivamente: cúbica, tetragonal, ortorrômbica e romboédrica.....	35
Figura 11: Gráfico esquemático da tensão por polarização em um eletrostritor.....	40
Figura 12: Curvas de campo elétrico por polarização, campo elétrico por tensão e tensão por polarização em um dielétrico não linear (PMN orientado [001]).....	40
Figura 13: Relação do potencial e distância entre íons.....	41
Figura 14: Fotografias de fibras ópticas submarinas.....	44
Figura 15: Estrutura das seções em uma fibra óptica coaxial: núcleo, revestimento, amortecedor e jaqueta.....	46
Figura 16: Caminho de um feixe de luz em uma fibra óptica multimodo por reflexão total interna.....	47

Figura 17: Tipos de modos de uma fibra óptica: Monomodo de índice degrau, multimodo de índice gradual e monomodo de índice degrau.....	48
Figura 19: Esquema de uma torre de desenho para uma fibra óptica.....	51
Figura 18: Materiais típicos e funções para as fibras ópticas.....	54
Figura 20: Sensor submerso em uma plataforma de petróleo.....	57
Figura 21: Representação de um campo eletromagnético em um fio cilíndrico, linhas de campo magnético em uma barra e ordenamento dos polos em duas barras magnéticas.....	61
Figura 22: Momentos magnéticos de um elétron, a esquerda o movimento orbital, e a direita o movimento por spin.....	62
Figura 23: Curva de histerese relacionada ao $H \times B$	64
Figura 24: Representação esquemática do efeito magnetostrictivo sobre a estrutura magnética do material.....	66
Figura 25: Curva de histerese entre deformação e campo magnético.....	67
Figura 26: Relação entre as propriedades mecânicas e magnéticas regidas pelo efeito Joule e Villari.....	68

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

B	Indução magnética
CAD	Desenho Assistido por Computador
CPS	Sistemas Ciber-físicos
CVD	Deposição Química por Vapor
CYTOP	Fluoropolímero amorfo de Poliperfluoro-butenovinil éter.
ERF	Fluido Eletro Reológico
EVA	Acetato de Vinila
FEA	Análise dos Elementos Finitos
GPS	Sistema de Posicionamento Global
H	Intensidade do Campo Magnético
IF	Infravermelho
IoT	Internet das Coisas
MCVD	Deposição Química por Vapor Modificada
Metglas	Vidro metálico
MRF	Fluido Magnetoreológico
SMA	Ligas com Memória de Forma
PC	Polycarbonato
PMMA	Polimetilacrilato
POF	Fibra óptica polimérica
PS	Poliestireno
PLA	Poliácido Láctico
PIB	Produto Interno Bruto
PTFE	Politetrafluoretileno
PVCD	Deposição Química de Vapor assistido por plasma
PU	Poliuretano
T_c	Temperatura Curie

T_g Temperatura de Transição Vítrea
UV Ultravioleta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	11
3	UM BREVE ESTUDO SOBRE A INDÚSTRIA 4.0.....	11
4	SMART MATERIALS.....	15
4.1	INTRODUÇÃO SOBRE OS <i>SMART MATERIALS</i>	15
4.2	LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA	18
4.2.1	Efeito de memória.....	19
4.2.2	Superelasticidade.....	20
4.2.3	Efeito de amortecimento.....	22
4.2.4	Principais SMAs e rotas de processamento.....	23
4.2.5	Aplicações e tendências futuras.....	25
4.3	PIEZOELÉTRICOS.....	29
4.3.1	Efeito piezoeletrico direto e indireto.....	30
4.3.2	Efeito piezoeletrico numa perspectiva microestrutural.....	31
4.3.3	Principais materiais piezoeletricos e rotas de processamento.....	32
4.3.4	Aplicações e tendências futuras para os piezoeletricos.....	33
4.3.5	Considerações sobre eletroestritores.....	36
4.4	FIBRAS ÓPTICAS.....	43
4.4.1	Mecanismo básico de funcionamento das fibras ópticas.....	45
4.4.2	Principais materiais para as fibras ópticas e formas de processamento.....	46
4.4.3	Aplicações e tendências futuras para fibras ópticas.....	50
4.5	MATERIAIS MAGNOSTRICTIVOS.....	60
4.5.1	Efeito magnetostrictivo.....	61
3.5.2	Principais materiais magnetostrictivos e rotas de processamento.....	69
4.5.3	Aplicações e tendências futuras para materiais magnetostrictivos.....	74
5	VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS SMART MATERIALS.....	78

CONCLUSÕES.....	79
REFERÊNCIAS.....	82

1- INTRODUÇÃO

A sociedade e o setor produtivo estão passando por profundas transformações devido a uma Quarta Revolução Industrial, que se caracteriza pela integração entre meios físicos, digitais e até mesmo biológicos, com a possibilidade de captação e análise de dados em tempo real, além de execução automatizada de tarefas por meio de dispositivos eletrônicos, assim como meios de produção e sistemas descentralizados Schwab (2016). A transformação digital está sendo feita em diversos setores industriais a partir da Inteligência Artificial, de robôs automatizados, sensores, IoT, manufatura aditiva e outros demais Oztemel et al. (2020).

A relevância econômica é tão significativa que, segundo a *Boston Consulting Group* Rüßmann et al. (2015), na Alemanha – país pioneiro na indústria 4.0 – após a implementação das tecnologias associadas à indústria 4.0 (aquelas referentes à quarta Revolução Industrial), o ganho de produtividade foi tão expressivo que as indústrias de componentes industriais tiveram um aumento de 20 a 30% de produtividade, e nas indústrias automobilísticas o incremento produtivo foi de 10 a 20%. O setor manufatureiro alemão, como um todo, teve ganhos de produtividade de 90 a 150 bilhões de euros, concomitante a uma projeção de aumento de receitas futuras do setor industrial em torno de 1% do PIB alemão por ano. Além disso, vale salientar que há benefícios intangíveis, tanto das externalidades positivas sobre demais setores, como produtos para o consumidor final, o que demonstra a notabilidade deste tema.

Sendo a indústria de materiais algo essencial aos mais diversos produtos e aplicações, a revolução não tão somente ocorre nos mais diversos processos, tal como há uma demanda necessária por novos materiais de tal forma que seja possível viabilizar as inovações da indústria 4.0, sejam estas inovações direcionadas ao consumidor final ou em tecnologias para o setor produtivo. Uma parte do universo para as ciências e engenharia de materiais são os *smart materials*, que são materiais com mudanças automáticas estruturais e de propriedades a partir de estímulos externos, que podem ser utilizados como sensores, atuadores, conversores de energia e transdutores para as mais diversas

aplicações avançadas.

Dentre os *smart materials*, as principais classes são os Akhras (2000): piezoelétricos, eletroestritores, magnetostritivos, fibras ópticas e SMAs.

2- OBJETIVOS

A partir da revisão bibliográfica, por meio de artigos, livros e sites, além de plataformas de busca de publicações científicas, como Google Scholar, Capes e Scielo, o desenvolvimento da monografia segue tais objetivos:

- Identificar a relevância dos *smart materials* para a Revolução Industrial 4.0 e mapeamento das aplicações cotidianas;
- Descrever e sintetizar a tecnologia dos *smart materials* orientado a estrutura, propriedades, processamento e aplicações;
- Analisar as tendências futuras e a ultrapassagem de fronteiras técnicas no que se referem a novos materiais, a reengenharia aplicada a materiais já existentes, novos mercados e tecnologias;
- Dissertar sobre a integração dos sistemas físicos, digitais e/ou biológicos associados aos *smart materials*;
- Analisar as vantagens, desvantagens e limitações dos *smart materials*.

3 - UM BREVE ESTUDO SOBRE A INDÚSTRIA 4.0

Segundo Schwab (2016), a indústria 4.0 é um conceito englobado pela Quarta Revolução Industrial. A palavra “revolução” remete a mudanças radicais e abruptas, e no modelo produtivo ocorre através de mudanças tecnológicas e culturais que desencadeiam mudanças sociais e econômicas, cujo acompanham o ser humano há milênios.

A primeira grande mudança social e produtiva do ser humano foi a transição da silvicultura para a agricultura há cerca de 10.000 anos, graças à domesticação dos animais, e por consequência, foi possível aumentar a produtividade, e evoluir a logística e as comunicações, o que por sua vez trouxe desenvolvimento

socio-econômico.

Posteriormente, as revoluções foram industriais, assim sendo Schwab (2016):

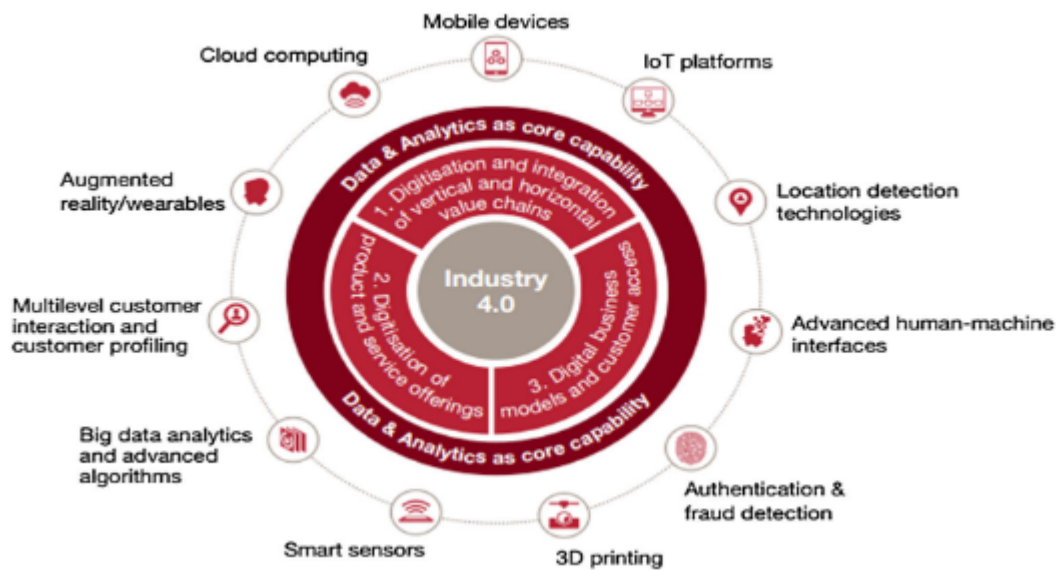
1. Primeira Revolução Industrial: após a segunda metade do século XVIII, foi possível substituir a força muscular pela a energia mecânica, com o advento da máquina a vapor e ferrovias, o que tornou possível a produção mecânica;
2. Segunda Revolução Industrial: no fim do século XIX, iniciou o uso massivo da energia elétrica e linhas de montagens, o que tornou viável a produção em massa;
3. Terceira Revolução Industrial: após a década de 1960, houve o desenvolvimento de sistemas digitais, sendo impulsionada pelo desenvolvimento de semicondutores, e passando pelos estágios de computação em *mainframe* (década de 1960), computação pessoal (década de 1970 a 1980) e da internet.

Atualmente, estamos vivenciando a Quarta Revolução Industrial, em que a disrupção é a cognição. O conceito da nova Revolução Industrial surgiu em 2010 por meio de pesquisas sobre fábricas inteligentes e novas formas de cadeias produtivas, sendo oficializada e reconhecida como a Quarta Revolução Industrial em 2011, em uma feira organizada pelo governo alemão em Hannover Pereira et al. (2017) e Schwab (2016).

A indústria 4.0 está pautada na inovação por meio da manufatura digital, redes de comunicações, automação tecnológica e áreas correlatas. Dentro deste tema, as tecnologias podem ser o desenvolvimento de CPS, IoT, robótica, *Big Data*, Manufatura por nuvem, realidade aumentada etc.

Por mais que haja uma Revolução Industrial, o fim não está restrito somente à indústria, sendo o objetivo é a criação de produtos, processos e serviços que possam ter a integração física, digital e/ou biológica de forma a termos informações em tempo real por meio de redes, aquisição de dados que possam ser analisados e utilizados para a maior eficiência de um dispositivo, sistema ou processo, além do controles de maquinário e partes, adaptação de produtos e serviços de acordo com a demanda, descentralização do sistemas e tomada de decisões automáticas Glistau et al. (2018) e Wichmann et al. (2019).

Figura 1: Principais inovações da indústria 4.0. Fonte: Oztemel et al. (2020)



Como principais inovações das categorias físicas, digitais e biológicas, temos Oztemel et al. (2020), Schwab (2016) e Wichmann et al. (2019):

- Categoria física: veículos autônomos, manufatura aditiva, robótica avançada, sensores e atuadores, materiais avançados e *smarts*.
- Categoria digital: IoT, *blockchain*, computação em nuvem etc.
- Categoria biológica: biologia sintética, edição de genes e tecidos, medicina diagnóstica em tempo real etc.

A manufatura na indústria 4.0 tem quatro focos: fabricação inteligente, produtos inteligentes, modelos de negócios e consumidores Pereira et al. (2017).

No que tange a fabricação inteligente, a planta industrial do futuro deve ter operações flexíveis e soluções inteligentes, necessitando a integração de toda cadeia de valor com processos adaptáveis. O ambiente de fábricas inteligentes utiliza a integração das etapas industriais em tempo real com o requisito de intercomunicação entre os recursos de manufatura, como sensores, atuadores, semicondutores, máquinas, robôs e estruturas de transportes.

Sobre os produtos inteligentes, estes podem ser utilizados como parte do sistema de cadeia de valor ou como produto final. Nas cadeias de valores, o objetivo dos produtos inteligentes é monitorar os sistemas de produção por armazenamento

de dados, além de poder tomar decisões autônomas e solicitar recursos para a produção. Para o consumidor final, permitem a integração de um produto com o meio digital, interação automática com o meio, armazenamento e provisão de dados, além de possibilitar comunicações e mecanismos de funcionamento autônomo na execução de tarefas para o usuário, com constante monitoramento e manutenção de um produto proativo aliado a maximização do uso do bem. Um exemplo a ser dado é a proposição da conexão entre o comando do controle aéreo e os aviões, em que há o objetivo de toda informação de um avião ser enviada de antemão ao controle de tráfego aéreo, de forma a determinar a existência de falhas em curso durante o voo; ou sensores em pneus de caminhões, que possibilitam a informação sobre o desgaste dos pneus durante o uso, garantindo maior segurança operacional e compra ou trocas somente quando há necessidade para tal Pereira et al. (2017) e Schwab (2016).

Com a mudança da fabricação e de produtos, obviamente, os modelos de negócios vão se alterar, de forma similar aos focos supracitados. Para os consumidores, o foco será a experiência do usuário e customização de produtos, através das informações e de produtos inteligentes.

As tecnologias chaves para a viabilidade da indústria 4.0 são os CPS e o IoT. O CPS são sistemas de integração físicos e virtuais, para controlar e coordenar processos e operações, além de prover dados. Quando os CPS são conectados à internet, tem-se a IoT, ou a Internet das Coisas.

A indústria de materiais será impactada por esta Revolução Industrial por meio da pesquisa e desenvolvimento, além de campos de produção e manutenção poderem ser assistidos por inteligência artificial e *big data*, no sentido de desenvolvimento de produtos baseados em análises de dados e simulações, além do acompanhamento de propriedades de um material durante a sua aplicação Sajid et al. (2021).

A manufatura aditiva é um processo que envolve materiais em que é possível fazer o processamento por camadas em 3 dimensões, podendo fazer peças customizadas *in situ*, e assim, está aberto o desenvolvimento de materiais possíveis para a sua maior viabilidade Schwab (2016).

Outro campo em desenvolvimento é o de materiais que viabilizam operações

autônomas e/ou coletam informações de forma eficiente e em tempo real, podendo ser utilizados como produtos finais ou em sistemas produtivos (ex: robótica), sendo sensores, atuadores e outros diversos materiais que exibem um determinado comportamento de mudança de propriedades de forma mais autônoma possível (a exemplo dos materiais com propriedades auto reparadoras), conhecidos como *smart materials* Almaadeed et al. (2020).

4- SMART MATERIALS

4.1 - INTRODUÇÃO SOBRE OS SMART MATERIALS

Apesar do termo *smart materials* ser amplamente discutido e estudado em meios técnicos, acadêmicos, empresariais e até mesmo por meio da imprensa, não há uma definição exata e bem descrita sobre seu conceito, apesar de que comumente nos referimos aos *smart materials* como materiais que, de acordo com um estímulo externo, geram uma determinada resposta físico-química automática, e isso pode ser exemplificado por: sensores, auto regeneração de um material, atuadores, diagnósticos, mudança de formato de um produto etc. Em síntese, são materiais úteis a diversos dispositivos e/ou possuem propriedade para gerar uma resposta automática quando expostos a uma determinada condição, sendo que há uma infinidade de capacidades ou funcionalidades a serem exploradas ou aprimoradas. Os estímulos observados costumam ser por tensão mecânica, efeito de temperatura, o meio químico, radiação, campo eletromagnético, entre outros Bogue (2014) e Morad et al. (2014).

Como observado em Farhat et al. (2018) e Hu et al. (2012), existem *smart materials* criados espontaneamente pela natureza, tais como: o sistema de coloração dos camaleões de acordo com as condições ambientais, o fechamento das folhas da *Dionaea muscipula* (uma espécie de planta carnívora) na presença de insetos ou moscas, a movimentação da planta asiática *Codariocalyx motorius* de acordo com a presença da luz solar e outros casos.

Figura 2: Classes de materiais de acordo com uso em sensores e atuadores.

	Material Class	Stimulus	Response
Sensors	Pyroelectrics	Temperature Change	Electric Polarization
	Piezoelectrics	Mechanical Strain	Electric Polarization
	Electrostrictors	Mechanical Strain	Electric Polarization
	Magnetostrictors	Mechanical Strain	Change in Magnetic Field
	Electroactive Polymers	Mechanical Strain	Electric Polarization
	Electroluminescent Materials	Electric Field	Light Emission
	Photoluminescent Materials	Incident Light	Light Emission
	Electrochromic Materials	Electric Field	Color Change
Actuators	Piezoelectrics	Electric Current	Mechanical Strain
	Electrostrictors	Electric Current	Mechanical Strain
	Magnetostrictors	Magnetic/Electric Field	Mechanical Strain
	Shape Memory Alloys	Temperature Change	Mechanical Strain
	Electroactive Polymers	Electric Field/pH change	Mechanical Strain
	Electrorheological Fluids	Electric Field	Viscosity Change
	Magnetorheological Fluids	Magnetic Field	Viscosity Change

Craig et al. (2013)

Na figura 2, podemos verificar a relação de estímulos e respostas dos sensores e atuadores de acordo com a classe de materiais.

Um fator interessante para as aplicações dos *smart materials* é a possibilidade de haver não-linearidade das suas propriedades como respostas ao meio externo em diversos dispositivos Fan (2010), sendo constatado nas SMA (Ligas com Memória de Forma) o efeito de histerese associada à temperatura e dimensões por meio do efeito de memória de forma para uma determinada liga, e algo similar pode ser observado nos MRF (Fluidos Magneto-Reológico) de acordo com a relação viscosidade por campo magnético Sarawate (2008) e Weng (2014).

Para fins de classificação dos *smart materials*, usaremos conceitos de Akhras (2000), Bahl et al. (2020), Bogue (2014) e Craig et al. (2013), que são as principais classificações para o estudo, havendo a consideração de que a classificação não é exata, variando de acordo com cada literatura ou organização científica - porém, ainda assim, tem-se:

1. Piezoelétricos: materiais que apresentam o fenômeno de mudança do comportamento elétrico ou de variação de corrente elétrica quando submetido a um estímulo através de mudança de carga mecânica, e

vice-versa – ou seja – efeito direto e converso;

2. Magnetostrictivos: classe de materiais que passam por efeitos direto e conversivos em relação ao campo magnético e tensão mecânica, sendo utilizado em sensores e/ou atuadores;
3. SMA: materiais que quando submetidos a determinadas faixas de temperaturas, há transformação de fases sólido-sólido que geram mudanças dimensionais. Um exemplo é a liga metálica do Nitinol, que quando é submetida a baixas temperaturas gera uma microestrutura de fase martensítica, porém quando aquecida retoma a sua forma original, com microestrutura de fase austenita;
4. Fibras ópticas: são fibras de polímeros ou vidro que utilizam a intensidade, fase, frequência ou polarização de ondas eletromagnéticas para a medição de tensões, temperaturas, campos eletromagnéticos, pressão, e outras medições, além de claro, serem utilizadas para a transmissão de informação de telecomunicações e sensores
5. Eletrostritores: Esta classe de materiais tem as mesmas propriedades mecânicas de um piezoelétrico, porém a mudança mecânica é proporcional ao quadrado do campo elétrico.

Vale salientar que a classificação acima foi dada referindo-se as principais classes de materiais, até porque existem diversos materiais com a capacidade de uma determinada resposta automática de acordo com o meio – tanto que ao vermos a Figura 2, verificamos uma grande lista de classes de materiais utilizados como *smart materials*: piroelétricos, polímeros eletroativos, materiais eletroluminescentes, fotoluminescentes e eletrocromicos. Ainda assim, existem outras formas de materiais inteligentes, a exemplo de produtos com propriedades autolimpantes, auto reparadoras Behera (2021).

Outra forma de classificação é de acordo com as propriedades: materiais ativos ou passivos. Os passivos têm a habilidade de transmitir um tipo de energia, a exemplo das fibras ópticas, que transmitem ondas eletromagnéticas. Já os materiais ativos podem ser divididos em duas categorias:

1. Com pouca variação das propriedades, ou seja, quando exposto a um estímulo externo, não haverá grande diferença estrutural ou composicional. Exemplo, um vidro fotocromático que, sob a luz externa, somente muda a sua cor.
2. O outro tipo converte uma determinada fonte de energia para outra forma de energia. Exemplo, o piezoelétrico quando submetido a um campo elétrico converte a energia elétrica em energia mecânica.

Não há como dissertar sem citar as vantagens e desvantagens acerca dos *smart materials* com aplicações em sensores e atuadores Sarawate (2008) que são:

- Vantagens: alta densidade energética, resposta rápida aos estímulos externos, tamanho compacto e poucas partes montáveis.
- Desvantagens: limitação em gerar respostas através de tensões, alto custo e alta sensibilidade a condições ambientais severas.

4.2 - LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA

As SMAs são ligas metálicas com dois a quatro componentes com composições especiais, divididas por duas famílias LExcellent (2013):

- Ligas de cobre: Cu-Al (Zn, Ni, Be, etc);
- Ligas de Ni-Ti-X, onde X é um elemento presente em baixas composições, e geralmente X sendo Fe, Cu, Co e similares.

As SMAs são denominadas materiais com memória de forma por terem a capacidade de quando sujeitas a tratamento termomecânico retomarem as suas formas originais após passarem por tensões, sejam de tração, torção, flexão etc. Isso se deve pôr meio das transformações de fases que envolvem as fases martensita e austenita. Outro fenômeno interessante é a elasticidade induzida em altas temperaturas. Essa capacidade de regeneração dimensional – inclusive após deformação plástica -- e a superelasticidade fazem que sejam uma classe de materiais única e interessante. As SMAs são materiais em que se observam distorções dimensionais quando afetamos a temperatura do meio ou com tensões

aplicadas devido a transformações de fase martensítica e elasticidade induzida em altas temperaturas. Vale salientar que há como criar uma previsibilidade desse comportamento de regeneração, bastando repetir algumas vezes o tratamento termomecânico na liga LExcellent (2013) e Naresh et al. (2016).

4.2.1 - Efeito de memória

O efeito de memória em SMA, como afirmado anteriormente, é resultante das transformações de fases entre austenita e martensita. Em baixas temperaturas, a fase mais estável (apesar de ser metaestável) para as SMAs é martensita, com maclas na sua microestrutura, e enquanto não deformada, possui célula unitária cúbica, similar à austenita; em nível macroscópico, quando não existe deformação, a fase martensítica possui mesmo tamanho e formato da fase Austenita. Na figura 3, a curva de histerese está representada pelo percentual de fase austenita de acordo com a temperatura Gupta et al. (2012) e Pfeifer et al. (2013).

Figura 3: Ilustração esquemática da transformação de fases e histerese na liga NITI-SMAs.

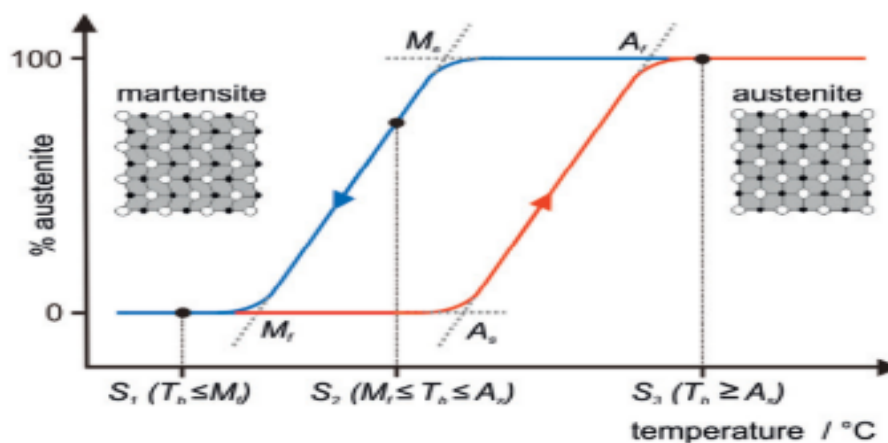


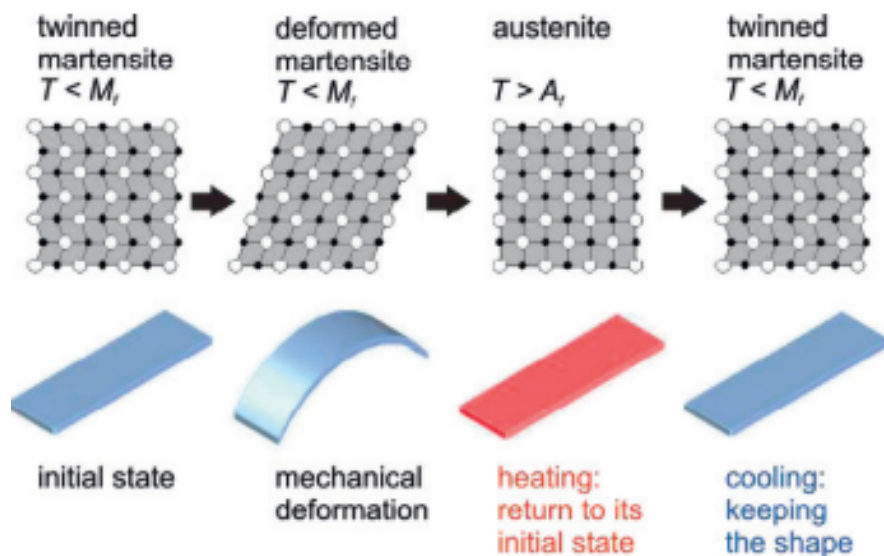
Fig. 2. Schematic illustration of the phase transformation and the hysteresis of NiTi-SMAs.

Fonte: Pfeifer et al. (2013)

Na figura 3, tem-se quatro variáveis: (Ms, Mf, As, Af); Durante o ciclo de

aquecimento, a temperatura A_s é o início de transição de fases entre martensita-austenita, até chegar a temperatura A_f , que todo material se converteu em austenita. Quando se resfria, após um tempo, ocorre a conversão de austenita-martensita, sendo que a conversão é completa em M_f para martensita. O efeito de memória de liga se dá quando a peça é exposta a uma temperatura abaixo do M_f , porque será mais fácil deformar a fase martensita (devido a sua maior capacidade de deformação e ductilidade), e caso seja necessário retomar a forma original, basta aquecer a uma temperatura A_f . O aquecimento é a força motriz para o rearranjo molecular da liga. Sendo esquematizado na figura 4. Gupta et al. (2012)

Figura 4: Representação esquemática dos fenômenos ocorridos durante a histerese termomecânica da SMA, mostrando o material em escala macro e uma representação aproximada da microestrutura.



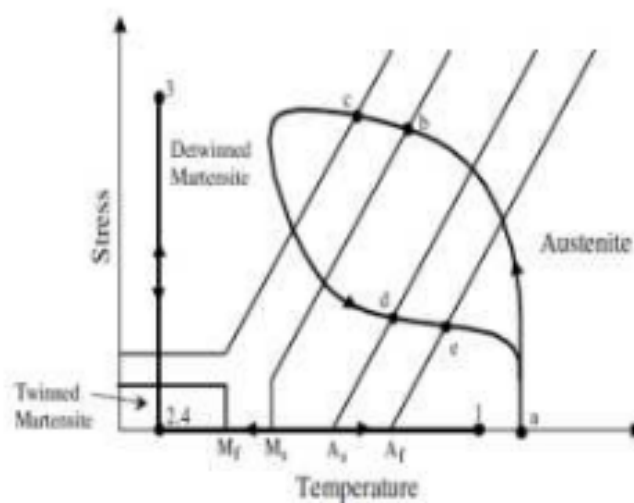
Fonte: Pfeifer et al. (2013)

Porém, existe mais de um comportamento de efeito de memória de liga. O que vimos anteriormente é o *One-Way*, que envolve apenas uma variável, a temperatura. O outro processo é o *Two-Way*, em que o estímulo é por meio da tensão e temperatura Naresh et al. (2016).

4.2.2 - Superelasticidade

O comportamento superelástico das SMAs está relacionado com a recuperação da deformação induzida após o descarregamento da tensão aplicada, em temperaturas acima da transformação martensítica. Normalmente, o caminho de carregamento termomecânico superelástico começa no estado de tensão nulo, onde a martensita desagregada é estável. Na figura 5, temos os caminhos de carregamento, sendo isotérmico e isobárico. Para este gráfico, é necessário considerar que o carregamento é quase estático com pequenos incrementos de deformação, de forma que o calor latente durante a transformação de fases tenha tempo suficiente de ser absorvido/dissipado para não haver mudança relevante de temperatura (lembrar, processo isotérmico).

Figura 5: Diagrama de tensão-temperatura de acordo com os domínios de fase austenita e martensita.



Fonte: Naresh et al. (2016)

A partir da análise da figura 5, observa-se que inicialmente o material é carregado em temperaturas acima de A_f , em que a fase austenita sofre um carregamento termoelástico até um nível crítico de tensão denominado tensão de transformação (a-b); durante este nível de tensão, o material sofre uma transformação de fases induzida pela tensão (b-c) na qual a austenita se converte em martensita, e assim, causa grandes deformações inelásticas no corpo. Durante a

região (c-d), não há transformação de fases, senão reorientação das maclas da martensita, de forma que a condição para aplicar um carregamento multiaxial se torna possível. Ao atingir o ponto (d), inicia-se a transformação de martensita em austenita, o que traz consigo a recuperação das deformações inelásticas. No ponto (e) do gráfico, o material se converte totalmente em austenita, e após o segmento final do caminho do carregamento (e-a), existe recuperação das deformações termoelásticas e, como consequência, zero deformação macroscópica. O processo de transformação resulta em uma histerese que reflete a energia dissipada no ciclo Gupta et al. (2012).

4.2.3 - Efeito de amortecimento

Segundo Gupta et al. (2012), o efeito de amortecimento é a dissipação de energia mecânica em calor, e apesar de esta ser uma característica exibida em todos materiais, nas SMAs existe uma capacidade muito acima da maioria de outras classes de materiais. O que faz as SMAs se destacarem como amortecedores são as interfaces ligadas à transformação martensítica, sendo tais fenômenos: transformação entre austenita e martensita, transformação entre diferentes variantes de martensita, e maclas dentro da martensita. As SMAs mesmo quando sob transformações termoelásticas, ainda assim, haverá transformações irreversíveis, como produção de defeitos e movimentos de discordâncias. A histerese observada na superelasticidade é uma manifestação de energia de dissipação, sendo que o amortecimento é a razão da energia dissipada com a energia total, e uma das variáveis associada a tal razão é a temperatura. Como consequência disto, existem três regimes de amortecimento distintos nas SMAs: (i) quando a liga está em fase austenítica, em temperaturas maiores que a temperatura de transformação martensítica e sob baixa excitação mecânica, a capacidade de amortecimento é baixa; (ii) Em temperaturas abaixo do fim da transição de fases martensítica, o número de interfaces cresce, e por consequência, a capacidade de amortecimento aumenta; (iii) Em temperaturas acima do início da transformação austenítica e com tensões altos de forma a induzir martensita, a capacidade de amortecimento é máxima, porque haverá criação e deslocamento das interfaces austenita-martensita,

acompanhado de um alto nível de produção de defeitos e acoplamento termomecânico.

4.2.4 - Principais SMAs e rotas de processamento

Como relatado em Gupta et al. (2012) e Lexcellent (2013), o comportamento de efeito memória pode ser observado em diversas ligas, a exemplo do: Au-Cd, In-Ti, Au-Cu, Fe-Pt etc. No entanto, poucas ligas são utilizadas industrialmente, seja por questão de custo financeiro ou por propriedades que inviabilizam o seu uso comercial, a exemplo da liga Fe-Mn-Si, sendo que esta exhibe altas temperaturas de transição.

As categorias mais utilizadas são:

- Ligas de Cobre: Cu-Zn, Cu-Al, Cu-Sn, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni;
- Ligas de NiTi: Tanto como liga binária, como com elementos de liga como Cobre, Ferro, Paládio e até mesmo o Háfnio.

As principais ligas de cobre são a Cu-Zn e Cu-Al. A presença de um terceiro elemento permite reduzir as temperaturas de transição de forma. As SMAs de cobre possuem uma menor histerese que as NiTi. A liga Cu-Zn-Al é uma liga de fácil processamento e baixo custo, como é possível de se imaginar, contudo, tem uma tendência de decompor suas fases de equilíbrio quando aquecidas, o que traz a estabilização da martensita, e se lembramos sobre o efeito de memória de forma, é importante que haja uma boa transição de fases para a recuperação do formato. Sobre a engenharia de microestruturas, é possível o engenheiro ou cientista de materiais produzir grão de 50 – 100 nm de tamanho com a adição de Co, Zr, B e Ti, o que pode ser importante quando se busca determinadas propriedades mecânicas. A adição do boro pode aumentar a ductilidade da liga. Outro fator interessante é que é possível ter tal liga na forma monocristalina.

As ligas de Ni-Ti são os principais materiais no que tange o setor comercial de SMA, sendo usualmente conhecidas por Ni-Ti-NOL ou Nitinol, sendo o NOL um acrônimo para *Naval Ordnance Laboratory*, que foi o laboratório responsável pela pesquisa e desenvolvimento desta liga. Ainda que o custo financeiro seja alto, é um

material importante para aplicações que dependem de um forte comportamento de memória de liga e deformações dimensionais resultantes da transformação de fase em aproximadamente 8%. As propriedades do Nitinol não seguem uma tendência previsível, senão que são dependentes da composição exata e da forma do processamento da liga, inclusive considerando diferentes formas de tratamento termomecânico e trabalho à frio, logo, a determinação das temperaturas de transformação martensítica e austenítica é algo incerto. Esta liga tem as vantagens como: baixa densidade (cerca de $6,5 \text{ g/cm}^3$), boa resistência à corrosão, não magnética, alta resistência à fadiga e excelente capacidade amortecimento em temperaturas intermediárias às de transição de fases austenita-martensita e vice-versa e resistência ao aquecimento. Outra propriedade interessante das ligas de Nitinol é a faixa de transições de fase, que costumam ser entre 70°C à 90°C Motzki et al(2022).

Sobre o processamento de SMAs Behera (2021) e Lagoudas (2008), não há grandes diferenças se comparado a outras ligas metálicas não SMA, podendo ter uma vastidão de rotas de processamento. No entanto, deve-se atentar ao tamanho de grãos, considerando que menores grãos incrementam a superelasticidade, e isso pode ser alterado em mecanismo de aquecimento por um tempo maior. Outra questão relevante é o trabalho a frio, em que dependendo das circunstâncias e variáveis, pode reduzir a capacidade de histerese do material, apesar de aumentar a resistência à tensão, enquanto o recozimento aumenta a capacidade de histerese do material, porém, reduz sua resistência à tensão. Ou seja, para um engenheiro de materiais responsável pela obtenção e processamento de uma SMA, pode ser interessante utilizar da etapa de trabalho a frio e posteriormente, o recozimento, de forma a procurar um ponto ótimo das propriedades mecânicas para a determinada aplicação.

Outro fator que merece atenção é o controle da temperatura e tempo no processo, pois essas variáveis podem provocar facilmente uma mudança composicional; um exemplo para as ligas de TiNi, em que o diagrama de fases contém várias composições. Ademais, a temperatura e o tempo podem afetar em geração de precipitados na matriz, o que por sua vez podem promover o envelhecimento da liga. Provocar precipitados pode ser uma opção em detrimento

de um forte trabalho a frio, visto que o trabalho a frio promove muitas discordâncias que obstruem a mobilidade das maclas.

O uso de elementos de ligas pode alterar as propriedades termomecânicas do material, e como exemplo, os elementos Fe, Al, Cr, Co e V nas ligas de NiTi reduzem a temperatura de transição para a geração de martensita, enquanto Nb aumenta o efeito de histerese e o Cu causa uma redução da histerese.

Apesar da vasta gama possível de rotas de processamento, podemos citar as principais como: fundição a vácuo, metalurgia do pó, fundição por plasma, *thermal spray*, *Magnetron Sputtering Deposition* e manufatura aditiva Behera (2021)

De acordo com Behera (2021), uma consideração a ser feita é que o efeito de memória de forma não está restrito somente às SMA, apesar destas ligas comporem as principais aplicações. Dentro deste universo, existem polímeros e cerâmicas.

Para os polímeros, os principais termoplásticos e termofixos com efeito de liga são: PLA, PTFE, PU e PLA British Plastics Federation (2022) e Lendlein et al. (2002). Conceitualmente, o mecanismo de efeito de liga é similar ao efeito das SMAs, exceto pelo fato de que não há presença de fase martensítica e austenítica, senão somente um efeito de transição de fases após uma determinada temperatura, e que inclusive pode coincidir com a T_g Behera (2021) e Mather et al. (2009). Um fato intrigante é que este comportamento nos polímeros pode ser estimulado não tão somente por efeito térmico e/ou mecânico, ou seja, pode-se incluir a estimulação por meio magnético, luminoso, elétrico e pela umidade Behera (2021) e Mather et al. (2009).

Já para as cerâmicas, em algumas delas existe transformação de fases entre austenita e martensita, após a fase austenítica sofrer uma determinada tensão de compressão, e com o aquecimento, é possível o material retomar a fase austenita. Um exemplo de material do qual exhibe este comportamento é a Zircônia (ZrO_2) dopada com CeO_2 , Y_2O_3 , ou MgO Behera (2021)

4.2.5 - Aplicações e tendências futuras

Devido as suas incríveis propriedades em peso, eficiência energética e flexibilidade em se construir uma peça, além da possibilidade de atuadores e sensores inteligentes, existe uma grande gama de aplicações diversas, ao ponto que a empresa *Actuator Solutions GmbH*, que é uma empresa bastante relevante no mercado de atuadores de SMA, produz mais de 10 milhões de atuadores de SMA por ano Motzki et al. (2022).

No setor de bioengenharia, essas ligas tiveram um grande êxito devido às suas propriedades, além de possibilitarem melhor performance se comparado a outras ligas dependendo da aplicação e reduzir a invasividade de tratamentos médicos, principalmente cirúrgicos. Outro fator interessante se deve à biocompatibilidade das ligas em aplicações biomédicas como: implantes ortopédicos, equipamentos cardiovasculares, instrumentos cirúrgicos, além de uma vasta área odontológica. Ossos quebrados podem ser emendados por SMA. Outra função muito utilizada são implantes de quadril, devido à superelasticidade. O uso em cateteres e similares para desentupimento de veias e vasos sanguíneos é comum, porque a própria temperatura do corpo pode causar a dilatação dos vasos. No caso de fios para uso odontológico, a maior relevância não é o efeito de memória, senão a superelasticidade, além da capacidade dos fios retomarem sua forma original após a remoção das tensões. Outro item são as armações de óculos. Gupta et al. (2012), Pfeifer et al. (2013) e Duerig et al. (2003)

Outra aplicação é no uso para controle de fluidos, como a água. Podemos usar em tubulações ou qualquer mecanismo que envolva fluxo de fluidos, e de acordo com a temperatura, é possível restringir o fluxo ou qualquer coisa que envolva temperatura e fluidos. Ou seja, pode ser importante em plantas industriais, seja como parte do processo, seja como um equipamento de segurança, principalmente na indústria petroquímica, farmacêutica, em semicondutores, ou *boiler* de petróleo e gás Naresh et al. (2016).

As linhas de produção possuem um relevante número de atuadores pneumáticos. Esses atuadores consomem muita energia e isso tem sido um custo de produção de impacto. Visando solucionar isso, uma nova fronteira de aplicação dos SMA é o uso em garras e manuseio de materiais, inclusive por poderem ser eletrificadas. Aliado a esse propósito, um novo campo são os músculos artificiais na

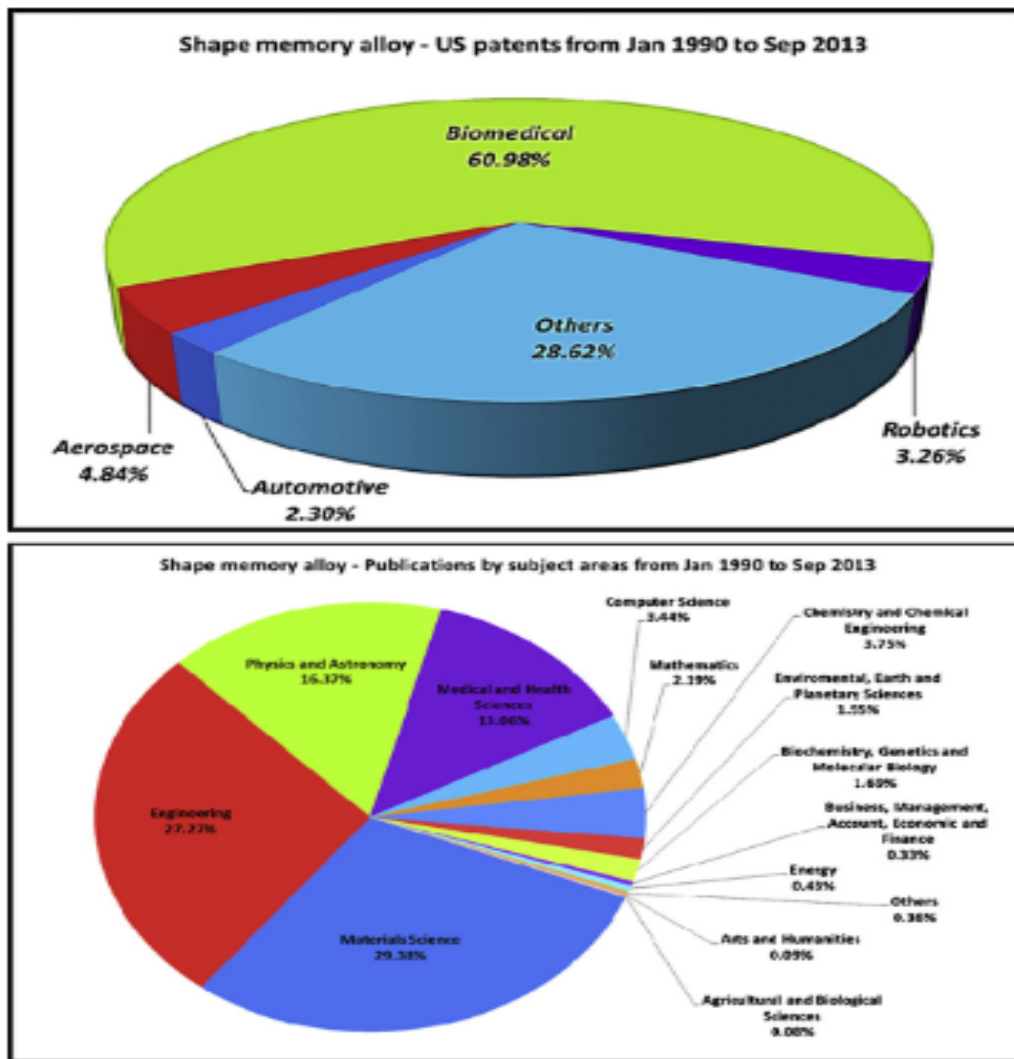
mecatrônica, em que por meio das ligas SMA leves, tenta-se aplicar o biomimetismo do corpo humano em equipamentos industriais, principalmente garras. Motzki et al. (2019) e Motzki et al. (2022)

As hélices de helicóptero também podem utilizar SMA devido ao efeito de amortecimento que ajuda no controle vibracional, dando maior precisão ao voo, além de diversos outros atuadores Gupta et al. (2012), Hartl et al. (2007) e Jani et al. (2014).

Na indústria automobilística, o número de atuadores de SMA é alto, e seu uso está em ascensão ao longo do tempo, principalmente em aplicações direcionadas à segurança e ao conforto do passageiro, como para auxiliar a tecnologia *drive-by-wire*. Os componentes mais usados são atuadores lineares – retrovisor, trava de portas, *flaps* de controle do tempo – e atuadores ativados termicamente – embreagem da transmissão mecânica, controle de temperatura do motor, carburador etc. Além disso, o uso das SMAs está se ampliando em outras partes de um veículo, como na aerodinâmica e aplicações estéticas Jani et al. (2014) e Jani et al. (2014).

Na figura 6, é possível verificar através das patentes registradas nos EUA que a maior parte das inovações e novidades envolvendo SMA são incomparavelmente o setor biomédico; vale salientar que ainda assim há diversas aplicações, além das principais. Contudo, quando vemos as áreas de pesquisa através das publicações científicas, é notável a diversificação de áreas para aplicações em um futuro próximo.

Figura 6: Gráfico contendo a porcentagem de setores em que as SMA são aplicadas e estudadas de Janeiro de 1990 à Setembro de 2013, no primeiro gráfico, patentes registradas nos EUA e no segundo, publicações científicas.



Fonte: Jani et al. (2014)

Segundo Van Humbeeck et al. (1991), as tendências futuras para as SMAs seguem três diferentes perspectivas:

- Desenvolvimento de novas ou melhoria das já existentes SMAs.
- Combinação de propriedades funcionais de SMAs com outras classes de materiais (exemplo: compósitos).

- Busca por novos mercados.

Uma das novas fronteiras desta classe é conseguir operar temperaturas de transição de fases em diversas faixas possíveis, como feito no estudo de Khan et al. (2013). As ligas de ferro possuem grande importância cotidiana, além de terem a possibilidade de gerarem fase martensítica, logo, outro campo é o desenvolvimento de ligas de ferro com efeito de memória, uma vez que algumas ligas de ferro até possuem efeito de memória quando submetidas a tensão mecânica, além de uma larga histerese Naresh et al. (2016).

De acordo com Jani et al. (2014), existem 3 principais áreas de pesquisa e desenvolvimento usando as SMAs que visam novas propriedades, aplicações ou melhorias:

- Biomédica: músculos artificiais, implantes de liga de memória, SMA atóxica.
- Robótica: microatuadores com maior velocidade, atuadores rotacionais, além de atuadores estáveis, eficientes e precisos.
- Automotivo e aeroespacial: Atuadores rotacionais, atuadores para altas temperaturas, atuadores auto regenerativos e sensores de estrutura/componentes e capacidade de transformação para características aerodinâmicas e estéticas.

Outra fronteira a ser rompida é a da computação. Campos de pesquisa envolvendo modelagem e simulação computacional, além do desenvolvimento de design e análise por meio do CAD e FEA Jani et al. (2014) e Naresh et al. (2016).

4.3 - PIEZOELÉTRICOS

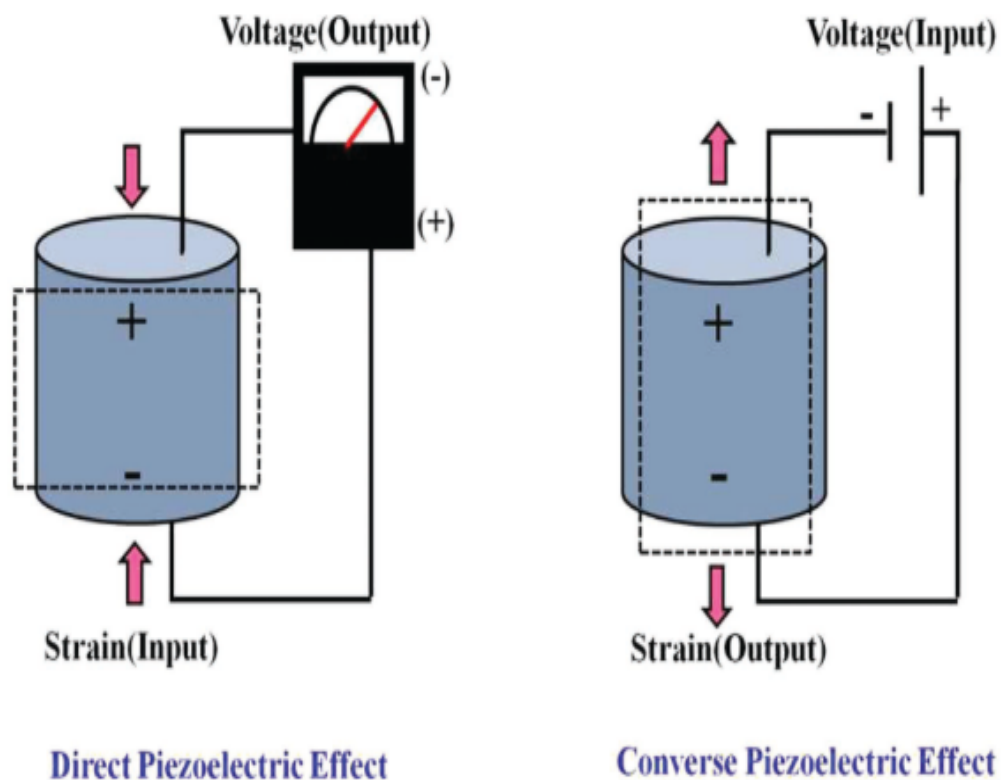
O termo piezoelétrico tem a sua etimologia da língua grega, em que o termo *piezo* significa pressão, e claramente, eletricidade refere à cargas elétricas Bogue (2014). Ou seja, o material piezoelétrico converte energia mecânica em energia elétrica e vice-versa. Diante dessa propriedade particular, é uma classe de materiais com grande relevância no uso em transdutores. As classes de materiais que desenvolvem esse fenômeno são inorgânicos (cristais ou cerâmicas) e polímeros Hamdi et al. (2018), sendo a segunda classe citada com um promissor futuro por ser

leve, com baixo custo, flexível e fino. Existem dois efeitos importantes para a análise dos fenômenos envolvendo piezoelétricos: efeito piezoelétrico direto e indireto.

4.3.1 - Efeito piezoelétrico direto e indireto

O efeito piezoelétrico direto ocorre quando uma tensão mecânica é submetida no piezoelétrico de forma a produzir energia elétrica; este tipo de efeito igualmente é chamado de efeito gerador ou efeito sensor, e logo se torna fácil se inferir que, sob essas propriedades, o material costuma ser utilizado em dispositivos de sensores Bogue (2014), Liu et al. (2018) e Shackelford (2015).

Figura 7: Representação do mecanismo de efeito piezoelétrico direto e indireto.



Fonte: Mishra et al. (2019)

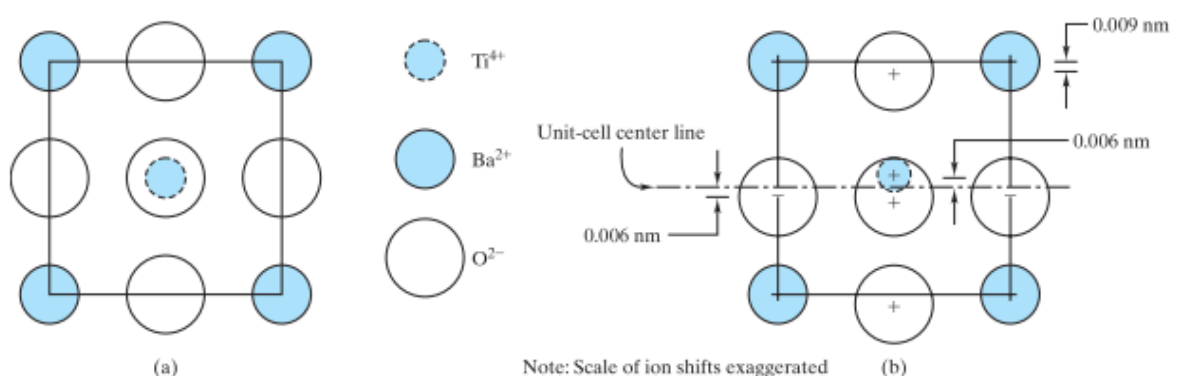
O efeito piezoelétrico inverso é uma propriedade na qual o material se deforma após a aplicação de tensão elétrica, sendo geralmente utilizado em atuadores. Drossel et al. (2015) e Liu et al. (2018). O mais interessante nesse efeito é que, mesmo sob tensões elétricas altas, o material tem uma mudança dimensional baixa, num nível de precisão micrométrica, e como consequência, os piezoelétricos

são excelentes em instrumentos de precisão e localização de objetos, além do uso em atuadores Bogue (2014) e Mishra et al. (2019).

4.3.2 - Efeito piezoelétrico numa perspectiva microestrutural

O fenômeno piezoelétrico é promovido pela microestrutura do material, descrevendo melhor, a célula unitária cristalina é a principal responsável por este fator. Em uma célula unitária, é previsto que haja um balanço entre cargas positivas e negativas, porém, em piezoelétricos existe um dipolo entre as cargas devido às posições dos átomos dentro da célula Callister et al (2012). A fim de exemplificar, o gráfico abaixo ilustra em uma célula iônica com tal comportamento.

Figura 8: Estrutura cristalina BaTiO_3 . Na primeira imagem, é a sua configuração acima da T_c , enquanto na segunda, temos a figura demonstrando abaixo da T_c .

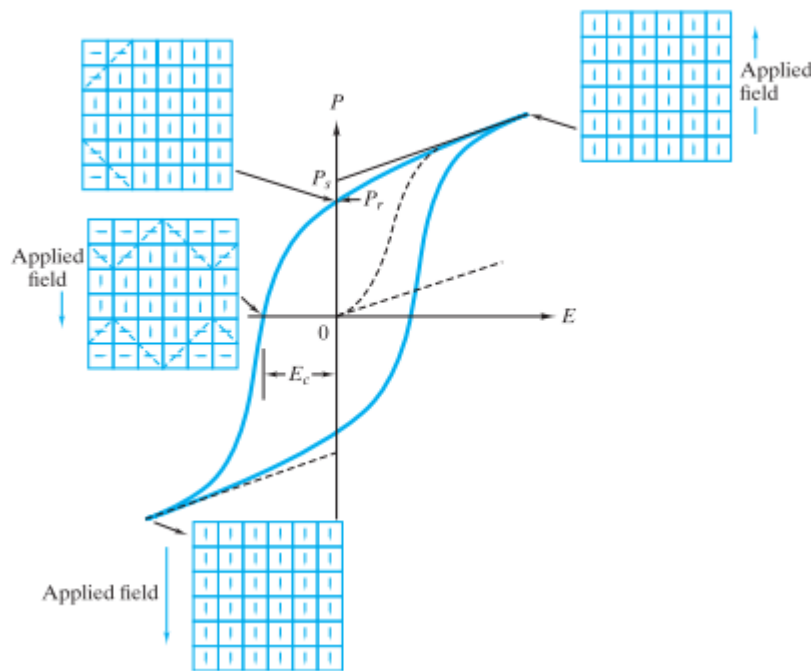


Fonte: Shackelford (2015).

Nas estruturas mostradas na figura 8, vemos o BaTiO_3 , um material ferroelétrico que reproduz o comportamento piezoelétrico abaixo da T_c . Todos os materiais ferroelétricos exibem piezoeletricidade, apesar de que a afirmação inversa não é verdadeira. O BaTiO_3 possui uma estrutura tetragonal distorcida, em que se forma um dipolo na célula unitária devido à assimetria das posições atômicas devido ao Ti^{4+} não estar alinhado com o íon O^{2-} . No entanto, esse comportamento é reversível em ferroelétricos quando se alcança a T_c , em que há mudança de fases que torna a célula unitária simétrica. Em uma célula monocristalina, existe somente um domínio ferroelétrico, ou seja, todos os dipolos resultantes da estrutura já estão

em uma única orientação, enquanto que nos policristalinos existem diversos domínios ferroelétricos (não confundir com grãos) desalinhados quando não submetidos à força externa Callister et al. (2012) e Shackelford (2015).

Figura 9: Curva de histerese polarização x campo elétrico num material ferroelétrico.



Fonte: Shackelford (2015).

De acordo com a curva de histerese, quando aplicamos uma tensão elétrica, os domínios ferroelétricos se alinham, resultando em um único sentido de polarização quando sob um único campo elétrico máximo (em módulo). Há um determinado campo elétrico (em módulo) que a polarização será nula. Quando o campo elétrico é nulo, o material retoma a sua polarização original. E obviamente, isso é relevante para o controle do comportamento piezoelétrico, tendo em vista que é uma função da polarização no material.

As equações constitutivas que dirigem os efeitos diretos e indiretos de piezoelectricidade são demonstradas na matriz abaixo Erturk et al. (2011) e Liu et al. (2018):

$$\begin{bmatrix} \delta \\ \sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S^E & d^t \\ d & \epsilon^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E \\ T \end{bmatrix}$$

Na equação acima, δ representa a deformação e σ a tensão; D é a polarização dielétrica e E o campo elétrico; s é a compliância elástica (inverso da rigidez), ϵ é a constante dielétrica, d é o coeficiente piezoelétrico; E e T são consideradas para campo elétrico e tensões constantes, sendo T o tensor de tensões; t representa a transposição. Ou seja, existe de fato correlação entre estados de tensão e campo elétrico e vice-versa. Após certas deduções Aabid et al. (2021) e Chopra (2002), temos como equações para o efeito direto e indireto piezoelétrico respectivamente:

$$D = dT + \epsilon E$$

$$S = sT + dE$$

4.3.3 - Principais materiais piezoelétricos e rotas de processamento

O pré-requisito para a possibilidade de ser um material piezoelétrico é possuir uma estrutura cristalina, ou pelo menos possuir regiões com uma estrutura similar à cristalina. Materiais cristalinos são caracterizados por repetição de rede atômica regular em todas as direções do espaço, sendo a menor unidade desta rede a célula unitária Rupitsch (2019).

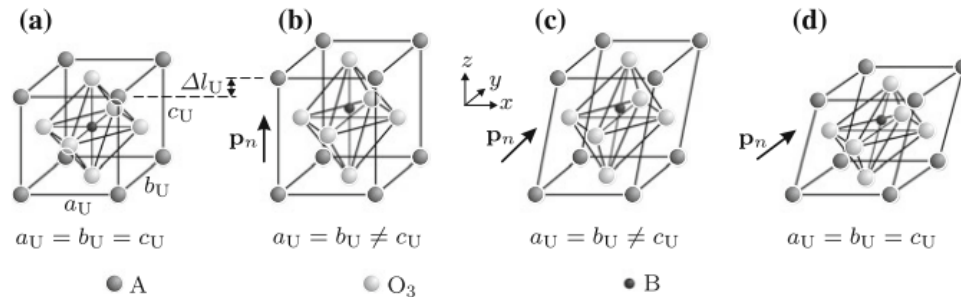
Em questão de classificação, temos 4 tipos possíveis de materiais Hamdi et al. (2018), Li et al. (2014), Mishra et al. (2019), Rupitsch (2019) e Usher et al. (2018):

1. Monocristalinos: existe uma vasta gama de piezoelétricos monocristalinos, que podem ser divididos de acordo com a ocorrência natural (ex: quartzo) e sinteticamente produzidos (ex: niobato de lítio). São materiais com maior tendência a serem melhores piezoelétricos. Os materiais ferroelétricos, quando são monocristalinos, possuem maior constante de tensão piezoelétrica, devido ao maior alinhamento dos dipolos elétricos, como foi verificado na seção 3.3.2. No entanto, possuem menor módulo de Young,

logo são menos rígidos que as policristalinas; apesar disto, há um benefício na menor frequência de ressonância para dispositivos pequenos. Exemplos: α -quartz, β -quartzo, turmalina, GGG, Niobato de lítio e Tantalato de Titânio; sendo as 3 primeiras de ocorrência natural, e as 3 últimas feitas sinteticamente. Devido à complexidade de fabricação e aos altos custos, o uso de cristais monocristalinos é menor que o das cerâmicas, além da fragilidade resultante da falta de contornos de grão. As vias de processamento possuem uma grande flexibilidade, de acordo com o uso; não há segredo para processar.

2. Cerâmicas piezoelétricas policristalinas: cerâmicas policristalinas são os materiais mais utilizados para aplicações piezoelétricas, tanto pelo seu custo, como simplicidade de processo, além da maior flexibilidade de engenharia de estruturas, resultando em maior facilidade de controle das propriedades. Existem uma variedade de composições químicas que fornecem essa propriedade, ainda assim, esse fenômeno está associado à estrutura química, sendo geralmente materiais com estrutura do tipo Perovskita, com fórmula química ABO_3 , sendo A e B dois cátions de tamanho diferente, e O_3 um ânion; os cátions A são maiores que B e localizados no centro das faces da célula unitária, O_3 no centro das faces, e dependendo do estado da célula unitária, o pequeno cátion B está no centro ou próximo, sendo que o fenômeno para tais materiais foi explicado na seção 3.3.2. E para haver o efeito piezoelétrico, é necessário o desalinhamento entre o cátion B e o O_3 , o que não ocorre na célula cúbica, como demonstrado na figura 9. O processamento costuma seguir esse padrão: (i) mistura, (ii) calcinação, (iii) conformação, (iv) sinterização, (v) aplicação de eletrodos para reforçar a polarização do corpo, e às vezes, (vi) polimento. O tipo de conformação depende da aplicação, podendo ser feito de forma variada. Igualmente, dependendo da aplicação, podem haver outras formas de processamento, como deposição de solução química (ex: sol-gel), deposição física de vapor (sputtering) e outros, principalmente quando é necessário gerar produtos com filmes e afins. Exemplos de cerâmicas piezoelétricas: PZT, Titanato de Bário e Niobato de Potássio.

Figura 10: células unitárias de uma estrutura do tipo Perovskita ABO_3 , respectivamente: cúbica, tetragonal, ortorrômbica e romboédrica.



Fonte: Rupitsch (2019)

3. Polímeros: Essa classe de materiais é uma nova fronteira de crescimento dos piezoelétricos por terem boa flexibilidade, o que faz com que suportem altas tensões, principalmente em aplicações que envolvam torções e dobragem. Encontra-se esse fenômeno no Fluoreto de polivinilideno-trifluoro etileno (PVDF-TrFE), celulose e seus derivados, poliamidas (PA), ácidos poliláticos (PLA), entre outros. O que causa esse fenômeno nos polímeros é a estrutura polar de uma molécula que resulta em dipolos. Apesar disto, possui um coeficiente piezoelétrico baixo se comparado a uma cerâmica piezoelétrica e demandam maiores campos coercitivos para reverterem a polaridade (o que está associado a principal componente de polarização sua ser de orientação à nível molecular), além do envelhecimento. Outro problema em relação à aplicação dos polímeros é o ciclo de fadiga, pois enquanto a indústria trabalha com padrões de 10^8 ciclos de polarização, o PVDF (principal polímero em aplicações) suporta cerca de 10^6 ciclos, o que é bem menor que óxidos cerâmicos piezoelétricos, que suportem mais de 10^{12} ciclos. Os polímeros são usualmente utilizados na forma de filmes finos, processados por *spin coating*, *electrospinning*, *replica molding*, processos de

litografia, *screen printing* e *casting*. Outra forma de uso, além dos filmes, são placas com sanduíches de sólido polimérico e células gasosas, de forma que as células gasosas se ionizam, assim acelerando e reforçando os efeitos de polarização no dispositivo. Alguns polímeros também exibem comportamento de histerese.

4. Compósitos: O uso de compósitos e nanocompósitos tem se mostrado relevante para modular e melhorar propriedades de diferentes materiais piezoelétricos. Um exemplo são partículas de PZT em uma matriz de polimérica reforçada, em que é possível combinar as propriedades piezoelétricas de uma cerâmica com a flexibilidade mecânica de um polímero. Vale salientar que a combinação anterior não é a única, de fato, alguns compósitos cerâmica-polímero piezoelétricos exibiram algumas propriedades melhores que somente um material cerâmico ou polimérico. Existem outros compósitos em estudo, combinando classes diferentes de materiais – cerâmicas, metais, materiais híbridos, biomateriais etc – em escala macro, micro e nano dimensionais. Vale salientar que no caso dos compósitos cerâmica-polímeros, a geometria de dispersão do reforço e matriz igualmente altera as propriedades piezoelétricas, exemplo: quando a cerâmica está na forma de fibras ou laminados na matriz polimérica é possível observar melhor propriedades piezoelétricas, desde que a direção longitudinal dos reforços estejam na direção paralela ao dipolo; enquanto compósitos em que o reforço cerâmico esteja na forma de partículas na matriz se verifica propriedades piezoelétricas fracas.

4.3.4 - Aplicações e tendências futuras para os piezoelétricos

Uma das principais aplicações dos piezoelétricos é na captura de energia, o que se trata de coletar energia do ambiente para converter em energia elétrica, sendo que os piezoelétricos têm um papel expressivo para tal aplicação, por conseguir capturar energia mecânica e converter em energia elétrica suficiente e adequada para microssistemas, principalmente em sensores, dispositivos *wireless*, equipamentos digitais e IoT - que além de serem um mercado crescente – estas

tecnologias estão sendo utilizadas em regiões remotas ou locais de inviabilidade de uso de baterias (como equipamentos biomédicos, prédios inteligentes ou até mesmo para minimizar o tamanho do dispositivo). Os piezoelétricos têm grandes vantagens para tal uso, como baixo custo, estabilidade, simplicidade de aplicação e alta densidade energética. Como desvantagens, existe campo elétrico máximo suportado pelo material, baixo nível de energia coletada, além de que não podem ser utilizados sozinhos para aplicações que dependem de energia alternada, necessitando um conversor AC-DC. Covaci et al. (2020), Hamdi et al. (2018) e Liu et al. (2018)

Dentro dessa vasta gama de aplicações, pode-se citar algumas como:

- Sensores de impacto: a energia de impacto é função da velocidade e força de um objeto atingido, e esse momento pode ser monitorado por algum dispositivo eletrônico, como um computador. Um exemplo a ser dado são os *airbags* Merhar (1972) e Segui-Gomez (2000), que quando um impacto é desenvolvido, um sinal elétrico é enviado à unidade de controle do sistema do carro, e assim envia à informação ao gerador de gás do insuflador que ative a reação química para a bolsa de ar entrar em ação. Pensando em um uso aplicado a proposta da indústria 4.0, pode-se citar um dispositivo feito pela *XOnano smart foam company*, um capacete de futebol americano com uma espuma polimérica que avisa em tempo real o impacto de cada jogador durante uma partida, a fim de se evitar traumas ocultos ou potenciais riscos neurológicos.
- Registro de atividade biológica: uso de dispositivos e *wearables* que informem atividades de impacto humana, como pressão arterial, batimentos cardíacos, passos dados durante uma caminhada ou corrida e cinética humana, seja para o propósito de entretenimento ou saúde. Um exemplo disso é o uso de PP em filmes porosos (50 µm de espessura) com gás que monitoram a distribuição de forças radiais pelo movimento da contração dos músculos, ou um equipamento desenvolvido pela *Emfit*, no qual se utiliza um filme de PP nas camas para monitorar a atividade respiratória e analisar os dados digitalmente, e assim poder descrever o sono de uma pessoa.
- Aplicações nos transportes: algumas dessas tecnologias vão além de

sistemas embarcados, como no caso do conforto dos passageiros de meios de transportes. Uma tecnologia que pode ser exemplificada é o uso de polímeros piezoelétricos para coletar dados sobre as ondas acústicas no transporte (frequência e amplitude de vibração), e assim uma central de comando envia uma onda sonora que anule ou minimize tais barulhos.

- Sensores tácticos: um sensor tátil é um dispositivo que mede um fenômeno físico, como forma, força e temperatura no toque. É utilizado em uma grande gama de áreas, sendo que a mais fácil de lembrarmos é o uso em telas de celulares, onde há sensores de PP celular que analisam 4 sinais de voltagem diferentes, e assim, com o toque, traduzindo em comandos ao computador dos *smartphones*.
- Aplicações acústicas: transdutores eletromecânicos que operam no espectro acústico (20-20000 Hz), ou seja, faixas de frequência ultra sônicas e infra sônicas. Uma tecnologia cotidiana são os microfones e alto-falantes. Ainda assim, existe um grande mercado de produtos, como equipamentos de ultrassom para a indústria e medicina. Outro sistema são os sensores de emissão acústica, que detectam passivamente ondas acústicas devido à mecânica de um sistema ou mudança de forma de um produto analisado, e isso pode ser importante num contexto de engenharia, por exemplo, para detectar o momento de uma fratura ou falha de um material; o transdutor transmite um sinal e recebe o sinal refletido para detectar qualquer alteração. Transdutores são usados em máquinas automatizadas e imagens médicas, enquanto sensores de emissão acústica são geralmente utilizados onde é necessário o monitoramento contínuo. Para tornar mais simples a explicação, vamos imaginar um cenário industrial: transdutor ultrassônico está embutido em uma máquina utilizada para o controle de qualidade de um determinado material para verificar onde existe alguma falha interna, enquanto o sensor de emissão acústica estaria acoplado a alguma máquina como uma medida de segurança para alertar a fábrica sobre uma falha.

O uso de piezoelétricos como atuadores tem foco em diversas indústrias e produtos, como no setor militar, médico, automotivo (ex: vela de ignição), em câmeras e lentes, computadores e similares, dispositivos eletrônicos etc APC

International (2008) e Yoichi (2006).

De acordo com Covaci et al. (2020) e Liu et al. (2018) e Mahapatra et al. (2021), os prospectos para a ciência e engenharia dos piezoelétricos está em ampliar a miniaturização dos dispositivos, o uso maior de compósitos e polímeros, ampliar a flexibilidade, aumentar as constantes piezoelétricas e crescente uso da nanotecnologia, o que se deve às novas demandas de mercado de tecnologia e ascensão do IoT, em que cada vez mais o mercado requer dispositivos eletrônicos autônomos (ex, dispositivos para smart cities) e/ou operações que querem baixa necessidade de baterias (ou pelo menos baterias que operem por menor tempo). Ou seja, o foco da pesquisa e desenvolvimento que engloba os piezoelétricos será no uso em captação de energia, visando principalmente sensores. A tendência é que o consumo de piezoelétricos cresça devido aos wearables, câmeras, tecnologia de monitoramento, veículos elétricos e/ou autônomos, eletroeletrônicos etc. Outra tendência é ampliar a captação de energia de energia cinética para além de vibrações mecânicas e movimentos humanos, sendo assim, a colheita de energia poderia se dar pelo movimento dos ventos, impactos pelas gotas d'água da chuva, no pavimento de estradas, ondas do mar e outras fontes de energia mecânica. O propósito desse uso em captação de outras fontes de energia seria *a priori* a alimentação de pequenos dispositivos eletrônicos.

Outro ponto sobre o futuro é o uso de piezoelétricos sem chumbo, porque apesar de estar presente em cerâmicas com boas propriedades piezoelétricas, o custo disso é que tal elemento é tóxico e venenoso, e dependendo das concentrações, pode afetar o meio ambiente e a saúde humana Kwok et al. (2010).

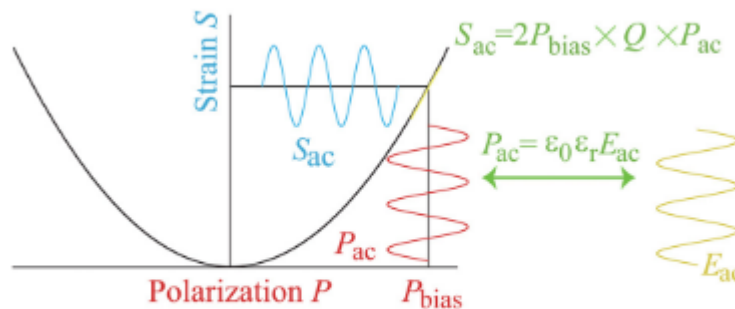
4.3.5 - Considerações sobre eletroestrutores

De acordo com Jan et al. (2016) e Li et al. (2014), a eletrostrição é um efeito que ocorre com todos os dielétricos ou isolantes, sendo um tipo de piezoelectricidade em que, com o campo elétrico aplicado ao corpo, a deformação é quadrática, e assim sendo possível relacionar a polarização com a tensão mecânica ou elétrica, apesar que os principais materiais com este efeito são principalmente ferrícos e com estrutura do tipo Perovskita, devido a sua polarização permanente, o que a

níveis práticos, pode-se afirmar que materiais com eletrostrição relevante pertencem ao conjunto dos piezoelétricos.

A eletrostrição é caracterizada pela não-linearidade das respostas do material no que tange fenômenos mecânicos e elétricos, enquanto nos piezoelétricos tradicionais a resposta é linear. Na figura 11, é possível verificar a curva quadrática entre tensão mecânica e polarização, o que confirma a afirmação anterior.

Figura 11: Gráfico esquemático da tensão por polarização em um eletrostritor.



Fonte: Li et al. (2014)

Para níveis práticos, nesta classe de materiais, observa-se um comportamento de histerese entre as variáveis campo elétrico e tensão mecânica, tensão e polarização, além da presença de relação não linear entre a polarização e o campo elétrico, tal como pode ser observado na figura 12.

Figura 12: Curvas de campo elétrico por polarização, campo elétrico por tensão e tensão por polarização em um dielétrico não linear (PMN orientado [001]).

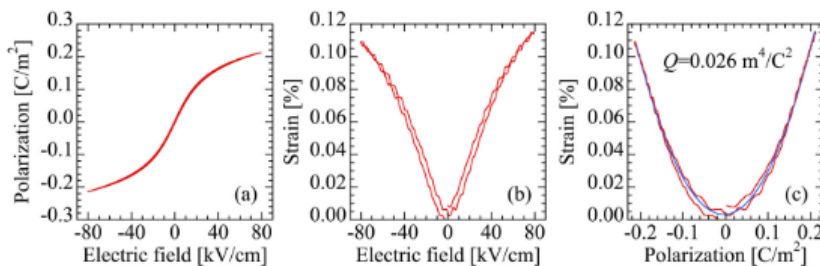


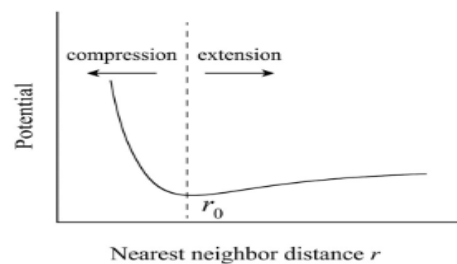
FIG. 3. The polarization-electric field, strain-electric field, and strain-polarization loops for nonlinear dielectrics (taking [001] oriented PMN crystal as example).

Fonte: Li et al. (2014).

Tal como explicado sobre os piezoelétricos, este efeito de histerese é resultado da orientação dos domínios ferroelétricos.

A origem da eletrostrição se dá na polarização induzida por íons, ao se afastarem e retomarem sua posição de equilíbrio, ou seja, na variação dos parâmetros de rede. Na rede cristalina com centrossimetria, esses deslocamentos induzidos dos íons na rede quase se cancelam, mesmo que a diferença nos deslocamentos devido à desarmonia potencial gera tensão na rede. O comportamento tensional está ligado à energia potencial de ligação iônica, em que existe um ponto de menor energia potencial, sendo este o equilíbrio, e para estirar as ligações, é necessário dispor energia potencial de U_e (energia potencial de estiramento), assim como para comprimir é necessário dar energia potencial de compressão U_c . Na figura 13, é possível constatar que a energia de compressão é maior que a de estiramento.

Figura 13: relação do potencial e distância entre íons.



Fonte: Li et al. (2014)

Logo, quando há um estiramento, os ânions e cátions vão se locomover de forma a gerar um dipolo elétrico, sendo este efeito analisado através das equações de Maxwell, em que:

$$S_m = -1/2 s \epsilon E^2$$

Sendo S_m a tensão longitudinal induzida pela tensão de Maxwell, s é a componente de compliância elástica, E o módulo de Young e ϵ é a permissividade dielétrica.

A deformação de tensão de Maxwell é causada pela cargas livres nos eletrodos, enquanto para a eletrostrição é pela desarmonia do potencial do cristal

iônico. E essa informação é importante pois, para a medição da histerese tensão-campo elétrico, estas duas formas de tensão se misturam. Logo, os coeficientes estritivos aparentes (MM ou QM) são:

$$M_m = (S_m/E^2) = -(1/2)s\varepsilon$$

$$Q_m = (M_m/\varepsilon^2) = -(1/2)(s/\varepsilon)$$

A partir da equação supracitada, materiais com alta permissividade elétrica ou alta complacência elástica mantêm alta capacidade de eletrostrição.

As características microscópicas são a chave para efeitos dominantes da eletrostrição, como raio, carga iônica e estrutura cristalina. Exemplo, o ABO_3 e ABF_3 possuem estrutura do tipo Perovskita similares e com boa ordem, porém, devido ao F^- ter maior capacidade de polarização que o O^{2-} , o efeito magnetostrictivo é maior para o ABF_3 , devido ao efeito de eletronegatividade e valência. Outro fator gerador de maior eletrostrição é a ordem iônica, em que materiais com estrutura mais ordenada conseguem ter maior polarização.

Uma forma de mensurar o efeito eletrostritor é através do coeficiente de polarização Q. E para isso, têm-se as fórmulas, sendo ε a permissividade dielétrica e s a complacência elástica:

$$Q = 1/\varepsilon = s$$

Ou seja, com esse resultado, é fácil analisar porque ferroelétricos e polímeros com alta polarização se destacam em exibir variação dimensional não linear, tendo em vista a sua estrutura bem ordenada, orientada e polarizada.

É intrigante que exista uma correlação entre a expansão térmica e o coeficiente de polarização, tendo em vista que possuem comportamentos similares entre a expansão e a polarização.

Outro fato, enquanto que nos piezoelétricos o efeito eletromecânico tem restrição de temperatura, sendo a T_c o limite, para o fenômeno da eletrostrição há, apesar que claramente, quanto maior a capacidade de polarização, o efeito se torna realmente relevante. Outro efeito comum entre ambos é a questão dos

domínios ferroelétricos, pois o arranjo e orientação destes é função dos efeitos elétricos e mecânicos.

Diante desta similaridade entre piezoelétricos e eletrostritores, diversos materiais categorizados como piezoelétricos compartilham da eletrostricidade, além de terem aplicações e tendências de inovação similares. Exemplo de eletrostritores são Zhang (2012): PZT, TiBaO₃ e PbTiO₃.

4.4 - FIBRAS ÓPTICAS

A fibra óptica é uma fibra flexível e transparente feita através de plástico ou de vidro, com dimensões menores que o diâmetro do cabelo humano. Seu uso se dá através da transmissão de dados por meio da luz transmitida entre o começo e o fim da fibra; a informação é codificada em sinais elétricos, e logo os sinais elétricos são convertidos em luz. Essa tecnologia é vastamente utilizada em comunicações e transmissão de dados Akhras, G. (2000), Bogue (2014), Carter; Norton (2007) e Teja et al. (2012).

A ideia de utilizar ondas de luz para a comunicação é algo antigo, inclusive Graham Bell, em 1880, idealizou um equipamento capaz de aplicar esse conceito, chamado “Fotofone”, que consistia na modulação da luz do sol por meio de uma grade presa a um diafragma flexível. A voz causava movimentação na grade, de forma que a luz solar variava quando recebida no receptor feito de detector de selênio, sendo a tarefa do receptor traduzir as variações da intensidade da luz em corrente elétrica e, a partir disso, recriar a conversa na ligação telefônica. Porém, não deu certo por duas razões: o ar é um meio que causa muita perda da transmissão de onda de luz, além disso, a luz solar não é uma fonte estável de luz, sendo afetada pelo meio.

Figura 14: Fotografias de fibras ópticas submarinas.



Fonte: Yin-can et al. (2018)

Após a invenção do laser, em 1960, o crescimento da pesquisa em ondas de luz cresceu muito, e um dos questionamentos dos pesquisadores foi como transmitir ondas de luz de maneira eficaz e com baixas perdas, tendo em vista que a transmissão em atmosfera aberta causa perdas relevantes. Parte da solução pensada foi a construção de tubos para transmitir a luz, inclusive Charles Kao, em 1964, propôs uma fibra óptica de vidro de sílica com perdas de 20 dB/km em substituição ao pulso elétrico em cabos coaxiais metálicos para as telecomunicações, contudo o êxito em se obter uma fibra óptica comercial e com menor perda de transmissão que métodos anterior só foi possível em 1970, *através da Corning Glass Works*. O sucesso da Corning foi tão impactante, que em pouco tempo, houve uma ascensão comercial grande, além de uma evolução da pesquisa e desenvolvimento de tais materiais numa velocidade alta, e que tão breve foi capaz de desenvolver uma fibra com baixo nível de dopagem e índice de refração, o que

garantiu a condução da luz por quilômetros com poucos desvios e perda da transmissão (10 dB/km), sendo que atualmente temos índice de perda menor a 0.15 dB/km Optical Society of America (2001) e Yeh (1990).

As fibras ópticas são utilizadas em transmissão de dados e fotônica, devido às suas habilidades em transmitir dados com velocidades maiores que 10 Gb/s, e assim um meio de transmissão para as telecomunicações eficiente, principalmente à longas distâncias, além de registrar velocidades maiores de transmissão de dados que comunicações a cabo ou sem fio. Outras aplicações são nas áreas de fotoeletrônica, micromáquinas e sensores Addanki et al. (2018).

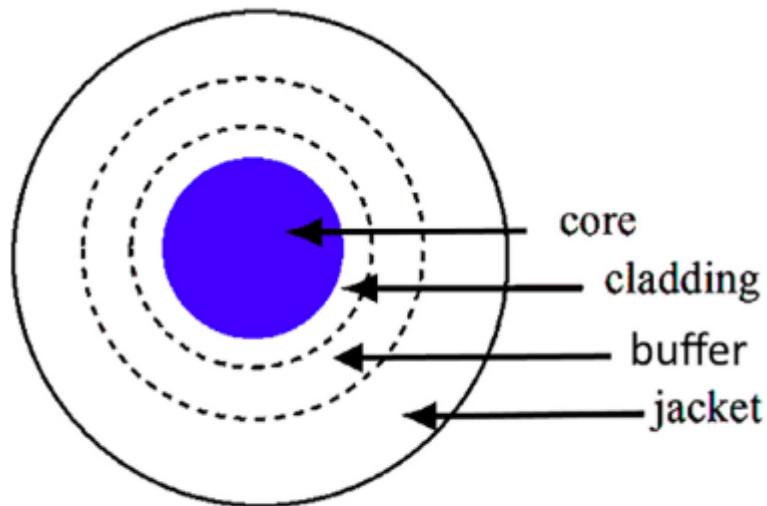
4.4.1 - Mecanismo básico de funcionamento das fibras ópticas.

Para entender o mecanismo básico de funcionamento das fibras ópticas, primeiro é necessário explicar brevemente alguns dos mais importantes fenômenos ópticos que as envolvem Mion et al. (2017) e Rüdiger (2011):

(1) Reflexão: no fenômeno da reflexão, quando a luz incide sobre uma superfície, os raios de luz voltam para o meio incidente com um ângulo de reflexão igual ao ângulo de raio incidente. O exemplo mais simples é o espelho plano.

(2) Refração: quando a luz incide de um meio separado de outro meio, a luz tem a sua velocidade e angulação alteradas quando há mudanças do meio, sendo que a velocidade e a angulação depende do meio que está exposto. O ângulo de refração está associado a lei de Snell: $\eta_1 \sin(\hat{i}) = \eta_2 \sin(\hat{j})$ – onde η_1 é o índice de refração do meio incidente de luz, η_2 o índice de refração em que a luz passa, \hat{i} é o ângulo de incidência e \hat{j} o ângulo de refração.

Figura 15: Estrutura das seções em uma fibra óptica coaxial: núcleo, revestimento, amortecedor e jaqueta. .



Fonte: Addanki et al. (2018).

As fibras ópticas comumente possuem uma estrutura de cilindros coaxiais multicamadas, dividido em três partes Addanki et al. (2018) e Yin-can et al (2018):

(1) Núcleo da fibra: a transmissão de luz numa fibra óptica se dá por meio da reflexão total interna, sendo assim, é primordial que haja um núcleo com vidro ou polímero com alto índice de refração para refletir ao máximo a luz ao longo da fibra, ademais, que tenha um índice de refração maior que o revestimento, para assim se evitar o fenômeno da refração. A maioria das fibras tem o núcleo de Sílica, devido às suas propriedades ópticas e ao seu grau de pureza.

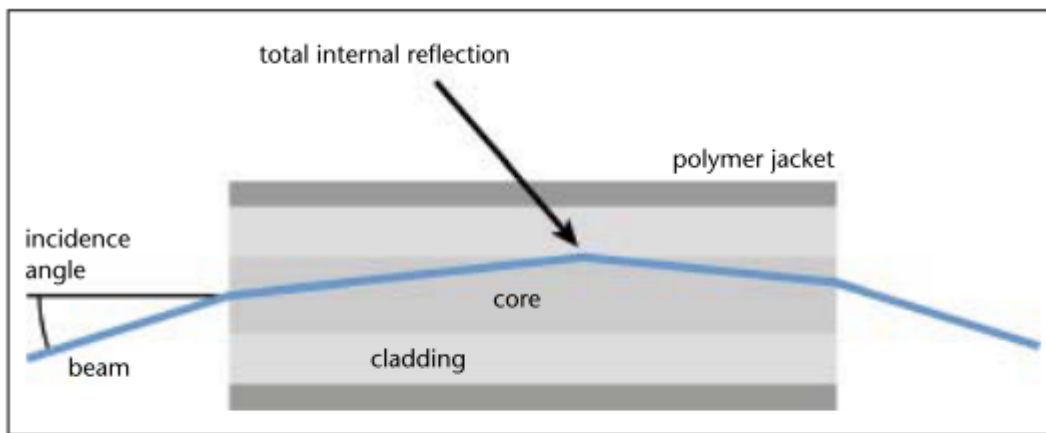
(2) Revestimento: é composto por um vidro/plástico de índice de refração menor que o material do núcleo revestido por um polímero amortecedor, sendo sua finalidade a proteção de danos físicos, isolamento óptico, além de evitar tanto a refração pelo meio externo, tal como perdas por espalhamento causadas por microflexão.

(3) Jaqueta: é uma camada externa de *coating*, servindo como uma camada extra de proteção mecânica, principalmente à abrasão, e proteção do intemperismo

das camadas mais internas.

A transmissão da luz na fibra óptica envolve a reflexão e a refração. Claro que há efeitos secundários, como espelhamento, dispersão e interferência da luz Mion et al. (2017). A figura 16 explica o mecanismo de funcionamento da fibra óptica.

Figura 16: Caminho de um feixe de luz em uma fibra óptica multimodo por reflexão total interna.



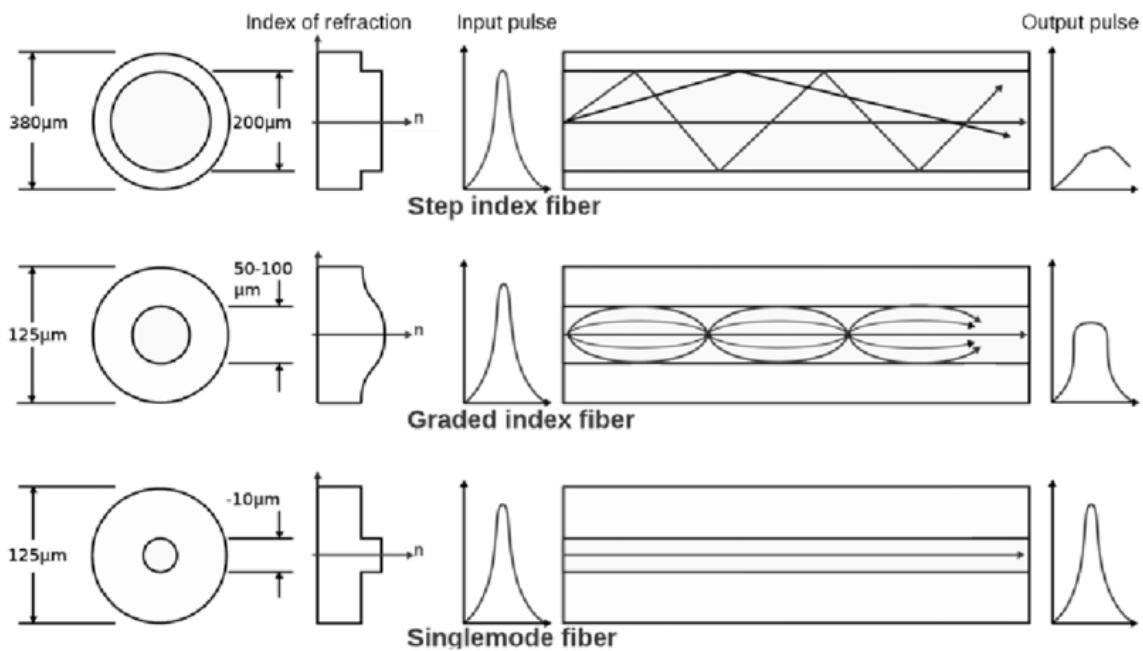
Fonte: Rüdiger (2011)

De acordo com Rüdiger (2011), o transporte da luz na fibra óptica se dá através do envio das faixas de luz com um ângulo que permita a reflexão total da luz dentro no núcleo vítreo, sendo este núcleo revestido com materiais com maior índice de refração que o núcleo para evitar a refração da luz, e a luz vai refletindo entre o núcleo vítreo até o seu destino final, onde será codificada em sinais elétricos.

As fibras ópticas podem ser classificadas em relação aos índices de refração do núcleo e do revestimento, sendo subdivididas em: índice degrau ou índice gradual. Nas fibras do tipo de índice degrau, existe um único índice de refração para o núcleo e um outro para o revestimento; enquanto que, no gradual, os maiores índices de refração estão no centro do núcleo e, gradualmente, há uma redução do índice de refração até o revestimento, sendo que não há uma mudança abrupta de índices refração entre o núcleo e o revestimento Rüdiger (2011) e Teja et al. (2012).

Logo, através dessa classificação, é possível dividir a fibra óptica em três tipos de fibra, de acordo com a associação entre o índice de refração da fibra e o caminho da luz (denominado de modo): monomodo de índice degrau, multimodo de índice gradual e multimodo de índice degrau Teja et al. (2012) e Yeh (1990).

Figura 17: Tipos de modos de uma fibra óptica: monomodo de índice degrau, multimodo de índice gradual e multimodo de índice degrau.



Fonte: Kapoor (2010).

A fibra multimodo de índice degrau possui um revestimento com um índice de refração pouco menor que do núcleo. Como previsto pela teoria, os feixes de luz com angulação maior que o ângulo crítico serão refletidos nas extremidades da fibra, e assim posteriormente transmitidos. O desafio que envolve esse tipo de fibra é que, após uma certa distância, os feixes de luz perdem a energia cinética e, por haver muitos modos na transmissão, logo, não haverá uma trajetória uniforme para os modos, o que por sua vez acarreta que os pulsos chegam à extremidade da fibra em tempos diferentes, o que por sua vez espalha os pulsos e limita a taxa de bits de um sinal digital transmitido Teja et al. (2012).

A fibra de multimodo de índice gradual funciona com um degradê de

vidros/polímeros com índices de refração crescentes em direção ao centro da fibra, onde a luz viaja mais veloz quanto mais distante do centro da fibra (devido ao menor índice de refração). Em uma fibra de índice degrau, a luz é refletida diretamente, enquanto que na fibra de índice gradual, cada camada óptica refrata a luz, de forma que a luz será curvada e transmitida em um padrão próximo ao senoidal. Os feixes de luz que seguem um modo mais longo viajam próximo à parte externa do núcleo com maior velocidade, enquanto os feixes de menor modo viajam mais próximos ao centro do núcleo com menor velocidade média. Por consequência deste efeito, os feixes tendem a atingir a extremidade da fibra em tempos similares, ainda que percorrem caminhos diferentes. Esse tipo de fibra diminui a dispersão modal, que será dissertação à frente Teja et al. (2012).

As fibras de monomodo de índice degrau tem um diâmetro tão pequeno (5-10 μm), que permitem somente um tipo de modo na sua transmissão, logo não há dispersão. Essa fibra tem uma boa capacidade de transmissão em longas distâncias.

Segundo Optical Society of America (2001) e Yin-can et al (2018), existem dois fenômenos associados à perda de transmissão de luz: a dispersão e a atenuação.

A dispersão em fibras ópticas em uma determinada circunstância gera interferência intersimbólica devido à sobreposição entre os pulsos frontais e traseiros, o que por sua vez limita as larguras das bandas e a distância entre as fibras ópticas. Existem três causas relacionadas a esse obstáculo operativo, são as dispersões: cromática, modal e do material Optical Society of America (2001) e Yin-can et al. (2018):

- A dispersão cromática é quando se utiliza uma luz com amplas faixas espectrais, de forma que as ondas de menores comprimentos viajam mais rápido que ondas de maiores comprimentos, assim espalhando o sinal. A solução é utilizar faixas espectrais mais estreitas e, se possível, ondas com um único comprimento de onda.
- A dispersão modal é referente à dispersão que envolve o caminho (igualmente chamado de modo) do feixe de luz. Os transmissores de luz usualmente emitem em diversos modos, e isso como consequência faz com

que haja feixes com modos diferentes, por exemplo, alguns feixes possuem modos axiais, outros em zigue-zague, outros são transmitidos no limite do revestimento etc. Uma forma de se evitar totalmente esse efeito é o uso de fibras ópticas de modo único, pois elas transmitem um único modo de luz, apesar de que por serem mais complexas em uso, sendo que seu uso se restringe a aplicações de longa distância. Outra forma de somente reduzir esse efeito é a utilização de fibras ópticas de índice graduado.

- Dispersão nos guias de luz: a geometria das fibras pode ocasionar velocidades de propagação diferentes para cada modo. Vale salientar que dentre todos efeitos, este é o menor causador de dispersão.

A atenuação é o fenômeno no qual a potência do sinal óptico decai com o aumento da distância de transmissão, seguindo uma lei exponencial. O valor de atenuação é o que determina as distâncias entre repetidores numa fibra óptica. As perdas podem ocorrer por meio de três maneiras: absorção, espalhamento e radiação. A perda por absorção se deve ao fato de a fibra óptica absorver parte da energia luminosa; o efeito pode ser causado por absorção intrínseca da fibra e por impurezas. A perda por espalhamento está relacionada a diferentes índices de refração na fibra, o que pode ter origem em rugosidades e outros efeitos superficiais, além de falhas durante o processamento; logo, a maneira de se evitar é utilizar uma superfície mais lisa e homogênea possível. Já a perda por radiação é induzida pelo vazamento de energia luminosa para o revestimento quando a fibra é dobrada ou torcida; para se evitar isso, molda-se a fibra com uma jaqueta de compressão, assim, quando a fibra for exposta à alguma força mecânica externa, a jaqueta se deforma, mas a fibra se mantém intacta Addanki et al. (2018) e Yin-can et al (2018).

4.4.2 - Principais materiais para as fibras ópticas e formas de processamento

Para a região de transmissão de luz, é necessário um material que possa transmitir a luz de forma eficiente, que seja transparente, tenha estabilidade óptica, química e mecânica com o tempo, além de ser um material dielétrico (de forma a minimizar a interação com as ondas eletromagnéticas) e tenha viabilidade financeira. Outras necessidades importantes são a pureza da peça óptica e

uniformidade nas suas superfícies e dimensões, de forma a evitar perdas ópticas, seja por atenuação (absorção e/ou espalhamento), como assim se evitar a dispersão nos guias de luz. Além disso, em um projeto, deve-se atentar às temperaturas de fusão e transição vítrea, expansão térmica, e relação temperatura com a viscosidade de forma que seja compatível com a aplicação desejada. Obviamente, outra variável para o desenvolvimento de uma fibra óptica é o índice de refração Stewart (1979).

Dentro desse contexto, as lentes mais adequadas são os vidros inorgânicos e polímeros, sendo majoritários, apesar de que existem diversas classes que podem ser utilizadas, como os mais diversos compósitos, como representados na figura 18 Liu et al. (2019).

Figura 18: Materiais típicos e funções para as fibras ópticas.



Fonte: Liu et al. (2019)

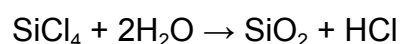
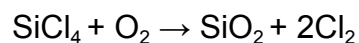
Para os vidros inorgânicos, as fibras mais comuns são :

- (1) A sílica fundida pura e vidros de sílica dopados são utilizados em telecomunicações para longas distâncias e cirurgias a laser devido ao nível de exigência para tais aplicações por serem materiais com baixas perdas por transmissão e combinarem tanto alta resistência mecânica, estabilidade térmica e durabilidade. Os dopantes para a sílica tem como finalidade alterar propriedades, sendo eles comumente utilizados: GeO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , B_2O_3 e F. O GeO_2 causa o aumento do índice de refração, e assim, se torna útil para o núcleo, embora seja fotossensível a luz UV Ballato et al. (2013), Ballato et al. (2014), Carter et al. (2007), Dragic et al. (2018) e Giusy (2009).
- (2) Outra classe relevante é de vidros de óxidos multicomponentes como $\text{Na}_2\text{-O-CaO-SiO}_2$ (NCS) e $\text{Na}_2\text{-O-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (NBS) que são utilizados para aplicações em transmissões de curtas distâncias, a exemplo de feixes de imagens (muito visto em painéis ópticos) e dispositivos de imagens na faixa do infravermelho. Embora possuam qualidade óptica inferior ao vidro, são mais baratos e fáceis de processar (granel fundido em técnicas convencionais de fusão) Carter et al. (2007).
- (3) Vidros de Fluoreto a base de ZrF_4 , a exemplo do $\text{-ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ (ZBLAN). Esta classe de vidros inorgânicos estão sendo estudados para uma maior aplicação devido seu potencial de perda ser muito baixo. Esses vidros são processados pela mistura de pós de fluoreto com alta grau de pureza a 800°C e moldados em pré-formas. O obstáculo para a maior uso em projetos comerciais é o nível de impurezas, o que por sua vez pode trazer problemas de absorção de determinadas faixas do espectro da luz, sendo assim, é necessário um nível ainda menor de perdas ópticas; outra problemática que envolve os vidros de fluoretos é o baixo índice de refração. Uma vantagem deste material é por ter baixa viscosidade enquanto fluido em altas temperaturas (acima de 625°C), torna-se mais homogêneo enquanto sólido, o que reduz as chances de espalhamento Carter et al. (2007) e Saad (2009).
- (4) Vidros calcogenetos são baseados nos elementos calcogênios do grupo 16 da tabela periódica, como S, Se e Te, com a adição de elementos como o Ge,

As e Sb para a formação de vidros estáveis. Temos como vidros importantes: As₂S e Ge₂₀S₄₀Br₄₀. Recentemente, reportou-se novos vidros calcogenetos com dopagem de terras raras para aplicações ativas (termo dissertado com maior amplitude nas próximas seções). Os calcogenetos transmitem comprimentos de onda mais longos no infravermelho que vidros de sílica ou fluoretos Carter et al. (2007) e Sanghera et al. (2002).

De acordo com Liu et al. (2019) e Optical Society of America (2001), os processos de fabricação da fibra óptica de vidros cerâmicos envolve duas etapas. A primeira consiste na fabricação da pré-forma em dimensões macroscópicas, com centímetros de largura e metros de comprimentos, mantendo a distribuição dimensional e de dopantes ao longo do núcleo e revestimento que formam a fibra. A segunda etapa se trata da conversão de pré-forma no produto, em que passa pela sinterização e moldagem com o formato da fibra. A fabricação da pré-forma tem 3 principais formas de processamento: CVD, MCDV e PCVD.

O CVD é a forma mais básica de processamento para a fabricação das fibras. Esse processo consiste em uma reação química ocorrendo na fase de vapor em uma câmara de vácuo, e os produtos são depositados em um substrato metálico resfriado, assim, havendo a acumulação dos produtos e conseqüente solidificação, e assim formando produtos na com formato de filmes e tiras ou similares Chandler (2015). Para as fibras ópticas Optical Society of America (2001), a fabricação deve cumprir dois requisitos: alta pureza e controle preciso do perfil da composição, tal como o índice de refração. Este processo gera alta taxa de deposição e grandes pré-formas, ocorrendo em temperaturas acima de 1800°C. O exemplo de reação será dado para fibras de vidro de Silíca:



Este processo é capaz de prover uma pré-forma de alta pureza do teor de Silíca, que posteriormente será sinterizada.

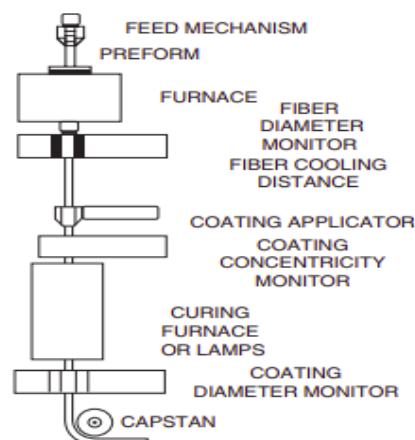
Os processos mais modernos de fabricação são o MCVD e PCVD, que são

modificações do processo de CVD. Em ambas técnicas, existe deposição por camadas e o controle composicional em cada etapa para controlar o índice de refração. Neste processo, para o caso do vidro de sílica, o oxigênio está envolvido em SiCl_4 , que possui alta pressão de vapor em temperaturas ambientes Optical Society of America (2001).

O método PEDVD Neralla (2016) envolve a deposição de vapor meio de reações químicas, porém, diferente do método CVD, utiliza plasma para prover energia suficiente para a reação química acontecer, o que traz a vantagem de não necessitar grande energia térmica na forma de calor, ou seja, é possível operar com faixas de temperaturas menores. Para este processo, é utilizado fonte de radiofrequência para gerar o plasma, e por consequência, o plasma é ionizado ou dissocia os gases reagentes para gerar radicais mais quimicamente reativos e, posteriormente, ocorre o processo de deposição similar ao CVD, porém demanda sinterização da pré-forma separada da câmara de deposição a fim de evitar porosidade. A pré-forma quando aquecida à 2150° se convertirá no estado ideal para a moldagem Optical Society of America (2001).

O processo MCVD Optical Society of America (2001) utiliza a deposição através do aquecimento por uma tocha externa, em vez do aquecimento dentro da câmara. Essa tocha tem energia suficiente para a reação de oxidação e para sinterizar o SiO_2 depositado. Apesar desta vantagem de proporcionar a reação e sinterização concomitantemente, há um problema relacionado ao controle do gradiente térmico. Após esta etapa, ocorre a trefilação da fibra.

Figura 19: Esquema de uma torre de desenho para uma fibra óptica.



Fonte: Mendez et al. (2007)

Após as etapas de pré-forma, o material passa por uma torre de desenho das fibras, que consiste em uma etapa de diâmetro da fibra, resfriamento, aplicação do *coating* e cura do revestimento, ou seja, se trata de um processo de extrusão.

De acordo com Mendez et al. (2007), as pré-formas típicas geralmente possuem um metro de comprimento e 2,0 a 7,5 cm de diâmetro, sendo que o desenho da fibra costuma ser de 125 mm. As pré-formas são vertidas por um alimentador, e posteriormente aquecidas acima da T_g do vidro até que comece a fluir em um canal com o formato do desenho da fibra. Esse fluido é tracionado pela gravidade, gerando um filamento com um comprimento contínuo das fibras. Posteriormente, a fibra é resfriada. Antes de entrar em contato com alguma superfície sólida, a fibra é revestida com polímero para proteger a fibra da abrasão e preservar as propriedades dimensionais e mecânicas da sílica pura. Após a etapa de revestimento, existe uma etapa de cura ou solidificação da camada polimérica.

Existem outras formas de processamento das pré-formas fibras ópticas de vidro cerâmico, como sol-gel, deposição de vapor externo e deposição de vapor radial e outras.

Dentre as fibras ópticas poliméricas (POF), a grande maioria delas são de índice de degrau, o que faz com que sejam fibras simples, com índice constante de refração e material homogêneo no núcleo Beckers et al. (2015). Um exemplo de POF são as fibras de PMMA, em que o recobrimento é de PMMA e o núcleo de PMMA com dopantes Liu et al. (2019). Vale constatar que as POF possuem perda por atenuação maior que as fibras tradicionais, principalmente quando expostas a ondas com maior comprimento de onda, além de menor índice de refração, apesar que são vantajosas em relação a ductilidade, componentes elásticas, fácil processabilidade e menor densidade Peters (2011).

As POF geralmente são compostas por Beckers et al. (2015), Liu et al. (2019) e Peters (2011): PMMA, PC, PS e CYTOP. A principal POF é de PMMA.

De acordo com Peters (2011), para processos que envolvem a fabricação de POF de índice degrau, essas etapas são seguidas: limpeza das matérias-primas, polimerização, formação da geometria da fibra, aplicação da jaqueta e estiramento

da fibra. Os processos de formação da geometria da fibra ocorrem por meio de extrusão, sendo este um processo simples. Para POF de índice grau, para modos de processamento contínuo, se utiliza a co-extrusão, *dry spinning* e *melt spinning* com têmpera em água; para modo descontínuo, as rotas podem ser polimerização interfacial-gel, CVD, centrifugação, difusão e polimerização fotoquímica.

3.4.2 - Aplicações e tendências futuras para fibras ópticas

Das (2022) as fibras ópticas são extensivamente aplicadas nos campos de telecomunicações, dispositivos de iluminação, medicina, dispositivos optoeletrônicos e sensores.

Nas telecomunicações, seu principal uso, um transmissor recebe um sinal elétrico e converte em luz, e as fibras ópticas transportam essa luz até um receptor, que converte a luz em sinal elétrico, o que é possível para transportar as informações em pequenas ou longas distâncias Yeh (1990).

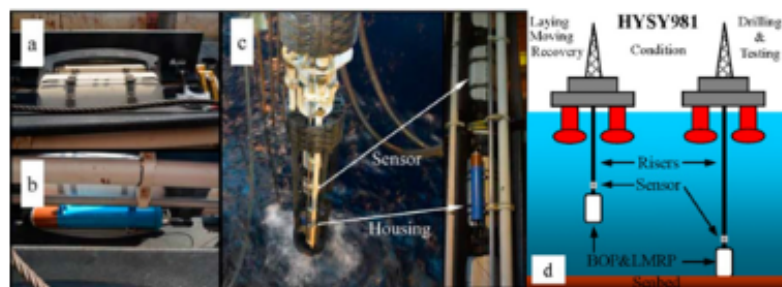
Para dispositivos optoeletrônicos, podemos citar seu uso na endoscopia e nos televisores. Na endoscopia ou dispositivos similares (ex: microscópio eletrônico), emite-se uma luz através de uma fibra óptica, e esta luz enviada reflete no objeto em análise. Os espectros refletidos vão por meio de outra fibra óptica até um receptor, que converte o sinal elétrico em construção de imagens.

Um dos usos como sensores pode se dar através da fibra óptica, sendo um meio de levar alguma informação por pulso elétrico em luz, a exemplo do monitoramento ambiental em plataformas de petróleo, como esquematizado na figura 20, em que sensores de temperatura, pressão, fluxo da água e outras demais condições são ligados a uma fibra óptica para transportar a informação para a plataforma Joe et al. (2018).

Outro uso de sensores se dá através da espectrometria e fotômetro. Em resumo Kaflee (2020) e Vo (2022), a espectroscopia, um ramo da química analítica que estuda a interação entre a radiação eletromagnética com a matéria, sendo amplamente utilizada para a caracterização de materiais de forma qualitativa e quantitativa. Basicamente, um analista pode identificar e qualificar a matéria a partir

da luz, através dos fenômenos da absorção, emissão, reflexão ou espalhamento, seja através de amplas faixas contínuas do espectro ou de um determinado espectro. As vantagens da utilização destes métodos se dão pela otimização de tempo, baixa quantidade de amostras, análise de amostras de forma controlada e fácil de ser acessada por um computador, são confiáveis e acuradas (até mesmo em misturas complexas e traços de impurezas). Em faixas de raio-x é possível analisar átomos com até mesmo camadas K e L, no UV é uma faixa de estimulação de camadas atômicas intermediárias e elétrons de valência, no visível, atinge-se elétrons de valência, no IR vibrações moleculares até rotações moleculares, no micro-ondas rotações moleculares e ondas de rádio o *spin* nuclear. A espectrometria tem como principais dispositivos o espectrômetro e/ou fotômetro, sendo o primeiro equipamento composto por uma fonte de luz que passa por lentes e um monocromador, a fim de se gerar diferentes faixas de luz, e posteriormente, passa por um filtro de comprimento de onda para assim atingir a amostra com o feixe desejado, enquanto o fotômetro detecta as faixas de ondas magnéticas que lhes foram atingidas e absorvidas, sendo tal informação óptica convertida em pulsos elétricos. Isto significa que a fibra óptica serve como um meio para a obtenção desta informação da caracterização de um material ou de faixas de ondas.

Figura 20: sensor submerso em uma plataforma de petróleo



Fonte: Joe et al. (2018).

Dentro deste tema de sensores, os principais são voltados para as áreas de Sabri et al. (2015): química, medicina, agricultura e alimentação, transportes,

energia e construção civil.

Tal como existe uma Revolução Industrial 4.0, igualmente o setor do agronegócio está incorporando tecnologias similares no campo Albiero et al. (2020), demandando assim muitas tecnologias *in situ*. E as fibras ópticas estão presentes em sensores rurais na avaliação das condições do solo, no controle de qualidade dos alimentos, na refletância de níveis de UV no campo e determinação de substâncias químicas Sabri et al. (2015). Um exemplo disso são sensores com reflexão para analisar a composição do solo, sendo emitido comumente faixas de transição entre o IR e luz visível Joe et al. (2018).

Para a construção civil Sabri et al. (2015), o uso de sensores ópticos é necessário para evitar o uso de sensores elétricos, que trazem consigo a desvantagem de inúmeros fios, corrosão ou degradação e a necessidade de calibração dos mesmos. Os sensores ópticos são utilizados em monitoramento de construções, rodovias, pontes, pistas de pouso, hidrelétricas e até mesmo plataformas *offshore*. Um dos usos para a construção civil são os sensores interferométricos para o monitoramento de estruturas Pieraccini (2013).

No setor químico Sabri et al. (2015), o maior propósito é a determinação de substâncias e estruturas químicas, sendo muito utilizado para o monitoramento ambiental, análises químicas e bioquímicas, além do uso nas indústrias. Os principais fenômenos feitos pelos sensores opto químicos são a absorção, fluorescência, luminescência, espalhamento Raman e ressonância plasmônica de superfície. A indústria utiliza amplamente tais sensores para o monitoramento químico na produção, além do controle de gases e rejeitos Joe et al. (2018) e igualmente pode ser utilizado por meios de espectrométricos a medição do pH Wang et al.(2020).

Para o setor médico Sabri et al. (2015), como as fibras ópticas podem ser atóxicas, e são quimicamente inertes, imune a interferência eletromagnética e não invasivas em contato com órgãos externos ou órgãos em processo cirúrgico, são flexíveis, finas e podem ser posicionadas em cavidades físicas, além de serem facilmente inseridas em cirurgias invasivas ou intravasculares, há um amplo campo de exploração dos seus sensores. De acordo com Tosi et al. (2018), o campo da medicina já utiliza há um bom tempo o uso de tecnologias de fibra óptica na saúde,

tendo alcançado grande maturidade tecnológica na neurologia, urologia, gastroscopia, cardiologia etc. Atualmente, a tecnologia está avançando em dispositivos de fibra óptica serem somente um meio de diagnóstico baseado em imagens, e está ampliando seu uso para sensores, como monitoramento de pressão nos sistemas cardiovascular, urinário e respiratório, além de servir como um dos meios de funcionamento de robôs cirúrgicos, seja na obtenção de imagens, informações e comandos do próprio dispositivo ou para os sensores, sendo uma pesquisa bastante promissora para cirurgias na retina.

Outra aplicação promissora dos sensores baseados em fibra óptica são os *smarts* têxteis, em que o paciente veste uma roupa embutida de fibras ópticas e sensores para medições de variáveis importantes para a fisiologia, a exemplo das aferições de respiração na caixa torácica e abdome. Outro uso importante dos sensores é a utilização de métodos ópticos diretos para a caracterização de algumas substâncias, como a glicose e outras substâncias orgânicas Wang et al. (2020)

Para os transportes Sabri et al. (2015), é muito útil o uso das fibras ópticas nos seus sistemas, devido à otimização de espaço e peso, além de suportarem ambientes extremos, principalmente para a aviação.

No setor de energia Sabri et al. (2015), as fibras ópticas são utilizadas para monitorar plantas e operações, como o monitoramento de barulho de turbinas eólicas, medição de movimento de turbinas e controle estrutural. Um exemplo disto é a detecção por espectrofotometria e/ou interferometria da salinidade da água e análise de óleos para a indústria do petróleo Wang et al. (2020) ou controle de vazamento de polidutos, a partir de ondas de pressão negativas, ruídos que indicam fluxo turbulento, gradientes de temperatura ou deslocamentos de terra Joe et al. (2018).

Para concluir, é necessário dizer que há uma gama de aplicações das fibras ópticas, e com o aumento da demanda por sensores e eletrônicos, logicamente, há um espaço de crescimento, principalmente com a sua flexibilidade de uso. Outro fato é o aumento da demanda por uso de fibra óptica *in situ*. Como tendências futuras, existe a ampliação do uso de outros materiais em detrimento da sílica, seja por questões de custos ou de propriedades, a exemplo do maior uso de POF,

4.5- MATERIAIS MAGNOSTRITIVOS

O efeito de magnetostricção é a mudança de formato de um material sob um campo magnético externo (efeito direto), e quando a tensão magnética é retirada ocorre a recuperação das suas dimensões originais, ou quando tensionadas mecanicamente existe uma resposta magnética (efeito indireto), e quando a tensão mecânica é suspensa, o material retoma o seu campo magnético original. Ou seja, são materiais capazes de converter energia magnética e energia mecânica elástica entre si, e isso os fazem bons transdutores, sendo sensores (efeito direto) ou atuadores (efeito indireto).

O salto tecnológico ocorreu após os anos 60, com a descoberta de magnetostritivos com elementos terra rara, tanto pelo aumento da magnetostricção, como por alcançar maiores T_c . A primeira observação registrada na história desse efeito foi realizada pelo físico James Joule em 1842. Por meio de um experimento com um material ferromagnético, Joule percebeu a mudança de comprimento do corpo analisado quando exposto a um campo magnético, e por consequência, essa inovação foi aplicada em sonares, receptores de telefones, osciladores, sensores de torque e outros. O salto tecnológico ocorreu após os anos 60, com a descoberta de magnetostritivos com elementos terra rara, tanto pelo aumento da magnetostricção, como por alcançar maiores T_c . Buschow et al. (2004), Olabi et al. (2008) e Schwartz (2001).

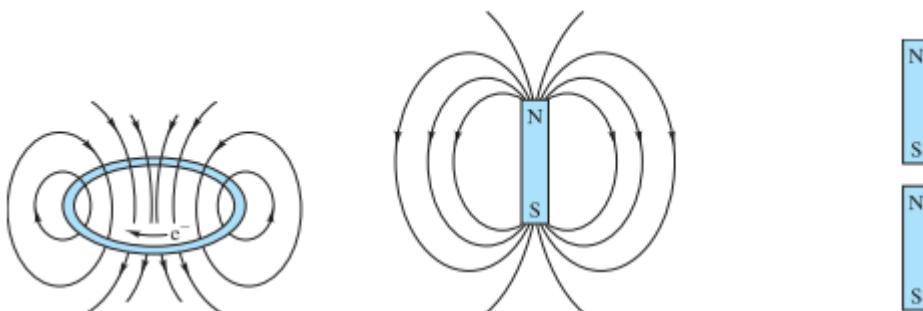
As ligas de Ferro, Níquel e Cobalto ligadas a elementos de transição e combinadas com alguns elementos Terra Raras são os principais materiais responsáveis por aplicações magnetostritivas em indústrias, defesa e em equipamentos biomédicos. A estrutura de tais materiais é composta por domínios magnéticos que ao serem orientados e reorientados após uma força externa (tensão magnética ou mecânica) geram a conversão energética. Como a magnetostricção é uma propriedade inerente do material, não há degradação das propriedades magnéticas e mecânicas quando associadas como existe nas substâncias piezoelétricas para a sua polarização, como exemplificado em seções anteriores, o

caso da fadiga piezoelétrica. Outra comparação que se pode fazer com os piezoelétricos é que os magnetostrictivos possuem maior densidade de energia, além de suportarem maiores tensões, o que fazem uma potencial forma de substituição em transdutores Gao et al. (2022) e Schwartz (2008).

4.5.1 - Efeito magnetostrictivo

Para ser possível a compreensão do efeito magnetostrictivo, é necessário inicialmente entender a ferroeletricidade e outros comportamentos magnéticos; a única classe de materiais com esse efeito são materiais metálicos.

Figura 21: representação de um campo eletromagnético em um fio cilíndrico, linhas de campo magnético em uma barra e ordenamento dos pólos em duas barras magnéticas.



Fonte: Shackelford (2015).

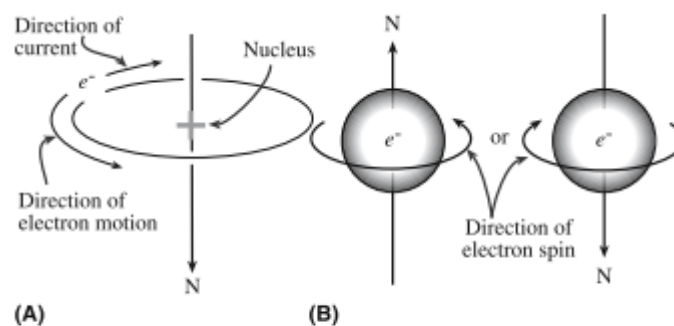
O magnetismo é um fenômeno físico associado à interação dos materiais, através de dipolos magnéticos, em que pólos opostos se atraem por meio de linhas magnéticas. Uma corrente elétrica em uma bobina (ou solenóide) gera um campo magnético induzido, que pode ser representado com linhas de fluxo magnético, como mostrado na figura 21. O vetor campo magnético (H) é determinado em qualquer ponto próximo a corrente circular, e está relacionado com a constante de permeabilidade relativa (μ_r), com a indução magnética (B), e com uma propriedade

intrínseca do material, a magnetização do material (M); essa relação pode ser conferida com a fórmula abaixo Callister et al. (2012):

$$B = \mu_r(H + M)$$

Para este estudo, o mais importante é a magnetização do material, pelo comportamento magnetostritivo ser uma característica do material. No caso, a constante de permeabilidade do material é a propriedade intrínseca chave deste comportamento magnético, em que quanto maior a permeabilidade, maior a resposta magnética do material, sendo bastante alta nos ferromagnéticos, e por consequência, nos magnetostrictivos. A permeabilidade relativa é uma relação da razão permeabilidade do material e do meio.

Figura 22: Momentos magnéticos de um elétron, a esquerda o movimento orbital, e a direita o movimento por spin.



Fonte: Carter et al. (2007).

A origem das propriedades magnéticas macroscópicas estão nos momentos magnéticos decorrentes associados aos elétrons individualmente. Cada elétron em um átomo possui momentos magnéticos associados a duas fontes: (i) movimento orbital: o elétron faz movimento rotacional ao longo da sua trajetória, assim gerando um pequeno campo magnético perpendicular aos eixos de rotação; (ii) *spin*: Tem origem quântica, em que cada elétron possui um momento magnético decorrente da rotação em torno do seu próprio eixo, sendo este momento $+1/2$ para elétrons que orbitam paralelamente, e em direção antiparalela sendo $-1/2$ o seu momento. Em um átomo individual, os momentos orbitais podem ser ocupados por pares, por somente um elétron ou vazio; assim como os momentos orbitais se anulam quando

ocupados por dois elétrons, igualmente esse efeito ocorre para os momentos de *spin*, pois são ocupados por elétrons com orientação diferente, que assim cancelam o momento de *spin*; caso haja em pelo menos momentos orbitais no átomo elétrons desemparelhados, o material terá maior magnetização natural, até porque o momento de spin é mais forte que o momento orbital, assim como é o efeito predominante para a magnetização do material, ao ponto de ser o fenômeno gerador da magnetização permanente. Callister et al. (2012) e Carter et al (2007).

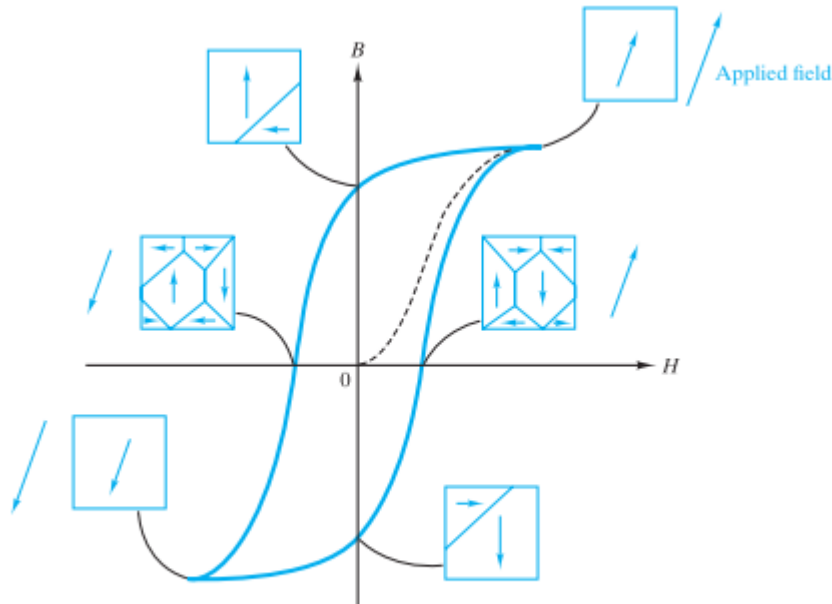
Dentro dos muitos tipos de magnetismo, existem cinco principais fenômenos relativos à magnetização do material: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferrimagnetismo. Apesar da existência de cinco fenômenos, nesta tese, a abordagem será direcionada aos três primeiros efeitos citados, por serem conectados ao tema dos magnetizadores. O diamagnetismo e paramagnetismo são magnetizados por indução, enquanto o ferromagnetismo tem magnetização permanente no material Carter et al. (2007).

Os materiais diamagnéticos não possuem momento dipolo permanente, logo, não apresentam magnetização espontânea e tão pouco são capazes de responder bem a campos magnéticos externos. Enquanto os paramagnéticos possuem permeabilidade menor que 1, porque apesar de possuírem momento dipolo permanente, a configuração destes em conjunto é desordenada, o que faz com que tenham baixa magnetização quando não expostos à indução magnética; quando um campo magnético externo é aplicado, o material tende a polarizar seus momentos magnéticos aleatórios, e assim, causa um pequeno magnetismo Carter et al. (2007).

Os materiais ferromagnéticos possuem um campo magnético permanente e alto, desde que seja em temperaturas menores a T_c , independente de um campo magnético aplicado externamente, o que está associado ao momento orbital dos átomos componentes da liga metálica, em que há desemparelhamento dos seus elétrons, sendo um comportamento comum em elementos de transição. Contudo, não basta haver o desalinhamento do spin dos átomos, ainda assim é necessário que haja uma estrutura em que haja alinhamento dos átomos da rede cristalina, de forma ao arranjo cristalino ter alinhamento magnético; fenômeno este chamado de interação de troca. A interação de troca é a explicação que o Ferro na estrutura CCC é ferromagnético, enquanto o aço austenítico é paramagnético Schwartz

(2008) e Shackelford (2015).

Figura 23: Curva de histerese relacionada ao $H \times B$.



Fonte: Shackelford (2015).

Os materiais ferromagnéticos possuem uma microestrutura composta de domínios magnéticos, sendo que estes domínios possuem domínios vizinhos com diferentes orientações cristalográficas e de momento magnético, sendo tais domínios originalmente de mesmo tamanho, e o efeito de rede gera indução nula até iniciar a primeira indução magnética. O comportamento magnético permanente dos ferromagnéticos está associado aos domínios magnéticos, em que este fenômeno gera uma resposta macroscópica em termos de indução magnética de acordo com a intensidade do campo magnético aplicado após a primeira indução magnética, representado na figura 23, em que pode-se ver um gráfico com curva de histerese que relaciona B e H. Quando aplicado um campo magnético, os domínios magnéticos se orientam em direção ao campo aplicado, e isso causa que os campos já previamente paralelos ao campo magnético cresçam em detrimento não favoravelmente orientados. A parede de Bloch é a borda do domínio magnético, e nesta região, percebe-se que é possível mudar a orientação dos momentos

magnéticos em 180° . Com o crescimento do domínio, a parede de Bloch se desloca em uma direção em que é mais favorável para o crescimento do domínio mais orientado em relação ao campo magnético. Na curva de histerese, vemos que existe uma máxima magnetização no material, chamada magnetização de saturação, em que existe um campo magnético máximo que gera a maior indução magnética possível neste material, e isso é consequência de um único domínio magnético orientado em direção do campo magnético induzido. Quando se diminui o campo magnético, cresce o número de domínios com diversas orientações, até a indução magnética externa ser zero, e assim, se chegar ao máximo de domínios que a estrutura tem, e estes domínios em diversas orientações, e ainda assim, o material produz campo magnético remanescente, ainda que seja em seu menor valor em módulo. E esse comportamento segue um ciclo. O comportamento ferromagnético de um material se cessa quando a T_c é alcançada, havendo mudança de fases no material Callister et al. (2012), Carter et al. (2007), Schwartz (2001) e Shackelford (2015).

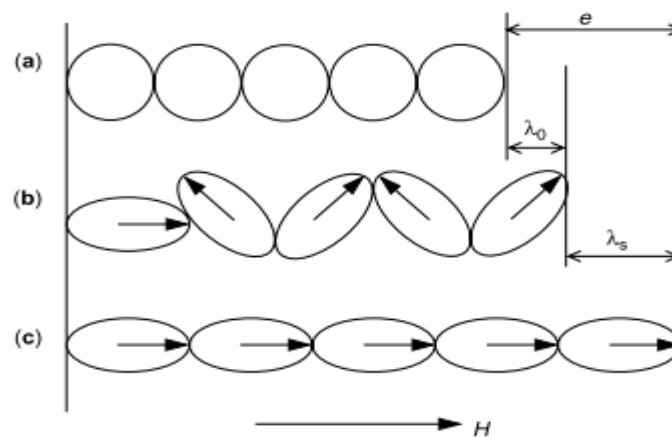
A partir do conhecimento do ferromagnetismo, o próximo passo para entender os primeiros conceitos do comportamento magnetostriativo é compreender a anisotropia magnética de um material, sendo que uma pista foi dada quando exemplificamos neste capítulo o caso do magnetismo no Ferro e no Aço.

Como visto anteriormente, existem dois comportamentos quânticos associados ao magnetismo: *spin* e momento orbital. A magnetostrição se deve ao momento orbital, um efeito associado à rede cristalina, o que faz com que haja anisotropia magnetocristalina. Quando um campo magnético externo é aplicado em um corpo qualquer, a órbita do elétron tende a se reorientar, embora encontra resistência por estar ligado à estrutura cristalina. Para conseguir reorientar o momento magnético é necessário uma energia maior que a do momento orbital, e assim, preferencialmente, movimentar o momento fora do eixo preferencial. A anisotropia magnética é a dependência das propriedades magnéticas em torno das direções do material, sendo associado a diversos efeitos, como tensão, forma, mudança cristalográfica e anisotropia do cristal; somente a anisotropia cristalina é uma propriedade intrínseca, relacionada a orientações cristalográficas preferenciais. A condição para que haja possibilidade da magnetostrição é a dependência entre o

estado de tensão em conjunto à anisotropia. Quando um material está sob um campo magnético, a rede cristalina sofre deformações para minimizar o estado de energia do material, o que por consequência gera deformações macroscópicas no material. Buschow et al.(2004) e Schwartz (2001).

Em resumo, as deformações geradas em um material magnetostrictivo são causadas pela rotação dos momentos magnéticos quando submetidos a um campo magnético, e vice-versa. Esse fenômeno pode ser representado pelo coeficiente de magnetostricção (λ), que relaciona a deformação e campo magnético aplicado. Isso pode ser esquematizado na figura 23, em que num primeiro momento, (a), a liga está acima da T_c , o que faz com o que o material não seja ferromagnético e assim, não responda de forma forte ao estímulo magnético, (b) com o resfriamento abaixo da T_c surgem domínios magnéticos desalinhados, havendo expansão dos domínios sob o campo magnético externo, chamada de magnetostricção isotrópica espontânea, resultante da mudança de domínios esféricos para domínios com formato elipsoidal; (c) quando se alcança a magnetização de saturação, o material está na sua maior expansão magnetostrictivo possível Olabi et. (2008) e Schwartz (2001).

Figura 24: Representação esquemática do efeito magnetostrictivo sobre a estrutura magnética do material.

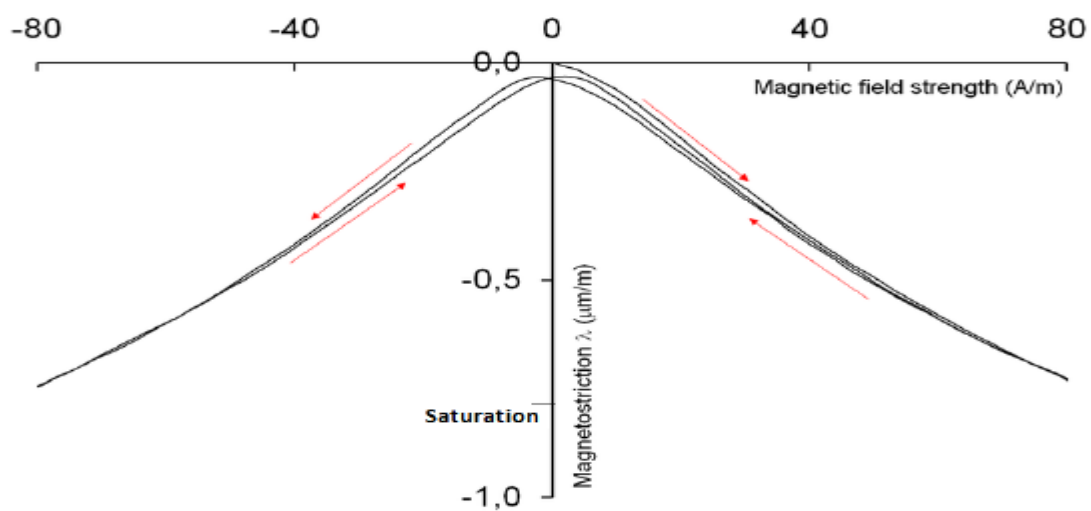


Fonte: Schwartz (2001).

De acordo com Gao et al. (2022), Schwartz (2001) e Yu (2015), a histerese entre o campo magnético aplicado e a magnetostricção começa com um campo magnético zero e com o material desmagnetizado, e após o alinhamento dos domínios, a deformação aumenta, até um campo magnético máximo, em que há a

maior deformação possível associado à magnetização de saturação. Posteriormente, ao se diminuir o campo magnético, os domínios voltam a ser desalinhados, e com isso, igualmente se reduz a deformação. Quando o campo magnético aplicado volta a ser nulo, existe ainda uma deformação remanescente, fruto da magnetização permanente do próprio material, e assim, a direção do campo magnético permanente é determinada pela anisotropia cristalina. No sentido contrário de campo magnético, o efeito é similar ao que foi relatado, porém com orientação contrária. Ao reduzir-se a intensidade do campo magnético, o material retoma domínios magnéticos desmagnetizados, com conseqüente redução da magnetostricção, embora que para um mesmo campo magnético, haverá uma diferença na magnetostricção entre os ciclos de orientação e desorientação dos domínios, porque a mudança dos domínios não é somente resultado da tensão e campo magnético, igualmente há uma relação com o tempo. Posteriormente, quando o campo magnético externo seja nulo, haverá deformação permanente; ao se aplicar um campo magnético positivo, novamente, esse ciclo retorna de alteração dimensional se retoma como citado anteriormente neste parágrafo.

Figura 25: Curva de histerese entre deformação e campo magnético.



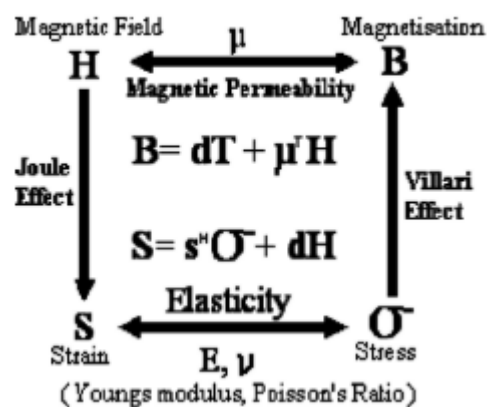
Fonte: Yu (2015)

O efeito que vimos acima foi o efeito Joule, no qual há conversão da energia magnética em deformação, sendo que no caso da magnetostricção negativa, haverá contração do material, enquanto para a magnetostricção positiva ocorre expansão. Esse efeito é utilizado para atuadores devido à proporcionalidade entre o campo

magnético e a deformação elástica.

Outro efeito relacionado a magnetostricção é o efeito Villari, segundo o qual quando há uma tensão mecânica aplicada na amostra, haverá uma mudança no fluxo de densidade magnética através da geração de um campo magnético, sendo que há proporcionalidade entre a densidade de fluxo magnético e a deformação mecânica, o que faz com que esse fenômeno seja o princípio de aplicações sensores magnetostrictivos; tais sensores utilizam espiras para transformar a informação das propriedades magnéticas em pulsos elétricos. Igualmente, relacionado ao efeito Villari está a variação do módulo de Young de acordo com o campo magnético; com esse efeito é possível analisar a propagação e velocidade do som na amostra (bem como as influências externas afetando a amostra), o que faz com que este fenômeno seja importante para sistemas de sonares e outros equipamentos de aferição das propriedades das ondas acústicas/mecânicas.

Figura 26: Relação entre as propriedades mecânicas e magnéticas regidas pelo efeito Joule e Villari.



Fonte: Olabi et al.(2008)

Na figura 26, podemos ver a relação entre múltiplas propriedades e efeitos no material magnetostrictivo, e com isso, algumas fórmulas a serem estudadas. Para o efeito Villari, tem-se a equação $B = dT + \mu^T H$, o que nos afirma que a magnetização será a soma entre os produtos dT e $\mu^T H$ que d é a constante magnetostrictivos, T a tensão mecânica, μ^T sendo a permeabilidade magnética de acordo com a tensão mecânica constante, e por último, H sendo o campo magnético; ou seja, a

permeabilidade magnética da amostra é função do campo magnético . No efeito Joule, a equação regente do fenômeno é $S = s^H \sigma + dH$, e isso afirma que a deformação é uma função da soma entre os produtos $s^H \sigma$ e dH , sendo s^H a deformação de acordo com o campo magnético aplicado e σ a tensão aplicada; logo, pode-se afirmar que o módulo elástico, o índice de Poisson e a deformação são funções do campo magnético aplicado Olabi et al (2008).

Existem outros efeitos relacionados aos magnetostrictivos, sejam com um comportamento adequado para atuadores ou sensores, dentre tais Schwartz (2008):

- Efeito Wiedemann: efeito direto, no qual um campo magnético circular é produzido por um fio, e assim, os momentos magnéticos se alinham preferencialmente na direção do campo. Quando um campo magnético é aplicado axialmente, os momentos se alinham helicoidalmente, de forma que gera um campo magnético helicoidal, e por fim, a resposta mecânica é o torque.
- Efeito Matteuci: efeito indireto do Wiedemann, no qual o torque gera anisotropia helicoidal e campo magnético induzido.
- Efeito Barret: Efeito direto. Mudança do volume de acordo com o campo magnético aplicado, porém, é mais perceptível próximo a T_c . Não é um efeito muito comum.
- Efeito Nagaoka–Honda: Efeito inverso ao efeito Barret.

4.5.2 - Principais materiais magnetostrictivos e rotas de processamento

Desde da descoberta da magnetostricção em 1842, diversas ligas foram desenvolvidas e algumas estão em estudo. Há várias ligas magnetostritivas com diversos elementos componentes, a exemplo do: Ferro, Níquel, Cobalto, Gálio, elementos terras-raras e outros Behera (2021) e Gao et al. (2022).

Dentre as principais ligas magnetostritivas, serão mapeadas neste trabalho: ligas de Ferro, ligas de Níquel, Terfenol-D, Metglas, ligas de Memória de forma e entre outras.

As ligas de Ferro são conhecidas por terem alto momento orbital e forte

polarização de spin do Fe, estados não ligantes próximo ao nível de Fermi e número de elétrons ajustável para cada cátion, logo, pode-se afirmar que esse conjunto de características atômicas geram propriedade magnetostritivas fortes. As ligas do tipo Fe-X exibem diagramas de fases similares entre si, desde que o diagrama seja analisado na região rica em Ferro. Existe uma grande gama de tipos de ligas magnetostritivas de Ferro com a configuração Fe-X, podendo ser o X: Al, Ga, Si, Ge etc. Uma das mais usadas é a liga Fe-Al, conhecida pelo seu baixo custo, excelentes propriedades mecânicas e magnetostricção moderada, o que confere uma alta relação de custo-benefício nas suas diversas aplicações, inclusive quando dopada com Tb, pode-lhe conferir um grande aumento da magnetostricção, inclusive podendo ser substituta da Terfenol-D, pois apesar de menor magnetostricção, ainda há boa magnetostricção, menor custo e é um material mais dúctil e resistente; as ligas de Fe-Al dopadas com Tb são: Gafenol, $\text{Fe}_x\text{Ga}_{(x-1)}$ e Alfenol. As ligas Tb-Fe-Dy exibem magnetostricção gigante. Outra liga muito relevante é a Fe-27% Co para o uso em transformadores de energia devido à alta magnetização durante o nível de saturação com redução de tamanho. Na ferrita de cobalto, a inclusão de materiais de transição gera melhores propriedades mecânicas para o uso em atuadores e sensores. O uso de metais de transição nestas ligas também ajuda a reduzir a T_c . Behera (2021).

As ligas de Níquel como Ni-Zn, Ni-Cu, Ni-Zn, Ni-Cu-Co, Ni-Cu-Zn-Co e Ni-Fe apresentam comportamento magnetostritivo. Contudo, as ligas mais importantes dessa classe são as ligas de Ni-Fe, que tem uma característica magnética mole; outra característica importante dessas ligas é que se pode ajustar de diversas formas o seu comportamento magnético através da mudança de composição química e processo de preparação. Do ponto de vista da engenharia de materiais, o melhor material é o que se adapta melhor a uma determinada aplicação, e no caso, a liga Fe-Ni com 80% do peso em Ni e 20% em ferro, é a protagonista destas ligas, exatamente pela sua baixa coercividade e magnetostricção, além de uma grande magnetoresistência anisotrópica, o que possibilita o uso para nanoescalas, em que não há demanda de grande magnetostricção ou fortes campos magnéticos aplicados. Elementos de liga, como Mo, Cu e Cr auxiliam em produzir materiais com baixas perdas de histerese, o que faz serem materiais úteis para altas frequências.

Behera (2021) e Willard et al. (2002)

Já a Terfenol-D é uma liga com a fórmula $Tb_xDy_{(1-x)}Fe_2$ (com $x \sim 3$) capaz de oferecer magnetostricção gigante, tanto que entre as ligas mapeadas, é a que possui maior magnetostricção, o que a faz ser uma liga com aplicações de engenharia pesada, como o uso em sonares, maquinário ultrassônico, detecção de movimentos e forças, motores lineares e rotacionais, maquinários industriais e soldas, e em geração de campos magnéticos. O Terfenol-D tem alta densidade energética, baixo módulo de Young (logo, baixa velocidade do som), baixa ductilidade e resistência à fratura, ou seja, deve-se pensar em utilizar em um produto muito específico e não estrutural. Alterando a composição do Tb e Dy pode-se mudar as propriedades magnetostritivas, em que caso se aumente a razão Tb e Dy, a magnetostricção pode operar em temperaturas menores a $-200^\circ C$, e no caso inverso, a temperatura máxima de operação magnetostritora será de $200^\circ C$. Outro fato, o Dy torna mais fácil a indução de respostas magnetostritivas de acordo com menores níveis de campos magnéticos. Este material está presente em produtos nas mais diferentes formas possíveis, o que inclui hastes e até mesmo ser fase precipitada em compósitos de matriz polimérica. As desvantagens para o uso deste material são: alto preço, alto campo de magnetização, fragilidade e problemas durante a usinagem Behera (2021) e Gao et al. (2022).

O Metglas é uma série de ligas amorfas feitas pelo rápido resfriamento do Fe, Ni e Co juntos ou com mais elementos, como Si, B e P. O Metglas 2826 MB é candidata ao uso como sensor magnetostrictivo devido ao seu alto valor de saturação magnetostrictivo, alta magnetização de saturação, baixa energia anisotrópica (afinal, é um material amorfo) e baixa coercitividade. O problema em relação a sua aplicação é que só é possível processar esta liga em fitas de 10 a $50\mu m$, embora possa ser utilizada em sistemas de micro e nanoeletrônica. A nova fronteira de desenvolvimento deste material é processá-los em forma de filmes finos para uso comercial, e isso seria capaz de gerar um material concorrente aos piezoelétricos em microeletrônica. Um exemplo de metglas é a liga $Fe_{81}Si_{3.5}B_{13.5}C_2$, um material com alta constante de magnetostricção (20 microdeformações, ou mais), com baixa anisotropia magnética, e com alto efeito da mudança do módulo de Young (com até 80% de redução do módulo se comparado ao módulo máximo

original) Behera (2021).

Pesquisas através de alguns experimentos demonstraram a existência de SMAs com magnetostricção, como Ni_2MnGa , NiFeGa , NiTiHf , FePd e Fe_3Pt Kokorin et al. (2001).

As formas mais comuns de processamento de ligas magnetostritivas são Gao et al. (2022): métodos de solidificação direcional, método de laminação, método da têmpera rápida, método de ligamento e método da pulverização de *Magnetron*.

O método de solidificação direcional é o mais utilizado para fazer ligas magnetostritivas, como as ligas de Ferro e de terras-raras. É um método capaz de preparar materiais com grande tamanho (apesar de ser o principal método para produtos pequenos devido seu alto custo), regularidade superficial e uniformidade em aspectos de composição axial e propriedades. Neste método, a solidificação ocorre com o princípio de crescimento competitivo de grãos para obter materiais com orientação preferencial e, como já relatado, a orientação é importante para o fenômeno da magnetostricção. Essa fabricação permite até mesmo a obtenção de materiais monocristalinos. Existem dois métodos principais: *Czochraski* e *Brigman*. Estes métodos basicamente são o aquecimento do material processado por meio de bobinas eletromagnéticas passando em torno do material, de forma a crescer e orientar seus grãos. No método *Crzochraski*, a bobina é fixa, e o crescimento do grão pode ser observado e controlado, sendo o crescimento cristalino rápido. O método *Bridgman* traz uma vantagem para magnetostrictivos, da qual se a velocidade do movimento da bobina de indução e a velocidade crítica de solidificação, pode-se ter uma haste magnetostrictiva de alto desempenho durante a descendência lenta do processo de aquecimento, apesar que pode haver perda de material neste processo. Estes métodos possuem como vantagens: i) evitar a contaminação por matérias-primas em um cadinho e o crescimento orientado de grão; as desvantagens são: alto custo de fabricação por conta do uso de silício de alta pureza como haste do equipamento e pode-se obter um material com falha devido às interfaces do fundido com o sólido no processamento.

No método de laminação, o fundido é vertido em uma câmara com gás e atomizador, de modo que se forma um *spray* do material, e assim este *spray* é solidificado e processado por meio do atrito entre dois disco e a liga, gerando uma

liga metálica, e assim, a liga sofre compressão, resultando numa seção transversal reduzida e aumentando a sua largura. É um método muito utilizado para ligas dúcteis e com boa plasticidade, sendo utilizado em magnetostritivos de ligas de Ferro. É uma forma mais econômica e eficiente de constituir um material orientado, apesar de não ser efetivo se comparado aos métodos de solidificação direcional, além de gerar produtos em formas de placas e laminados. Ainda assim, tem suas limitações em produzir formas estáveis e otimização de texturas.

Para o método da têmpera rápida, o método consiste em rápido resfriamento e solidificação em estado de não equilíbrio, sendo comum o seu uso para a preparação de faixas finas magnetostritivas. Inicialmente, o processo se dá na obtenção do fundido por meio de arco elétrico em vácuo, com atmosfera de gases inertes, como argônio. Este fundido é vertido em um reservatório, e posteriormente, é formado um spray por meio de um atomizado, sendo este spray ejetado em uma roda de cobre que rotaciona em alta velocidade, o que causa rápido resfriamento do fundido, e por sua vez, gera uma solidificação rápida, e por meio da rotação, este sólido adquire uma forma de fita fina, com altos gradientes de tensão e temperatura, o que posteriormente é corrigido por meio da laminação. Neste processado, os cristais colunares em orientação $\langle 100 \rangle$, o que favorece o efeito de magnetostricção. Os exemplos de ligas são as ligas de terras-raras e de ferro.

O método de ligamento se dá pela mistura de pós da liga com aditivos de resinas termoplásticas ou ligas de baixo ponto de fusão. Posteriormente, essa mistura é moída e fundida em um forno de arco elétrico, logo, podendo ser pressionadas, extrudadas ou injetadas para formar materiais compósitos. A adição de aditivos serve para alterar a densidade e propriedades do material. A vantagem deste processo é o seu baixo custo, é um processo simples e utiliza muitas matérias-primas. O lado positivo da utilização do método de ligamento é gerar produtos com formatos complexos.

O método da pulverização por *magnetron* se trata de um método que combina o plasma com um campo eletromagnético, em que as tensões de descarga geram a ionização do argônio, e assim o campo eletromagnético orienta os átomos da liga a se rearranjar em um substrato, gerando assim filmes finos com alta adesão. Este tipo de processamento é muito utilizado para ligas

magnetostritivas com fins biomédicos. Contudo, ainda tem a limitação para a geração de filmes mais compactos e uniformes para melhorar as propriedades mecânicas e sensibilidade térmica dos filmes.

4.5.3 - Aplicações e tendências futuras para materiais magnetostrictivos

Atualmente, os materiais magnetostritivos são utilizados como: atuadores, transdutores de sonares, motores lineares e rotacionais, biomateriais, sensores e magnetômetros Gao et al. (2022), Schwartz (2001) e Schwartz (2008).

O setor de atuadores magnetostritivos está em ascensão, sendo o Terfenol-D um protagonista, apesar de que ainda é necessário o desenvolvimento de técnicas de processamento mais simples e menor custo. Para estas aplicações, é comum que os atuadores sejam parte de dispositivos de sonar, válvulas de injeção de combustível, bombas hidráulicas, ferramentas industriais e de alta precisão, tomografia geológica, limpeza ultrassônica industrial, aparelhos auditivos para condução óssea etc Schwartz (2001).

No caso dos sensores, o funcionamento se dá através da conversão de respostas mecânicas (ou magnéticas) em sinais elétricos, por meio do eletromagnetismo, sendo tais respostas: força, tensão e torque, ou até mesmo mudanças magnéticas do meio. Por operar como meio gerador de forças eletromagnéticas, os sensores são feitos com espiras (ou solenóides) com um fio de material magnetostrictivo no meio, de forma a converter a energia magnética em pulso elétrico, o que segue o princípio de Faraday-Lenz. Igualmente, um sensor magnetostrictivo pode ter técnicas interferométricas que através da velocidade de propagação do som no magnetostritivo pode afirmar a mudança do módulo de Young e rigidez no material. Dentro os principais sensores temos: torque, força, deformação ou posição e magnetômetros.

Sensores de torque são fundamentados quando o torque é aplicado a um eixo, haverá uma reação de tensão de sinal oposto orientado a 45° entre os eixos de aplicação da tensão e da tensão de reação. Como os magnetostritivos possuem orientação preferencial, haverá uma resposta magnética de acordo com a

intensidade da angulação do torque. Esse tipo de sensor é muito utilizado em sistemas de direção *fly-by-wire* nas indústrias automobilísticas e aeroespacial. Outra forma de torquímetro são os sem-contato, em que o material magnetostrictivo não recebe o torque, senão que o torque gerado externamente é capaz de mudar de permeabilidade do material magnetostrictivo que está acoplado as espiras, e isso muda a resposta eletromagnética, sendo sensores de baixa sensibilidade.

Sensores de força são baseados no efeito Villari, em que um sensor de força sofre uma deformação, e como resposta, este efeito mecânico pode ser traduzido em força magnética, e posteriormente, com o dispositivo de solenóide, todos esses efeitos são convertidos em força elétrica. Costumam ser dispositivos simples.

Outro tipo de sensores são os deformacionais ou de posição, que dão a informação sobre a deformação (e posição) num material de acordo com uma aplicação. O mecanismo de funcionamento se dá através de um dispositivo com um magnetostrictivo que serve de guia de ondas, um ímã permanente e uma cabeça receptora/emissora de pulsos acústicos. O ímã é móvel e está sobreposto ao magnetostrictivo, sendo que quando há movimentos, o ímã se move, e por sua vez, altera as propriedades magnéticas e mecânicas do magnetostrictivo, e por consequência, existe uma alteração das ondas acústicas emitidas/recebidas no dispositivo, o que por sua vez gera respostas sobre a posição e deformação de um determinado material. Existem dois modos de funcionamento, sendo o primeiro, a mudança de módulo de Young, que assim altera a forma que o magnetostrictivo conduz as ondas acústicas, e a segunda, a onda acústica emitida no dispositivo altera o campo magnético do fio magnetostrictivo, e por consequência, altera o campo magnético do ímã, sendo que graças ao efeito Wiedemann, isso gera um torque no fio, o que altera a forma que as ondas acústicas são defletidas, e assim, pode-se inferir a posição do material externo.

Os magnetômetros são sensores para a medição do campo magnético. Um dos modos de operação é uma placa de magnetostrictivo estar acoplada a um piezoelétrico, onde qualquer alteração do campo magnético acarreta uma mudança dimensional que causa tensão ao piezoelétrico (efeito Villari), sendo que essa informação do campo elétrico gerado pelo piezoelétrico pode ser correlacionada ao campo magnético. Outro dispositivo magnetômetro é uma fita de magnetostrictivo

amorfo ligado a uma fibra óptica e envolto por um conjunto de espiras; quando um campo magnético é aplicado, a deformação do magnestritor acontece, de forma que igualmente afeta as dimensões da fibra óptica, e assim, alterando o caminho óptico dos feixes da fibra óptica, o que por sua vez, este sinal óptico está relacionado ao campo magnético, bastando ao computador mensurar qual campo magnético fora aplicado.

Sobre os atuadores Apicella et al. (2019) e Schwartz (2001), tem-se microposicionadores, motores, sonares, controle de vibração ativa e outros. Basicamente, estes dispositivos geram energia mecânica, seja com aplicações forma vibracional (a exemplo dos sonares) ou com movimentos variação de dimensões (a exemplo dos motores de fricção ou agulhas para velas de ignição).

A tecnologia dos magnetostrictivos está passando por uma diversificação de produtos e áreas de aplicação, como exemplo de uso de novos produtos promissores em: indústrias aeronáuticas, automobilísticas e biomédicas, além da construção civil, dispositivos de colheita de energia e outras indústrias Bahl et al. (2020), Behera (2021) e Olabi et al. (2008).

No contexto da indústria automobilística, os magnetostrictivos podem ser uma das formas de viabilizar o uso de carros autônomos. Basicamente, a ideia proposta é construir estradas com ímãs fortes acoplados ao longo da estrada como sistema de orientação, e os carros equipados com sensores magnetostrictivos. Ou seja, a informação do trajeto será a interpretação de campos magnéticos por um computador. O intuito dessa tecnologia é dar uma margem de segurança maior que o GPS, pois há obstáculos para a propagação de ondas eletromagnéticas de acordo com o meio, além da resposta magnética ter um tempo curto Behera (2021). Um dos pontos propostos pela indústria 4.0 são veículos autônomos. Além disso, existe uma ideia da substituição dos freios hidráulicos por freios magnetostrictivos, devido ao seu baixo consumo energético. O dispositivo de freios magnéticos é composto por um conjunto de dois solenóides, sendo o núcleo do solenóide composto de Terfenol-D Kumar et al. (2010). O mecanismo de funcionamento dos freios magnostritores se baseia em que quando o freio é pressionado, o cubo é empurrado ao conjunto. Outros equipamentos promissores são elevadores hidráulicos e injetores de combustíveis.

Outro setor que demanda aplicações inteligentes é o biomédico, no qual é necessária a integração do meio digital, físico e biológico. Dentro deste tema, pode-se citar implantes *wireless*, os quais combinados a sensores piezoelétricos em forma de filmes finos podem melhorar o desempenho se comparado aos atuais biossensores, principalmente quando utilizados em antenas Gao et al. (2022). Um exemplo disto é o implante cerebral chamado de *NanoNeuroRFID*, que utiliza esta estrutura supracitada, podendo operar com auto capacidade de carga, indução do campo magnético neural sem contato e comunicações com transceptores, entre outros efeitos Rangriz et al. (2020). Outra inovação interessante do ponto de vista de tratamentos médicos é o uso de prótese reparadora de fraturas ósseas, em que se usa uma bobina de cobre em um filme de Galfenol-Silício, contendo um adesivo, sendo que este dispositivo funciona em detectar a osteossíntese, e assim, com as informações mecânicas sobre os ossos, é possível transmiti-las em dispositivos IoT Truong et al. (2020).

De acordo com Behera (2021) e Day et al. (2014), existem diversas aplicações para sensores na indústria da construção civil. Em pontes e plataformas, a atual maneira de verificação de efeitos de erosão em bancos de areia ou sedimentos é por meio da inspeção visual por mergulhadores e hastes sonoras, um processo não automatizado e pouco eficiente, ou de forma automatizada por meio sonares ou colares deslizantes. Dentro desta problemática, uma das soluções propostas é o uso de diversos sensores magnetostritivos acoplados à estrutura, sejam imersos ou enterrados, que informam em tempo real sobre as condições de erosão do solo, pois ao solo mover-se, haverá informação magnética nos sensores. Outras inovações são a inspeção do desempenho mecânico de cabos de pontes e detecção da força hidráulica em pontes suspensas.

Outra função importante para os magnetostritivos é a coleta de energia através da vibração mecânica Mohanty et al. (2019), podendo ser uma forma de alimentação de microsistemas. Um dos exemplos disto é a melhoria dos motores *stirling* feito pela NASA (2020), do qual há uma troca do alternador linear por um magnetostritivo que converte a pressão oscilatória em potência elétrica.

Pode-se citar também a crescente miniaturização dos sistemas, os quais podem ter um micromotor de filmes finos com controle de forma *wireless* Behera

(2021). O mecanismo básico é utilizar um micro motor fino, e através de comandos por energia magnética gerar movimentação e vibração desta placa fina.

Logo, pode-se inferir que com a maior necessidade de sensores, atuadores, coleta eficiente de energia em microdispositivos e a miniaturização, é um campo de pesquisa bastante promissor e que futuramente pode ter diversas aplicações, além das inúmeras já existentes em diversos campos.

5 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS *SMART MATERIALS*.

Segundo Behera (2021) e Bogue (2014), às vantagens dos principais tipos de materiais de acordo com seus dispositivos são:

- Piezoelétricos: materiais estruturalmente simples, geram sinal elétrico sob aplicação de força mecânica e vice-versa, alta frequência de resposta, podem ser processados em pequenos produtos, costumam ter um módulo de Young alto, além de serem insensíveis em sofrer interferência por meio de campos eletromagnéticos e radiação, além disso, é comum que suas formulações suportem altas temperaturas, o que permite o uso em condições extremas.
- Magnetostrictivos: são materiais com alta densidade energética. São adequados para dispositivos automatizados, e não necessitam de isolamento elétrico ou manutenção, além do fato de serem materiais com ciclo de histerese infinito. Os dispositivos de magnetostritores tem alta precisão, durabilidade e segurança de uso. Outra questão é a sua confiabilidade, devido aos magnetostritivos seguirem a teoria de guia de ondas e por não necessitarem de partes mecânicas, o que evita perdas por fricção ou atrito. Por serem dispositivos magnéticos, não há necessidade de contato elétrico direto com o magnetostritivo, bastando um ímã externo caso seja necessário, o que traz uma maior simplicidade de montagem do dispositivo.
- SMA: são materiais com comportamento superelástico, resistência mecânica e amortecimento, além de serem resistentes à corrosão, boa biocompatibilidade, podem ser processados em produtos compactos, são

leves e suportam altos ciclos de histerese.

- Fibras ópticas: São materiais flexíveis e que demandam pouco espaço físico, resistentes à corrosão, imunes à interferência eletromagnética, além de suportarem altas capacidade de faixas de bandas de transmissão.H

Seguindo as mesmas referências anteriores, as desvantagens são:

- Piezoelétricos: podem ser sensíveis a temperatura e condições ambientais nas mudanças de propriedades, por exemplo, em altas temperaturas e/ou cargas, pode haver queda da resistência elétrica, o que faz com que haja queda da sensibilidade. Outra questão é que são materiais em que as propriedades piezoelétricas dependem da pressão, ou seja, para forças estáticas podem ser ineficientes. O PZT, material que contém chumbo, é o melhor material na relação custo-benefício, mas traz consigo problemas ambientais. Além disso, existe um ciclo de vida para a propriedade piezoelétrica, visto que sua sensibilidade se perde com o tempo.
- Magnetostrictivos: sob altas frequências, estes materiais exibem correntes parasitas, o que por sua vez atrapalham a excitação no núcleo do material, apesar que pode ser corrigido através do uso de materiais laminados. Durante o uso, igualmente pode haver efeitos de fuga de corrente e desmagnetização, logo, um cientista ou engenheiro envolvido em um projeto com magnestritor deve pensar em um design eficiente para o sensor no que tange ao circuito magnético. Os produtos de magnetostrictivos são caros e complexos, não somente pelo magnetostritivo em si, senão pelo uso de cristais cristalinos como condutores ou conversores. Não devem ser utilizados para sistemas que dependam de respostas lineares, tendo em vista a sua não linearidade e histerese entre propriedades magnéticas e mecânicas.
- SMA: altos custos, sensibilidade a mudanças de temperatura, não linearidade em respostas para atuadores, problemas com propriedades de resistência à fadiga.
- Fibras ópticas: não são adequadas para suportar maiores potências ópticas, não podem transmitir energia elétrica para suas operações, os equipamentos

de transmissão e receptores são caros, além do alto custo de instalação, e seu processamento requer muito cuidado e conformidade das peças.

5 - CONCLUSÕES

As ciências e engenharia de materiais são engrenagens importantes e essenciais para produtos e aplicações, e não obstante a isso, igualmente é um fator relevante para o desenvolvimento da nova era industrial, com integração física e digital, ou até mesmo pode-se incluir biológica, através de dispositivos biomédicos.

A elevação de demandas da nova Revolução Industrial traz consigo um grande aumento das necessidades por sensores, coleta de energia e atuadores, principalmente que possam ter seu uso autônomo, em tempo real, *in situ* e/ou em microssistemas. Visando a solução para isto, surgiram inúmeros materiais com tais comportamento, chamados *smart materials*.

Apesar de haver inúmeras classes de materiais com propriedades inteligentes, as principais classes de materiais são: SMA, piezoelétricos, eletrostritores, fibras ópticas e magnetostritivos.

As SMA são ligas metálicas com memória de forma, sendo seu comportamento mecânico dependente da temperatura e/ou tensão para recuperar a sua forma. Costumam ser aplicadas como atuadores, devido a essa capacidade de deformação e recuperação de dimensões mecânicas, além de materiais para demandas de superelasticidade e amortecedores.

Os piezoelétricos convertem energia mecânica em elétrica, e vice-versa, através de microestrutura que permite dipolos permanentes. São aplicados para alimentação de energia de microssistemas, transdutores, atuadores e sensores, comumente são cerâmicas com microestrutura distorcida (ex: Perovskitas) e polímeros com boa capacidade de polarização.

Já os eletrostritores são similares aos piezoelétricos, apesar de que a deformação mecânica é proporcional ao quadrado do campo elétrico.

As fibras ópticas são dispositivos passivos que transmitem a luz, sendo vidros ou polímeros, e o seu mecanismo de funcionamento depende principalmente de mecanismos de reflexão e refração. São amplamente utilizadas para

telecomunicações e sensores.

Os magnetostritivos são materiais que convertem a energia mecânica em magnética, e vice-versa, através da capacidade em formar dipolos magnéticos permanentes. São úteis para sensores, coleta de energia em escala de microssistemas, atuadores e transdutores.

As tendências futuras para estes conjuntos de materiais é a ampliação do uso de novos materiais, novos processos e produtos, processamentos e materiais com menor impacto ambiental, maior miniaturização e melhoria contínua dos atuais materiais aplicados em *smart materials*.

REFERÊNCIAS

AABID, A.; RAHEMAN, M. A.; IBRAHIM, Y. E.; et al. **A systematic review of piezoelectric materials and energy harvesters for industrial applications.** *Sensors*, v. 21, n. 12, p. 1–27, 2021.

ADDANKI, S.; AMIRI, I. S.; YUPAPIN, P. **Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers.** *Results in Physics*, v. 10, n. June, p. 743–750, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.07.028>>. .

AKHRAS, G. **Smart Materials and Smart Systems for the future.** *Canadian Military Journal*, 2000.

AKHRAS, GEORGES. **SMART MATERIALS AND SMART SYSTEMS FOR THE FUTURE.** *Canadian Military Journal*, v. 1, n. 3, p. 25–32, 2000.

ALBIERO, D.; PAULO, R. L. DE; JUNIOR, J. C. F.; SANTOS, J. DA S. G.; MELO, R. P. **Agriculture 4.0: a terminological introduction.** *Revista Ciência Agrônômica*, v. 51, n. 5, p. 1–8, 2020.

ALMAADEED, M. A. A.; PONNAMMA, D. **Role of Research and Higher Education on Industry 4.0, Material Science as an example.** 2020 IEEE International Conference on Informatics, IoT, and Enabling Technologies, ICIoT 2020, p. 435–439, 2020.

APC INTERNATIONAL. **Low voltage co-fired multilayer stacks, rings and chips for actuation.** 2008.

APICELLA, V.; CLEMENTE, C. S.; DAVINO, D.; LEONE, D.; VISIONE, C. **Review of modeling and control of magnetostrictive actuators.** *Actuators*, v. 8, n. 2, p. 1–30, 2019.

BAHL, S.; NAGAR, H.; SINGH, I.; SEHGAL, S. **Smart materials types, properties and applications: A review.** *Materials Today: Proceedings*, v. 28, n. xxxx, p. 1302–1306, 2020. Elsevier Ltd.

BALLATO, J.; DRAGIC, P. **Rethinking optical fiber: New demands, old glasses.** *Journal of the American Ceramic Society*, v. 96, n. 9, p. 2675–2692, 2013.

BALLATO, J.; DRAGIC, P. **Materials development for next generation optical fiber.** *Materials*, v. 7, n. 6, p. 4411–4430, 2014.

BECKERS, M.; SCHLÜTER, T.; VAD, T.; GRIES, T.; BUNGE, C. A. **An overview on fabrication methods for polymer optical fibers.** *Polymer International*, v. 64, n. 1, p. 25–36, 2015.

BEHERA, A. **Advanced Materials: An Introduction to Modern Materials Science.** 2021.

BOGUE, R. **Smart materials: A review of capabilities and applications.** *Assembly Automation*, v. 34, n. 1, p. 16–22, 2014.

BRITISH PLASTICS FEDERATION. **Shape Memory Polymers - A Complete Guide.** Disponível em:

<<https://www.bpf.co.uk/plastipedia/applications/shape-memory-polymer.aspx>>.

Acesso em: 02 de abril de 2022.

BUSCHOW, K. H. J.; DE BOER, F. R. **Physics of Magnetism and Magnetic Materials.** Kluwer Academic Publishers, 2004.

CALLISTER, W.; RETHWISCH, D. **Ciência e Engenharia dos Materiais - Uma Introdução.** 8ª ed. ed. LTC, 2012.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic Materials: Science and Engineering.** Springer, 2007.

CHANDLER, D. **Explained: chemical vapor deposition | MIT News | Massachusetts Institute of Technology.** Disponível em:

<<https://news.mit.edu/2015/explained-chemical-vapor-deposition-0619>>.

Acesso em: 01 de abril de 2022.

CHOPRA, I. **Review of State of Art of Smart Structures and Integrated Systems.** *AIAA Journal*, v. 40, n. 11, p. 16–19, 2002.

COVACI, C.; GONTEAN, A. **Piezoelectric energy harvesting solutions: A review.** *Sensors (Switzerland)*, v. 20, n. 12, p. 1–37, 2020.

CRAIG, B.; LANE, R. **Materials That Sense and Respond: An introduction to Smart Materials.** *The AMPTIAC Quarterly*, v. 7, n. 2, p. 9–14, 2013.

DAS, N. **Uses of Optical Fibre: Definition, Uses and Sample Questions.** Disponível em:

<<https://collegedunia.com/exams/uses-of-optical-fibre-definition-uses-and-sample-questions-physics-articleid-859>>.

Acesso em: 28 de março de 2022.

DAY, S. R.; FLATAU, A.; NA, S. M.; SWARTZ, R. A. **The design and construction of a scour monitoring system.** *Sensors and Smart Structures Technologies for*

Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014, v. 9061, p. 90610F, 2014.

DRAGIC, P. D.; CAVILLON, M.; BALLATO, J. **Materials for optical fiber lasers: A review**. Applied Physics Reviews, v. 5, n. 4, 2018.

DROSSEL, W. G.; KUNZE, H.; BUCHT, A.; WEISHEIT, L.; PAGEL, K. **Smart3 - Smart materials for smart applications**. Procedia CIRP, v. 36, p. 211–216, 2015.

ERTURK, A.; INMAN, D. J. **Piezoelectric Energy Harvesting**. 1 st ed. New York City: John Wiley & Sons, 2011.

FAN, B. **Nonlinearity modeling of smart materials and structures**. University of Houston, 2010.

GAO, C.; ZENG, Z.; PENG, S.; SHUAI, C. **Magnetostrictive alloys: Promising materials for biomedical applications**. Bioactive Materials, v. 8, n. June, p. 177–195, 2022. KeAi Communications Co., Ltd.

GHAREEB, N.; FARHAT, M. **Smart Materials and Structures: State of the Art and Applications**. Nanotechnology & Applications, v. 1, n. 2, p. 1–5, 2018.

GIUSY, O. **Properties and Radiation Response of Optical Fibers: Role of Dopants**, 2009. Université Jean Monnet Of Saint-Etienne e Università Degli Studi Of Palermo.

GLISTAU, E.; MACHADO, N. I. C. **Industry 4.0, logistics 4.0 and materials - Chances and solutions**. Materials Science Forum, v. 919, p. 307–314, 2018.

GUPTA, P. K. A; B, P. S.; , DR. RAI, R. N. B, *. **Studies on shape memory alloys –A review**. International Journal of Advanced Engineering Technology, v. III, n. I, p. 378–382, 2012.

HAMDI, O.; MIGHRI, F.; RODRIGUE, D. **Piezoelectric cellular polymer films: Fabrication, properties and applications**. AIMS Materials Science, v. 5, n. 5, p. 845–869, 2018.

HARTL, D. J.; LAGOUDAS, D. C. **Aerospace applications of shape memory alloys**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, v. 221, n. 4, p. 535–552, 2007.

HU, J.; MENG, H.; LI, G.; IBEKWE, S. I. **A review of stimuli-responsive polymers for smart textile applications**. Smart Materials and Structures, v. 21, n. 5, 2012.

VAN HUMBEECK, J.; CHANDRASEKARAN, M.; DELAEY, L. **Shape memory alloys: materials in action**. Endeavour, v. 15, n. 4, p. 148–154, 1991.

JAN, T.; ERHART, J.; KITTINGER, E.; PŘÍVRATSKÁ, J. **Fundamentals of Piezoelectric Sensorics**. Springer, 2016.

- JANI, J. M.; LEARY, M.; SUBIC, A. **Shape memory alloys in automotive applications**. Applied Mechanics and Materials, v. 663, p. 248–253, 2014.
- JOE, H. E.; YUN, H.; JO, S. H.; JUN, M. B. G.; MIN, B. K. **A review on optical fiber sensors for environmental monitoring**. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology, v. 5, n. 1, p. 173–191, 2018.
- KAFLEE, B. P. **Chemical Analysis and Material Characterization by Spectrophotometry**. 1^o ed. Elsevier, 2020.
- KAPOOR, A. **Modeling , Design and Applications of Optical Amplifiers and Long Period Gratings**, 2010. University of Delhi South Campus.
- KHAN, M. I.; PEQUEGNAT, A.; ZHOU, Y. N. **Multiple memory shape memory alloys**. Advanced Engineering Materials, v. 15, n. 5, p. 386–393, 2013.
- KOKORIN, V. V.; WUTTIG, M. **Magnetostriction in ferromagnetic shape memory alloys**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 234, n. 1, p. 25–30, 2001.
- KUMAR, K. P.; KADOLI, R.; KUMAR, M. V. A. **Mechanical and magnetic analysis of magnetostrictive disc brake system**. 2010 5th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIS 2010, p. 644–649, 2010.
- KWOK, K. W.; LEE, T.; CHOY, S. H.; CH, H. L. W. **Lead-Free Piezoelectric Transducers for Microelectronic Wirebonding Applications**. 2010.
- LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys: modeling and engineering applications**. 2008.
- LENDLEIN, A.; KELCH, S. **Shape-Memory Effect From permanent shape**. Angewandte Chemie (International ed. in English), v. 41, p. 2034–2057, 2002.
- LEXCELLENT, C. **Shape-memory Alloys Handbook**. Wiley, 2013.
- LI, F.; JIN, L.; XU, Z.; ZHANG, S. **Electrostrictive effect in ferroelectrics: An alternative approach to improve piezoelectricity**. Applied Physics Reviews, v. 1, n. 1, 2014.
- LI, H.; TIAN, C.; DENG, Z. D. **Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials**. Applied Physics Reviews, v. 1, n. 4, p. 0–20, 2014.
- LIU, H.; ZHONG, J.; LEE, C.; LEE, S. W.; LIN, L. **A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications**. Applied Physics Reviews, v. 5, n. 4, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.5074184>>. .
- LIU, Z.; ZHANG, Z. F.; TAM, H. Y.; TAO, X. **Multifunctional smart optical fibers: Materials, fabrication, and sensing applications**. Photonics, v. 6, n. 2, p. 1–24, 2019.

- MAHAPATRA, S. DAS; MOHAPATRA, P. C.; ARIA, A. I.; et al. **Piezoelectric Materials for Energy Harvesting and Sensing Applications: Roadmap for Future Smart Materials**. *Advanced Science*, v. 8, n. 17, 2021.
- MATHER, P. T.; LUO, X.; ROUSSEAU, I. A. **Shape memory polymer research**. *Annual Review of Materials Research*, v. 39, p. 445–471, 2009.
- MENDEZ, A.; MORSE, T. F. **Specialty Optical Fibers Handbook**. 1º ed. Elsevier, 2007.
- MERHAR, D. M. **Piezoelectric vehicle impact sensor**. 1972.
- MION, J. A.; MORGON, F.; COSTA, A.; et al. **A óptica aplicada na indústria: um enfoque de sua importância nos cursos de Engenharia**. *Augusto Guzzo Revista Acadêmica*, v. 1, n. 19, p. 213–233, 2017.
- MISHRA, S.; UNNIKRISHNAN, L.; NAYAK, S. K.; MOHANTY, S. **Advances in Piezoelectric Polymer Composites for Energy Harvesting Applications: A Systematic Review**. *Macromolecular Materials and Engineering*, v. 304, n. 1, p. 1–25, 2019.
- MOHANTY, A.; PARIDA, S.; BEHERA, R. K.; ROY, T. **Vibration energy harvesting: A review**. *Journal of Advanced Dielectrics*, v. 9, n. 4, 2019.
- MOHD JANI, J.; LEARY, M.; SUBIC, A.; GIBSON, M. A. **A review of shape memory alloy research, applications and opportunities**. *Materials and Design*, v. 56, p. 1078–1113, 2014. Elsevier Ltd.
- MORAD, A.; ELZAHABY, A.; KAMEL, M.; KHALIL, M. **Smart Materials Used for Aero Engine Vibration Control**. *The International Conference on Applied Mechanics and Mechanical Engineering*, v. 16, n. 16, p. 1–20, 2014.
- MOTZKI, P.; KHELFA, F.; ZIMMER, L.; SCHMIDT, M.; SEELECKE, S. **Design and validation of a reconfigurable robotic end-effector based on shape memory alloys**. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 24, n. 1, p. 293–303, 2019. IEEE.
- MOTZKI, P.; SEELECKE, S. **Industrial Applications for Shape Memory Alloys**. Elsevier Ltd., 2022.
- NARESH, C.; BOSE, P. S. C.; RAO, C. S. P. **Shape memory alloys: A state of art review**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 149, n. 1, 2016.
- NASA. **Stirling Thermoacoustic Power Converter and Magnetostrictive Alternator**. NASA Technology Solution Sheet, 2020.
- NERALLA, S. **Chemical Vapor Deposition - Recent Advances and Applications**

in Optical, Solar Cells and Solid State Devices. 5^o ed. IntechOpen, 2016.

OLABI, A. G.; GRUNWALD, A. **Design and application of magnetostrictive materials**. *Materials and Design*, v. 29, n. 2, p. 469–483, 2008.

OPTICAL SOCIETY OF AMERICA. **Fiber Optics Handbook**. 1^o ed. McGraw-Hill Professional, 2001.

OZTEMEL, E.; GURSEV, S. **Literature review of Industry 4.0 and related technologies**. *Journal of Intelligent Manufacturing*, v. 31, n. 1, p. 127–182, 2020. Springer US.

PEREIRA, A. C.; ROMERO, F. **A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept**. *Procedia Manufacturing*, v. 13, p. 1206–1214, 2017. Elsevier B.V.

PETERS, K. **Polymer optical fiber sensors - A review**. *Smart Materials and Structures*, v. 20, n. 1, 2011.

PFEIFER, R.; MÜLLER, C. W.; HURSCHLER, C.; et al. **Adaptable orthopedic shape memory implants**. *Procedia CIRP*, v. 5, p. 253–258, 2013. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.01.050>>. .

PIERACCINI, M. **Monitoring of civil infrastructures by interferometric radar: A review**. *The Scientific World Journal*, v. 2013, 2013.

RANGRIZ, F.; KHALEGHI, A.; BALASINGHAM, I. **Wireless Link for Micro-scale Biomedical Implants using Magnetolectric Antennas**. 14th European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2020, 2020.

RÜDIGER, P. **Optical Fiber Technology- Physical Principles and Applications of Different Types of Optical Fibers**. *Optik & Photonik*, v. 3, n. 2, p. 52–55, 2011.

RUPITSCH, S. J. **Piezoelectric sensors and actuators: Fundamentals and applications**. Springer-Verlag GmbH Germany, 2019.

RÜSSMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; et al. **Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries**. Disponível em: <https://www.bcg.com/pt-br/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries>. Acesso em: 31 de março de 2022.

SAAD, M. **Fluoride glass fiber: state of the art**. *Fiber Optic Sensors and Applications VI*, v. 7316, p. 73160N, 2009.

SABRI, N.; ALJUNID, S. A.; SALIM, M. S.; FOUAD, S. **Fiber optic sensors: Short review and applications**. *Springer Series in Materials Science*, v. 204, p. 299–311, 2015.

SAJID, S.; HALEEM, A.; BAHL, S.; et al. **Data science applications for predictive maintenance and materials science in context to Industry 4.0**. *Materials Today: Proceedings*, v. 45, p. 4898–4905, 2021. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.357>>. .

SANGHERA, J. S.; SHAW, L. B.; AGGARWAL, I. D. **Applications of chalcogenide glass optical fibers**. *Comptes Rendus Chimie*, v. 5, n. 12, p. 873–883, 2002.

SARAWATE, N. N. **Characterization and modeling of ferromagnetic shape memory alloy Ni-Mn-Ga for sensing and actuation**. The Ohio State University, 2008.

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial**. 1º ed. Edipro, 2016.

SCHWARTZ, M. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. 2º ed. J. Wiley, 2001.

SCHWARTZ, M. **Smart materials**. 2008.

SEGUI-GOMEZ, M. **Driver air bag effectiveness by severity of the crash**. *American Journal of Public Health*, v. 90, n. 10, p. 1575–1581, 2000.

SHACKELFORD, J. F. **Introduction to Materials Science for Engineers**. 8 th. ed. Pearson, 2015.

STEWART, M. **Optical Fiber Telecommunications**. 1ª ed. Academic Press, 1979.

T. DUERIG, D. STOECKEL, D. J. SMA - **Smart materials for medical applications**. *Proc. SPIE*, v. 4763, p. 177–196, 2003.

TEJA, N. R.; BABU, M. A.; CHANAKYA, K.; RAVI, T. **Different Types of Dispersions in an Optical Fiber**. *International Journal of Scientific and Research Publications*, v. 2, n. 12, p. 643–647, 2012.

TOSI, D.; POEGGEL, S.; IORDACHITA, I.; SCHENA, E. **Fiber Optic Sensors for Biomedical Applications**. Elsevier Inc., 2018.

TRUONG, B. D.; ANDERSEN, E.; CASADOS, C.; ROUNDY, S. **Magnetolectric wireless power transfer for biomedical implants: Effects of non-uniform magnetic field, alignment and orientation**. *Sensors and Actuators, A: Physical*, v. 316, p. 112269, 2020. Elsevier B.V.

USHER, T. D.; COUSINS, K. R.; ZHANG, R.; DUCHARME, S. **The promise of piezoelectric polymers**. *Polymer International*, v. 67, n. 7, p. 790–798, 2018.

VO, K. Spectrophotometry. Disponível em: <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Kinetics/02%3A_Reaction_Rates/2.01%3A_Experimental_Determination_of_Kinetics/2.1.05](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Kinetics/02%3A_Reaction_Rates/2.01%3A_Experimental_Determination_of_Kinetics/2.1.05)>

%3A_Spectrophotometry>. Acesso em: 08 de abril de 2022.

WANG, X. D.; WOLFBEIS, O. S. **Fiber-optic chemical sensors and biosensors**. Analytical Chemistry, v. 92, n. 1, p. 397–430, 2020.

WENG, J. **Development of Platform Independent Remote Experiments**. University of Houston, 2014.

WICHMANN, R. L.; EISENBART, B.; GERICKE, K. **The direction of industry: A literature review on industry 4.0**. Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED, v. 2019-Augus, n. AUGUST, p. 2129–2138, 2019.

WILLARD, M. A.; CLAASSEN, J. C.; STROUD, R. M.; FRANCAVILLA, T. L.; HARRIS, V. G. **(Ni,Fe,Co)-based nanocrystalline soft magnets with near-zero magnetostriction**. IEEE Transactions on Magnetics, v. 38, n. 5 I, p. 3045–3050, 2002.

YEH, C. **Handbook of Fiber Optics**. Academic Press, Inc., 1990.

YIN-CAN, XINMIN JIANG, GUOFU PAN, W. J. **Submarine Optical Cable Engineering**. Submarine Optical Cable Engineering. p.1–27, 2018. Elsevier.

YOICHI, M. **Applications of Piezoelectric Actuator**. NEC Technical Journal, v. 1, n. 5, 2006.

YU, G. Magnetostriction - Engineering LibreTexts. Disponível em: <[https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_\(Materials_Science\)/Magnetic_Properties/Magnetostriction](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Materials_Science/Supplemental_Modules_(Materials_Science)/Magnetic_Properties/Magnetostriction)> Acesso em: 02 de abril de 2022.

ZHANG, S. **High performance ferroelectric relaxor-PbTiO₃ single crystals: Status and perspective**. Journal Of Applied Physics, v. 111, 2012.

