



**Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**  
**Campus Morro do Cruzeiro**  
**Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil**



# **MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**“ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS PARA INSPEÇÃO DE CABOS  
DE AÇO – ESTADO DA ARTE”**

**Paloma Faria Avelar**

**Ouro Preto, 3 novembro de 2022.**

**Paloma Faria Avelar**

**“Ensaio eletromagnético para inspeção de cabos de aço - estado da arte”**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

**Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Rangel Porcaro**

**Ouro Preto, 3 novembro de 2022.**



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Paloma Faria Avelar**

### **Ensaio eletromagnético para inspeção de cabos de aço - estado da arte**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 03 de novembro de 2022

#### Membros da banca

[Dr.] - Rodrigo Rangel Porcaro - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Dr.] - Igor Cezar Pereira - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Eng.] - Salvatore Giuliano Peixoto Tropa de Abreu - (Universidade Federal de Ouro Preto/REDEMAT)

Rodrigo Rangel Porcaro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 03/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Rangel Porcaro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/11/2022, às 09:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0427178** e o código CRC **242D2D02**.

## RESUMO

Os cabos de aço têm sido amplamente utilizados em equipamentos/sistemas de elevação, transporte e tração nas últimas décadas. A principal preocupação dos fabricantes, usuários, proprietários e órgãos de segurança é garantir a segurança e durabilidade desses cabos. Tendo em vista as condições de uso de cabo de aço e sua estrutura complexa a sua deterioração leva a uma redução na resistência estrutural. Diante do exposto, a avaliação não destrutiva torna-se uma importante ferramenta para detectar os estágios iniciais de danos nos cabos. No entanto, monitorar a condição da maioria dos cabos é difícil porque os danos podem ser ocultos ou profundos. Ou seja, métodos de ensaio não destrutivos são usados para inspecionar cabos de aço, dentre os quais o ensaio eletromagnético é mais utilizado. O ensaio *Magnetic flux leakage* (MFL) pode ser usado para analisar o sinal adquirido e resolver muitos problemas no campo magnético, nos casos em que essa técnica não é adequada, métodos alternativos podem ser usados dependendo das características e condições de uso. Ainda esta revisão apresenta um estudo de caso da empresa INTROM, no qual através da técnica conseguiram prever danos e fazer a substituição a tempo. Considerando a relevância desta técnica, este trabalho consiste em uma revisão bibliográfica exploratória sobre os aspectos fundamentais da técnica MFL e os efeitos que interfere como relação de sinal ruído e equipamentos.

**Palavras-chave:** Cabos de aços. Ensaio não destrutivo. *Magnetic flux leakage*. Inspeção eletromagnética.

## **ABSTRACT**

Wire ropes have been widely used in lifting, conveying and pulling equipment/systems in recent decades. The main concern of manufacturers, users, owners and safety agencies is to ensure the safety and durability of these cables. Given of the conditions of use of steel cable, its complex structure, its deterioration leads to a reduction in structural strength. Following the above, non-destructive assessment becomes an important tool to detect the early stages of cable damage. However, monitoring the condition of most cables are difficult because the damage can be hidden or deep. That is, non-destructive testing methods are used to inspect steel cables, among which the electromagnetic test is the most used. The Magnetic flux leakage (MFL) assay can be used to analyze the acquired signal and solve many problems in the magnetic field, where in cases where this technique is not suitable, alternative methods can be used depending on the characteristics and conditions of use. Still this review presents a case study of the company INTROM, in which through the technique they managed to predict damages and make the replacement in time. Considering the relevance of this technique, this work consists of an exploratory literature review on the fundamental aspects of the MFL technique and the effects that interfere with the signal to noise ratio and equipment.

**Keywords:** Steel cables. Non-destructive rehearsal. Magnetic flux leakage. Electromagnetic inspection.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ferramentas que são úteis para avaliar o cabo e um formulário para registrar as descobertas para fornecer um registro permanente. ....	16
Figura 2: Princípio de detecção óptica para cabo de aço. ....	17
Figura 3: Princípio da inspeção não destrutiva baseada em métodos eletromagnéticos. (a) Método da detecção do fluxo total, com excitação por bobinas. (b) Método da detecção do fluxo total, com excitação com ímãs permanentes. (c) Método da detecção do fluxo de retorno. (d) Método da detecção de campos de fuga.....	18
Figura 4: Leitura dos canais LMA e LF fornecidos após o registro das variações de fluxo captados por sensores. ....	19
Figura 5: Esquema de equipamentos para inspeção eletromagnética de cabos de aço. (a) e (b) Construções para medidas de LMA. ....	19
Figura 6: O conceito da técnica de detecção de danos LF.....	20
Figura 7: Etapas do processo de inspeção em ponte estaiada.....	31
Figura 8: Região onde apresentou defeitos do tipo LMA. Gráfico (1) e área do defeito LMA (2).....	31
Figura 9: Região onde detectaram defeitos tipo LF .....	32
Figura 10: Defeitos de perda de área metálica encontrados na região D. ....	32
Figura 11: Imagem real da região D com defeitos LMA. ....	33
Figura 12: Modificação do sinal observada após o processo de processamento do sinal. (a) Sinal bruto; (b) Sinal sem ruído e envelopado.. ....	24
Figura 13: Esquema de três posicionamentos do sensor Hall. (a) Detecção na direção axial. (b) Detecção na direção radial. (c) Detecção na direção circunferencial. ....	28
Figura 14: Dois modos de operação do detector MFL em aplicação de engenharia (a) modo manual e (b) modo fixo.. ....	28
Figura 15: Princípios do método ECT típico para cabo de aço.....	33
Figura 16: Princípios do método de teste AE típico para cabos de aço.....	34
Figura 17: Princípios do método UGWT típico para cabo de aço. ....	34
Figura 18: Processo esquemático do método de teste de raios-X para cabo de aço.....	35

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 : Principais especificações técnicas do instrumento de detecção .....	20
Tabela 2 : Comparação do sensor magnético .....	27

## LISTA DE SIGLAS

AE – *Acoustic Emission*

ASNT- *American Society for Nondestructive Testing*

ATSM- *American Society for Testing and Material*

ECT – *Eddy Current Test*

END- *Ensaio Não Destrutivo*

GMI- *Giant Magneto Impedance*

GMR- *Giant Magnetoresistance*

LF – *Local Faults*

LMA – *Loss of Metallic Area*

MFL – *Magnetic Flux Leakage*

SI – *Stress Impedance*

SNR- *Signal to Noise Ratio*

SQUID – *Superconducting Quantum Interference Device*

UGWT- *Ultrasonic Guided Wave Testing*

SWR- *Steel Wire rope*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>13</b>
<b>4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>14</b>
4.1 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS PARA CABOS DE AÇOS.....	14
4.2 INSPEÇÃO VISUAL .....	15
4.3 TÉCNICA DE MFL (MAGNETIC FLUX LEAKAGE) .....	17
4.3.1 Relação de sinal ruído na MFL.....	24
4.3.2 Influência dos equipamentos na técnica MFL .....	26
4.3.3 Estudo de caso - Aplicação da técnica MFL em ponte estaiada.....	30
4.4 OUTROS MÉTODOS DE INSPEÇÃO EM CABOS DE AÇOS.....	33
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>36</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Inventado em 1834, o cabo de aço tem as vantagens de alta resistência à tração, operação estável e confiável, forte carga dinâmica e capacidade de sobrecarga. Este elemento de máquina tem sido amplamente utilizado em equipamentos/sistemas de elevação, transporte e tração. Durante o uso do cabo de aço SWR (*Steel Wire Rope*), descontinuidades e danos como fratura de fios, desgaste, corrosão, fadiga e até mesmo ruptura inesperada podem ocorrer de forma imprevisível (ZHOU, P. *et al.*, 2019).

Tendo em vista as condições de serviço dos cabos de aço, os quais apresentam uma estrutura complexa, a sua deterioração leva a uma redução na resistência estrutural. Por isso é necessário realizar o controle de qualidade para prever a evolução dos danos e fazer o acompanhamento para não afetar a segurança (JOMDECHA, 2003). Ainda neste caso, destaca-se que o acompanhamento e controle dos cabos é de grande importância para os fabricantes, usuários, proprietários e autoridades de segurança (ZAMBRANO, MARTÍNEZ-DE-GUERENU e ARIZTI, 2014).

Dependendo da natureza do cabo e das características de uso, dois tipos principais de danos são produzidos: falha local e perda de área metálica. A falha local é caracterizada por uma redução repentina na área da seção transversal metálica do cabo de aço, enquanto a perda de área metálica é caracterizada por uma mudança no tamanho do cabo, ou seja, a área da seção transversal metálica diminui lentamente por dentro. (TIAN *et al.*, 2015).

Fraturas em arames e a mudança no diâmetro dos cabos são os principais tipos de deterioração a serem verificados. A estrutura do cabo de aço é complexa e o ambiente de detecção é severo, por isso é difícil processar e obter dados quantitativos em sinais de ensaios não destrutivos (HONGJIAN, KECHONG e SHUZI, 2015).

Entre as técnicas existentes de ensaios não destrutivos (END), a inspeção visual e o vazamento de fluxo magnético (MFL) são muito usadas para fazer o controle da saúde dos cabos. Apesar da inspeção visual ser relativamente fácil e não requerer equipamentos sofisticados, não é válida para fiscalizar a deterioração no interior do cabo. Em contraste, a técnica MFL se qualifica para identificar descontinuidades como falhas localizadas e perda de áreas metálicas em cabos de aço (SINGH *et al.*, 2012). Perante o exposto, a avaliação END torna-se uma ferramenta essencial para detectar os estágios iniciais de danos nos cabos. No entanto, monitorar a condição da maioria dos cabos é difícil porque

os danos podem ser ocultos ou profundos. Dito isso, utiliza-se métodos de ensaios não destrutivos para inspecionar cabos de aço, onde a inspeção eletromagnética destaca-se por ser mais utilizada (PARK *et al.*, 2014; ZHOU, P. *et al.*, 2019).

Todos os meios de inspeções eletromagnéticas funcionam magnetizando o WR e registrando o campo magnético circundante com um ou mais sensores de captação, como exemplo: sensores hall. Os sinais estão associados a certos tipos de ruído, principalmente devido à interferência da eletrônica do sistema de aquisição, ruído irradiado de fontes eletromagnéticas externas e vibrações mecânicas no cabo de aço (SCHLANBUSCH, OLAND e BECHHOEFER, 2017).

Normas relevantes como ISO 4309 e ATSM E1571 detalham os princípios básicos de ensaio, procedimentos, instrumentos associados e métodos de calibração por técnicas de ensaio eletromagnético (LIU *et al.*, 2020). Dando destaque para a calibração, dentre os pontos importantes, a calibração do equipamento antes da inspeção garante a sensibilidade e a resolução da técnica.

Para situações em que as técnicas MFL não estão disponíveis, métodos alternativos como correntes parasitas, radiografia e ultrassom podem ser aplicados dependendo das características e condições de uso. Diante do exposto, a tecnologia MFL se destaca para aplicações nas indústrias de mineração, construção, transporte e outras. Considerando a relevância desta técnica na captura de sinais, entre outros fatores, este trabalho tem como objetivo uma revisão bibliográfica sobre as suas aplicações na inspeção de cabos de aço e as suas limitações.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar uma revisão bibliográfica sobre a técnica *magnetic flux leakage* (vazamento de fluxo magnético) e sua aplicação em inspeção não destrutiva de cabos de aço.

### **2.2 Objetivos Específicos**

De forma a atingir o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Revisar sobre as técnicas de ensaios não destrutivos para os cabos de aços;
- b) Comparar as técnicas de inspeção em cabos de aço sob os aspectos técnicos: aplicabilidade, sensibilidade e resolução;

### 3 METODOLOGIA

Como metodologia para o desenvolvimento desta revisão bibliográfica de caráter exploratório sobre a *técnica magnetic flux leakage* foram cumpridas as seguintes etapas:

- Levantamento das publicações sobre o assunto na literatura, livros, artigos, monografias, dissertações e teses, e selecionar o material relacionado.
- Leitura exploratória do material selecionado e eleger o material de interesse.
- Seleção das informações ou análises relevantes e registrar as fontes.
- Análise, organização e discussão das informações, baseando-se nas considerações da literatura e produção do material escrito da monografia.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão definidos alguns conceitos gerais relacionados aos ensaios não destrutivos e inspeção com foco em cabos de aços. Posteriormente será apresentado uma revisão da literatura sobre os aspectos fundamentais da técnica MFL (*Magnetic Flux Leakage*) onde será abordado princípios, detalhes e limitações da técnica. Ao final é apresentado outras técnicas existentes.

### 4.1 Ensaios não destrutivos para cabos de aços

Os Ensaios não destrutivos podem ser descritos como habilidade de examinar um objeto sem que provoque uma alteração ou comprometa seu uso posterior. Os autores ressaltam que os principais motivos para a utilização do END são garantir a qualidade do produto, prevenir acidentes e/ou perda de vidas humanas e aumentar os lucros do fabricante (SILVA Jr. e MARQUES, 2006).

O cabo de aço tem uma ampla gama de aplicações em indústrias como mineração, construção e transporte. É importante entender as condições de operação do cabo para substituí-lo em tempo hábil ou estender a vida útil segura do cabo se os critérios de saída não forem atendidos. Muitos aspectos, como desgaste, fadiga ou fratura, podem afetar a vida útil dos cabos. Os procedimentos de medição por END existentes podem melhorar sua segurança ao entender melhor possíveis descontinuidades, bem como os critérios para rejeitar cabos usados (FEDORKO *et al.*, 2016).

A ASNT- *The American Society for Nondestructive Testing* (2021) apresenta vários métodos de testes, como inspeção visual, inspeção eletromagnética, emissão acústica, radiografia, correntes parasitas, testes ultrassônicos. Para esta revisão será abordado seus potenciais, limitações e progresso para as técnicas citadas, com enfoque na inspeção eletromagnética.

Segundo Silva Jr. e Marques (2006) existem quatro situações possíveis ao final da avaliação não destrutiva.

1. *A peça pode ser usada e o teste mostra que ela pode ser usada,*
2. *A peça não pode ser usada e o teste mostra que não pode ser usada,*
3. *A peça pode ser usada e os testes mostraram que ela não pode ser usada*
4. *Esta peça não pode ser usada e pode ser usada após o teste.*

Os casos 1 e 2 são desejáveis e sua ocorrência resulta em uma verificação bem-sucedida. O caso 3 significa gastos desnecessários e o caso 4 significa um alto risco de falha. Em geral, as normas de inspeção especificam regras e padrões que devem ser seguidos para se aumentar a assertividade na aplicação das técnicas.

Para manter a credibilidade dos ensaios garantindo resultados satisfatórios e válidos, alguns requisitos são considerados essenciais, como: treinamento de pessoal com qualidade e certificado; garantia de que os instrumentos estejam calibrados (devido a variações de temperatura, umidade, fadiga) e os procedimentos para realização dos ensaios devem ser baseados em padrões e diretrizes previamente especificados (ABENDI, 2019).

## **4.2 Inspeção visual**

Quando se trata em fazer uma análise em determinado objeto, antes de se utilizar métodos tecnológicos avançados, deve-se considerar a inspeção visual como a técnica preliminar para examinar peças e elementos que vão ser direcionados para outros tipos de ensaios (SILVA Jr. e MARQUES, 2006). A Norma ISO 4309 (2017) ressalta que seguindo as recomendações, a inspeção visual é um método que faz toda diferença nos ensaios para materiais metálicos incluindo os cabos de aço.

A TECH-INSP (2022), empresa especializada em serviços de inspeção, relata que o ensaio visual é o método de inspeção mais simples e amplamente utilizado na engenharia. Além disso, eles apontam que mesmo com todos os métodos de teste existentes, o ensaio visual é uma técnica essencial que lhes permite tomar melhores decisões sobre outros testes auxiliares. Devido à sua simplicidade, nunca pode deixar de ser usado na inspeção, ainda, toda inspeção visual requer um profissional treinado e testado com conhecimento prático.

Norma ABNT ISO 4309 (2009) (3.4.1.1) orienta que sejam verificadas todas as partes visíveis (tipo de equipamento, condições ambientais e operacionais, resultados de inspeções anteriores e tempo de uso) todos os dias úteis quanto a sinais de deterioração e deformação sempre que possível. Os pontos de conexão do cabo no equipamento de movimentação de carga devem ser cuidadosamente verificados. Quaisquer alterações

suspeitas na condição do cabo devem ser relatadas e acompanhadas por profissionais capacitados.

De acordo com Union (2009) as medições de diâmetro em pontos críticos devem ser cobertas em cada inspeção frequente e essas medições registradas para análise futura. Uma das razões para a redução do diâmetro é o desgaste, onde vários padrões de inspeção especificam essa quantidade permitida de perda de metal. Outro ponto a ser observado é o dano interno do cabo, quando o núcleo do cabo de aço começa a falhar, a redução do diâmetro geralmente é o primeiro sinal externo detectável. Como será discutido nesta revisão, a detecção eletromagnética desempenha um papel importante no monitoramento da condição de um cabo de aço, levando em consideração seu interior. Entretanto, existem limitações e por isso não deve ser usada com intuito de substituir a inspeção visual.

Como mencionando anteriormente, a técnica possui uma limitação em inspecionar apenas nas superfícies dos materiais, utilizando instrumentos adequados como mostrado na Figura 1. Destaca-se o instrumento paquímetro que é um equipamento que mede com precisão o diâmetro de cabos (UNION, 2009). Entretanto, existem equipamentos auxiliares que facilitam a inspeção visual por meio de equipamentos automatizados.



Figura 1: Ferramentas que são úteis para avaliar o cabo e um formulário para registrar as descobertas para fornecer um registro permanente (Adaptado de UNION, 2014).

Zhou *et al.* (2019) apresentam o princípio do método de detecção óptica mostrado na Figura 2, que subdivide em aquisição de imagem e diagnóstico de danos. A aquisição de imagens regularmente utiliza câmera com uma alta velocidade para projetar a superfícies dos cabos. O diagnóstico de danos inclui pré-processamento de imagem e

reconhecimento de padrões. As imagens coletadas são processadas primeiro pelo método de pré-tratamento, como corte ou filtragem.

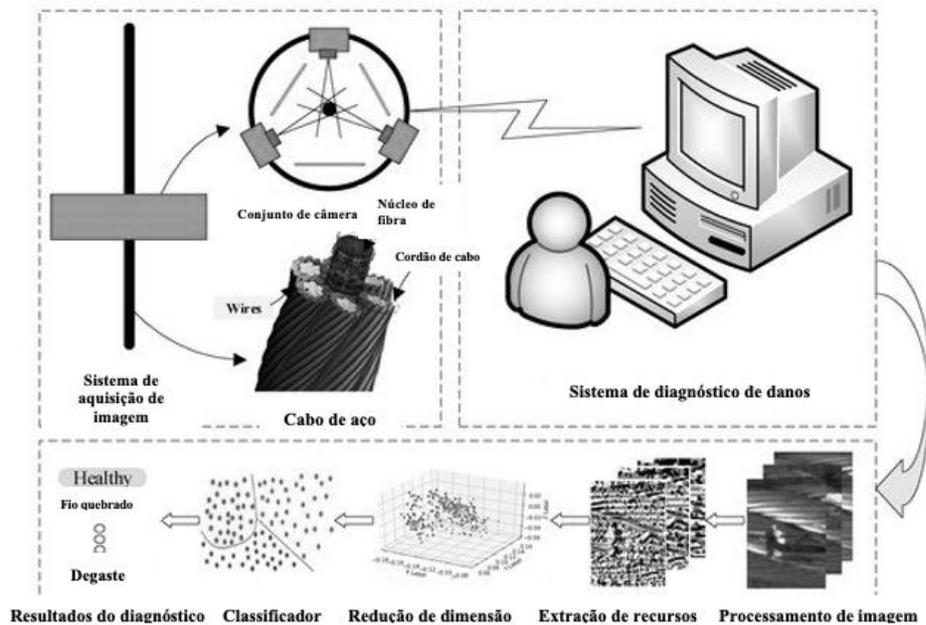


Figura 2: Princípio de detecção óptica para cabo de aço (Adaptado de ZHOU *et al.*, 2019).

Schlanbusch *et.al* (2017) mostraram que o método teve um desenvolvimento considerável nas últimas duas décadas devido a técnicas avançadas de processamento de imagem para extração e classificação de recursos, por se tratar de um método que ainda é estudado, existem alguns desafios como contaminação da superfície (óleo, lama, crescimento orgânico e até água), condições de iluminação externa, e a obtenção de um número suficiente de conjuntos de dados de treinamento supervisionado para todas as classes de falhas.

#### 4.3 Técnica de MFL (*Magnetic flux leakage*)

Em 1906, Zhou *et al.* (2019) desenvolveram o primeiro dispositivo de teste não destrutivo para cabos de aço baseado em princípios eletromagnéticos. Nos últimos 100 anos, a tecnologia de detecção eletromagnética percorreu um longo caminho. A pesquisa em tecnologia de detecção eletromagnética inclui principalmente: o modelo teórico do

mecanismo do sinal de detecção eletromagnética ou a relação entre eles sob a influência dos parâmetros do defeito (largura do defeito, profundidade, número de fios fraturados, etc.), métodos e dispositivos de magnetização para cabos; sensores de bobina, sensores Hall e métodos de detecção de sinais eletromagnéticos, como sensores magneto resistivos.

Os instrumentos para ensaios não destrutivos de cabos de aço (END) baseiam-se no princípio geral: detecção e avaliação das alterações na distribuição do fluxo magnético, mostrado na Figura 3. Resumidamente, o material ferromagnético é magnetizado até a saturação do cabo em teste, essa variação do fluxo ocorre uma vez que a seção do cabo sob teste contém irregularidades como fios rompidos ou seções que foram corroídas ou degradadas por abrasão. A leitura do vazamento de fluxo é feita através de sensores que captam mudanças no fluxo magnético, essas variações geram canais de falhas, onde identificam possíveis discontinuidades (SUKHORUKOV, SLESAREV e VORONTSOV, 2014).

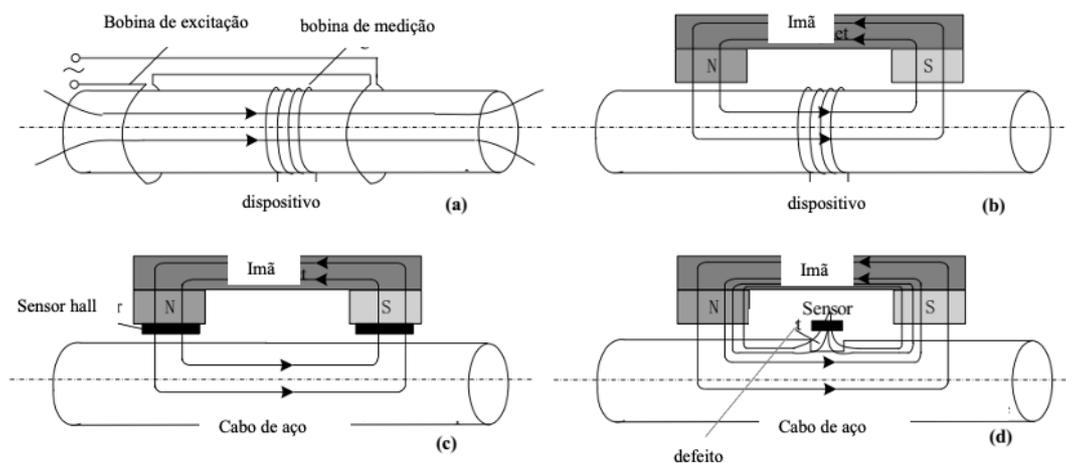


Figura 3: Princípio da inspeção não destrutiva baseada em métodos eletromagnéticos. (a) Método da detecção do fluxo total, com excitação por bobinas. (b) Método da detecção do fluxo total, com excitação com ímãs permanentes. (c) Método da detecção do fluxo de retorno. (d) Método da detecção de campos de fuga (Adaptado de ZHOU P. *et al.*, 2019).

Após a medição do vazamento de fluxo, o sensor Hall captura e armazena digitalmente as alterações de sinal baixadas para o processador de dados e são convertidas em formato gráfico. Os defeitos podem ser descritos pelos canais LMA e LF mostrado na Figura 4.

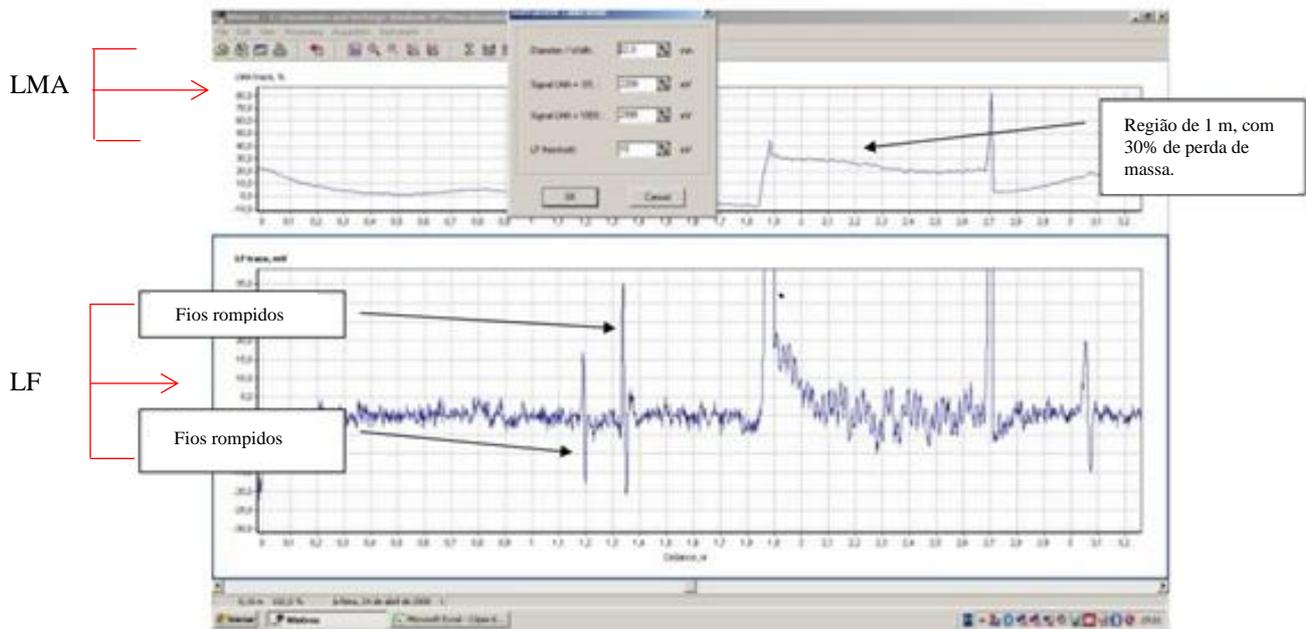


Figura 4: Leitura dos canais LMA e LF fornecidos após o registro das variações de fluxo captados por sensores (INTRON, 2022).

Praticamente todos os detectores de falhas de cabos MFL têm dois canais de informação: Perda de Área de Metal (LMA – *loss of metallic area*) e Falha Local (LF – *local faults*). Descontinuidades como perda de área da seção transversal dos cabos que ocorrem devido à fadiga, ruptura dos cabos devido a fadiga, podem causar interferência na área e reduzir o fluxo magnético (SUKHORUKOV, SLESAREV e VORONTSOV, 2014). Uma perda de massa metálica ou uma redução na área do cabo de aço resulta em uma redução do fluxo magnético que passa pela seção. Essas informações podem ser medidas integrando bobinas (a) ou sensores Hall em cada polo (b), conforme mostrado na Figura 5 (ASTM E 1571, 2017).

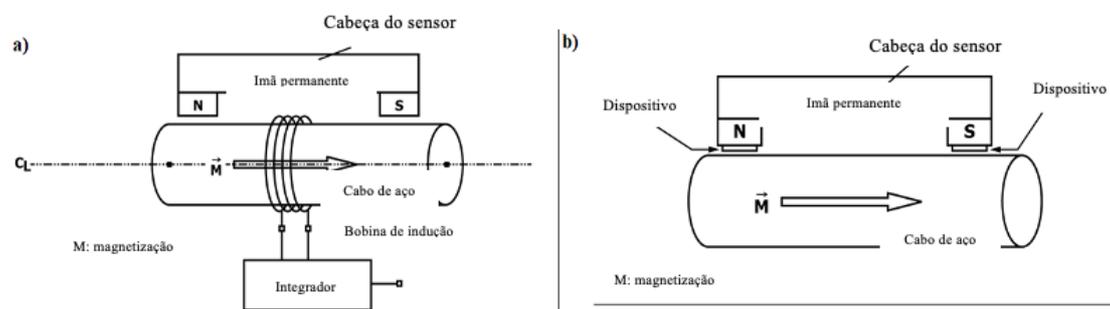


Figura 5: Esquema de equipamentos para inspeção eletromagnética de cabos de aço. (a) e (b) Construções para medidas de LMA (Adaptado de ASTM E157, 2016).

Conforme mostrado na Figura 6, quando não há descontinuidades, o fluxo no metal permanece constante (a). Se houver algum defeito (b), como fios fraturados ou desgaste, o vazamento de fluxo poderá ocorrer e ser detectado. Sensores que podem detectar esse fluxo de fuga são colocados entre os pólos do ímã e geram um sinal elétrico proporcional ao fluxo de vazamento (PARK *et al.*, 2014).

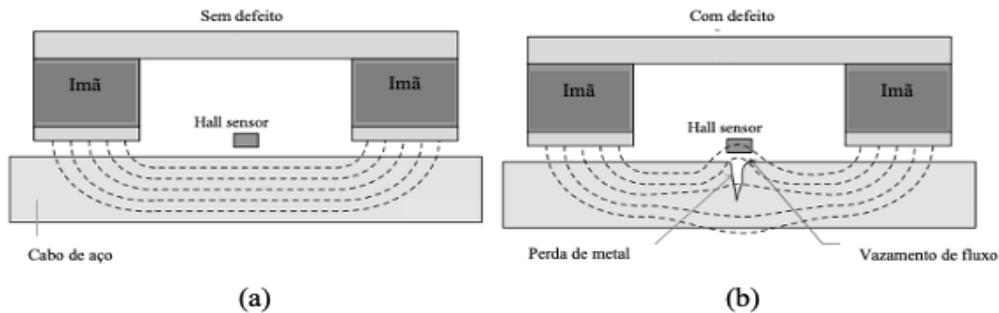


Figura 6: O conceito da técnica de detecção de danos LF.  
(Adaptado de PARK *et al.*, 2014).

A validação final de qualquer protocolo END dependerá do teste de aceitação realizado usando padrões de calibração apropriados. Os dispositivos atuais possuem canais que medem LMA e LF. A norma ASTM E157 (2016) enfatiza que, dentre as limitações desta técnica, os sinais de fratura de fios finos podem não ser reconhecidos e, além disso, fraturas finamente espaçadas podem não criar um campo de vazamento suficiente para ser detectado.

A literatura mostra alguns fatores que podem interferir no trabalho da bobina de realizar a detecção em pequenos campos de fuga, por exemplo, no caso do diâmetro da bobina, é afetado quando o defeito da amostra é menor que o diâmetro, isso pode prejudicar a técnica pois não será detectado de forma incontestável. De forma análoga, se o defeito for maior pode acarretar na mesma situação. Outro fator que afeta é o comprimento da bobina, se o comprimento vertical for maior que a componente vertical do campo magnético, o comprimento da bobina em excesso não é utilizado. O número de voltas do fio também é afetado quando uma força eletromotriz (f.e.m) é maior, isso faz com que a indutância, impedância e sinal de ruído aumentem (MIX, 2005).

Zhou e Liu, (2021) discutiram que uma das questões que tem maior impacto na inspeção é o sinal de ruído. Métodos de imagem MFL semelhantes têm sido amplamente utilizados na inspeção de dutos, mas comparados com dutos, os cabos tem dois grandes

problemas no diagnóstico de falhas devido à sua estrutura helicoidal flexível e superfície irregular. O primeiro é causado pela movimentação durante a detecção, o que é presente na prática de engenharia e indistinguível dos sinais LF. Outro problema que aparece, é devido à superfície irregular, os sinais de baixa frequência são fortemente afetados pelo ruído da fita, até mesmo os sinais fracos de baixa frequência pode ser mascarados. Esses dois tipos de ruído podem facilmente causar falsos positivos ou detecções defeituosas, resultando em grave degradação do desempenho dos métodos de detecção.

A Norma ASTM E 1571 (2016) (7.2.2) destaca um ponto interessante que aponta a sensibilidade dos métodos de inspeção provoca uma queda na profundidade das falhas da superfície dos cabos. Zambrano *et al.* (2014), propõem analisar o sistema de medição LF em um cabo com diâmetro reduzido e os resultados que tiveram demonstram que é possível detectar falhas na superfície de um cabo de aço com diâmetro muito pequeno, ainda destacam que a sensibilidade do sistema de medição se assemelha a uma queda de seção da seção do cabo de aço nos sinais longitudinal e radial, onde os valores SNR (*Signal to noise ratio*) que geraram são aceitáveis para detectar falhas de acordo com as normas europeias.

A INTRON BRASIL (2022) uma empresa especializada em inspeção e tecnologia, relata que uma grande dificuldade da técnica está na inspeção de cabos de estaiamento. De modo geral é mais trabalhoso devido a sua aplicação em elevadas cargas. O diâmetro dos pode ultrapassar 70 mm, isso gerando limitações de instrumentos, tempo da inspeção, dentre outras ações que necessitam de um bom planejamento para que não seja afetado. Tabela 1 mostra as principais especificações técnicas de um instrumento de detecção.

Tabela 1: Principais especificações técnicas do instrumento de detecção (Adaptado de HONGJIAN, KECHONG, Y. e SHUZI, Y., 2015).

Diâmetros dos cabos	10 mm - 60mm
Velocidades de teste	2 m/s
Proporção quantitativa	70%
Capacidade de distinção longitudinal	Comprimento do fio
Peso do detector	5kg - 15kg

Deng *et al.* (2017) relataram que o ensaio MFL tem vantagens em termos de alta sensibilidade e estabilidade de detecção. A desvantagem da técnica está em superfícies rugosas que podem afetar os resultados. Para concluir este estudo, os autores se basearam em dispositivos MFL, os quais apresentam respostas positivas ou negativas dependendo dos defeitos que aparecem na superfície. A presença de rugosidade afeta a distribuição do fluxo magnético no ar acima da superfície, o que caracteriza o sinal do vazamento do fluxo. Os resultados que apresentaram, mostram que os efeitos negativos são afetados pelos seguintes motivos: (1) a rugosidade da superfície leva a sinais MFL mais irrelevantes, e a SNR aumenta com a rugosidade da superfície, o que indiretamente representa a qualidade do sinal de teste. (2) O estado da superfície rugosa sempre leva a um sinal MFL fraco, de modo que os resultados do teste não podem refletir com precisão o tamanho da trinca.

No trabalho de Kasai *et al.* (2004) os autores estudam o efeito dos produtos de corrosão na resolução e sensibilidade da detecção eletromagnética. Produtos de corrosão podem ocorrer se expostos à umidade. Composições representativas desses produtos de corrosão incluem óxidos de ferro II e III –  $Fe_3O_4$  e óxidos de ferro III –  $Fe_2O_3$ .  $Fe_3O_4$  é um material ferromagnético e pode afetar os sinais da inspeção. Foi observado que a amplitude dos sinais diminuiu com o aumento da proporção de produtos de corrosão eletromagnéticos, levando a perspectivas de descontinuidades serem menores que o tamanho existente.

Zhang *et al.* (2015) realizaram um estudo utilizando elementos finitos para verificar o efeito da velocidade no sinal MFL e observaram que à medida que a velocidade aumenta, ocorre deformação no campo devido ao efeito de correntes parasitas induzidas pela velocidade. Outro ponto é na indução magnética axial, onde a velocidade afeta o corpo de prova, está diretamente relacionada à posição do sensor da geometria estudada.

Conforme Sathappan *et al.* (2021) um distúrbio que afeta o desempenho da técnica é a temperatura, os ímãs permanentes são afetados pelas condições de temperatura, logo os ímãs tendem a ter uma eficiência melhor em baixas temperaturas do que em altas. Dessa forma os ímãs conseguem manter sua força magnética, na qual, colocado numa condição extrema de calor, os ímãs perdem sua força magnética no qual, afeta as partículas magnéticas que oscilam com movimentos rápidos e desorganizados, causando distúrbios e perdas no fluxo.

Neste contexto do ensaio eletromagnético de cabos de aço, a maioria das pesquisas dedica-se na ampliação da correção da detecção de falhas LMA e LF. Vários estudos mostram que a teoria Wavelet e a rede neural são os métodos relevantes para verificar a densidade do campo magnético e atingir os resultados quantitativos (GUO *et al.*, 2022). Os autores Benliang, Zhiye e Jian, (2009) propõem um novo método usando rede neural Hopfield para caracterizar defeitos de sinais tridimensionais de MFL. Zheng e Zhang (2019) usaram a rede neural para quantificar o LMA e analisaram o sinal pela teoria de decomposição de modo empírico de conjunto e teoria wavelet para identificar o sinal de LF.

Conforme foi argumentado anteriormente, levando em consideração que a inspeção eletromagnética é uma técnica que suplementa a técnica de inspeção visual para aplicação de cabos de aços, alguns autores enfatizam alguns pontos importantes:

- No campo da detecção eletromagnética de cabo de aço, as teorias e tecnologias existentes foram desenvolvidas. Os problemas dos ensaios não destrutivos eletromagnéticos nos cabos incluem principalmente a influência de diferentes estruturas no sinal de detecção. Somente resolvendo a detecção quantitativa de defeitos do tipo LF, a vida útil dos cabos pode ser prevista de forma verdadeira e precisa por END (ZHOU P. *et al.*, 2019).

- Embora o padrão permita que ensaios eletromagnéticos prolonguem a vida útil dos cabos de aço, existem alguns padrões de desativação de cabos. A nova revisão da norma considera essa dificuldade, pois mesmo uma inspeção visual bem feita se limita a defeitos superficiais em cabos de aço, por isso em sua revisão de 2017, a norma entende que a inspeção eletromagnética proporciona maior confiabilidade. No entanto, é necessário definir intervalos de inspeção periódica para monitorar a condição real dos cabos (ISO 4309, 2017).

- O uso da tecnologia de detecção magnética para monitorar o dano por fadiga de materiais ferromagnéticos é uma nova direção de pesquisa de tecnologia de teste não destrutivo. Se a tecnologia de detecção de vazamento de fluxo magnético for adotada, a tecnologia de detecção eletromagnética do cabo de aço atingirá um novo patamar (TIAN *et al.*, 2015).

### 4.3.1 Relação de sinal ruído na MFL

Como mencionado previamente nesta revisão, o maior fator que afeta a técnica MFL é a relação sinal-ruído, característica destacada por alguns autores, na qual apresentam pontos de vista que podem agravar esse problema ou melhorar seu desempenho.

O conceito proposto na literatura é que a relação sinal-ruído pode ser definida como a razão entre a amplitude do sinal de uma indicação correlacionada e a amplitude do sinal recebido de ruído de fundo ou indicações não correlacionadas. Com relação ao ensaio MFL, a relação sinal-ruído é afetada pelo ruído da superfície (sensor saltando ao longo da superfície) e pela variação do *lift off* da sonda. O *Lift off* reduz a amplitude do sinal de fluxo e altera sua frequência, com sondas de mola ajudando a minimizar esses efeitos. Ainda em MFL, a velocidade máxima permitida para uma sonda de teste ou tubo é de cerca de 300 rpm ou 5 fps (MIX, 2005).

Depois de medir o sinal de fluxo magnético, a remoção de ruído é realizada para melhorar a resolução do sinal. Após a remoção de ruído, o processo de envelopamento baseado em transformação de Hilbert pode ser usado para esclarecer vazamentos de fluxo e melhorar a sensibilidade da detecção de danos. Esse processo de envelopamento pode revelar informações importantes sobre o sinal e reduzir informações sem sentido, como ruídos de alta frequência. Além disso, as decisões de detecção de danos podem se beneficiar de várias extrações de métricas que podem ser usadas para quantificar a extensão do dano. Os sinais antes e depois do processamento do sinal são mostrados na Figura 12 (KIM *et al.*, 2019).

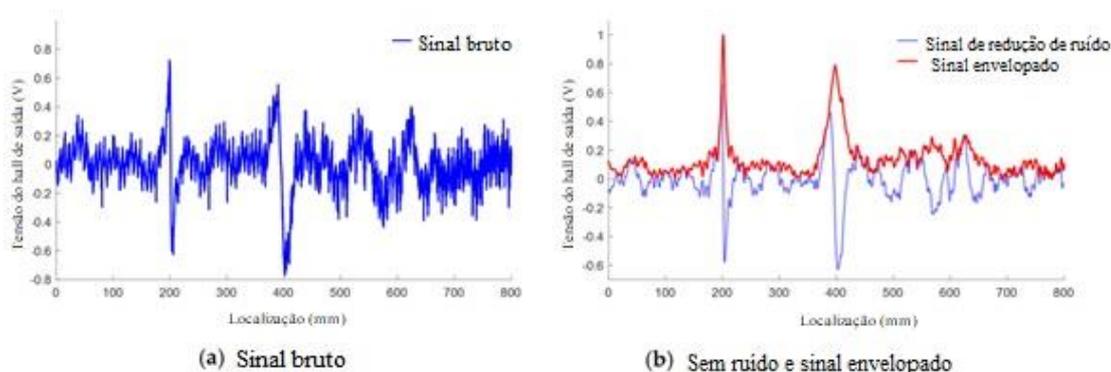


Figura 7: Modificação do sinal observada após o processo de processamento do sinal. (a) Sinal bruto; (b) Sinal sem ruído e envelopado (Adaptado de KIM *et al.*, 2019).

Os autores Krause *et al.* (1997) citam em seu trabalho que os sinais MFL dependem não apenas da geometria do defeito, velocidade e configuração da ferramenta, propriedades magnéticas da parede do tubo, mas como também da tensão. A combinação destes dificulta as previsões de profundidade precisas. Desses vários fatores, o estresse (tensão) é o mais complexo e o menos compreendido. Os autores investigaram em seu estudo a tensão uniaxial de massa no sinal MFL, na qual puderam perceber que em uma tensão máxima de 340MPa, o sinal MFL de tensão zero pode mudar em até 40%, ou seja, a tensão não afeta apenas as propriedades magnéticas do aço, mas como, os efeitos de defeitos como geradores de tensão ou os efeitos da concentração de tensão, também podem afetar o sinal MFL. Logo, os resultados obtidos por elementos finitos mostraram que a concentração de tensão perto do defeito aumenta com a sua indicação de profundidade.

Outros autores como Mukhopadhyay e Srivastava (2000) destacaram em seu estudo no qual foi utilizado tubos para o ensaio, que além do tamanho e forma do defeito, fatores como nível de magnetização do sensor, tamanho e orientação também podem afetar a caracterização do sinal. No entanto, o nível de magnetização depende da espessura da parede do tubo e da permeabilidade do material do tubo. Além disso, a pressão da linha e a velocidade PIG (estes são dispositivos que usam o princípio MFL para detectar alterações na parede do tubo) também podem causar alterações significativas no sinal MFL que são compensadas durante a análise. Também vale a pena notar que a magnetização é um fator chave na obtenção de dados confiáveis e precisos. Para PIG MFL, a baixa resolução é mais proeminente do que a alta resolução usada para caracterização.

Liu *et al.* (2022) relatam que a detecção de sinais fracos de cabos de aço mistos e o ruído ainda existe uma barreira, os autores combinaram alguns experimentos de processamento de sinal no teste MFL e tecnologia de filtragem multi-passo, utilizaram os resultados para investigar os fatores que afetam o tipo de suavização dos sinais. Foi notado que distâncias mais curtas do *lift-off* produzem melhores sinais, mas, entretanto, elevam a interferência de desgaste entre a superfície do cabo e as paredes do detector, ainda mostram que a detecção de falhas em longo prazo é necessária para os métodos de detecção. Bem como, sob condições de teste de *lift-off* curta, o sinal de falha não é tão fraco e SNR mais alto pode ser alcançado com as técnicas aprimoradas de HHT e

filtragem. Ainda apontam que o método proposto e o processamento de sinal fraco são eficientes para outros objetos ferromagnéticos, no entanto, a viabilidade deste estudo para outros tipos de defeitos de cabos de aço como LMA (incluindo desgaste e corrosão) ainda precisa ser verificada.

Ainda se destaca que o efeito da profundidade possui um grande desafio, visto que, de acordo com o padrão de inspeção MFL, o teste MFL é normalmente aplicado para detectar defeitos internos com profundidade interna de até 20 mm, o que está longe de ser capaz de atender às necessidades de inspeção industrial, desta forma, é necessário utilizar um método de detecção de alta sensibilidade para coletar eficientemente o campo magnético de vazamento fraco de defeitos internos. (WU, J. *et al.*, 2021). Os autores Wu, J. *et al.* (2021) propuseram em seu trabalho, além do método de magnetização da bobina de Helmholtz, uma bobina de indução com núcleo de alta permeabilidade desenvolvida para aumentar a profundidade detectável, que é um método de detecção ativa e perceberam que com o aumento da profundidade interna as amplitudes do sinal e a razão de ruído do sinal diminuíram. Ainda perceberam que o método MFL proposto tem potencial para detectar defeitos internos numa profundidade maior e um futuro promissor para END.

#### **4.3.2 Influência dos equipamentos na técnica MFL**

Existem muitos equipamentos e tipos de cabos diferentes, é difícil escrever padrões além das diretrizes gerais. A norma ASTM E 1571(2016) define considerações básicas para inspecionar cabos de aço por métodos eletromagnéticos como citado anteriormente e existem também outras normas nacionais e internacionais (por exemplo, SABS 0293:1996) onde referem-se ao uso de testes magnéticos como auxílio à inspeção visual. A SABS 0293 (1996) prescreve o uso de END, mas também discute suas limitações, incluindo problemas na interpretação dos resultados e diferenças nos resultados obtidos com diferentes dispositivos (TYTKO e RIDGE, 2004).

Embora existam vários modelos de sensores MFL para detecção de sinais magnéticos, como sensores Hall, SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*) e GMR (*Giant Magnetoresistance*) (SHARIF *et al.* 2020 *apud* KRAUSE e KREUTZBRUCK, 2002; SHARIF *et al.* 2020 *apud* SOPHIAN, TIAN E ZAIRI 2006; PERIN *et al.* 2017). O mecanismo do sensor de efeito Hall é utilizado para detectar

mudanças no campo magnético processando os dados brutos em uma tensão e convertendo-os em um sinal elétrico (SHARIF *et al.* 2020; Ma, He e Chen 2015).

Existem também vários sensores em testes MFL que foram introduzidos na Avaliação Não Destrutiva (NDE), como *fluxgate*, GMI (*Giant Magneto Impedance*) e SI (*Stress Impedance*). A Tabela 2 mostra a comparação dos tipos de sensores MFL (SHARIF *et al.* 2020).

Tabela 2: **Comparação do sensor magnético (Adaptado de SHARIF *et al.* 2020).**

Sensor	Comprimento da cabeça	Resolução	Velocidade de resposta	Energia de consumo
Sensor hall	10 $\mu$ m-100 $\mu$ m	0,5Oe/ $\pm$ 1kOe	1MHz	10mW
Sensor GMR	10 $\mu$ m-100 $\mu$ m	0,01Oe/ $\pm$ 20Oe	1MHz	10mW
Fkuxgate	10mm-20mm	1 $\mu$ Oe/ $\pm$ 3Oe	5kHz	1W
Sensor SI	1mm-2mm	0,1 Gal/30Gal	10kHz	5mW

Usando sensores de elemento Hall, as informações de falha podem ser obtidas capturando a falha de vazamento e processando o sinal elétrico convertido do campo magnético. Na ausência de defeitos, o campo magnético é distribuído uniformemente através do material ferromagnético. Ainda, medem o campo magnético diretamente, convertendo o nível do campo magnético diretamente em uma tensão de saída. Como o campo e a densidade de fluxo magnético estão relacionados a constantes no ar, a tensão de saída do elemento Hall é proporcional à densidade de fluxo magnético. Sensores Hall, como bobinas, medem apenas um componente do campo magnético (LIJIAN *et al.* 2009).

Segundo os autores Tian *et al.* (2022) apresentaram um experimento no qual utilizaram um concentrador magnético radial adequado para ensaios não destrutivos de cabos de aço com base em análises teóricas. Teoricamente, o concentrador melhora o circuito magnético radial e agrega o campo magnético de fuga no dispositivo de detecção e o campo magnético vazando do defeito converge na localização do sensor da matriz circunferencial, melhorando assim a relação sinal-ruído do Hall sensor de efeito.

Desta forma, quando o cabo de aço é inclinado, o campo MFL é homogeneizado pela estrutura do concentrador magnético, o que reduz a influência do gradiente de vibração do cabo de aço nos resultados do teste. Finalmente, os resultados são positivos, indicando que a amplitude do sinal de dano do cabo de aço é efetivamente melhorada usando a técnica de concentração magnética radial proposta, que facilita a análise de

defeitos (TIAN *et al.*, 2022).

Zhou e Liu (2021) mostraram em seu estudo que dependendo da orientação do posicionamento do dispositivo Hall, pode afetar a análise, ou seja, a Figura 13 mostra a orientação do posicionamento do dispositivo que pode ser colocado neste experimento, os autores optaram por posicionar o sensor em direção à superfície SWR, ou seja, o sensor Hall detecta o sinal MFL radialmente. Para uma relação de onda estacionária perfeita, o sensor Hall deve ser colocado no centro dos dois ímãs e voltado para a superfície da onda estacionária, quando o sinal MFL for detectado pela sonda magnética na direção radial será zero porque o MFL é paralelo ao SWR e o sensor Hall, minimizando o efeito de *lift-off*.

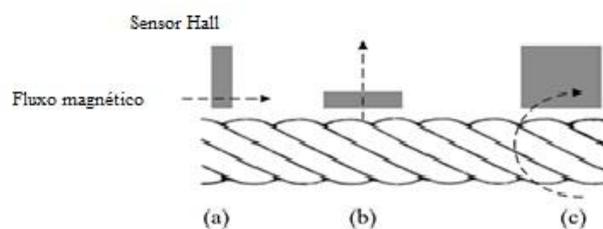


Figura 8: Esquema de três posicionamentos do sensor Hall. (a) Detecção na direção axial. (b) Detecção na direção radial. (c) Detecção na direção circunferencial (Adaptado de ZHOU e LIU, 2021).

Os autores Zhou e Liu, (2021) ainda mostram na figura 14 que o modo de operação do dispositivo que pode ser manual (a) ou modo on-line com instalação do equipamento num ponto fixo (b).

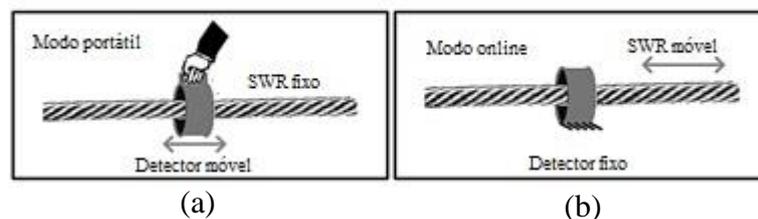


Figura 9: Dois modos de operação do detector MFL em aplicação de engenharia (a) modo manual e (b) modo fixo (Adaptado de ZHOU e LIU, 2021).

A fim de resolver os problemas de baixa precisão de detecção, grande tamanho e qualidade dos equipamentos de detecção e dificuldade no monitoramento on-line na detecção de MFL de cabos de elevador, os autores Dai *et al.* (2021) criaram um sistema

de aquisição de dados. A verificação é realizada estabelecendo um sistema de aquisição de sinal de fio rompido baseado no sensor de magnetorresistência de túnel TMR2703, e um dispositivo de excitação de *dual-loop*. Como o modelo determina a direção de detecção e o fluxo de sinal vaza através do circuito de pré-processamento de sinal, ele permite a exibição em tempo real do sinal de linha através do computador host LabVIEW, e os dados coletados são armazenados na forma de um arquivo TDMS. Os resultados obtidos mostraram que o sistema garantiu a aquisição do sinal em tempo real e obteve com precisão os dados característicos do sinal de fuga em diferentes números de fios rompidos, ainda, perceberam que os valores de pico, vale, pico a pico e largura de onda do sinal aumenta com número de fios fraturados.

Os autores Sun *et al.* (2015) realizaram ensaios na qual baseia-se no método de magnetização aberta e o método tradicional com *yoke*. As análises comparativas entre os dois métodos foram conduzidas pelo método dos elementos finitos, onde os resultados que tiveram mostraram que ao contrário do método tradicional o método de magnetização aberta apresentou menos força de interação magnética, densidade de fluxo magnético mais uniforme para varredura por oscilação, arquiteturas mais simples e funções mais universais sob o quadro de similaridades magnéticas. Ainda se mostraram positivos os efeitos das simulações sobre a magnetização com o sensor MFL, a partir de comparações com os sensores convencionais obteve mais versatilidade em objetos de diferentes tamanhos, flexibilidade de substituição de peças além de obter um volume e massa menor prologando a vida útil.

No trabalho dos autores Jin *et al.* (2021) os sensores magnetoresistivos (TMR) baseados em junção de túnel magnético (MTJ) se destacam por sua alta sensibilidade, excelente escalabilidade e baixo consumo de energia. Nos testes MFL, o sensor provou ser muito sensível e, quando integrado a um MTJ, mostrou fornecer ruído dependente da frequência que reduz a detectabilidade; como os sensores seriais baseados em MTJ permitem o design de sensores de alto desempenho para medir variações em campos magnéticos. Neste trabalho, um sensor TMR serial baseado em MTJ foi fabricado e conectado a um circuito completo de ponte de Wheatstone. Comparado com o sensor TMR, o sensor TMR de ponte de Wheatstone forneceu um nível mais alto de inspeção em barra de aço em relação sinal-ruído. Ainda podendo detectar variações de campo fracas em testes MFL.

Outro dispositivo que existe nos testes de MFL, é a bobina de indução, que é utilizada por sua alta durabilidade e baixo custo. No entanto, a estrutura de enrolamento deste projeto é complexa, várias voltas são necessárias para melhorar a relação sinal-ruído (SNR) e o processamento dos dados torna-se difícil de compreender. Em resposta a esse problema, os autores Yan, Zhang e Zhao (2017) apresentaram uma análise teórica e simulação de um campo magnético transiente 3D, utilizando um núcleo de ferro para envolver a bobina, desempenhando a função de um concentrador magnético, permitindo que o MFL ser alterado e os defeitos convergirem para o núcleo. Usando esta técnica, os autores tiveram resultados notáveis na melhoria da relação sinal-ruído do enrolamento da bobina, simplificado pela estrutura do núcleo. Foi percebido que aplicando essa técnica, poderiam eliminar a área da seção transversal da bobina na simulação e reduzir a influência da distância de içamento entre a bobina e o cabo de aço nos resultados do ensaio. Então provaram que na relação sinal ruído da bobina com núcleo de ferro foi melhorada através do experimento de prova. Quase seis vezes, para facilitar a análise de defeitos.

#### **4.3.3 Estudo de caso - Aplicação da técnica MFL em ponte estaiada**

A empresa INTRON (2022) é especializada em serviços de inspeção eletromagnética em cabos de pontes estaiadas, foi contratada para inspecionar e verificar as condições de uso desse material. A Figura 7 mostra as etapas da inspeção. O primeiro passo é a seleção do equipamento (1), pois os cabos normalmente têm diâmetro maior que 70 mm, são trabalhosos e precisam ser ajustados para atender às especificações. Em seguida, é realizada a calibração (2) e o acoplamento do coletor de dados operando com o dispositivo. Último passo é o equipamento montado (3), que passa por todo o comprimento do cabo, repetindo várias vezes ao longo de todos os cabos da ponte.



Figura 10: Etapas do processo de inspeção em ponte estaiada (INTRON, 2022).

De acordo com os dados obtidos da empresa, mesmo com as condições externas que causam interferências de ruído, conseguiram obter as informações necessárias para identificar os defeitos existentes que afetam a integridade do material. Neste serviço da empresa foram inspecionados 540 m de cabo, com a cabeça magnética MH 60-85 – o resultado desta inspeção está demonstrado nos gráficos a seguir.

Na Figura 8 abaixo, mostrou a área “ampliada” para 20m, no qual podem ser avaliadas as áreas de interesse A e B. As discontinuidades A e B representaram ganho de massa no gráfico %LMA, o que neste caso significou que uma camada de fio "zeta" foi transferida sobre outra durante este trecho.

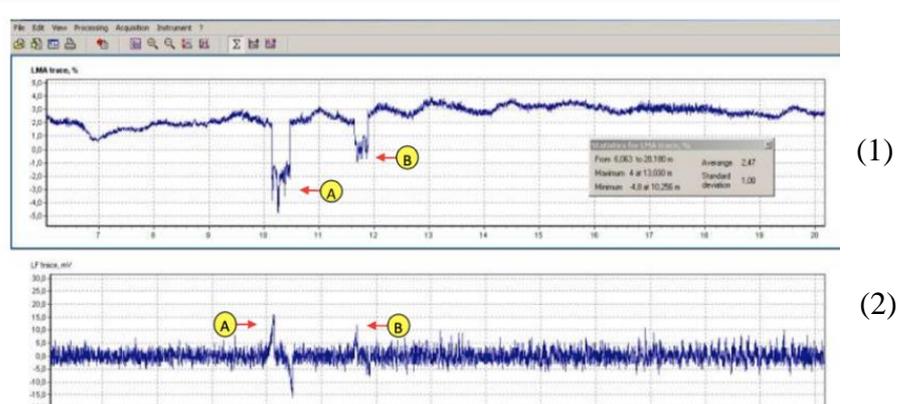


Figura 11: Região onde apresentou defeitos do tipo LMA. Gráfico (1) e área do defeito LMA (2) (INTRON, 2022).

Dando sequência aos resultados da inspeção a Figura 9 analisou área entre 458 m e 468 m, região de interesse C, no qual indicou fio rompido. Um pico positivo seguido por um pico negativo, a 9,295 m de distância, indicou que está faltando fio nesta seção.

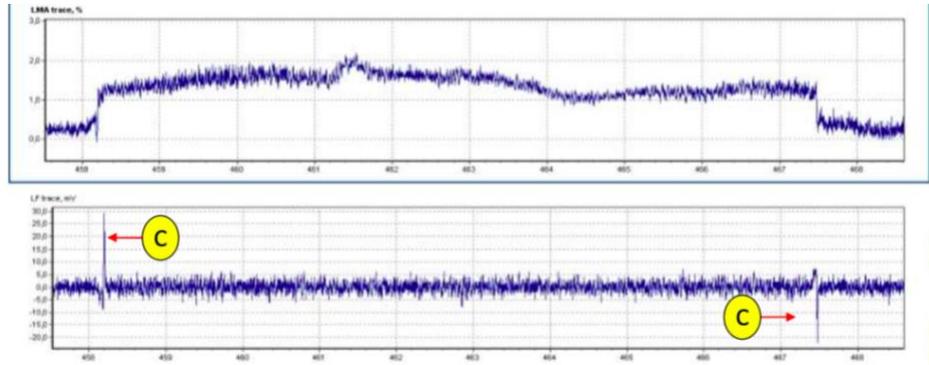


Figura 12: Região onde detectaram defeitos tipo LF (INTRON, 2022).

Nesta Figura 10, a região de interesse D, apresentou grandes mudanças nos símbolos no gráfico %LMA, juntamente com os símbolos no gráfico LF, indicando que a área danificada da camada externa do cabo pode ter se originado de um poço de corrosão, onde o gráfico LF indica um baixo grau de corrosão e sobressai de 527 m a 540 m. A Figura 11 constata que houve, em algum momento, a intenção de reparo nesta região.

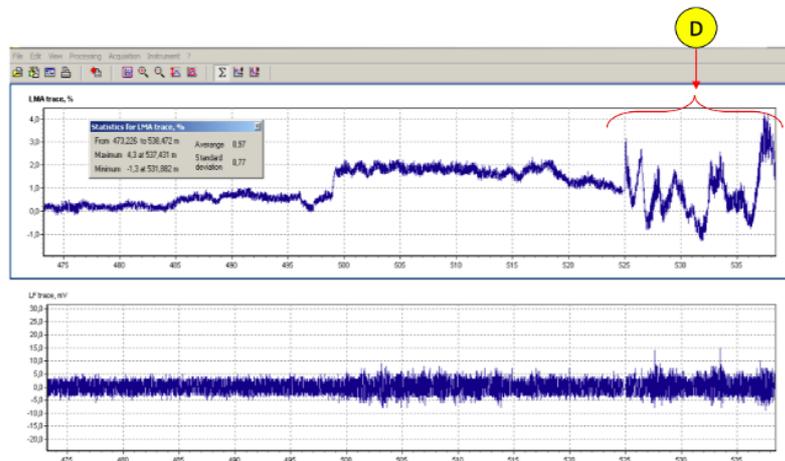


Figura 13: Defeitos de perda de área metálica encontrados na região D (INTRON,2022).



Figura 14: Imagem real da região D com defeitos LMA (INTRON, 2022).

#### 4.4 Outros métodos de inspeção em cabos de aço

Devido a diferença que existe entre os métodos em relação a propriedades físicas e princípios de teste, Liu *et al.* (2020) abordam no seu estudo recente alguns métodos que são utilizados para fazer a inspeção de cabos de aço. Com exceção da tecnologia MFL, o ensaio de ECT (*Eddy Current Test*), usa o efeito de corrente parasita como seu princípio de funcionamento, mostrado na Figura 15. Os aspectos relevantes que causam interferências na técnica são: frequência da corrente, permeabilidade e condutibilidade dos cabos.

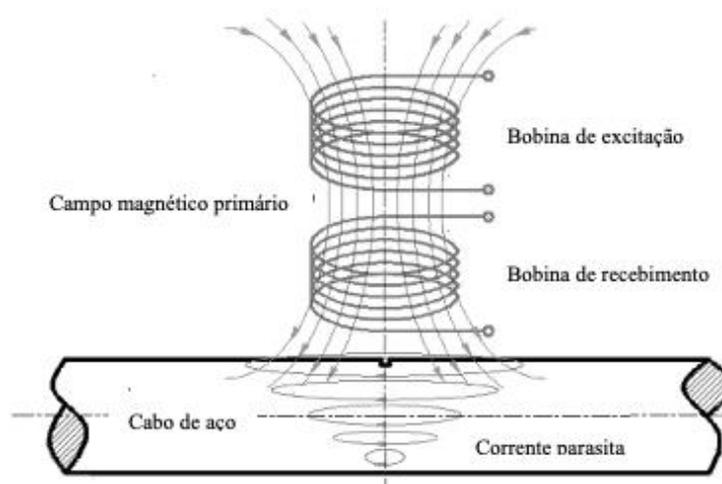


Figura 15: Princípios do método ECT típico para cabo de aço (Adaptado de LIU *et al.*,2020).

Para os autores Liu *et al.* (2020) o método de ensaio AE (*Acoustic Emission*) provou ser uma técnica END dinâmica bem-sucedida. Devido ao mecanismo físico pelo quais defeitos como fraturas em cabo de aço, concentração de tensão e corrosão liberam ondas de tensão, quando atingem a superfície do objeto medido, pequenos deslocamentos são gerados e detectados por um sensor composto por: Transdutor piezoelétrico (Figura 16). Um ponto negativo que a técnica apresentou dificuldades de inspecionar defeitos com superfícies rugosas juntamente com a fratura dos cabos.

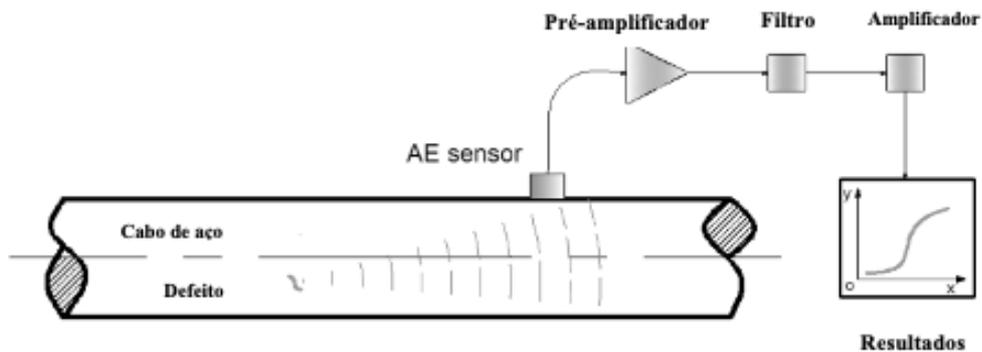


Figura 16: Princípios do método de teste AE típico para cabos de aço. (Adaptado de LIU *et al.*,2020).

Outra técnica que teve destaque para os autores Liu *et al.* é a UGWT (*Ultrasonic Guided Wave Testing*) de acordo com as especificações do método, a parte mais importante é a onda piezoelétrica do transdutor, que é usada para gerar e detectar ondas guiadas (Figura 17). As ondas de Lamb típicas e as ondas de cisalhamento horizontais são frequentemente usadas em aplicações práticas de detecção de defeitos. A vantagem distinta do UGWT sobre os métodos tradicionais de inspeção eletromagnética não destrutiva é sua capacidade de detectar defeitos remotos sem contato (LIU *et al.*, 2020).

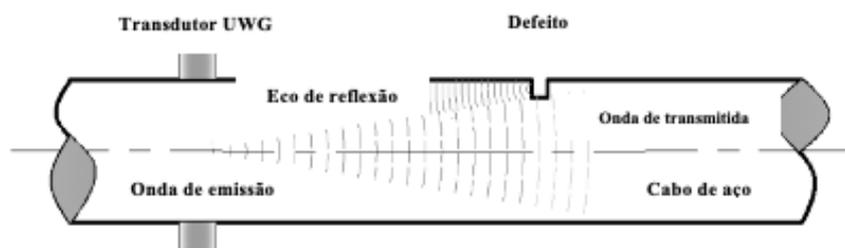


Figura 17: Princípios do método UGWT típico para cabo de aço (Adaptado de LIU *et al.*,2020).

A última técnica introduzida por Liu *et al.* (2020) é o ensaio radiográfico (Figura 18), que tem sido amplamente utilizado para inspeção de cabos. A quantidade de radiação absorvida ou penetrada pelo cabo sob teste varia e é afetada pela densidade do material, espessura e outros fatores. Questões adicionais, como intensidade de radiação, ajuste do tempo de exposição, perfis de exposição e avaliação do filme, representam desafios para uma ampla gama de aplicações e pesquisas.

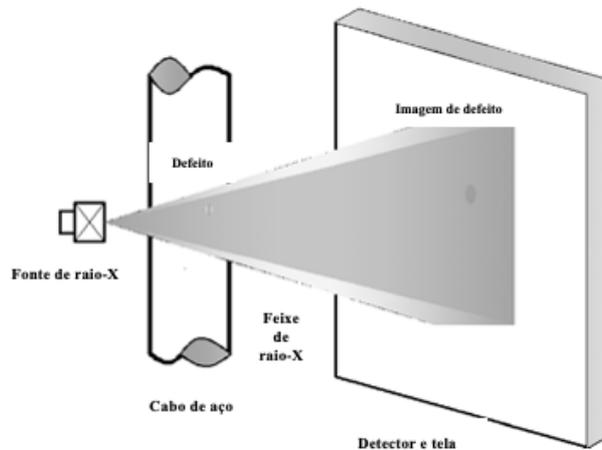


Figura 18: Processo esquemático do método de teste de raios-X para cabo de aço. (Adaptado de LIU *et al.*,2020).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos argumentos apresentados, o END nos mostra a importância da inspeção como alguns dos métodos de ensaio citados que permite detectar e avaliar defeitos em materiais sem danificá-los. Como esses defeitos são frequentemente caracterizados por fraturas, porosidade, inclusões, corrosão, fadiga e outros fatores que podem levar à perda de resistência e consequente falha do material, são necessárias inspeções periódicas para evitar acidentes, mas também para a vida útil do material. O teste visual, mesmo com suas limitações, se mostra primordial em vários ensaios e se destacou como o principal método para tomada de decisões dentro de um determinado método.

A técnica de vazamento de fluxo magnético em cabos de aço, se mostra efetiva em sua aplicação. Existem as dificuldades do ensaio relacionadas aos fatores que afetam como as interferências relacionadas a ruído, ambiente, equipamentos, operação e superfície do material. Entretanto, a técnica de MFL nos estudos apresentados obteve efeitos positivos e negativos dependendo da forma de operação e da condição que a superfície se encontra, como foi citado pelos autores Deng *et al.* (2017).

A INTROM (2022) relata que a inspeção teve um resultado positivo. No qual, conseguiram identificar que antigos procedimentos de reparo de cabo de aço foram aplicados para tentar resolver as consequências de um novo problema, porém sem eficiência. Com o uso de técnicas de END no suporte à manutenção preditiva obteve uma otimização dos custos de manutenção e puderam diagnosticar todos os defeitos e intervir na hora certa.

Ainda em relação à MFL proposta por alguns autores de dispositivos auxiliares, destacando alguns pontos importantes, como o maior problema que causa na técnica MFL é a relação de sinal ruído, equipamentos e tipo material. Este é um problema que requer mais experimentos e simulações, embora tenha um efeito positivo de alguns protótipos nos ensaios sobre os cabos de aço, esse problema continua amplamente por ser um material que sofre muito em uso, onde dependendo do seu problema é algo que precisa ser criado ou adaptado para cumprir os protótipos como pré-requisitos para a análise.

Em resposta ao comentário anterior, como foram apresentados outros métodos de ensaios eletromagnéticos pelos autores Liu *et al.* (2020), cada tipo de ensaio apresenta suas particularidades, porém a técnica MFL em especial se destaca pelo método mais

utilizado dentre os ensaios conforme as normas internas. Ainda, com as exigências dos métodos de detecção de cabo de aço em relação à alta precisão e sensibilidade, é exigido o uso de metodologias de sinais e tipos de sensores apropriados para que se consiga uma análise satisfatória. Outro ponto a ser analisado dos cabos de aço está além da sensibilidade do sensor e das tecnologias existentes. Um fato que interfere muito na inspeção é os tipos de defeitos que surgem e dos tipos de cabos de aço. É de extrema importância analisar o ambiente que vai ser operado e os meios de detecção para uma aplicação futura.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABENDI. **Guia Abendi de END & Inspeção** – 2019. São Paulo. Disponível em: <[http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/GUIA\\_ABENDI\\_2019.pdf](http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/GUIA_ABENDI_2019.pdf)> Acesso em: 25.maio.2022

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. **E1571-11: Prática padrão para exame eletromagnético de cabo de aço ferromagnético**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ISO 4309: Equipamentos de movimentação de carga — Cabos de aço — Cuidados, manutenção, instalação, inspeção e descarte**. Rio de Janeiro, 2009. 47p. Disponível em: <<https://document.onl/documents/abnt-nbr-iso-43092009-para-impressao-da-norma-nbriso4309-gerado-em-10-12-2015.html>> Acesso em: 26.maio.2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ISO 4309: Guindastes - cabos de aço - cuidados e manutenção, inspeção e descarte**. Vernier, Genebra, Suíça: ISO International, 2017. 10p. Disponível em: <<https://www.sis.se/api/document/preview/922803/>> Acesso 26.maio.2022

ASTN. **Introdução aos testes não destrutivos** – 2021. The American Society for Nondestructive Testing. Colombo, EUA. Disponível em: <[https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction\\_to\\_Nondestructive\\_Testing.aspx](https://www.asnt.org/MajorSiteSections/About/Introduction_to_Nondestructive_Testing.aspx)> Acesso em: 24.maio.2022

BENLIANG, L.; ZHIYE, D.; JIAN, L. Characterization of Magnetic Flux Leakage Testing Signals by the Modified Hopfield Neural Network. **Scientific Research**, p.163-168, 2009.

DAI, L.; ZHAO, M.; TANG, B.; YANG, N.; XIAO, Y.; WU, T. Signal acquisition system for broken wire of elevator wire rope based on TMR sensor. *Journal of Physics: Conference Series*, p. 1-9, 2021.

DENG, Z.; SUN, Y.; YANG, Y.; KANG, Y. Effects of surface roughness on magnetic flux leakage testing of micro-cracks. **Measurement Science and Technology**, v. 28, n. 4, p. 1- 13, 2017.

FEDORKO, G.; MOLNÁR, V.; FERKOVÁ, Z.; PETERKA, P.; KREŠÁK, J.; TOMAŠKOVÁ, M. Possibilities of failure analysis for steel cord conveyor belts using knowledge obtained from non-destructive testing of steel ropes. **ELSEVIER**, v. 67, p. 33-45, 2016.

GUO, Z.; LUO, H.; ZHUO, J.; ZHANG, C.; LI, X. Quantitative study of shaking based on non-destructive testing of steel wire ropes. **International Conference on Damage Assessment of Structures**. p.1- 5, 2022.

HONGJIAN, X.; KECHONG, Y.; SHUZI, Y. Quantitative inspection of broken wire in wire ropes: Method and Apparatus. **International Journal of Occupational Safety and Ergonomics**. v. 2, n. 1, p. 35- 40, 2015.

INTROM BRASIL. **Inspeção eletromagnética nos cabos de aço de pontes estaiadas** – Espírito Santo. Disponível em: <  
<https://www.institutodeengenharia.org.br/site/wp-content/uploads/2017/10/arqnot5385.pdf>> Acessando em: 26.maio.2022.

JIN, Z.; MOHD NOOR SAM, M.A.I.; OOGANE, M.; ANDO, Y. Serial MTJ-Based TMR Sensors in Bridge Configuration for Detection of Fractured Steel Bar in Magnetic Flux Leakage Testing. *Sensors*, v. 21, p. 1-10, 2021.

JOMDECHA, C. Characterization of Wire Rope Defects from Magnetic Flux Leakage Signal. **SEMANTIC SCHOLAR**, v. 8, n.1, p. 54-63, 2003.

KASAI, N.; SEKINE, K.; MARUYAMA, H. Influence of corrosion products on magnetic flux leakage signals in inspection of far-side metal-loss defects in oil storage tank bottom floors. **Journal of the Japan Petroleum Institute**, v. 47, n. 1, p. 19–26, 2004.

KIM, J-W.; TOLA, K. D.; TRAN, D. Q.; PARK, S. MFL-Based Local Damage Diagnosis and SVM-Based Damage Type Classification for Wire Rope NDE. *Materials*, v. 12, p- 1-20, 2019.

KRAUSE, T. W.; DONALDSON, R. M.; BARNES, R.; ATHERTON, D. L. Variation of the stress dependent magnetic flux leakage signal with defect depth and flux density. **ELSEVIR**, v. 29, n. 2, p. 79-86, 1997.

LIJIAN, Y.; GANG, L.; GUOGUANG, Z.; SONGWEI, G. Sensor Development and Application on the oil-gas pipeline Magnetic Flux Leakage Detection. *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments*, p. 876-878, 2009.

LIU, S.; SUN, Y.; JIANG, X.; KANG, Y. A review of wire rope detection methods, sensors and signal processing techniques. **Journal of Nondestructive evaluation/Springer**. v. 39, n. 85, p.1-18, 2020.

LIU, S.; SUN, Y.; HE, L.; KANG, Y. Weak Signal Processing Methods Based on Improved HHT and Filtering Techniques for Steel Wire Rope. *Applied sciences*, v.12, p. 1-18, 2022.

PARK, S.; KIM, J.W.; LEE, C.; LEE, J. J. Magnetic Flux Leakage Sensing-Based Steel Cable NDE Technique. *Hindawi*, p. 1- 8, 2014.

MIX, P. E. **Introduction to nondestructive testing**. (2. ed.) Hoboken, New Jersey: Wiley-interscience, 2005. 697p.

Mukhopadhyay, S.; Srivastava, G.P. Characterisation of metal loss defects from magnetic flux leakage signals with discrete wavelet transform. *ELSEVIER*, p. 57-65, 2000.

SATHAPPAN, N. TOKHI, O. M.; PENALUNA, L.; ZHAO, Z.; DUAN, F.; SHIRKOOHI, G.; KAUR, A. Development of an MFL Coil Sensor for Testing Pipes in Extreme Temperature Conditions. *Sensors*, v. 21, p.1-11, 2021.

SCHLANBUSCH, R.; OLAND, E.; BECHHOEFER, R.E. Condition Monitoring Technologies for Steel Wire Ropes – A Review. *International Journal of Prognostics and Health Management*, p. 1-14, 2017.

SHARIF, A. N; RAMLI, R.; NUAWI, Z.M.; MOHAMED, Z. A. Theory and Development of Magnetic Flux Leakage Sensor for Flaws Detection: A Review. *Jurnal Kejuruteraan*, p. 387- 395, 2020.

SILVA JR., F. S.; MARQUES, V. P. *Ensaio não destrutivo*, 2006. Belo horizonte. Disponível em: <<https://s1p.livrozilla.com/store/data/000956206.pdf?k=AwAAAYEBAsLgAAACWLtWQ9nwnBS7xxxnUg6llxbY3Blg> - pdfjs.action=download> Acesso em: 26.maio.2022.

SINGH, S.W.; RAO, C.P.B.; THIRUNAVUKKARASU, S.; JAYAKUMAR, T. Flexible GMR Sensor Array for Magnetic Flux Leakage Testing of Steel Track Ropes. *Hindawi Publishing Corporation/ Journal of Sensors*, p. 1-7, 2012.

SOUTH AFRICAN BUREAU OF STANDARDS - SABS 0293 – 1996. Code de pratique traitant de l'évaluation de la condition des câbles à fils métalliques sur les machines d'extraction. Republic of South Africa, 46 p. Disponível em: <<https://www.cnesst.gouv.qc.ca/sites/default/files/publications/code-pratique-evaluation-condition-cables-fils-metalliques-machines-extraction-norme-sud-africaine-sabs-0293-1996.pdf> > Acesso em: 29 de agosto 2022.

SUKHORUKOV, V.V.; SLESAREV, D. A.; VORONTSOV, A.N. **Electromagnetic Inspection Evaluation**, v. 72, n. 8, p. 1019–1027, 2014.

SUN, Y.; LIU, S.; LI, R.; YE, Z.; KANG, Y.; CHEN, S. A new magnetic flux leakage sensor based on open magnetizing method and its on-line automated structural health monitoring methodology Yanhua. *Structural Health Monitoring*, v. 14, p. 583–603, 2015.

TECH-INSP. **Descrição de serviços-** 2022.

Disponível em:< <http://tech-insp.com.br/servicos/inspecao-ensaios/ensaio-visual-nao-destrutivo>> Acesso 8.novembro.2022.

TIAN, J.; WANG, W.; WANG, H.; BAI, Q.; ZHOU, Z. LI, P. Enhancing Wire-Rope Damage Signals Based on a Radial Magnetic Concentrator Bridge Circuit. *Sensors*, n. 22, p. 1-18, 2022.

TIAN, J.; ZHOU J.; WANG, H.; MENG, G. Literature Review of Research on the Technology of Wire Rope Nondestructive Inspection in China and Abroad. **EDP Sciences**, v. 22, p.1-6, 2015.

TYTKO, A.A.; RIDGE, I.M.L. The influence of rope tension on the LMA sensor output of magnetic NDT equipment for wire ropes, *Nondestructive Testing and Evaluation*, v. 19, n. 4, p. 153–163, 2004.

UNION. **RELATÓRIO TÉCNICO N° 107 Inspeção de cabo de aço** – 2009. Disponível em:< <https://www.unionrope.com/technical-support/wire-rope-basics>> Acesso 24.maio.2022.

YAN, X.; ZHANG, D.; ZHAO, F. Improve the signal to noise ratio and installation convenience of the inductive coil for wire rope nondestructive testing. *ELSEVIER*, n. 92, p. 221-227, 2017.

WU, J.; WU, W.; LI, E.; KANG, Y. Magnetic Flux Leakage Course of Inner Defects and Its Detectable Depth). *Springer open*, n.34, v.63, p.1-11, 2021.

ZAMBRANO, M. X.; MARTÍNEZ-DE-GUERENU, A.; ARIZTI, F. Magnetic Flux Leakage Measurement System to Detect Flaws in Small Diameter Metallic Wire Ropes. **European Conference on Nondestructive Testing (ECNDT 2014)**, v. 6, n. 10, p. 1-10, 2014.

ZHANG, L.; BELBLIDIA, F.; CAMERON, I.; SIENZ, J.; BOAT, M.; PEARSON, P. Influence of Specimen Velocity on the Leakage Signal in Magnetic Flux Leakage Type Nondestructive Testing. **Journal of Nondestructive evaluation**. v. 34, n. 6, p. 1-8, 2015.

ZHENG, P.; ZHANG, J. Application of Variational Mode Decomposition and k-Nearest Neighbor Algorithm in the Quantitative Nondestructive Testing of Wire Ropes. **Hindawi**, p. 1-15, 2019.

ZHOU, P.; ZHOU1, G.; ZHU, Z.; HE, Z.; DING, X.; TANG, C. A Review of Non-Destructive Damage Detection Methods for Steel Wire Ropes. **Applied Sciences**. v. 9, ed.13, p. 1-16, 2019.

ZHOU, Z.; LIU, Z. Fault Diagnosis of Steel Wire Ropes Based on Magnetic Flux Leakage Imaging Under Strong Shaking and Strand Noises. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**, v. 68, n. 3, p. 2543-2553, 2021.