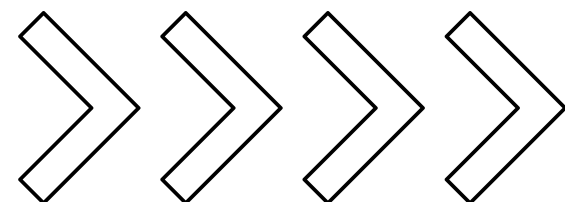


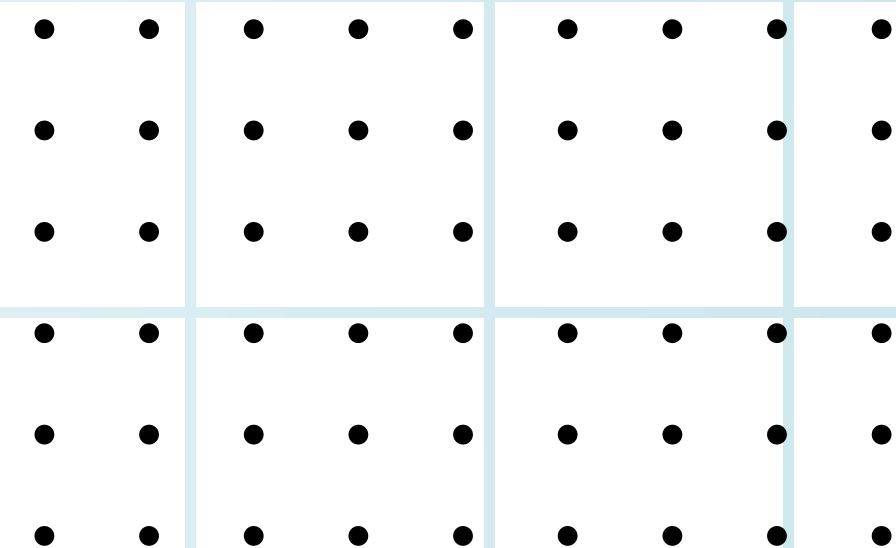
SENSORES MAGNETOELÁSTICOS NO MONITORAMENTO DE EDIFICAÇÕES CIVIS

LOM 3223 - MATERIAIS E DISPOSITIVOS
MAGNÉTICOS E SUPERCONDUTORES



Grupo S4

Gabriel dos Santos Melo
Lucas Rodini Amato
Luiz Guilherme Bispo da Silva
Nicolas Ribeiro
Paulo Vinicius P. da Silva Camargo



Sumário

01 Introdução e Contexto

02 Fundamentos Físicos e Montagem do Sensor

03 Desenvolvimento do Sensor

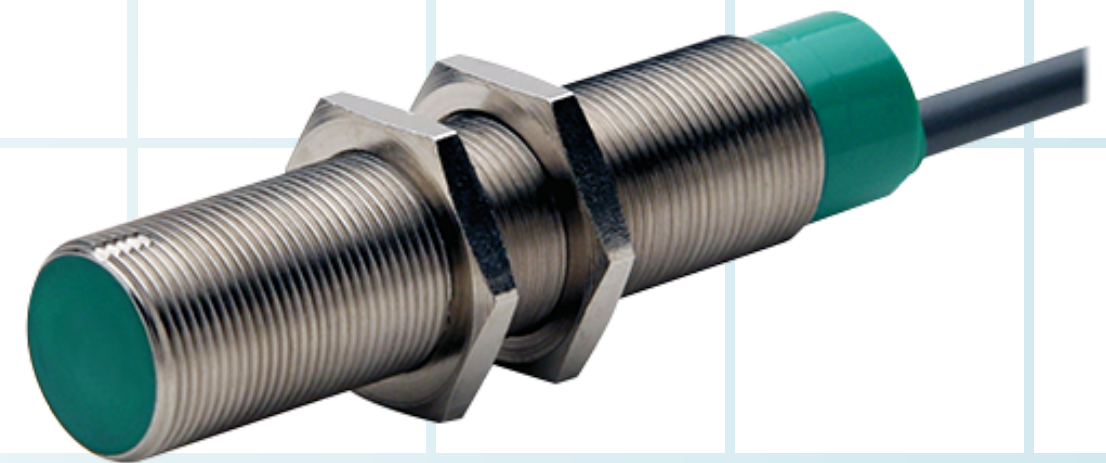
04 Aplicações e Benefícios práticos

05 Conclusões e Perspectivas Futuras

Introdução

O que são Sensores Magnetoelásticos?

- MES é uma alternativa as limitações dos sensores tradicionais (extensômetros resistivos e os sensores de fio vibratório (VWSG)).
- Características dos MES:
 - Alta sensibilidade;
 - Alta estabilidade e confiabilidade;
 - Capacidade de monitoramento em tempo real;
 - Possibilidade de miniaturização e operação wireless.



Fonte: WEG, Sensores Magnéticos .

Por que Monitorar Edificações Cíveis?

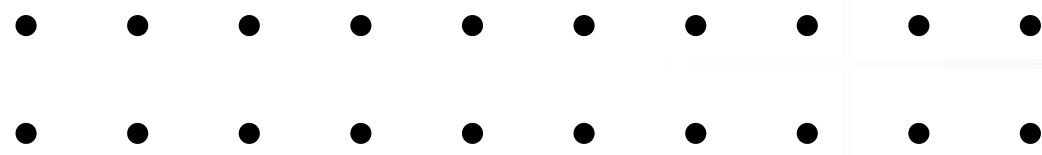
- Prevenção de acidentes;
- Detecção precoce de problemas de integridade;
- Redução de custos com manutenção corretiva;
- Aumento da vida útil das estruturas;
- Atendimento a normas de segurança e regulamentações de engenharia civil.

Aplicação em Engenharia Civil

1. Monitoramento de Vigas Metálicas

**2. Monitoramento de Estruturas de
Concreto Armado (Pilares**

**3. Monitoramento de Fissuras em
Paredes de Tufa**



Princípios Físicos de Funcionamento

Do macro ao micro

- Materiais magnetoelásticos
- Magnetostricção
- Efeito Villari

Materiais magnetoelásticos

01

Materiais que sofrem mudanças nas suas dimensões em função de um campo aplicado.

- São materiais ferromagnéticos (mas não necessariamente) nos quais é possível a conversão de energia magnética em energia mecânica(elástica)
- Materiais que podem sofrer deformações na presença de campo magnético ou alterações em suas propriedades magnéticas em tensões externas.
- Essas alterações são consequência de dois efeitos que podem ocorrer nesses materiais: Magnetostricção e Efeito Villari.

Alguns materiais magnetoelásticos:

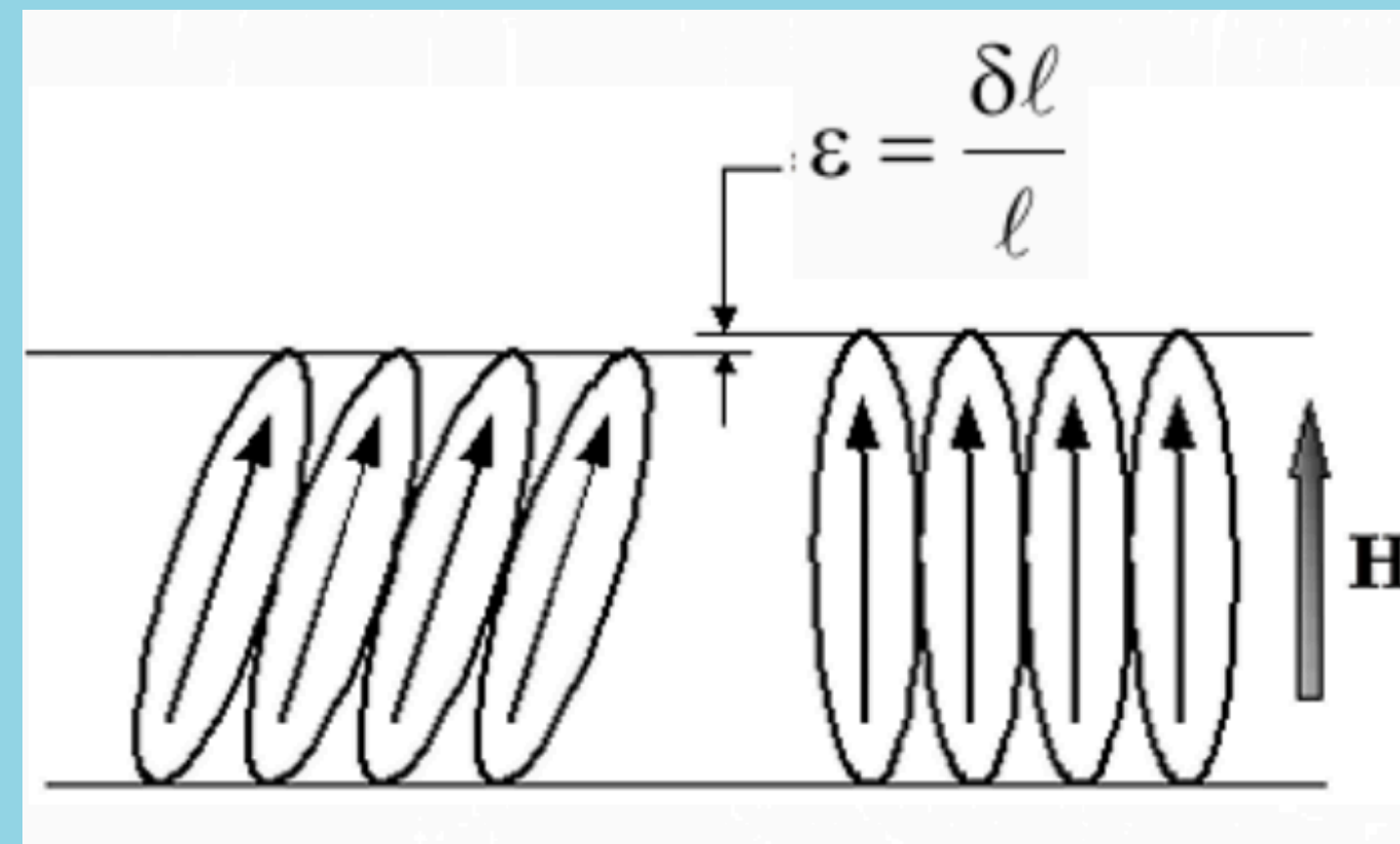
1. Terfenol-D: de 1500 à 2000 ppm
2. Galfenol: de 150 à 400 ppm
3. Ligas Metálicas Amorfas (Metglas): de 26 à 41 ppm)
4. Ferrita de Cobalto(CoFe_2O_4): de -100 à -225 ppm
5. Ligas Amorfas a base de Cobalto

Magnetostricção

02

Magnetostricção é o fenômeno no qual esses materiais sofrem alterações em suas dimensões a partir de um campo aplicado

- Reorganização interna do próprio material em resposta a um campo magnético
- A presença do campo externo leva a um alinhamento dos domínios magnéticos do material na direção campo.
- Devido ao acoplamento spin-orbita, esse alinhamento gera um torque nos orbitais.
- O que leva a um reordenamento da rede cristalina de forma a atingir uma nova posição de equilíbrio entre os átomos vizinhos. De forma a encontrar um novo estado de equilíbrio



Fonte: Slides das aulas

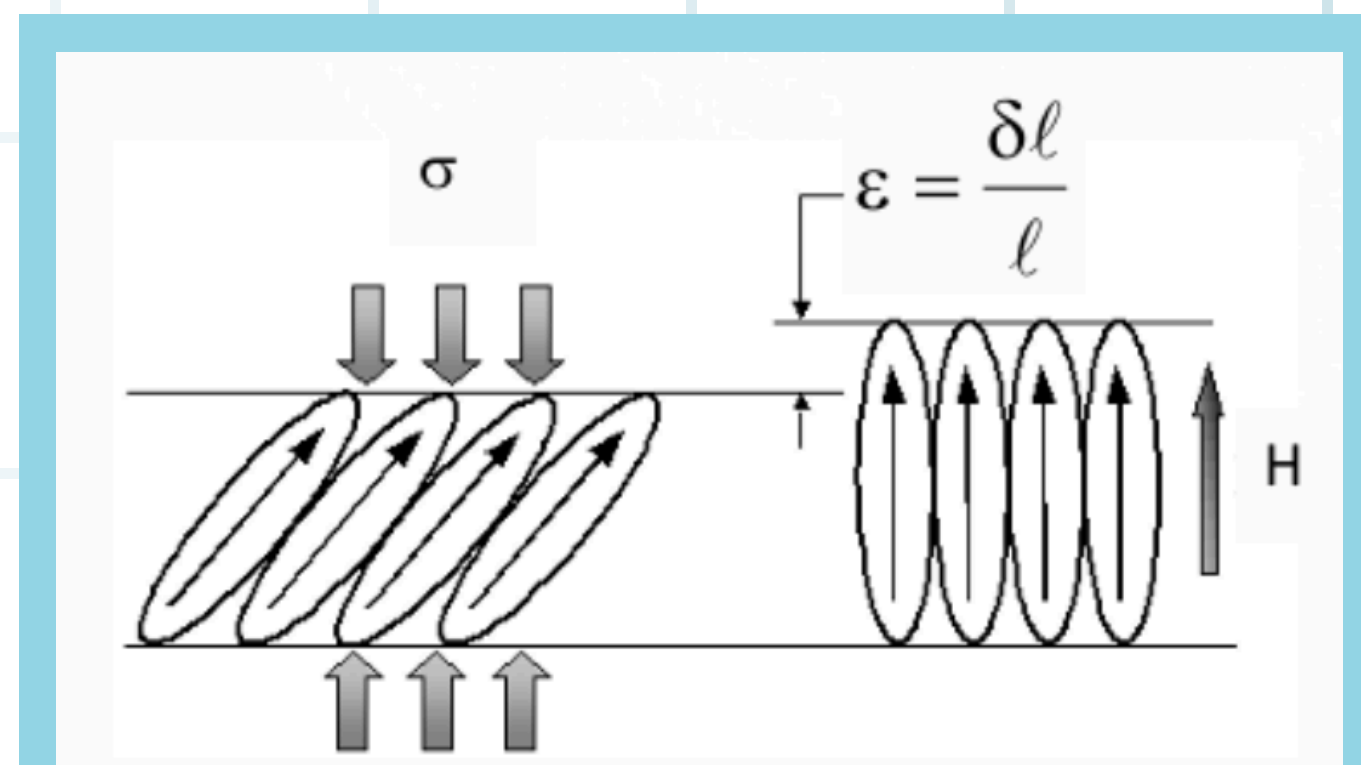
Efeito Villari:

03

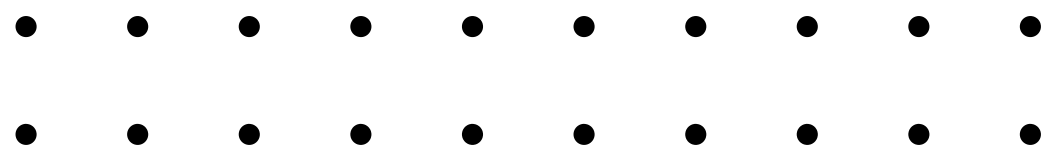
O Efeito Villari é justamente o inverso do efeito magnetostrictivo mas com ressalvas.

- Alteração na permeabilidade magnética do material quando uma tensão mecânica externa é aplicada.
- Devido a estrutura cristalina do material, os domínios magnéticos tem uma direção de fácil magnetização. (energia de anisotropia)
- Quando uma tensão é aplicada sobre o material, energia elástica é adicionada à rede. Essa energia interage com a magnetostricção de forma a criar uma nova direção de fácil magnetização para os domínios.
- Essa direção depende de λ

- Se $\lambda > 0$: Uma força de tração aplicada irá gerar uma nova direção de fácil magnetização paralela à direção da força aplicada. O que por sua vez aumenta a permeabilidade magnética do material
- Se $\lambda < 0$: A força de tração faz com que os domínios se alinhem perpendicularmente a direção da força. O que aumenta a energia magnética necessária para alinhar esses domínios na direção do campo. Ou seja, a permeabilidade aumenta.



Fonte: slides das aulas



Desenvolvimento, Funcionamento e Validação do Sensor Magnetoelástico

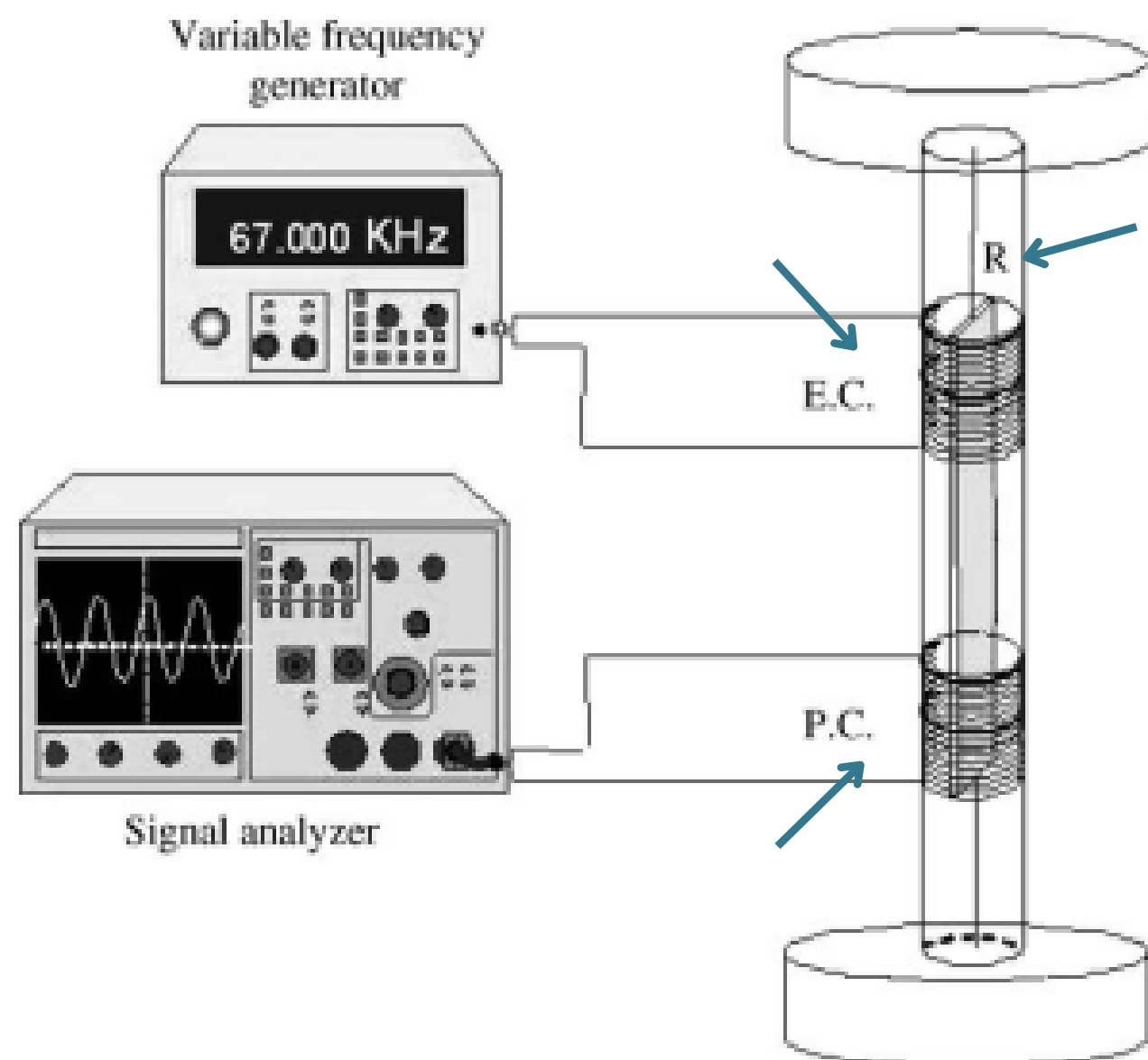
- Como o sensor magnetoelástico foi construído
- Seu princípio físico de funcionamento
- O processo de conversão de tensão mecânica em sinal elétrico
- A realização dos testes experimentais
- Testes Realizados e os resultados obtidos



Como o Sensor é Montado

- O sensor desenvolvido utiliza uma fita amorfa de **$\text{Fe}_{62.5}\text{Co}_6\text{Ni}_{7.5}\text{Zr}_6\text{Cu}_1\text{Nb}_2\text{B}_{15}$** , tratada termicamente a **390°C por 1 hora** (abaixo da temperatura de cristalização, garantindo a estabilidade magnética e propriedades magnetoelásticas).
- A fita é suspensa por **fios de nylon** (não-condutor e mecanicamente estável) dentro de um tubo cilíndrico elástico (90 mm de comprimento, 15 mm de diâmetro), de forma que não encoste nas paredes do tubo, preservando sua liberdade vibracional.
- Um campo magnético alternado é gerado por uma **bobina excitadora (E.C.)**, induzindo ondas longitudinais de ressonância na fita. A **bobina receptora (P.C.)** detecta a resposta vibracional amplificada, que é proporcional ao estresse aplicado à estrutura.

Arquitetura Experimental do Sensor



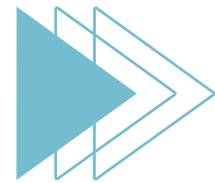
Fonte: AUSANIO, G. et al. (2005).

LEGENDA

- R = Fita Magnetoelástica
- E.C. = Bobina Excitadora (Excita)
- P.C. = Bobina de Leitura (Lê)

- Corpo cilíndrico com 90 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro
- **E.C. (Exciting Coil):** Gera **campo magnético alternado**, fazendo a fita vibrar em sua frequência ressonante
- **P.C. (Pick-up Coil):** **Detecta** a resposta vibracional induzida pela fita e **gera sinal elétrico proporcional**
- Transforma uma **deformação mecânica em um sinal elétrico mensurável**

Como o Sensor “Fala” com o Sistema



Princípio Físico de Funcionamento

- A excitação da fita gera **ondas estacionárias longitudinais** na frequência fundamental de ressonância:

$$v_0 = \frac{v}{2l} \quad \text{onde} \quad v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

- Em paralelo, temos o efeito da **Magnetostricção direta** (Campo Magnético alternado gera uma deformação mecânica):

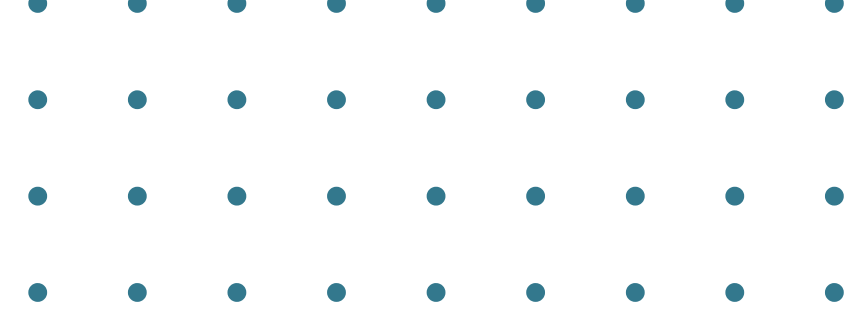
$$\vec{\varepsilon} = [g]\vec{B}$$

- A vibração da fita **induz um campo magnético alternado** na bobina de leitura (P.C.) → efeito de magnetostricção inversa → **sinal elétrico senoidal alternado**:

$$V(t) = V_0 \cdot \sin(2\pi v_0 t + \phi)$$

- Equação Final:** V_0 (Amplitude) depende diretamente da tensão mecânica aplicada à estrutura:

$$V_0 \propto H_0 \cdot \mu \cdot k^2 \cdot \left(\frac{E}{\rho}\right)^{1/2}$$



LEGENDA

- v_0 = frequência fundamental da ressonância longitudinal
- v = Velocidade da onda Acústica na fita
- l = Comprimento da fita amorfa
- E = Módulo de Young da Fita
- ρ = Densidade da Fita

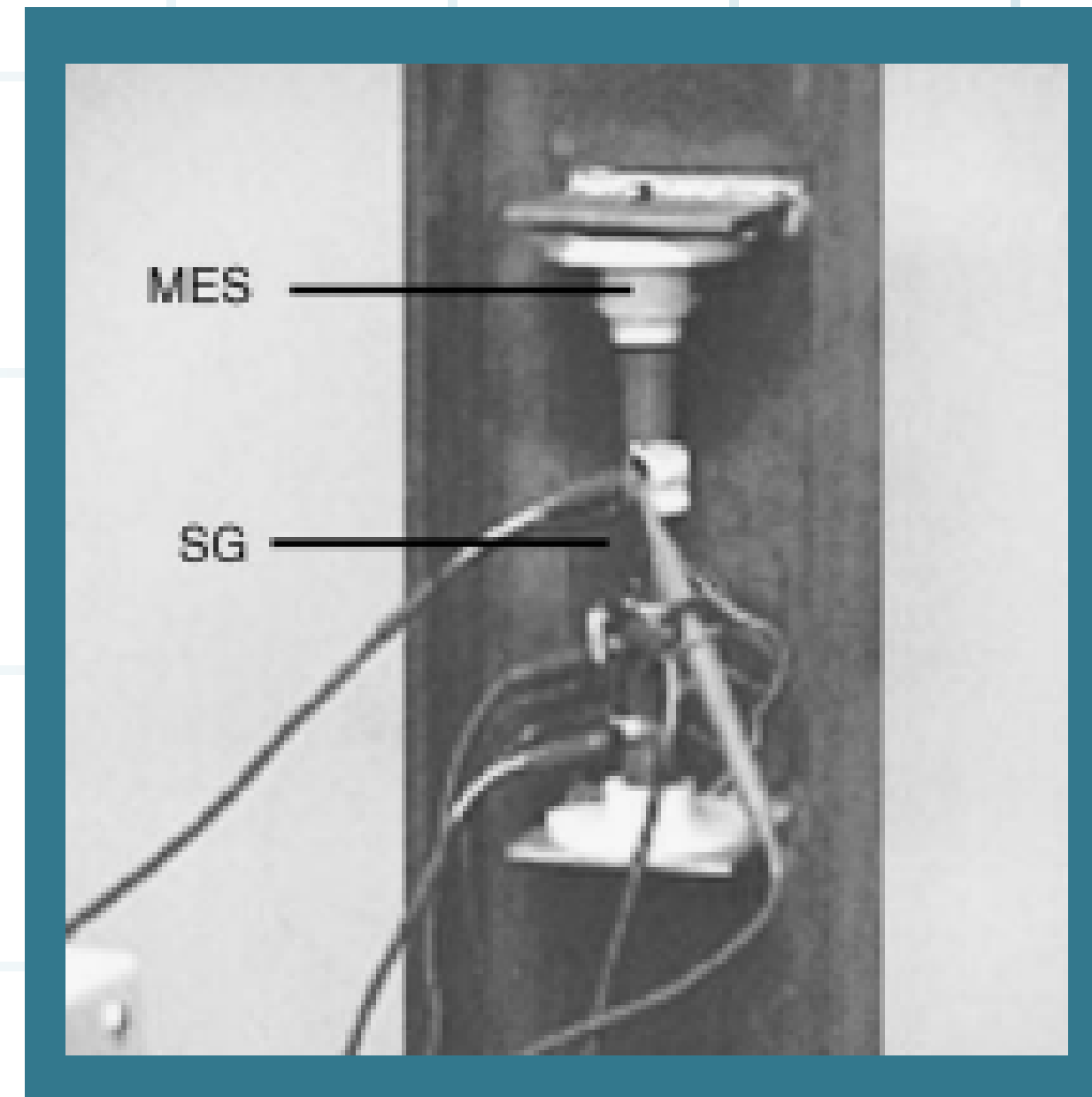
- $\vec{\varepsilon}$ = Vetor de Deformação
- $\vec{B}$ = Campo Magnético alternado (gerado por E.C.)
- $[g]$ = Matriz de acoplamento magnetoelástico

- ϕ = Fase da Oscilação Senoidal
- H_0 = Amplitude do Campo Magnético
- V_0 = Amplitude do Sinal de Saída (detectado por P.C.)

Validação Experimental em Diferentes Estruturas

01 Viga Metálica - Comparação com Strain Gauge (Extensômetro)

- O **sensor magnetoelástico (MES)** foi instalado sobre uma viga metálica do tipo **duplo T**.
- A fita sensora foi suspensa dentro de um tubo fixado por placas metálicas soldadas na viga.
- Um **extensômetro resistivo (strain gauge – SG)** comercial foi fixado **sobre o MES** para permitir **comparação direta**.
- O carregamento foi feito por aplicação de massas sobre a viga, induzindo **deformação longitudinal (compressão)**.



Fonte: AUSANIO, G. et al. (2005).

Validação Experimental em Diferentes Estruturas

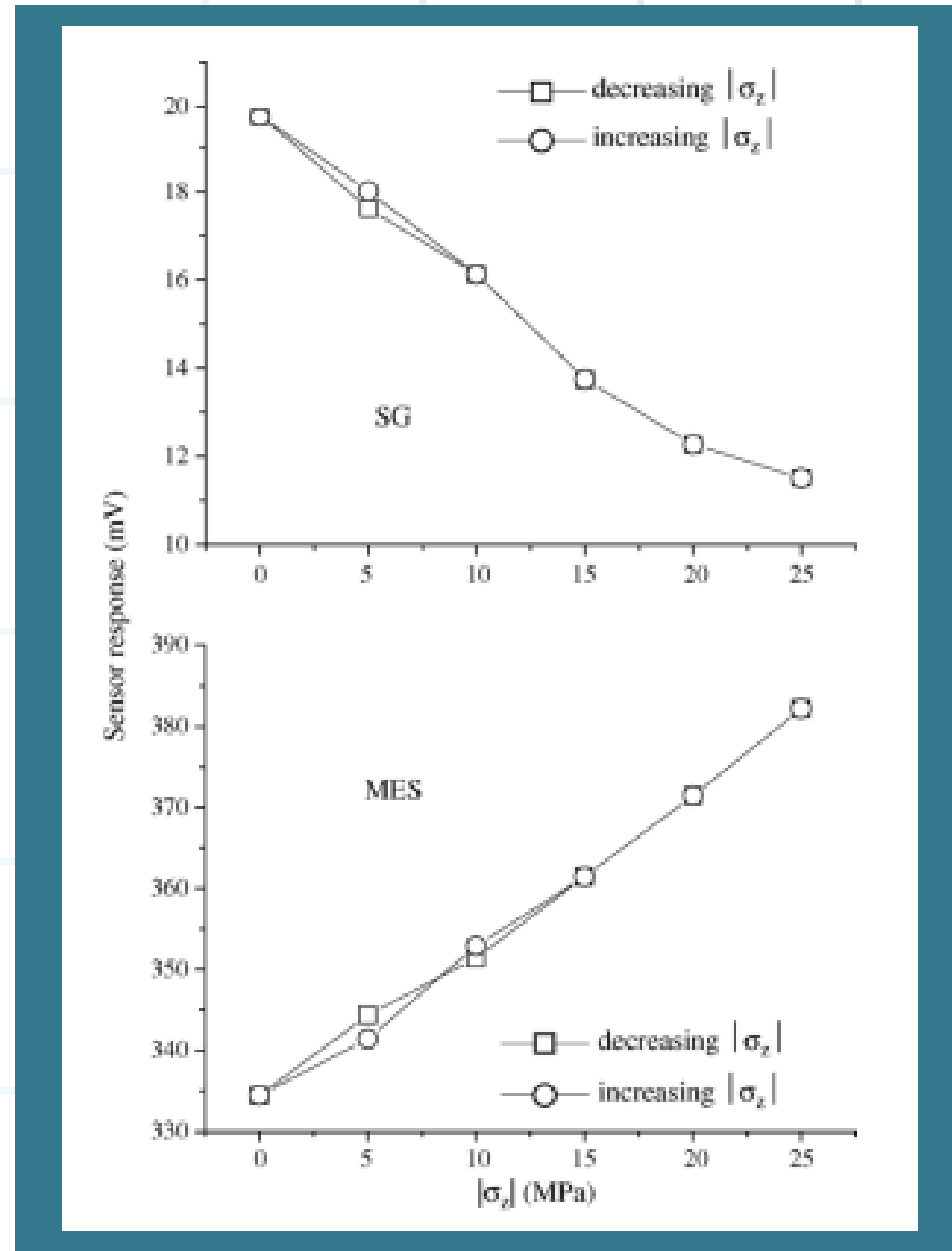
01 Viga Metálica - Comparação com Strain Gauge (Extensômetro)

O gráfico de Resposta mostra que:

- Ambos os sensores têm **resposta linear e confiável**.
- O **MES** apresentou uma sensibilidade cerca de **4 vezes maior** que o extensômetro Resistivo, para uma mesma tensão:

SG: $\Delta V = 9,7 \text{ mV}$ (para $\Delta\sigma = 25 \text{ MPa}$)

MES: $\Delta V_0 = 37,7 \text{ mV}$ (para $\Delta\sigma = 25 \text{ MPa}$)



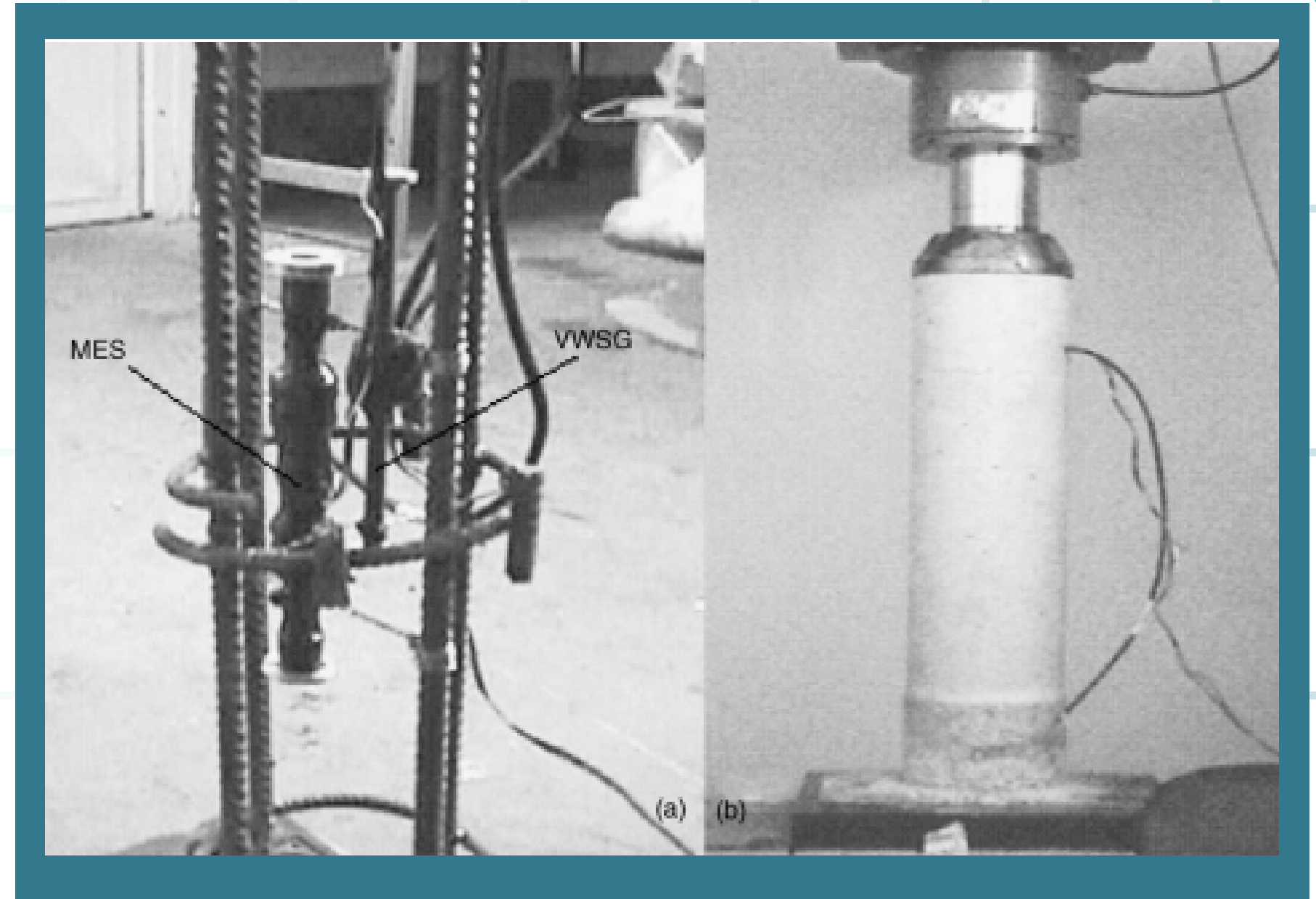
Fonte: AUSANIO, G. et al. (2005).

Validação Experimental em Diferentes Estruturas

02

Monitoramento de Pilar com Sensor de Fio Vibratório (VWSG)

- O **sensor magnetoelástico (MES)** foi inserido em um pilar com concreto armado, junto a um **sensor de fio vibratório (VWSG)**, durante a moldagem da estrutura.
- O objetivo era monitorar o **processo de cura e solidificação do concreto** e **avaliar a sensibilidade dos sensores**



Fonte: AUSANIO, G. et al. (2005).

Validação Experimental em Diferentes Estruturas

02

Monitoramento de Pilar com Sensor de Fio Vibratório (VWSG)

O **MES** demonstrou:

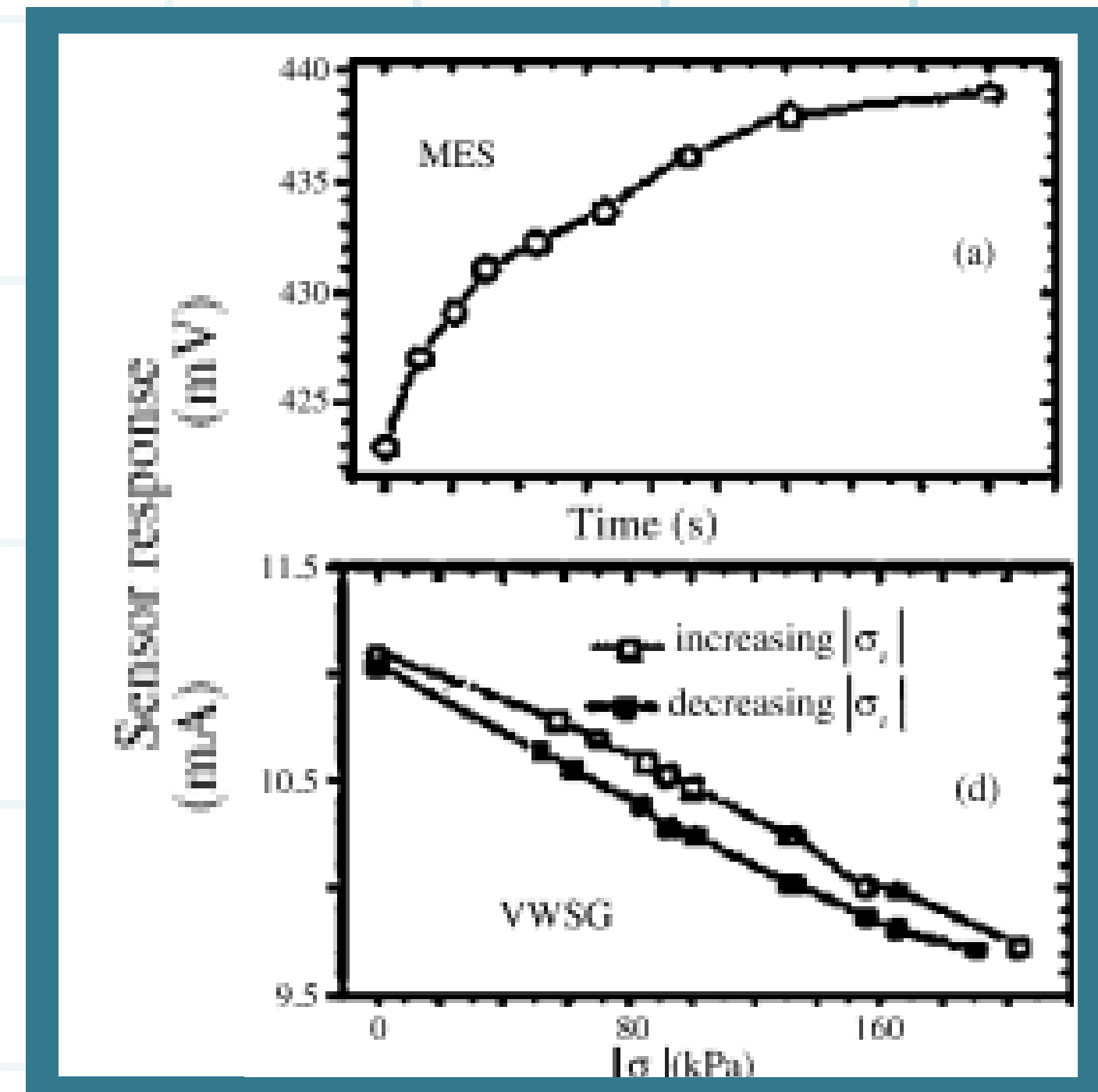
- **Estabilidade** ao longo do tempo
- **Baixa histerese** em ciclos de carga ($\approx 4\%$)
- Capacidade de **captar variações sutis de tensão** desde os primeiros minutos após a moldagem

O **VWSG**, por outro lado:

- Apresentou **resposta ruidosa e aleatória**
- **Alta histerese** ($\sim 15\%$)

Sensibilidade:

- **MES**: $\Delta V_0 = 285 \text{ mV}$ para $\Delta \sigma = 200 \text{ kPa}$
- **VWSG**: $\Delta I = 1,4 \text{ mA}$ para $\Delta \sigma = 200 \text{ kPa}$
- **MES** foi cerca de 200 vezes mais sensível



Fonte: AUSANIO, G. et al. (2005).

Validação Experimental em Diferentes Estruturas

03

Detecção de Pré-Fratura em Parede de Tufo

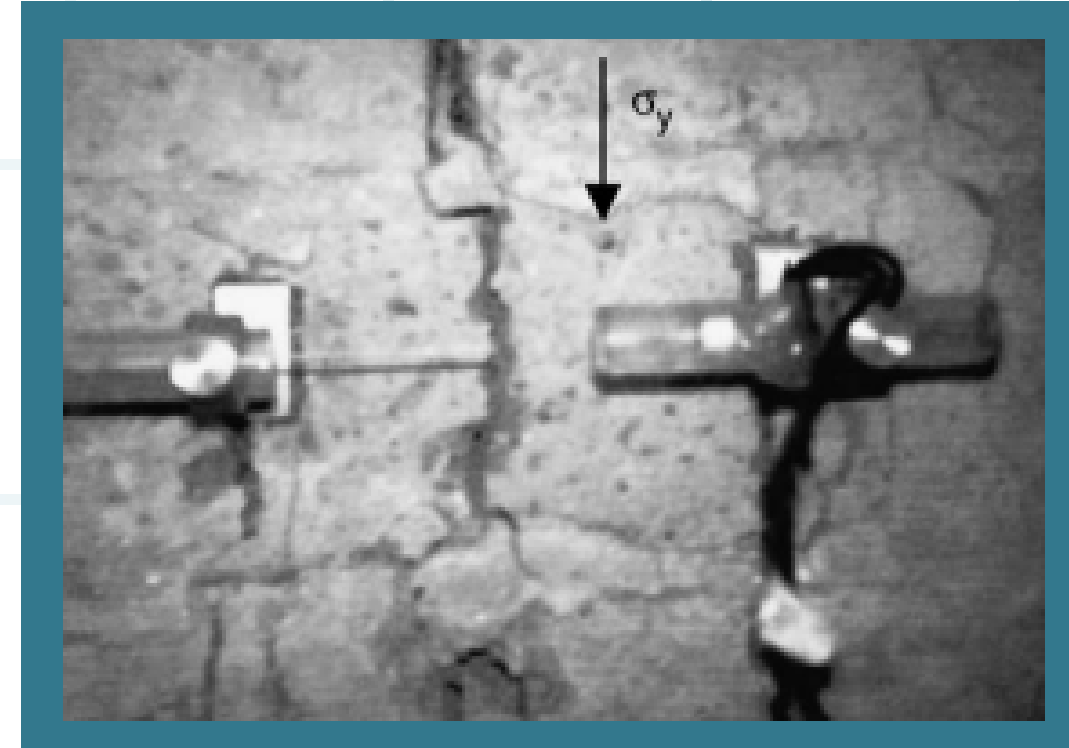
- O sensor foi fixado em uma parede de tufo, material poroso usado em construções antigas, submetida a carga longitudinal crescente (σ_y).
- A fita foi posicionada perpendicular à fratura esperada, medindo a deformação transversal (ϵ_x).

Durante a aplicação de carga:

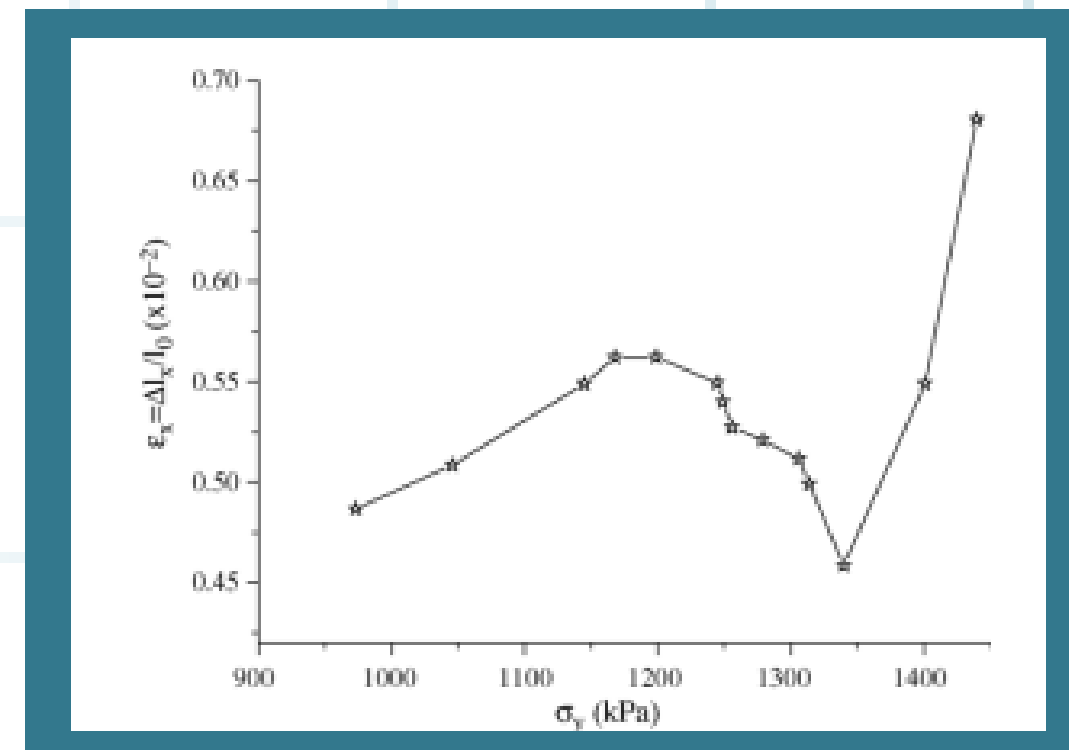
- **Inicialmente:** comportamento linear entre a carga e a deformação (ϵ_x)
- **Fase crítica:** Deformação começa a cair, mesmo com aumento da carga → indica fase de pré-fratura
- **Ruptura:** ϵ_x salta abruptamente, indicando abertura da fissura

Resultados: O **MES** foi capaz de identificar a Fase Crítica, logo:

- Antecipar a falha estrutural
- Atuar como sensor de alerta preventivo, detectando instabilidade antes do colapso

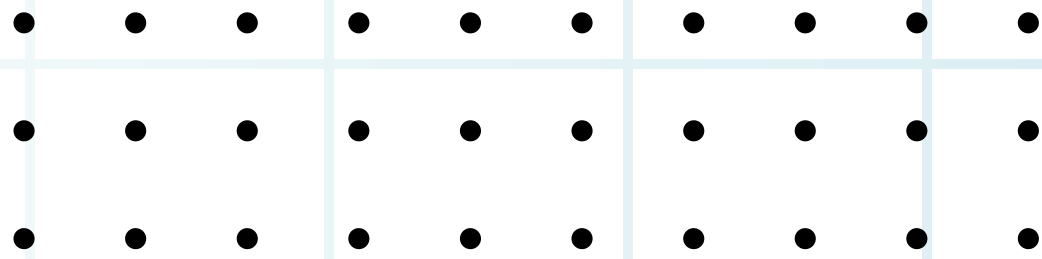


Fonte: AUSANIO, G. et al. (2005).



Fonte: AUSANIO, G. et al. (2005).

Conclusões e Potencial do Sensor Magnetoelástico



O **sensor magnetoelástico (MES)** foi testado em três contextos distintos : viga metálica, pilar de concreto e parede de tufo, demonstrando **desempenho consistente e superior aos sensores tradicionais em todos os cenários.**

Comparado a sensores tradicionais como strain gauges e fios vibratórios, o MES apresentou:

- **Maior sensibilidade** (até 200× superior)
- **Menor histerese** (< 4%)
- **Maior estabilidade** em regime dinâmico
- Capacidade de **detectar fases críticas** (como a pré-fratura).

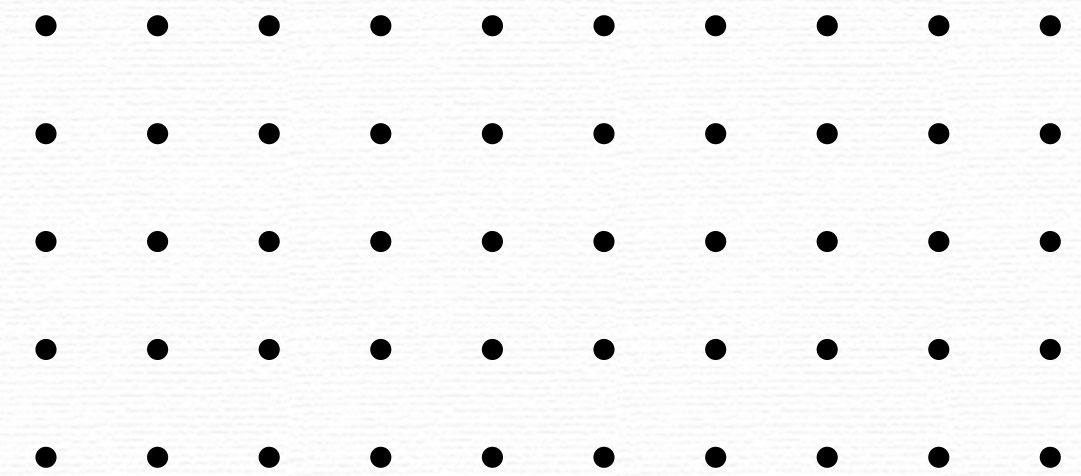
Com base nesses resultados, fica evidente que o sensor magnetoelástico representa uma solução promissora e tecnicamente viável para o monitoramento de estruturas civis.

Aplicações e Benefícios práticos

Os sensores magnetoelásticos têm aplicações fundamentais na construção civil e engenharia de materiais, com destaque para:

1. Monitoramento de Estruturas:

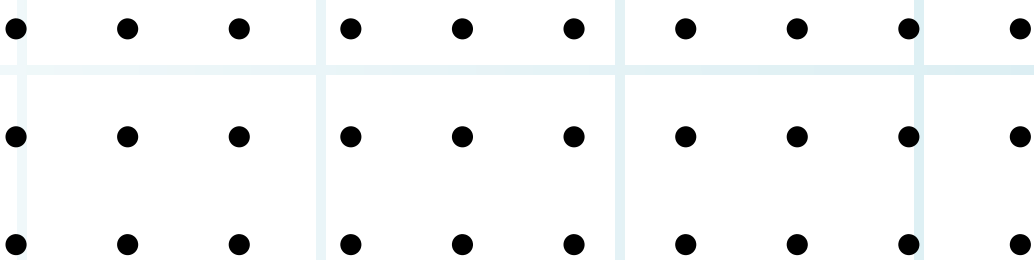
Medição de tensões, vibrações e deformações em componentes estruturais como pontes, pilares e lajes, permitindo a identificação precoce de danos ou sobrecargas.



2. Monitoramento de Estruturas (Ponte):

Monitoramento de tensão em cabos metálicos utilizados em pontes suspensas, detectando alterações no campo magnético permitindo a identificação precoce de danos ou sobrecargas.

Monitoramento de Estruturas





Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

Sensors and Actuators A 123–124 (2005) 290–295

www.elsevier.com/locate/sna

Magnetoelastic sensor application in civil buildings monitoring

G. Ausanio^a, A.C. Barone^{a,b}, C. Hison^b, V. Iannotti^a, G. Mannara^c, L. Lanotte^{a,*}

^a *Coherentia-INFM and Dip. di Scienze Fisiche, Università “Federico II”, P. le V. Tecchio 80, 80125 Napoli, Italy*

^b *Dip. di Ingegneria dei Materiali e della Produzione, PROMETE Srl and INFM, Università “Federico II”, P. le V. Tecchio 80, 80125 Napoli, Italy*

^c *STRAGO Srl, Via Campana 233, 80078 Pozzuoli (NA), Italy*

Received 13 September 2004; received in revised form 2 March 2005; accepted 6 March 2005
Available online 20 April 2005

Abstract

The development of a novel magnetoelastic sensor, based on the stress influence on amplitude of the resonant mechanical waves inside a Fe_{62.5}Co₆Ni_{7.5}Zr₆Cu₁Nb₂B₁₅ ribbon, for strain and/or stress real-time monitoring in civil buildings is reported. This novel sensor exhibits better sensitivity than resistive and vibrating wire strain gauges, good reliability and stability.

© 2005 Elsevier B.V. All rights reserved.

Keywords: Strain–stress sensor; Magnetoelastic resonator; Magnetostrictive material

Fonte: AUSANIO, G. et al. (2005).

第 40 卷第 3 期
2024 年 6 月

结 构 工 程 师
Structural Engineers

Vol. 40, No. 3
Jun. 2024

基于电磁弹式索力传感器的悬索桥短吊索索力检测

沈 伟¹ 张伟山¹ 魏 巍² 段元锋^{2,*} 段元昌³

(1.湖北交投智能检测股份有限公司,武汉 430050; 2.浙江大学建筑工程学院,杭州 310058;
3.杭州健而控科技有限公司,杭州 310030)

摘 要 采用传统索力测试方法进行短吊索索力测试的精度难以满足工程需求。本文以棋盘洲长江公路大桥悬索桥荷载试验为工程依托,提出基于磁弹原理及磁电效应的电磁弹式索力传感器检测吊索索力的方法,并与有限元分析结果以及频率法、应变法测试结果进行对比。结果表明,试验标定误差小于±2%,在荷载试验中,传统索力测试方法对吊索的测量误差偏大,采用电磁弹式索力传感器更为准确地测量了短吊索索力,解决了短吊索索力的测量难题。荷载试验的吊索索力测试结果表明,索力增量的测试值与分析值偏差小于±5%,实际索力的测试值与分析值偏差小于±4%。

关键词 电磁弹索力传感器,悬索桥吊索,荷载试验,索力检测

Application of Elasto-Magneto-Electric (EME) Sensor for Short Suspender Cable Force Measurement in Suspension Bridge

SHEN Wei¹ ZHANG Weishan¹ WEI Wei² DUAN Yuanfeng^{2,*} DUAN Yuanchang³

(1.Hubei Communications Investment Detection Co.,Ltd., Wuhan 430050, China;
2.College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
3.Monitoring and Control Hangzhou Co.,Ltd., Hangzhou 310030, China)

Abstract The accuracy of traditional cable force testing methods for short suspension cables is unable to meet engineering requirements. This paper proposed the elasto-magneto-electric (EME) sensor with the magnetoelastic principle and magnetoelectric effect to complete the cable force monitoring of short suspenders, based on the suspension bridge load test of Qipanzhou Yangtze River Highway Bridge. The measurement results obtained from EME sensor were compared with the finite element analysis value and the measurement results from the traditional cable force sensor. The results show that experimental calibration error of EME sensor is less than ±2%, in the loading test, the measurement error of the traditional cable force sensor for the short suspender is relatively large, and the EME sensor can more accurately measure the increment of the cable force, which breaks through the difficulty of measuring the cable force of the short suspender. The results of the suspension cable force measurement with the EME sensor in the load test show that the deviation between the test value and the analysis value of cable force increment in field load test is less than ±5%, and the deviation between the actual cable force test value and its analysis value is less than ±4%.

Keywords elasto-magneto-electric sensors, suspender cable, loading test, cable force measurement

收稿日期: 2023-07-12
基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0112600), 国家自然科学基金(52378318, 52361165658), 浙江省自然科学基金(LHZ23E080003)
作者简介: 沈 伟,男,高级工程师,研究方向为桥梁结构检测与监测。E-mail: 2627028@qq.com
* 联系作者: 段元锋,男,教授,研究方向为结构健康监测与振动控制。E-mail: ceyfduan@zju.edu.cn

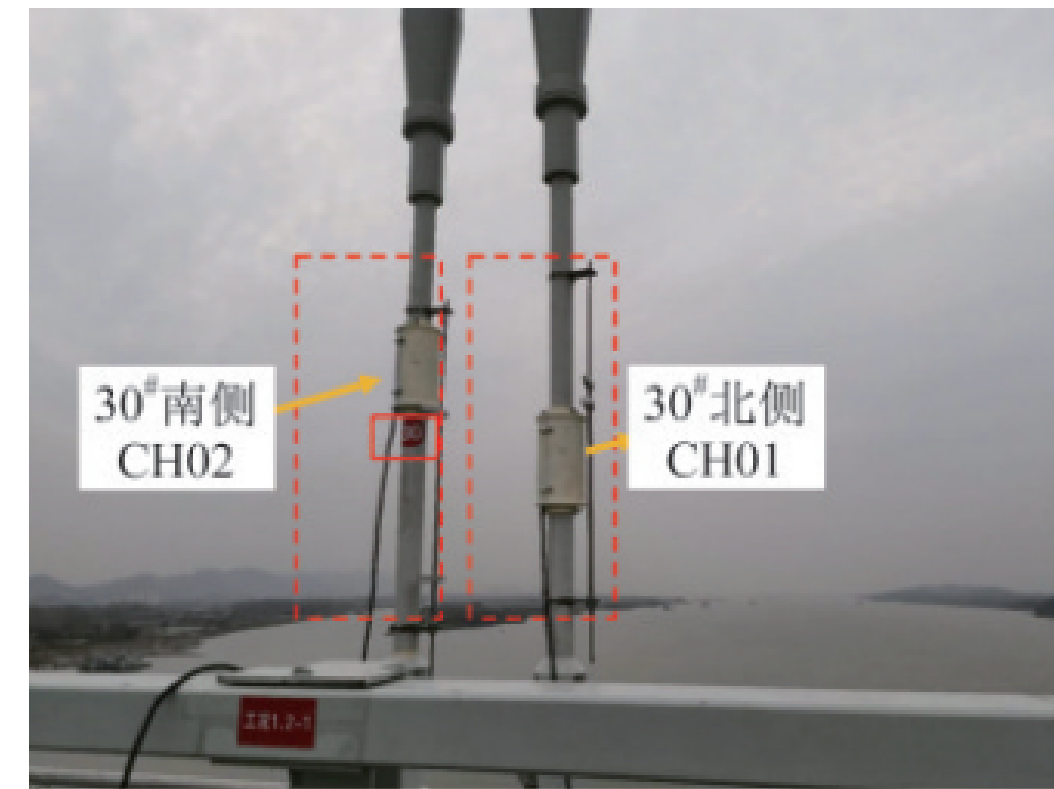
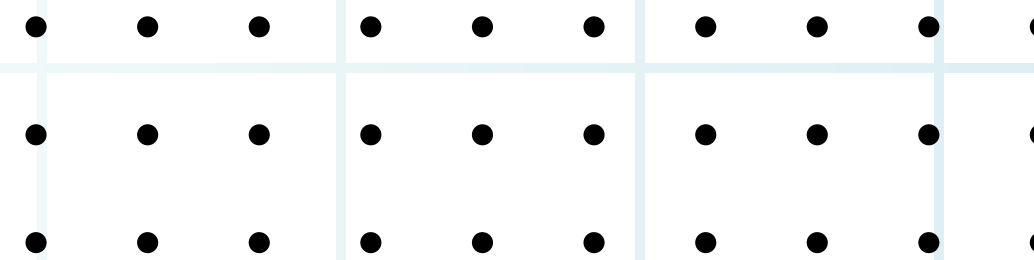
Fonte: SHEN, Wei et al. (2024).

Monitoramento de Estruturas

Finalidade Principal: Resolver o desafio de medir com precisão a força em cabos de suspensão curtos, onde métodos tradicionais (como o de frequência de vibração) são ineficazes.

Princípio Físico: Baseado no Efeito Villari (efeito magnetoelástico inverso), onde uma força mecânica aplicada ao sensor altera suas propriedades magnéticas.

Importância: A inovação está no elemento de detecção. Em vez de usar uma bobina de indução passiva, este sensor utiliza um elemento sensor magnetelétrico (EME).

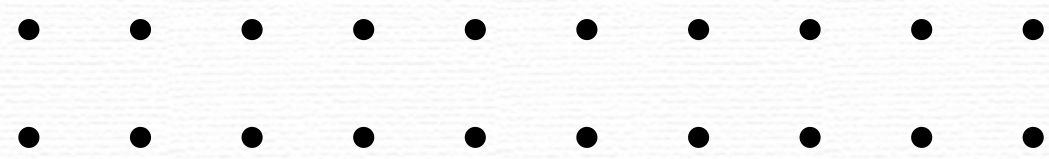


Fonte: SHEN, Wei et al. (2024).

Curiosidade - teste de
carga estrutural: 84
Caminhões



Qipanzhou Yangtze River Highway Bridge



Aplicações e Benefícios práticos

A aplicação dos sensores magnetoelásticos não se limita ao setor da construção, podendo também ser explorada em diversos ramos da engenharia, como:

3. Engenharia Biomédica:

Um levantamento abrangente que explora como os sensores magnetoelásticos (MES) são usados para monitorar uma variedade de parâmetros biológicos e químicos — utilizados em diagnósticos, cultivo celular e monitoramento fisiológico, com resposta rápida e sem fio.

4. Indústria Automotiva:

Utilizados em eixos de transmissão de veículos, especialmente em aplicações de alta performance como carros de corrida, para medir o torque aplicado de forma precisa, contínua e sem contato físico.

APLICAÇÕES DIVERSAS



Review

Applications and Advances of Magnetoelastic Sensors in Biomedical Engineering: A Review

Limin Ren , Kun Yu and Yisong Tan *

School of Mechanical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China; renlimin@neepu.edu.cn (L.R.); 2201700350@neepu.edu.cn (K.Y.)

* Correspondence: tanyisong@neepu.edu.cn; Tel.: +86-432-6480-7382

Received: 18 March 2019; Accepted: 5 April 2019; Published: 7 April 2019



Abstract: We present a comprehensive investigation into magnetoelastic sensors (MES) technology applied to biomedical engineering. This includes the working principles, detection methods, and application fields of MES technology. MES are made of amorphous metallic glass ribbons and are wireless and passive, meaning that it is convenient to monitor or measure the parameters related to biomedical engineering. MES are based on the inverse magnetoelastic (Villari) effect. When MES are subjected to mechanical stress, their magnetic susceptibility will change accordingly. And the susceptibility of MES is directly related to their magnetic permeability. The varying permeability can positively reflect the applied stress. The various detection methods that have been developed for different field applications include measurement of force, stress, and strain, monitoring of various chemical indexes, and consideration of different biomedical parameters such as the degradation rate and force conditions of artificial bone, as well as various physiological indexes including ammonia level, glucose concentration, bacteria growth, and blood coagulation.

Keywords: magnetoelastic sensors (MES); biomedical applications and advances; wireless and passive characteristics

Fonte: REN, L. et al. (2019)

Downloaded from SAE International by Univ of California Berkeley, Wednesday, August 01, 2018

2000-01-0085

Development of a Magnetoelastic Torque Sensor for Formula 1 and CHAMP Car Racing Applications

Sami Bitar and John S. Probst
Visteon Racing

Ivan J. Garshelis
Magnova, Inc.

Copyright © 2000 Society of Automotive Engineers, Inc.

ABSTRACT

The benefits of a magnetoelastic torque sensing system and its application on Formula 1 and CHAMP Car racing driveshafts are identified. In particular, the use of circumferential remanent magnetic bands on the shaft itself has enabled a design that satisfies the application's demanding packaging requirements. The criteria used to determine the suitability of a given shaft material for optimal magnetoelastic characteristics and concurrent mechanical strength are illustrated. Shaft material and geometry are shown to have significant effects on sensor performance. Design considerations for the magnetic field sensor layout and signal conditioning circuit are also presented. The racing driveshaft application is shown to add particular challenges in terms of temperature, packaging, and kinematic tracking. Magnetization and calibration processes associated with field operation of the sensor are discussed. Selected results from extensive track testing with Stewart-Ford in Formula 1 and Visteon-Patrick Racing in CART are presented and analyzed. Successful development and implementation of the racing torque sensor as a basis for extension to mass production automotive applications is suggested.

Visteon Racing first implemented the non-contact drive-shaft Torque Sensor System to support the Stewart-Ford Formula 1 racing program[1]. Following an extensive survey of all existing torque sensing technologies including those used for non-automotive applications, the categories of technologies viable for open-wheel racing were reduced to two: telemetric strain gauge technology and magnetoelastic polarized band technology. It was felt that developing a telemetric strain gauge sensor would be superfluous given that various competitors had already reached a fairly advanced stage of development for such a system. It was also felt that at the most fundamental level, a torque sensing system requiring neither components attached to nor functional contact with the shaft would be far more desirable, not only for racing applications but eventually for production car applications as well[2]. From this basic premise, the development team worked to apply magnetoelastic polarized band sensor technology[3],[4] to the Stewart Grand Prix drive-shaft.

Magnetoelasticity is the term used to describe the interactions found in many materials between magnetic system quantities (e.g., field, magnetization) and elastic system quantities (e.g., stress, strain). MDI* torque sen-

Fonte: BITAR, S. et al. (2000).

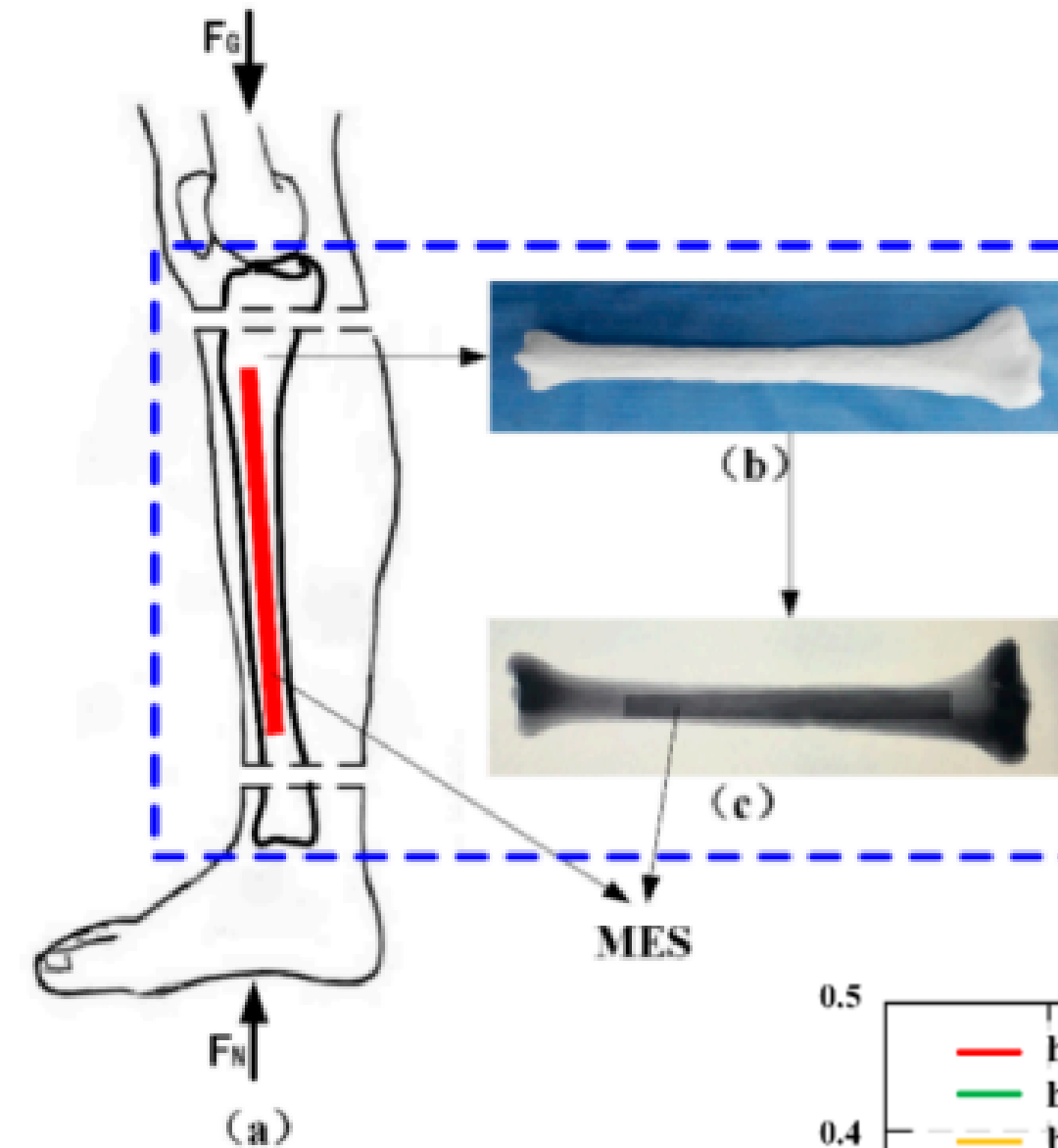
APLICAÇÕES DIVERSAS

Engenharia Biomédica

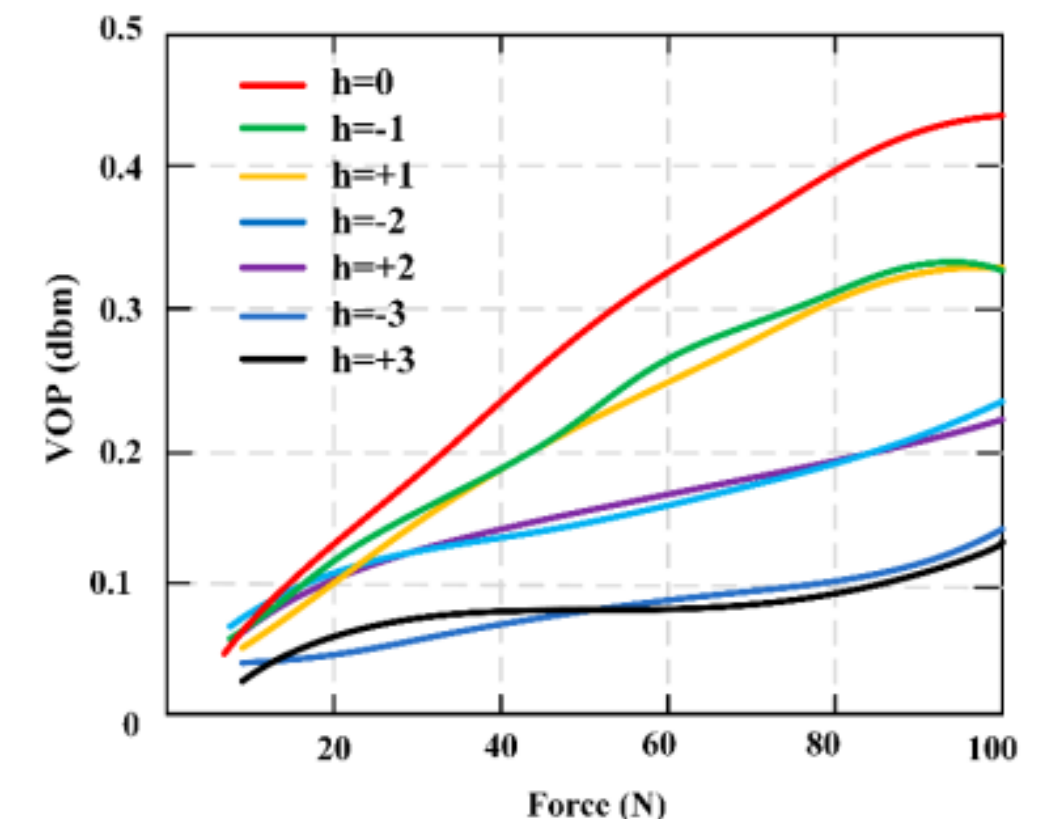
Finalidade Principal: Monitorar as propriedades mecânicas e a distribuição de força em um osso artificial (AB) ou prótese, tanto in vitro (em laboratório) quanto in vivo (dentro do corpo).

Princípio Físico: Baseado no Efeito Villari (efeito magnetoelástico inverso), onde uma força mecânica aplicada ao sensor altera suas propriedades magnéticas.

Importância: Permite avaliar como a prótese se comporta sob carga, otimizar o design de novos implantes e monitorar a reabilitação do paciente de forma não invasiva.



Fonte: REN, L. et al. (2019)



APLICAÇÕES DIVERSAS

Engenharia Biomédica

- **Monitoramento de Placas Ósseas:**

Acompanhar a cicatrização de fraturas medindo a deformação em tempo real na placa de metal que une o osso.

- **Monitoramento de Força em Ossos Artificiais:**

Medir as cargas reais em próteses e implantes para otimizar seu design e guiar a reabilitação do paciente.

- **Taxa de Degradação de Biomateriais:**

Acompanhar remotamente a velocidade com que implantes biodegradáveis (ex: magnésio) se dissolvem dentro do corpo.

- **Monitoramento de Estresse Bidimensional (Tensão e Torção):**

Medir forças complexas (tração e torção) ao mesmo tempo em implantes ortopédicos ou articulações.

- **Monitoramento de Tensão em Suturas:**

Medir a força de tensão diretamente nos fios de sutura para avaliar a cicatrização de feridas.

- **Controle de Adesão Celular:**

Usar micro-vibrações controladas do sensor para influenciar (promover ou inibir) como as células do corpo aderem à superfície de um implante.

- **Monitoramento da Coagulação Sanguínea:**

Detectar mudanças na viscosidade do sangue para analisar todo o processo de formação e dissolução de coágulos.

- **Mapeamento de Pressão e Força:**

Usar uma malha de sensores para criar mapas de distribuição de pressão, como na interface entre um membro amputado e sua prótese.

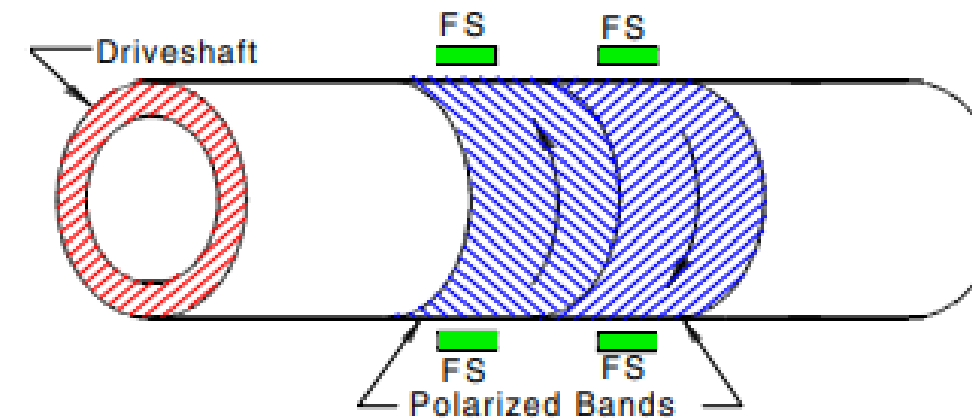
APLICAÇÕES DIVERSAS

Automobilismo

Finalidade Principal: A criação e implementação de um sensor de torque para eixos de transmissão de carros de corrida. O objetivo principal era medir o torque entregue às rodas em tempo real, uma informação crucial, porém difícil de obter em ambientes de corrida.

Funcionamento básico:

A torção no eixo de transmissão durante a aceleração/desaceleração causa um estresse de cisalhamento. Este estresse altera a magnetização do aço, criando um campo magnético externo que pode ser detectado. A magnitude e a polaridade deste campo (que são diretamente proporcionais ao torque) são medidas, sem contato, que convertem o sinal em Volts.



Fonte: BITAR, S. et al. (2000).

Utilização dos dados de torque para otimização de performance em tempo real, incluindo:

- Medição da potência real do motor na pista.
- Ajuste fino do diferencial para melhor dirigibilidade em curvas.
- Estimativa do arrasto aerodinâmico em condições dinâmicas.

VANTAGEM DOS SENSORES MAGNETOELÁSTICOS

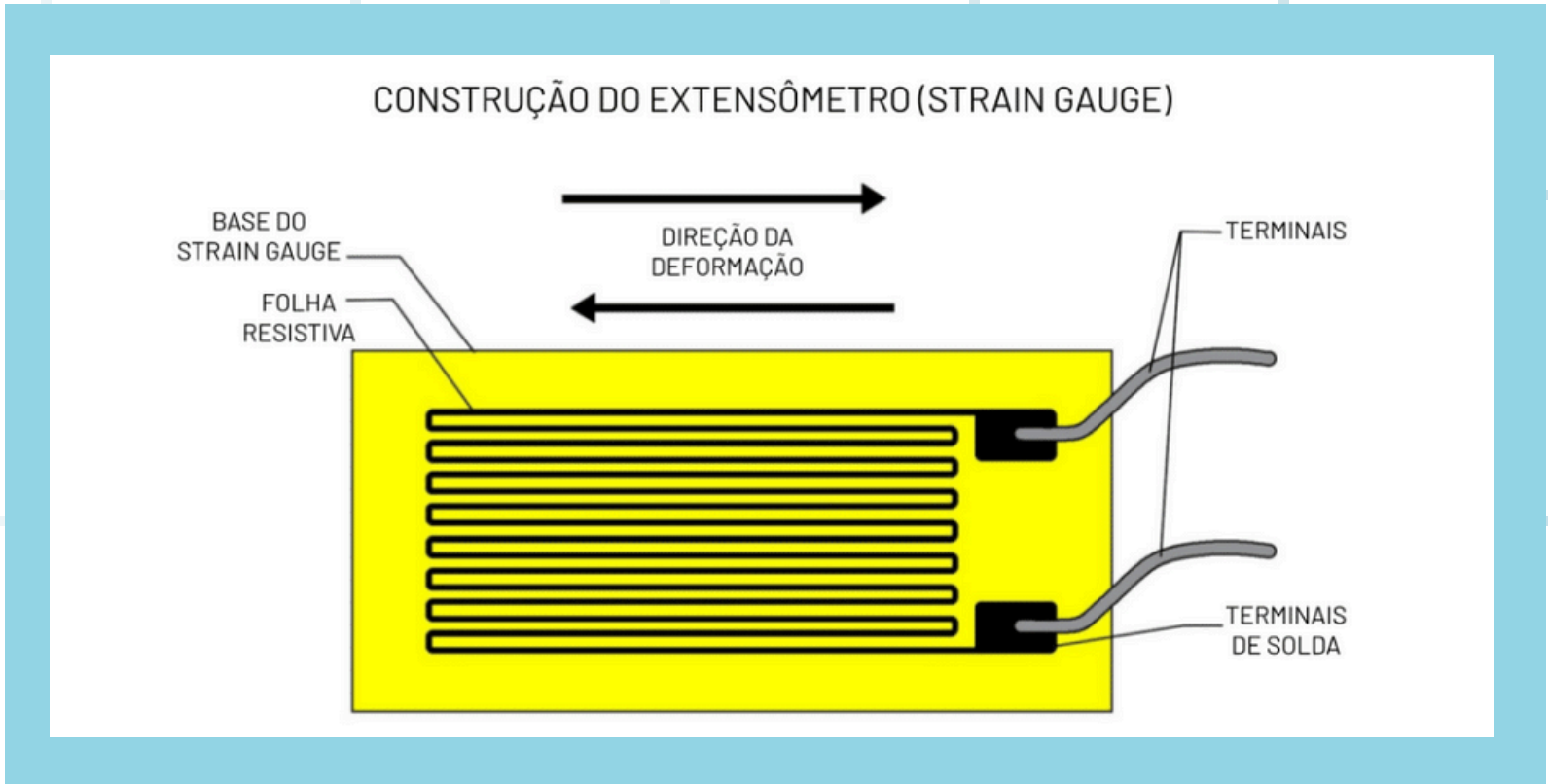
Os sistemas de monitoramento estrutural permitem o acompanhamento contínuo, detectam falhas precocemente e ajudam a prevenir desastres, sendo aplicáveis em obras novas, existentes e até em monumentos.

- Alta Sensibilidade a Esforços Mecânicos
- Resposta Estável e Rápida
- Capacidade de Monitoramento em Tempo Real
- Versatilidade de Aplicação
- Imunidade Eletromagnética e Sem Contato Direto com o Meio Monitorado
- Baixo Custo e Facilidade de Fabricação
- Possibilidade de Integração com Sistemas Inteligentes

COMPARAÇÃO COM MÉTODO CONVENCIONAL – EXTENSÔMETRO RESISTIVO

Sensor Magnetoelástico x Extensômetro Resistivo		
Característica	Sensor Magnetoelástico	Extensômetro Resistivo (convencional)
Sensibilidade	Alta (detecta pequenas variações)	Média
Robustez	Resistente a ambientes agressivos	Sensível a umidade e temperatura
Instalação	Simples, pode ser embutido ou colado	Requer contato direto e proteção
Custo	Pode ser maior (mas mais eficiente)	Menor, porém menos durável
Manutenção	Baixa	Pode exigir trocas frequentes

Fonte: Autores



Fonte: MAKERHERO, Strain Gauge

IMPORTÂNCIA DOS SENSORES MAGNETOELÁSTICOS PARA A SEGURANÇA EM ESTRUTURAS CIVIS

- **Monitoramento contínuo e em tempo real**
 - Acompanhar deformações, tensões e trincas em tempo real
- **Alta sensibilidade a pequenas deformações**
 - A sensibilidade foi quatro vezes maior
- **Aplicação em diversos materiais e estruturas**
 - Desde estruturas metálicas, até em concreto armado
- **Robustez e estabilidade**
 - Estabilidade mesmo em ambientes agressivos
- **Prevenção de desastres**
 - Evitar colapsos e acidentes



DESAFIOS TÉCNICOS PARA USO EM LARGA ESCALA

- **Calibração e customização para diferentes estruturas**
 - Cada sensor precisa ser calibrado com base no material da estrutura e nas características mecânicas locais
- **Integração com sistemas de monitoramento**
 - Integrados a sistemas de aquisição e análise de dados.
- **Custo de fabricação e instalação**
 - Custos unitários.
- **Sensibilidade a interferências magnéticas**
 - Ambientes com ruído eletromagnético, podem afetar a precisão dos dados.
- **Durabilidade e manutenção**
- **Falta de normatização**
 - A ausência de normas técnicas consolidadas, dificulta a aprovação.



ONDE ENTRA A ENGENHARIA FÍSICA?

- **Miniaturização e Sensores Inteligentes (IoT)**
 - Conectados a sistemas de IoT
 - Coleta de dados em tempo real e análise automatizada com IA.
- **Desenvolvimento de Materiais Mais Sensíveis**
 - Materiais com maior resposta magnetoelástica a pequenas deformações.
 - Detectar microtrincas ou esforços mínimos



E SE USÁSSEMOS SUPERCONDUTORES?

Integração com Supercondutores

- Resposta mais precisa e quase sem ruído
- Ausência de resistência elétrica e maior sensibilidade magnética
- Monitoramento ultra-precisos em ambientes críticos

Uso em Ambientes Extremos

- Ambientes com altas temperaturas, pressões ou corrosão
- Obras offshore, túneis e usinas

A evolução dos sensores é também a evolução da segurança. A física dos materiais tem o poder de salvar vidas, discretamente, dentro das paredes e vigas.

The image features a light blue grid background. In the top-left and bottom-right corners, there are decorative curved shapes in a darker blue color, resembling parts of a circle or a stylized corner design.

Perguntas?

Referências

- Clark, A. E. (1992). "Giant magnetostriction in rare-earth compounds". In Ferromagnetic Materials (Vol. 1, pp. 531-589). Elsevier
- A. E. Clark, "Magnetostrictive rare earth-Fe₂ compounds," in Ferromagnetic Materials, vol. 1, ed. E. P. Wohlfarth (North-Holland, Amsterdam, 1980), pp. 531-589.
- Kellogg, R. A., Flatau, A. B., Clark, A. E., Wun-Fogle, M., & Lograsso, T. A. (2002). "Temperature and stress dependence of the magnetic and magnetostrictive properties of Fe_{0.81}Ga_{0.19}". Journal of Applied Physics, 91(10), 7821-7823.
- A. E. Clark, J. B. Restorff, M. Wun-Fogle, T. A. Lograsso, and D. L. Schlager, "Magnetostrictive properties of Galfenol alloys under compressive stress," Materials Transactions, vol. 43, no. 5, pp. 881-886, 2002.
- Grimes, C. A., Moghaddam, S., & Ong, K. G. (2002). "Wireless magnetoelastic-based sensors for remote query health monitoring: A quantitative review". Smart Materials and Structures, 11(5), 621-634.
- Metglas® Alloy 2605SA1 & Metglas® Alloy 2714A
- Slonczewski, J. C. (1958). "Origin of Magnetic Anisotropy in Cobalt-Substituted Magnetite". Physical Review, 110(6), 1341-1348.
- R. M. Bozorth, E. F. Tilden, and A. J. Williams, "Anisotropy and Magnetostriction of Some Ferrites," Physical Review, vol. 99, no. 6, p. 1788, 1955.
- Machado, F. L. A., & da Silva, B. L. (1994). "Giant ac magnetoresistance in the soft ferromagnet Co_{70.4}Fe_{4.6}Si₁₅B₁₀". Journal of Applied Physics, 75(10), 6563-6565.

- CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. Introduction to magnetic materials. 2. ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2008.
- BLUNDELL, S. Magnetism in condensed matter. Oxford: Oxford University Press, 2001.
- LACHEISSERIE, E. du Trémolet de. Magnetostriction: Theory and applications of magnetoelasticity. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. Introduction to magnetic materials. 2. ed. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2008.
- JILES, D. C. Theory and applications of magnetoelasticity. Journal of Physics D: Applied Physics, v. 28, n. 8, p. 1537–1546, ago. 1995.
- LACHEISSERIE, E. du Trémolet de. Magnetostriction: Theory and applications of magnetoelasticity. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- UNIVESP. Eletrônica Aplicada - Aula 22 - O Extensômetro (Strain Gauge). YouTube, 24 jun. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=XFP0dElgeQY>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- MAKERHERO. O que é um strain gauge e como ele funciona com Arduino. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/o-que-e-strain-gauge-arduino/>. Acesso em: 16 jun. 2025.
- METHODE ELECTRONICS INC. Magnetoelastic Sensor Technology | Methode Electronics Inc [vídeo no YouTube], 0:50, 10 mil visualizações. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=dOHDn4aMOIE>.
- AUSANIO, G. et al. Magnetoelastic sensor application in civil buildings monitoring. Sensors and Actuators A: Physical, [S.l.], v. 123–124, p. 148–152, abr. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.03.009>.
- SHEN, Wei et al. Application of Elasto-Magneto-Electric (EME) Sensor for Short Suspender Cable Force Measurement in Suspension Bridge. Structural Engineers, [S. l.], v. 40, n. 3, p. 145-152, jun. 2024.
- REN, Limin; YU, Kun; TAN, Yisong. Applications and Advances of Magnetoelastic Sensors in Biomedical Engineering: A Review. Materials, [S. l.], v. 12, n. 7, p. 1135, 2019. DOI: 10.3390/ma12071135. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/7/1135>.
- BITAR, Sami; PROBST, John S.; GARSHELIS, Ivan J. Development of a Magnetoelastic Torque Sensor for Formula 1 and CHAMP Car Racing Applications. In: SAE 2000 WORLD CONGRESS, 2000, Detroit. Sensors and Actuators 2000. Warrendale, PA: SAE International, 2000. p. 1-10. (SAE Technical Paper 2000-01-0085).