

Além da inspeção em linha convencional: Avaliação de campo magnético passivo para perdas nas paredes da tubulação

Seamus Beirsto, Michael Byington, Shannon Campbell, Anouk van Pol,

John van Pol

INGU Solutions Inc.



**19ª PIPELINE
TECHNOLOGY
CONFERENCE**

8 a 11 DE ABRIL DE 2024, BERLIM

Organizado por



Instituto Europeu para Transferência de
Informações e Tecnologia

Processo da Pipeline Technology Conference 2024 (ISSN 2510-6716).

www.pipeline-conference.com/conferences

Copyright ©2024 por EITEP Institute.

1 RESUMO

Este documento explora o uso da densidade do fluxo magnético passivo (DFM) para caracterização da perda de metal em tubulações de aço. Desde o desenvolvimento inicial das ferramentas de FFM nos anos 1960, as propriedades ferromagnéticas das tubulações de aço foram equipadas de forma a determinar as condições da tubulação com desenvolvimento contínuo melhorando a resolução dessas ferramentas. Entretanto, a exploração da capacidade das análises de DFM em baixa resolução para inspecionar as condições da tubulação ainda é baixa.

A solução de inspeção em linha do Pipers® alimentada por aprendizagem de máquina (Michael Byington 2022) emprega análises de DFM para identificar conexões em tubos com potencial de perda de metal acima de 30% da espessura nominal da parede. Esta abordagem permite uma avaliação de integridade da tubulação, com resolução suficiente para compreender as condições das paredes da tubulação com resultados pelo menos equivalentes aos dos ensaios hidrostáticos.

Este documento discute as propriedades do campo magnético passivo, o desenvolvimento de um modelo para magnetizar axialmente tubos e a influência dos campos magnéticos externos e da geometria não cilíndrica no campo magnético passivo. Desta forma, demonstra-se como a solução do Pipers®, utilizando essa compreensão da DFM passiva, pode funcionar como uma ferramenta de inspeção em linha de baixa resolução, auxiliando na gestão segura das tubulações, mantendo a conformidade às normas. Finalmente, a abordagem é validada por comparações a uma inspeção de FFM.

Em sua conclusão, este trabalho demonstra um novo método analítico para utilizar a DFM passiva para detectar a perda de metal em tubulações. Identificando segmentos em risco e decisões orientativas em relação à manutenção, esta técnica de baixa resolução complementa as ferramentas de ILI de alta resolução tradicionais, permitindo uma abordagem estratégica à gestão da tubulação, que ressalta a segurança, a conformidade e a alocação otimizada de recursos.

2 O CAMPO MAGNÉTICO PASSIVO DE UM TUBO

O Pipers® da INGU utiliza magnetômetros com sistemas microeletromecânicos (MEMS) para medir o campo magnético passivo em estruturas ferromagnéticas, como as tubulações. O Pipers® foi projetado para implementação com duas configurações distintas: livre flutuação, ou seja, movimentando-se conforme o fluxo na tubulação, ou anexo a um pig de limpeza já instalado (Matthew Kindree 2022).

Os materiais ferromagnéticos apresentam uma ordenação de longo alcance em nível atômico, o que faz com que os aceleradores de elétrons não pareados se alinhem paralelamente uns com os outros, em uma região conhecida como domínio. Embora a magnetização seja intensa nos domínios, o material tipicamente permanece desmagnetizado em uma escala bruta, devido à orientação aleatória dos domínios (Kittel 2005).

Quando expostos a um campo magnético externo, como o da Terra, os materiais ferromagnéticos podem ser magnetizados se os domínios se alinharem, amplificando significativamente o campo magnético induzido, uma característica conhecida como permeabilidade magnética. O estresse mecânico pode ainda induzir a anisotropia magnética, por exemplo, a tensão de ruptura em um cristal de ferro se alinha à direção magnética preferencial com a tensão, causando o alinhamento dos domínios (Schäfer 1998).

Observações revelam que os tubos em uma tubulação, em parte devido à sua geometria cilíndrica, tendem a se magnetizar ao longo da direção axial. Essa magnetização ocorre espontaneamente na presença de um campo magnético da Terra, e não requer a aplicação de um campo magnetizante muito grande. Variações na massa e no estado magnético, incluindo a força do campo externo, a permeabilidade magnética e o histórico magnético, induzem variações na magnetização axial e, por extensão, ao DFM apurado (Kittel 2005).

2.1 MODELAGEM DO CAMPO MAGNÉTICO PASSIVO

Utilizando as equações de Maxwell e os princípios fundamentais, derivamos uma equação descrevendo o campo magnético ao longo da linha de centro de uma peça simétrica cilíndrica da tubulação, magnetizada uniformemente ao longo da direção axial (y) (Figura 1). A Equação 1 ilustra o fluxo magnético axial $B_y(y)$ ao longo do eixo y , onde μ_0 representa a permeabilidade do espaço livre e M denota o momento magnético do material, e R representa o raio do tubo (Griffiths 2013).

Equação 1: Campo magnético de um tubo axialmente magnetizado

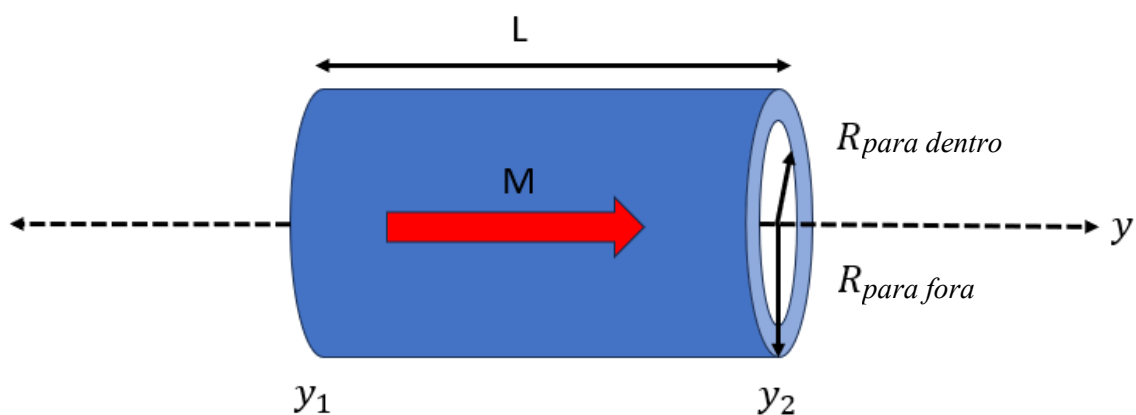
$$B_y(y) = \frac{\mu_0 M}{2} \left(\frac{y - y_1}{\sqrt{(y - y_1)^2 + R_{\text{para fora}}^2}} - \frac{y - y_2}{\sqrt{(y - y_2)^2 + R_{\text{para fora}}^2}} + \frac{y - y_2}{\sqrt{(y - y_2)^2 + R_{\text{para dentro}}^2}} - \frac{y - y_1}{\sqrt{(y - y_1)^2 + R_{\text{para dentro}}^2}} \right)$$

A derivação desta equação tem como base diversas premissas:

1. Não existem campos magnéticos externos presentes, com o único campo magnético se alastrando com a magnetização do tubo.
2. O tubo apresenta simetria cilíndrica.
3. A magnetização apresenta uniformidade na direção axial.

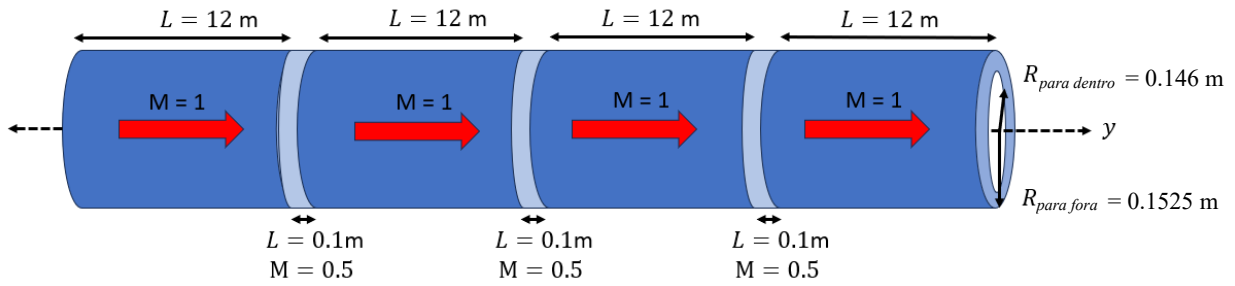
Dados empíricos mostram somente desvios menores, que indicam que este modelo é consistente com os fenômenos físicos dominantes em questão.

Figura 1: Tubo axialmente magnetizado.



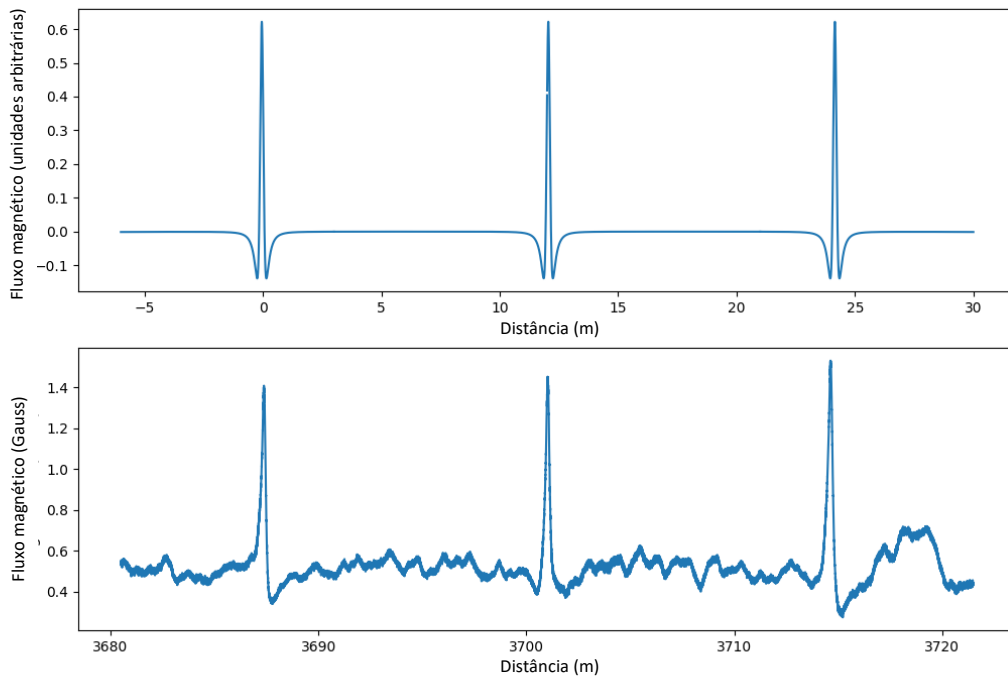
A natureza aditiva dos campos magnéticos permite o uso da Equação 1 para formular cenários mais complexos. Esta abordagem permite a modelagem do campo magnético axial em torno das soldas circunferenciais, onde as variações nas propriedades do material e as tensões induzem a alterações na magnetização do tubo.

Figura 2: Modelo com três soldas circunferenciais.



A Figura 2 mostra uma análise comparativa: a plotagem superior ilustra um modelo representando quatro conexões de 12 metros de comprimento, com as soldas circunferenciais gerando uma redução da magnetização axial (Figura 2). Este modelo é gerado pelo somatório de sete variantes da Equação 1; quatro com $M = 1$ representando as conexões nos tubos e três com $M = 0,5$ representando as soldas circunferenciais com magnetização axial reduzida. A plotagem inferior ilustra os dados de campo obtidos de conexões idênticas. A correspondência entre nossas previsões e as observações reais substanciam fortemente nosso entendimento das propriedades magnéticas básicas dos tubos.

Figura 3: Assinatura das soldas circunferenciais modelo vs. dados de campo.



Uma inferência da Equação 1 é que a direção do campo magnético no interior de um segmento da tubulação axialmente magnetizado se opõe à direção de magnetização da tubulação ao seu redor.

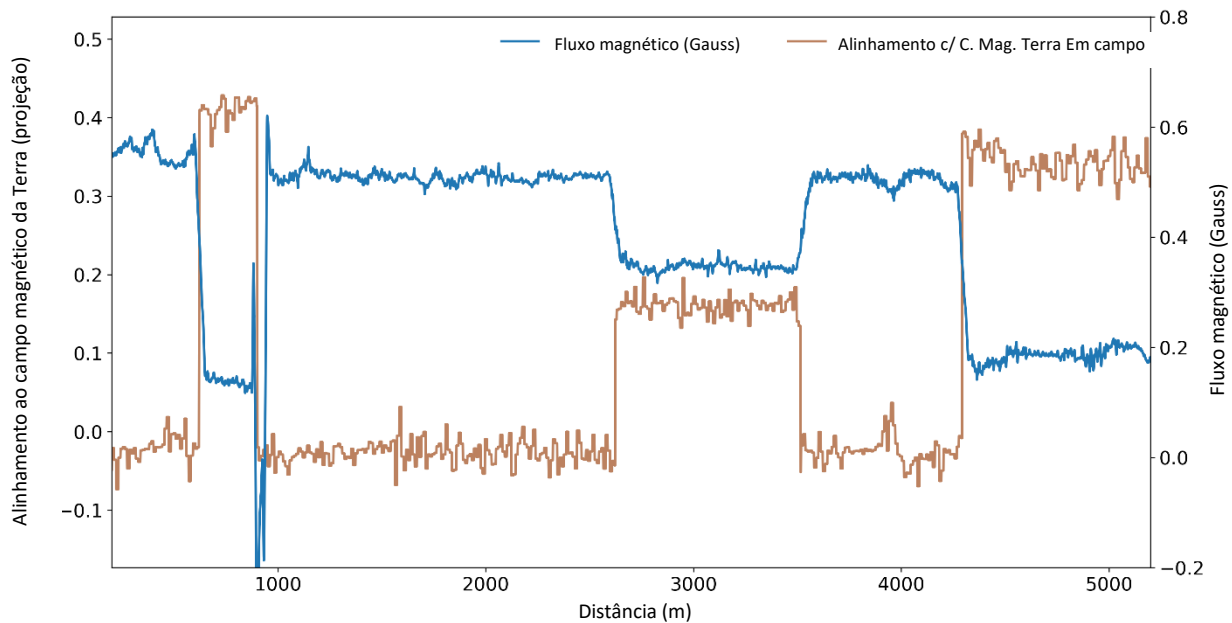
2.2 EFEITOS DOS CAMPOS MAGNÉTICOS EXTERNOS

Desenvolvido conforme a fundação definida pela Equação 1, a primeira expansão do nosso modelo integra o impacto de um campo magnético externo sobre o campo magnético passivo. O campo magnético da Terra é onipresente e apresenta variações globais, tipicamente variando de 0,25 a 0,65 Gauss, com variações na declinação e inclinação, conforme as coordenadas geográficas (William J. Hinze 2013). Esses parâmetros podem ser aproximados como uma constante em um ponto específico da tubulação.

Conforme citado anteriormente, quando expostos, quando expostos a um campo magnético externo, como o da Terra, os materiais ferromagnéticos podem ser magnetizados se os domínios se alinharem. Portanto, nossa hipótese é de que o alinhamento da pressão interna da tubulação com o campo magnético da Terra intensifica a magnetização axial da tubulação. Por outro lado, o desalinhamento induz a uma magnetização fora do eixo, o que reduz a magnetização axial.

Para validar esta hipótese, plotamos o alinhamento da orientação da tubulação com o campo magnético da Terra juntamente com o DFM apurado. Alavancando os percursos especificados da tubulação e os perfis de elevação, os vetores unitários direcionais são formulados para cada segmento da tubulação. Na sequência, o vetor unitário direcional do campo magnético da Terra na região da tubulação é determinado conforme a declinação e inclinação magnéticas. Projetando-se esses vetores unitários um contra o outro, determina-se o alinhamento da tubulação ao campo magnético da Terra para cada segmento da tubulação.

Figura 4: Fluxo magnético axial vs. alinhamento da tubulação ao campo magnético da Terra.



A Figura 3 ilustra o impacto alinhamento da tubulação ao campo magnético da Terra sobre o DFM axial na tubulação. Aqui percebemos uma forte correlação entre o campo magnético axial e o alinhamento da tubulação ao campo magnético da Terra. O relacionamento inverso entre o DFM axial e o alinhamento da tubulação ao campo magnético da Terra alinha-se às previsões derivada da Equação 1. Essa relação é indicativa da magnetização acentuada da parede do tubo ao longo da direção do campo magnético da Terra, causando uma redução correspondente na DFM no interior da tubulação, confirmando a coerência entre a observação empírica e a estrutura teórica fornecida pela Equação 1.

2.3 EFEITOS DA GEOMETRIA SIMÉTRICA NÃO CILÍNDRICA

Estendendo-se o modelo para além da simetria cilíndrica, presume-se que na Equação 1, agora inclui-se a geometria simétrica não cilíndrica, por meio de uma abordagem numérica. Nossa metodologia começa com o desenvolvimento de um modelo de projeto computadorizado (CAD) que representa a geometria desejada, como um inserção a quente (hot-tap) instalada na tubulação (Figura 4). Esse modelo é populado na sequência com dipolos magnéticos alinhados ao longo das direções axiais. Nesse contexto, a direção axial do tubo corpo corresponde para o y-direção, embora a direção axial da inserção hot-tap se alinha à direção z.

Para determinar o campo magnético ao longo da linha de centro do tubo, empregamos a lei de Biot-Savart, Conforme expressa na Equação 2:

Equação 2: Lei de Biot-Savart

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r}) \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{m}}{r^3} \right)$$

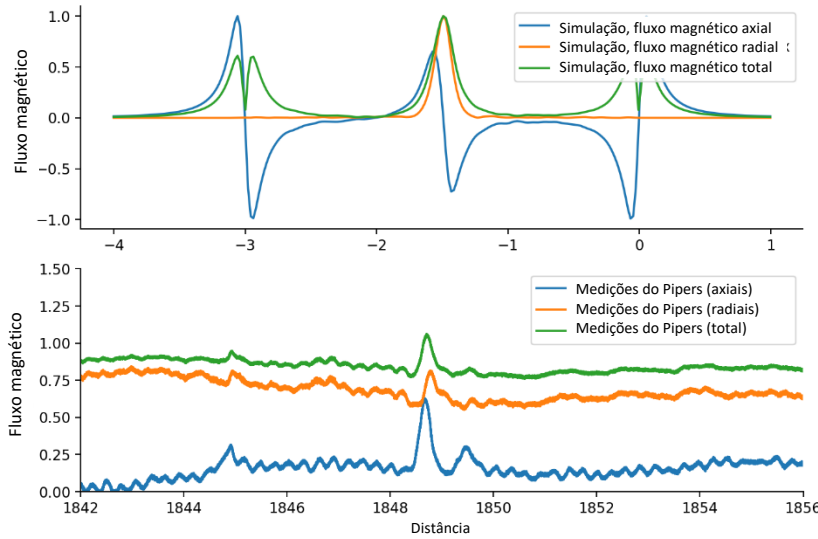
Aqui, \vec{B} representa o vetor que descreve o campo magnético, \vec{m} denota o vetor que representa a magnitude e a orientação do dipolo magnético e \vec{r} representa o vetor que descreve a posição do dipolo relativo ao ponto em que o campo magnético está sendo medido. Para determinar a DFM em qualquer ponto, a contribuição de cada dipolo é somada conforme a Equação 2. Esta abordagem nos fornece, não apenas um modelo do campo magnético axial, mas também o componente radial do campo.

Figura 5: Modelo de inserção hot-tap.



A Figura 5 apresenta uma análise comparativa: A plotagem superior mostra o campo magnético previsto pelo modelo baseado no CAD. A plotagem inferior mostra dados de campo obtidos da tubulação ilustrada na Figura 4, centralizada na inserção hot-tap. Mais uma vez, observamos uma forte semelhança entre o modelo e os dados de campo.

Figura 6: Modelo de inserção hot-tap vs. dados de campo.



Esta abordagem permite uma avaliação abrangente dos campos magnéticos em configurações além da simples simetria cilíndrica, oferecendo importantes perspectivas do comportamento magnético de geometrias complexas, como a instalação da inserção hot-tap.

2.4 EFEITOS DA PERDA DE METAL SOBRE O CAMPO MAGNÉTICO PASSIVO

A perda de metal tem um impacto significativo na estrutura magnética da tubulação, que influencia o campo magnético passivo detectado pela ferramenta Pipers®. Essa alteração na estrutura magnética é influenciada por diversos fatores, incluindo a geometria da superfície, a massa do metal e a zonas de concentração de tensão (Kittel 2005).

Embora a previsão da estrutura magnética resultante com base nos primeiros princípios apresente desafios, a análise dos dados do Pipers® fornece evidências convincentes. Ela sugere que a perda de metal se apresenta com uma profundidade mínima de 30% da espessura nominal da parede e comportamento consistente. Essas características produzem de forma consistente uma ligeira redução localizada, tanto da DFM axial quanto na radial, em torno do tubo, conforme ilustrado na Figura 7. Além disso, há uma redução global consistente nos fluxos axial e radial em toda a conexão hidráulica, comparada às conexões em tubos em torno da tubulação, conforme ilustrado na Figura 8.

Essas reduções nas DFM axial e radial são calculadas pela soma da raiz quadrada dos componentes magnéticos. O DFM total pode ser visto na cor verde na Figura 5 e Figura 6.

Figura 7: Redução localizada na densidade do fluxo magnético em torno da característica de perda de metal.

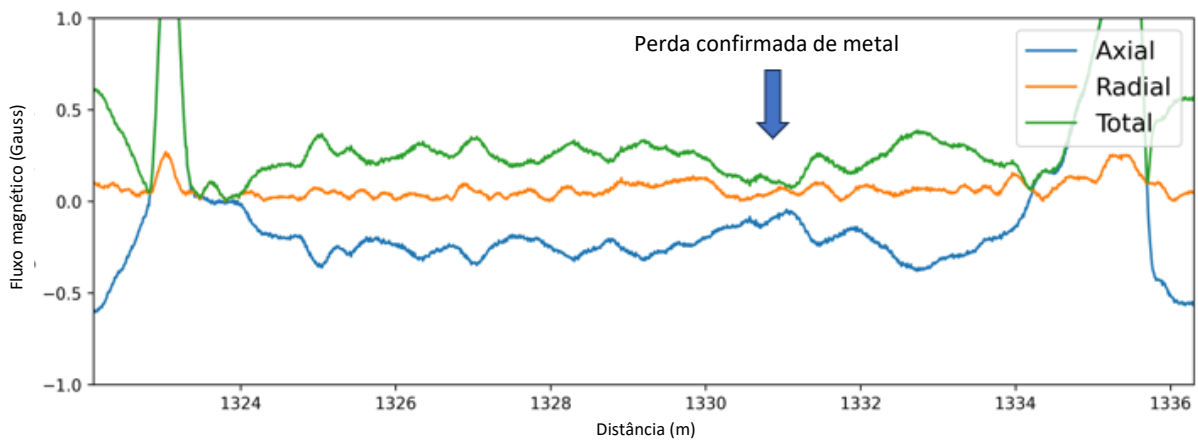
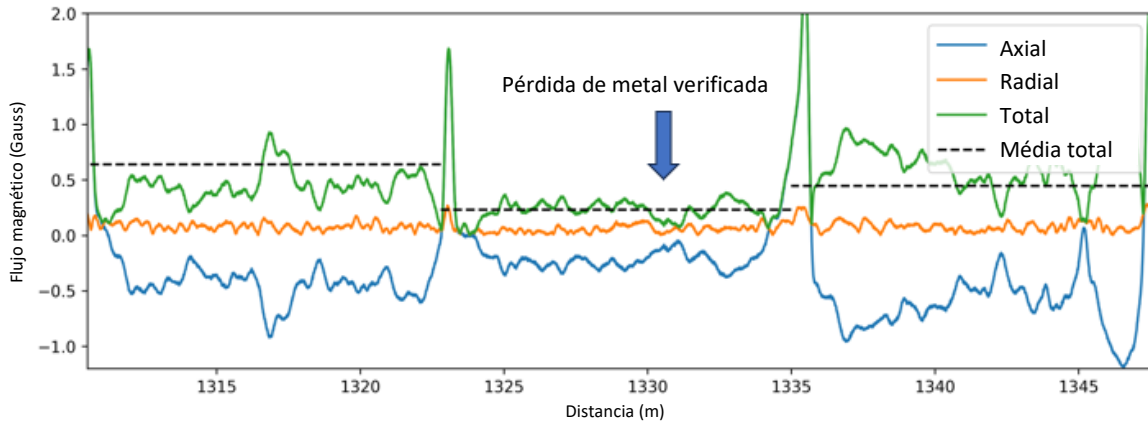


Figura 8: Densidade do fluxo magnético médio reduzido em conexão hidráulica com característica de perda de metal.



3 A ANÁLISE

Com uma compreensão estabelecida do campo magnético passivo na tubulação e uma ferramenta de medição correspondente, desenvolvemos um método analítico para identificar conexões em tubos com prováveis anomalias por perda de metal.

3.1 SEGMENTAÇÃO DA TUBULAÇÃO

A etapa inicial da análise envolve a segmentação da tubulação em seções com características magnéticas comparáveis na linha de base. A segmentação é feita com base nas mudanças no alinhamento ao campo magnético da Terra (p. ex. nas curvas), mudanças no diâmetro dos tubos e na espessura nominal das paredes.

As soldas circunferenciais, com suas propriedades magnéticas distintas, são excluída da análise, com o DFM limitado a 1 metro em ambos os lados de cada solda circunferencial filtrada.

3.2 COMPARAÇÃO ENTRE CONEXÕES HIDRÁULICAS

Na sequência, calculamos a DFM total média em cada conexão hidráulica e a comparamos à DFM total média do segmento de origem da tubulação. Se a disparidade exceder um patamar determinado empiricamente, levando em conta o diâmetro do tubo, a espessura das paredes e o pressão do fluxo no segmento (N-S vs. E-W), a conexão hidráulica é identificada como possível candidata à presença de anomalia por perda de metal, com uma profundidade acima de 30% da espessura nominal da parede.

3.3 CLASSIFICAÇÃO DA ASSINATURA

Os locais com suspeita de anomalias passam por uma avaliação, feita por um especialista no assunto, treinado para distinguir entre medições de DFM atribuíveis à perda de metal e daquelas associadas a atributos físicos da tubulação (p. ex. soldas circunferenciais, curvas e ânodos) ou ruído nos sensores. As medições de DFM associadas à perda de metal são anotadas como anomalias por perda de metal em uma lista de características. Além disso, um nível de confiança é atribuído a cada anomalia por perda de metal, determinado por fatores como a correspondência do sinal às assinaturas de perda de metal validadas, a proximidade às características da tubulação que possam distorcer a estrutura

magnética local e o nível de ruído nos sensores em torno do local. Esse nível de confiança fornece uma perspectiva quanto à confiabilidade de cada anomalia identificada, auxiliando nos processos decisórios subsequentes.

3.4 IMPLEMENTAÇÃO SUBSEQUENTE

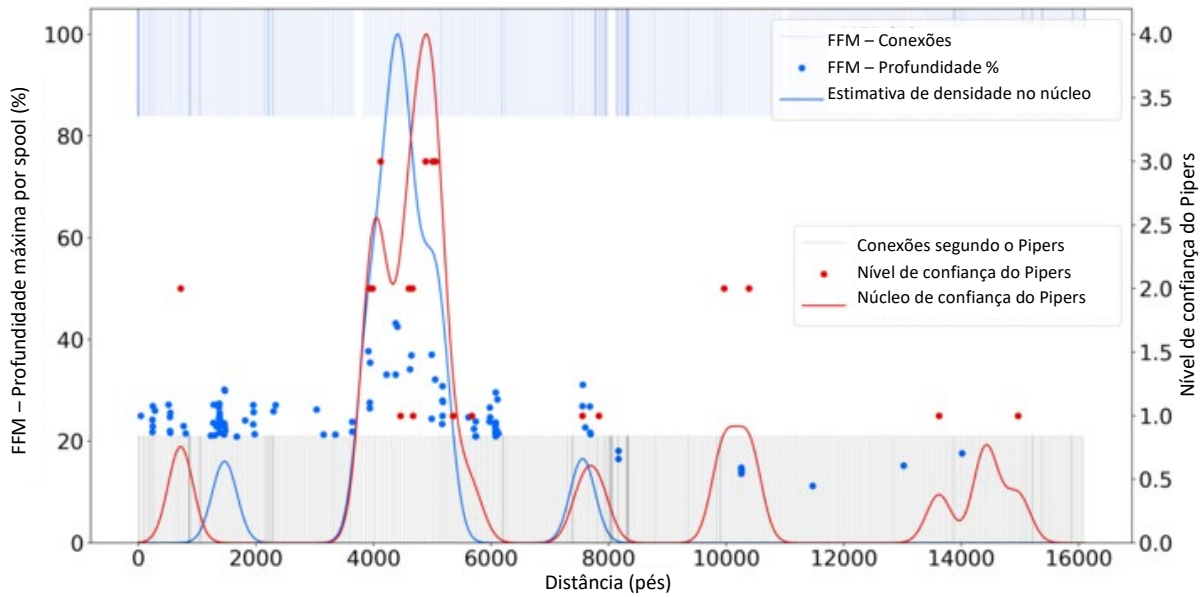
Devido à natureza altamente repetitiva das medições da DFM do Pipers® em uma tubulação (R. Ho 2021), as anomalias por perda de metal podem ser monitoradas nas implementações subsequentes. Por meio de uma comparação às implementações anteriores, a taxa de crescimento de uma característica de perda de metal pode ser estimada e as características de perda de metal com as maiores taxas de crescimento podem ser identificadas.

4 VALIDAÇÃO

A Figura 9 mostra a validação de uma análise de perda de metal no Pipers®, em comparação aos resultados da análise de perda de metal com características de perda de metal identificada em uma inspeção de FFM na mesma tubulação. O núcleo da densidade crítica para as características de perda de metal detectadas por FFM está ilustrado na cor azul, quantificado à esquerda do eixo y. Esse núcleo é calculado pela modelagem de cada característica de perda de metal com profundidade superior a 30% da espessura nominal da parede, conforme uma distribuição de Gauss em que a magnitude reflete a profundidade da perda de metal e a meia largura tem como base as incertezas das medidas das distâncias lineares do FFM e do Pipers® combinadas. A soma dessas distribuições Gauss formam a linha azul, com anomalias por perda de metal individuais do FFM marcadas por pontos azuis.

O núcleo de confiança para as características de perda de metal detectadas pelo Pipers® estão ilustradas na cor vermelha, com a respectiva magnitude indicada à direita do eixo y. O valor é calculado com a representação de cada característica de perda de metal do Pipers® como uma distribuição de Gauss, com a magnitude dimensionada conforme o nível de confiança da característica (baixo, médio ou alto, conforme a confiança de 1, 2 ou 3) e a meia largura determinada pelas incertezas das medidas das distâncias lineares do FFM e do Pipers® combinadas. A totalização dessas distribuições resulta na linha vermelha, com as anomalias por perda de metal individuais do Pipers® exibidas como marcadores vermelhos.

Figura 9: Validação da detecção da perda de metal utilizando a medida da densidade do fluxo magnético passivo.



A sobreposição entre os dois núcleos realça a capacidade do Pipers® de analisar a perda de metal, de forma a identificar com precisão o segmento da tubulação em condição mais precária, bem como diversos outros segmentos da tubulação que apresentem características de perda de metal. Esse método tem sido validado por outros clientes por meio de comparações às ferramentas tradicionais de inspeção em linha.

5 CONCLUSÕES

Este estudo apresenta uma nova abordagem à detecção da perda de metal em tubulações de aço, por meio da análise de densidade do fluxo magnético passivo (DFM), potencializando as propriedades ferromagnéticas do aço e os recursos da solução de inspeção em linha Pipers®, alimentada por aprendizagem de máquina. Detalhamos a fundamentação teórica da DFM passiva em tubulações de aço, incluindo os efeitos de campos magnéticos externos, a geometria não cilíndrica e a perda de metal no campo magnético, e proporcionamos uma visão geral abrangente da capacidade da tecnologia Pipers® de detectar perdas de metal significativas.

A validação da nossa estrutura analítica por meio de comparações de FFM e feedback de clientes destaca sua eficácia na identificação precisa de anomalias graves por perda de metal e a marcação de segmentos importantes da tubulação em condição precária.

Além disso, a versatilidade desta abordagem às inspeções se estende além da detecção de anomalias, oferecendo aplicações práticas à gestão de tubulações. Como uma ferramenta de inspeção em linha não convencional, permite uma avaliação da integridade das tubulações, com resolução suficiente para que se conheçam as condições das paredes da tubulação, pelo menos equivalente à dos ensaios hidrostáticos. Além disso, ela ajuda a identificar áreas críticas para uma inspeção localizada com alta resolução, orienta o processo decisório no planejamento de escavações conforme a avaliação das condições da tubulação, ajuda na implementação de programas de monitoramento da corrosão e permite uma triagem dos ativos das tubulações. Em termos globais, a integração da análise passiva do DFM às estratégias de manutenção de tubulações representa uma

promessa significativa de otimização da segurança e da conformidade, ao mesmo tempo otimizando também a alocação de recursos.

6 REFERÊNCIAS

Griffiths, David J. 2013. *Introduction to Electrodynamics*. Boston, MA: Pearson.

Kittel, Charles. 2005. *Introduction to Solid State Physics*. Hoboken, NJ: Wiley.

Matthew Kindree, Shannon Campbell, Anouk Van Pol, and John Van Pol. 2022. "Defect localization using free-floating unconventional ILI tools without AGMs." *Pipeline Pigging and Integrity Management*. Houston, TX.

Michael Byington, Anouk van Pol, John van Pol. 2022. "Neural Networks for Pipeline Joint Detection." *The Digital Pipeline Solutions Forum*. Houston.

R. Ho, Z. Shand, H.J. Son, and John van Pol. 2021. "Rapid Identification of New Hot Taps in Pipelines using Remnant Magnetism." *Pipeline Pigging and Integrity Management Conference*. Houston.

Schäfer, Alex Hubert and Rudolf. 1998. *Magnetic Domains: The Analysis of Magnetic Microstructures*. Berlin: Springer-Verlag.

William J. Hinze, Ralph R. B. von Frese, Afif H. Saad. 2013. *Gravity and Magnetic Exploration: Principles, Practices, and Applications*. Cambridge: Cambridge University Press.