



Congresso Internacional de
Corrosão, Integridade,
Pintura e Revestimentos
Anticorrosivos



Avaliação de corrosão em linhas de captação de água - Ensaios MMM e US-PA

Autores: Marcio Humberto Silva Siqueira
Vinícius Machado Mansur

Colaboradores: Alisson Zanuz / Andre da Silva Freitas / Franclim L. Masiero /
Júlio Endress Ramos / Marcos Aiub de Melo / Pedro Masato V. Oikawa / Ricardo S.
Sabino / Fabiana Dias Fonseca Martins

Áreas envolvidas

O estudo aqui apresentado faz parte de um trabalho que foi conduzido pelas seguintes áreas:

- Unidade de Negócio
- Gestão da Integridade de Ativos
- Centro de Pesquisas

Histórico

Falha nos revestimentos internos

Os sistemas de água salgada aerada tem apresentado falhas por corrosão. Essas falhas são atribuídas ao descolamento do revestimento interno de polietileno em linhas de aço carbono desse sistema.

A fim de **evitar vazamentos**, paradas não programadas, tem-se estudado técnicas de ensaios não destrutivos que permitam a detecção de áreas corroídas, que **subsidiem o planejamento de manutenção** desses sistemas.

Impacto das Falhas

A falha prematura destas tubulações tem impactos diretos:

- Vazamentos
- Perda de carga e obstruções em válvulas, filtros, etc.
- Paradas não programadas
- Lucro cessante
- Custo de reparo (bandagem): R\$ 50.000,00 a R\$ 200.000,00.
- Risco de potencial incidente.

Escopo

- O estudo aqui apresentado é focado na inspeção de juntas soldadas.
- Os trechos retos das tubulações foram inspecionados pelas técnicas de MEC e MFL e os resultados foram considerados satisfatórios.
- As juntas soldadas possuem diâmetros que variam de 10” a 18”, com espessura nominal de **6,5 mm**.

Ensaaios realizados



Estudos Preliminares

Inicialmente as seguintes técnicas de END foram avaliadas para a inspeção das linhas:

- Ultrassom *Phased Array* com sapatas *Water Wedge*
- Ultrassom ToFD
- Ultrassom convencional com incidência normal (acoplante de ondas transversais)
- Ultrassom *Phased Array* com incidência angular
- *Metal Magnetic Memory* (MMM)

Planejamento da inspeção

Modelo (padrão)

Curva de 14"

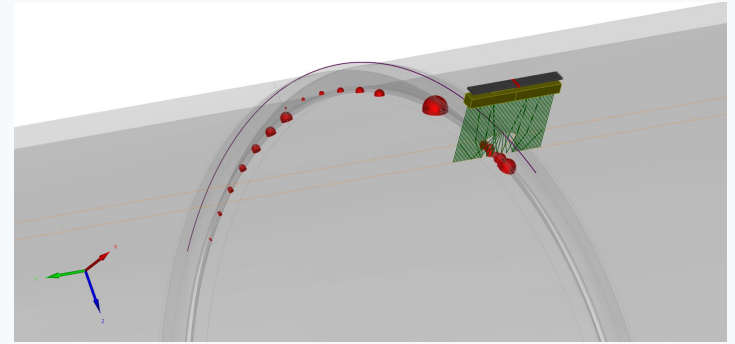
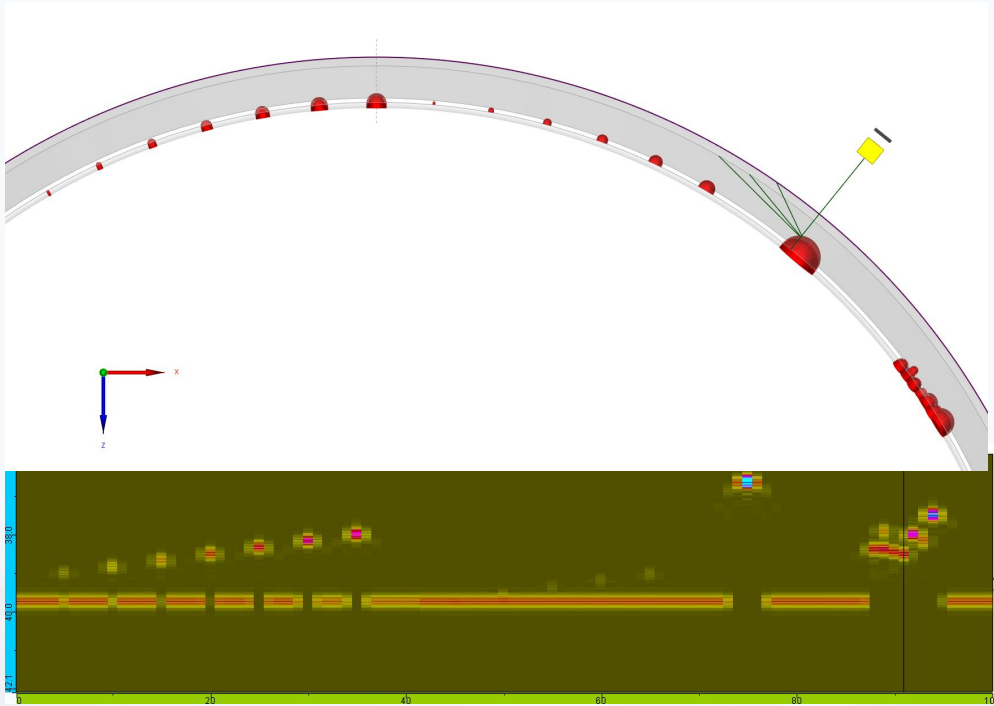


2023

ORIG



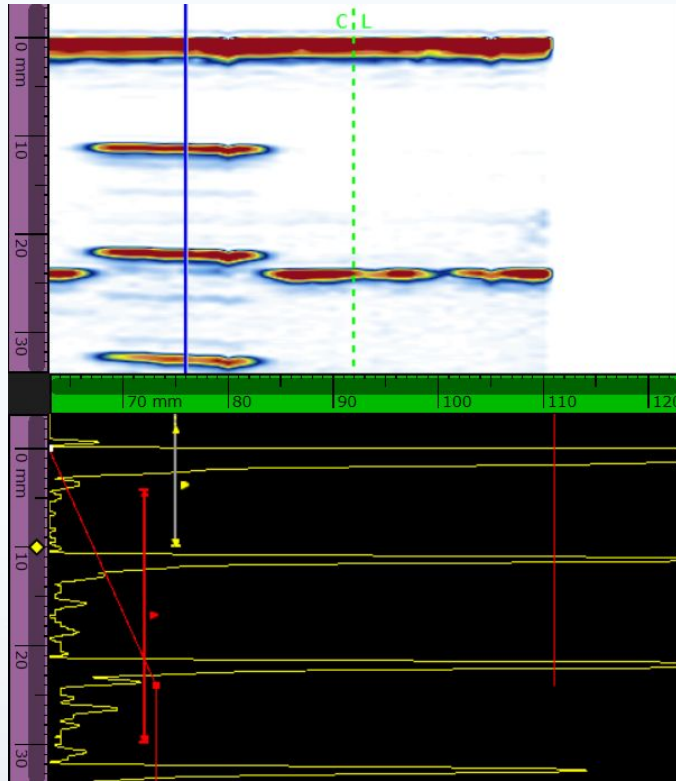
Ultrassom *Phased Array* com sapatas *Water Wedge*



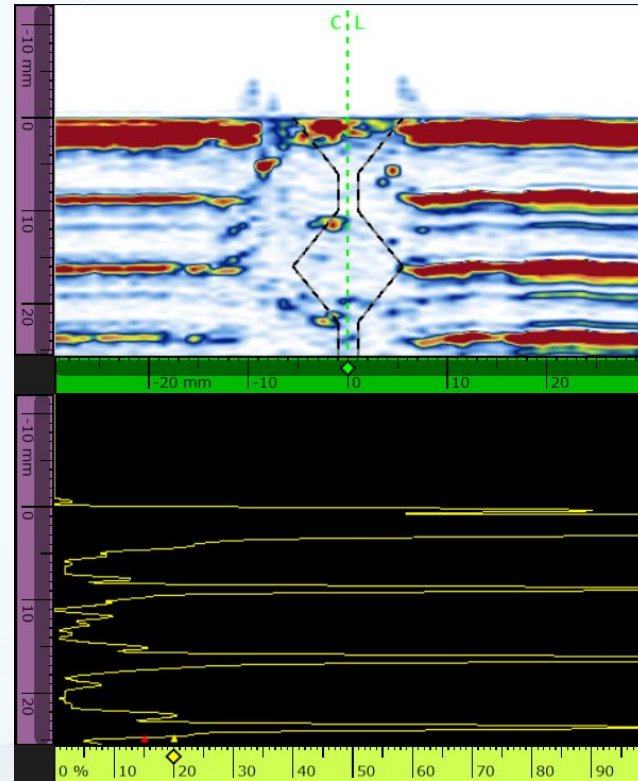
Ultrassom *Phased Array* com sapatas *Water Wedge*

- Resultados satisfatórios em superfícies planas
- Dificuldade de acoplamento em:
 - Reforço de solda > 2mm
 - Variação de geometria: curvas, flanges.

Ultrassom *Phased Array* com sapatas *Water Wedge*



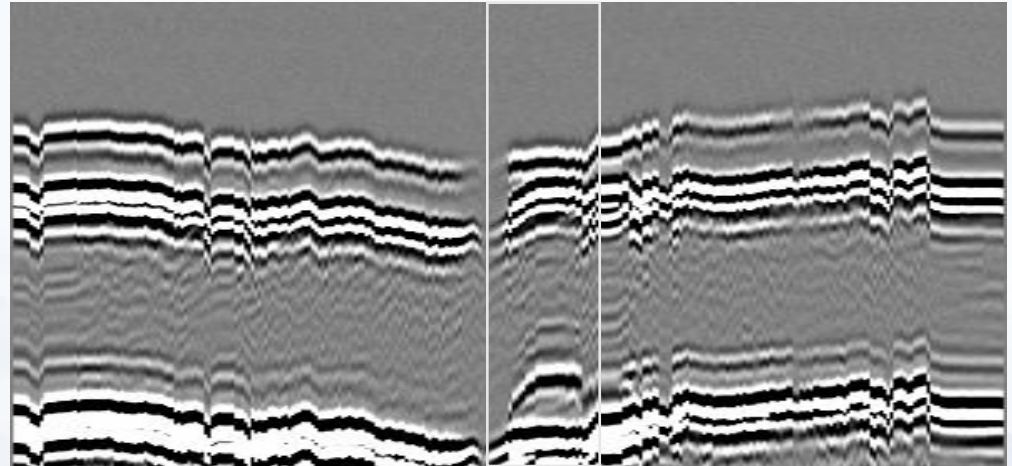
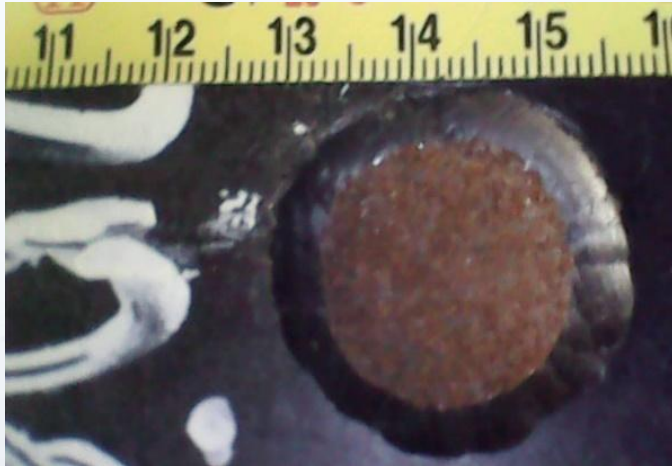
Superfície plana



Solda

Ultrassom *ToFD*

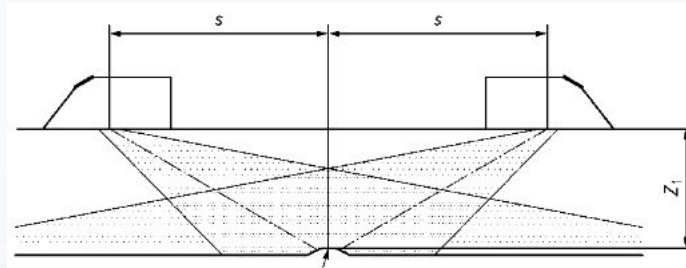
- Resultados preliminares ToFD
- Testes com transdutores de 60° e 70°



Ultrassom ToFD

Norma **EN 17290 - 2021** (*Non-destructive testing - Ultrasonic Testing - Examination for loss of thickness due to erosion and/or corrosion using TOFD Technique*)

Escopo: espessuras nominais $\geq 6\text{mm}$ (espessuras menores requerem testes de validação)



Ultrassom convencional com incidência normal (acoplante de ondas transversais)

- Sem remoção do reforço
- Acoplante de ondas transversais
- Resultados insatisfatórios
- Indisponibilidade de dispositivos de varredura personalizados

Ultrassom convencional com incidência normal (acoplante de ondas transversais)

- Sem remoção do reforço
- Acoplante de ondas transversais
- Resultados insatisfatórios
- Indisponibilidade de dispositivos de varredura personalizados

Ultrassom *Phased Array* com incidência angular

As inspeções, principalmente no caso do ultrassom, são fortemente afetadas pelas seguintes restrições:

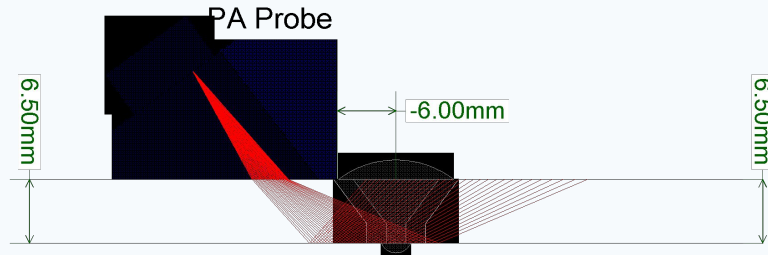
- A configuração das juntas soldadas, apresentando em sua maioria curvas e flanges.
- A variedade de morfologia das descontinuidades decorrentes de corrosão dificulta a previsibilidade da resposta do ensaio ultrassônico, que notoriamente apresenta melhor detectabilidade para defeitos planares.
- A presença de tinta na superfície pode ser um complicador para a inspeção, por atenuar o feixe sônico.
- Restrições de acesso (interferências com outras estruturas - *clearance*), impossibilitando por muitas vezes o posicionamento adequado para a varredura da junta soldada.

Ultrassom *Phased Array* com incidência angular

- A geometria das juntas soldadas, com baixas espessuras e cordões de solda largos, dificulta a cobertura da área de interesse da junta soldada, principalmente por incidência direta.
- Necessidade de mínima preparação da superfície (sem remoção de pintura)
- Tempo de inspeção relativamente longo (~ 20 minutos para os dois lado da solda para cada cabeçote)
- Dificuldade de varredura com dispositivo de posição (*encoder*)
- Dificuldade de avaliação quantitativa dos resultados

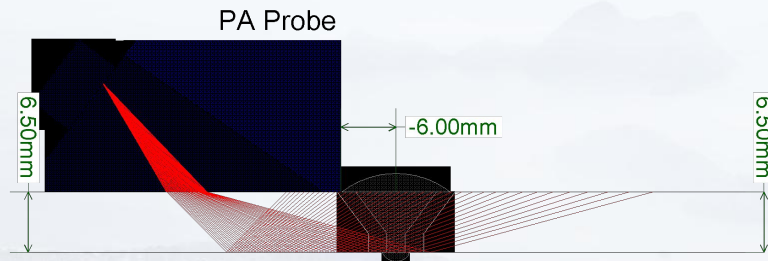
Ultrassom *Phased Array* com incidência angular

Configuração PA-01



Transdutor 5L16-A10; Sapata SA10-N55S. Varredura Setorial 42°-67°. Nº elementos: 08; Primeiro elemento: 09.

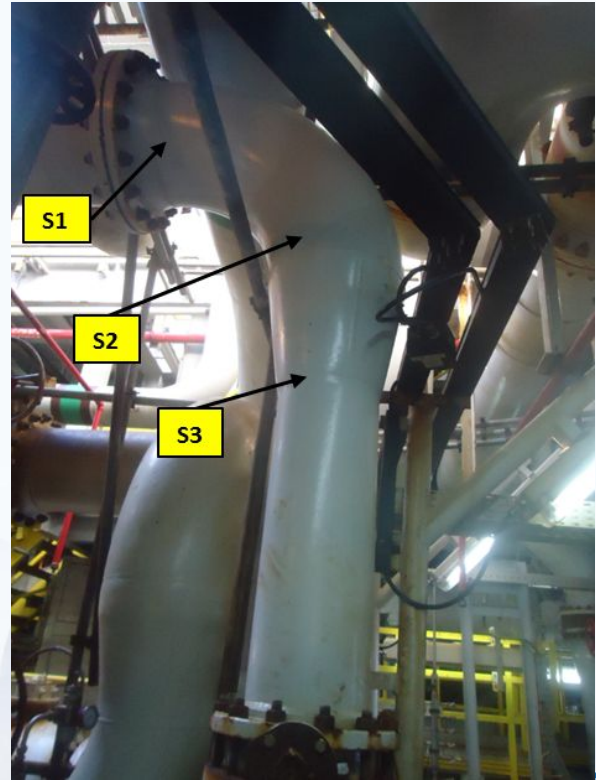
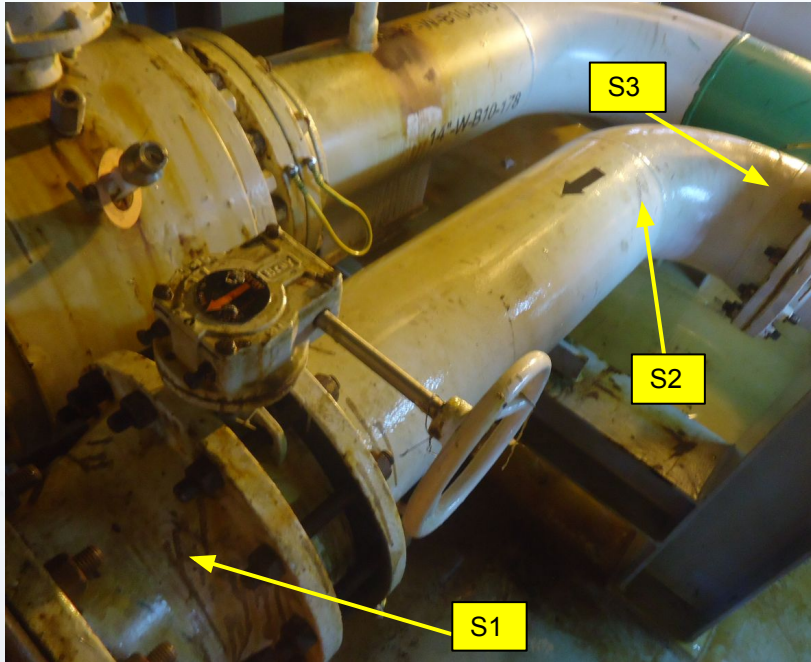
Configuração PA-02



Configuração PA-02. Transdutor 7.5CCEV35-16-A15; Sapata SA15-N60S. Varredura Setorial 45°-75°. Nº elementos: 08; Primeiro elemento: 09.

Dificuldade de ensaio

Geometrias complexas e áreas restritas



MMM (*Metal Magnetic Memory*)

- O ensaio de MMM (do inglês “*Metal Magnetic Memory*”) é um ensaio eletromagnético baseado na variação local de magnetismo devido a Zonas de Concentração de Tensão (ZCT), do inglês SCZ (*Stress Concentration Zones*). Descontinuidades decorrentes dos mecanismos de corrosão, fadiga, fluência, dentre outros são desenvolvidas mais intensivamente nestas zonas.
- Este ensaio deve ser considerado como uma técnica de triagem (“*screening*”), fornecendo resultados qualitativos que devem ser investigados posteriormente.

MMM (*Metal Magnetic Memory*)

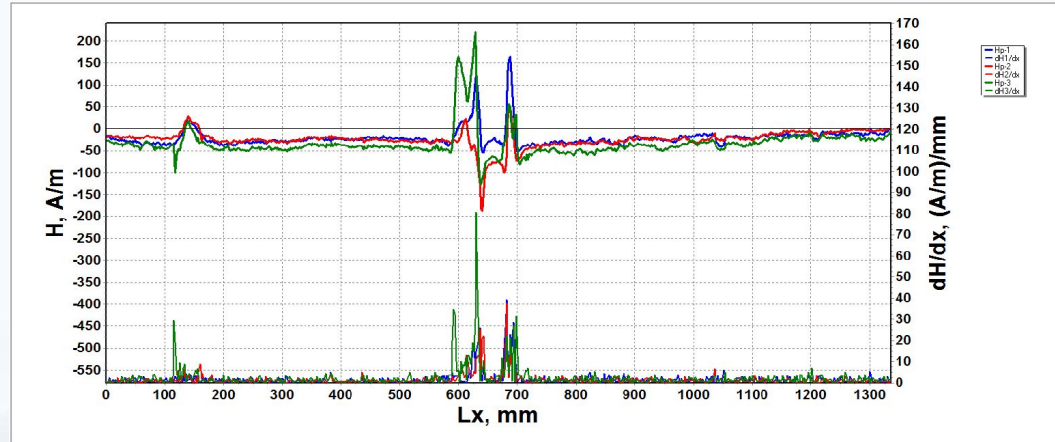
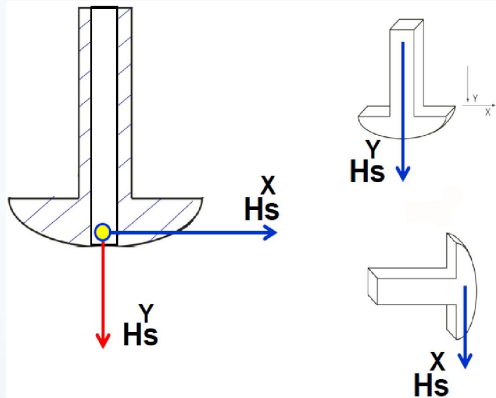
Os resultados são comumente avaliados a partir da análise dos seguintes parâmetros:

- Componentes normal e tangencial da intensidade da fuga de campo magnético H_s (A/m);
- Gradiente das componentes do campo magnético dH_s/dx (A/m²).

MMM (*Metal Magnetic Memory*)



MMM (Metal Magnetic Memory)



MMM (*Metal Magnetic Memory*)

Instrução Técnica MMM 01 - Rev.1

Instrução Técnica MMM 01 - Rev.0

Elaborado por: Fabiana Dias Fonseca Martins - 28/09/2020

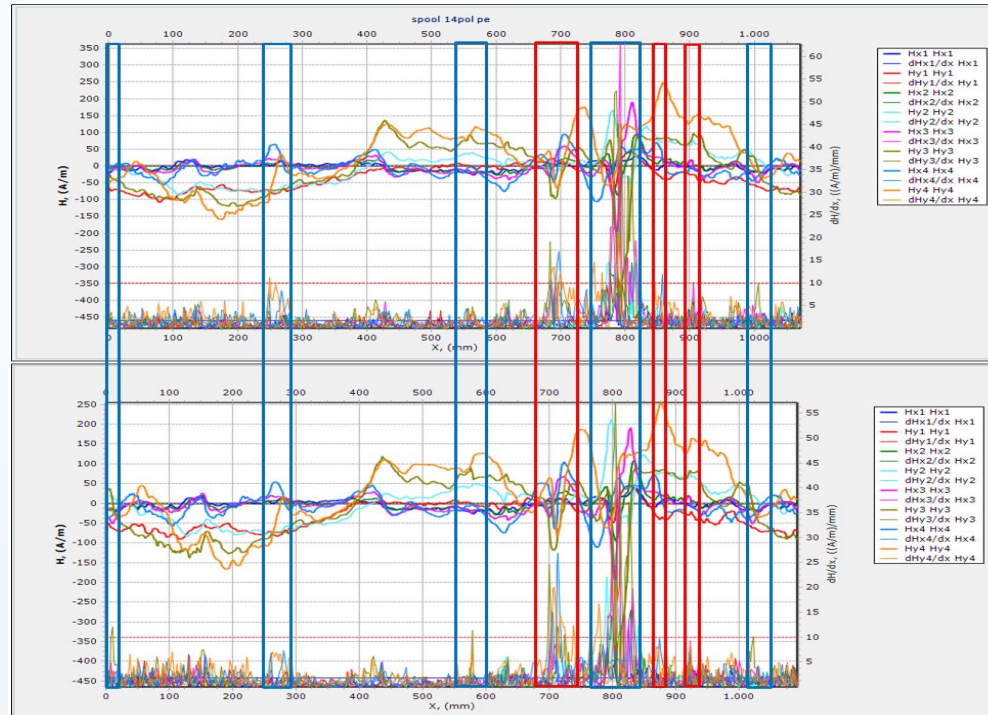
Técnica de inspeção Memória Magnética do Metal para detecção de corrosões internas em soldas de tubulações

1. Objetivo

Detectar corrosões internas em soldas circunferenciais de tubulações em material de aço carbono revestido internamente com polietileno, através de técnica qualitativa de alta velocidade de varredura – MMM – para definir pontos críticos a serem inspecionados de forma complementar por técnicas quantitativas como ultrassom e radiografia. Além de corrosões, a técnica MMM também detectará discontinuidades provenientes de soldas, como falta de fusão, trincas, falta de penetração e penetração excessiva, motivo pelo qual há a necessidade de técnica complementar para investigação da natureza da indicação.

MMM (Metal Magnetic Memory)

Resultados preliminares



MMM (*Metal Magnetic Memory*)

- Velocidade alta de varredura (> 20mm/s)
- Sem necessidade de acoplante (acoplamento magnético)
- Não há necessidade de remoção da pintura
- Não há necessidade de magnetização do material, pois se trata de um ensaio passivo
- Alta reprodutibilidade (“assinatura digital”)
- Dispositivo de varredura de tamanho reduzido, que permite maior versatilidade na varredura de geometrias complexas e espaços reduzidos (“*clearance*”)

MMM (*Metal Magnetic Memory*)

- Pouca experiência na técnica
- Muito susceptível a interferências externas
- Análise qualitativa dos resultados
- Critérios para avaliação dos resultados diferentes dos ensaios tradicionais

MMM (*Metal Magnetic Memory*)

O ensaio MMM se encontra normalizado pelos seguintes documentos:

- ISO 24497-1:2020 Non-Destructive testing - Metal magnetic memory - Part 1: Vocabulary and general requirements.
- ISO 24497-2:2020 Non-Destructive testing - Metal magnetic memory - Part 2: Inspection of welded joints.
- ISO 24497-3:2020 Non-Destructive testing - Metal magnetic memory - Part 3: Inspection of welded joints.

Ensaaios selecionados

Após os testes preliminares, optou-se pelos seguintes ensaios:

- Ultrassom *Phased Array* com sapatas *Water Wedge*
- Ultrassom ToFD
- Ultrassom convencional com incidência normal (acoplante de ondas transversais)
- Ultrassom *Phased Array* com incidência angular
- *Metal Magnetci Memory* (MMM)

Resultados



Critérios p. avaliação qualitativa dos resultados

Os resultados foram classificados segundo o nível de indicações e codificados por cores:

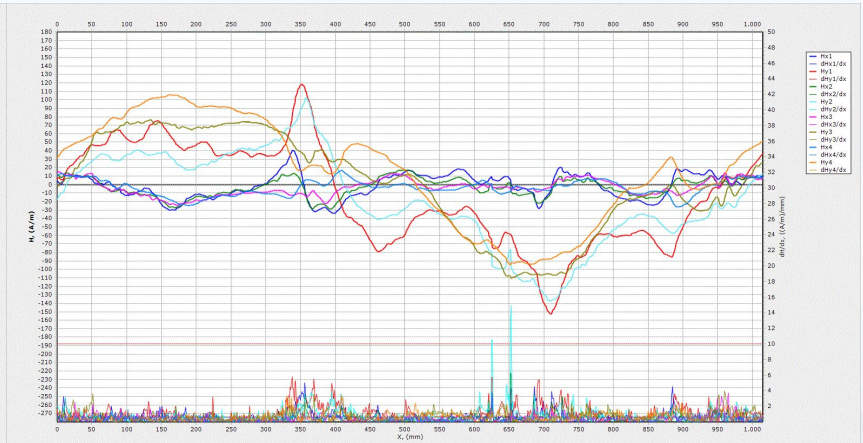
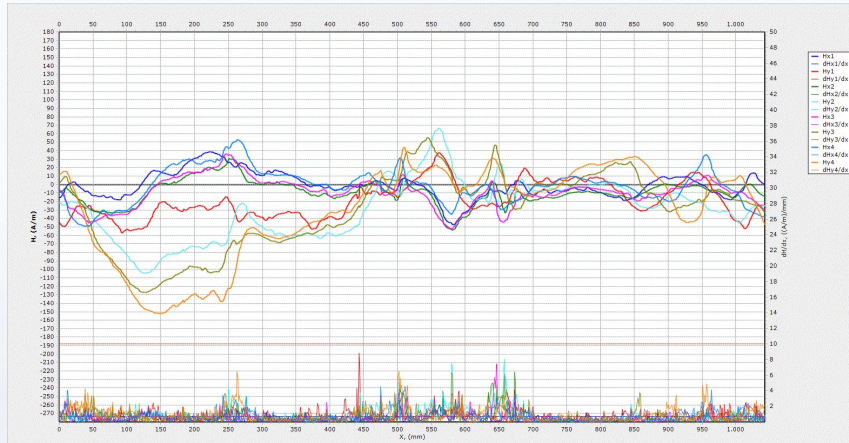
Nível de indicações	MMM	Ultrassom <i>Phased Array</i>
Baixo	<ul style="list-style-type: none">Sinais de MMM dHx/dx não ultrapassam o limiar de 10 (A/m)/mm.Um ou dois sinais de canais isolados ultrapassam o limiar.	Sem indicações na região de interesse.
Médio	<ul style="list-style-type: none">Pelo menos três sinais dHx/dx de canais individuais ultrapassam o limiar.Pelo menos duas regiões de sinais com mais de um canal ultrapassam o limiar.	Regiões com indicações isoladas na área de interesse.
Alto	<ul style="list-style-type: none">Pelo menos três regiões com indicações dHx/dx com vários canais ultrapassando o limiar;Uma região com todos os canais ultrapassando o limiar.	Várias regiões com indicações na área de interesse.

Nível baixo de indicações (MMM)

Baixo

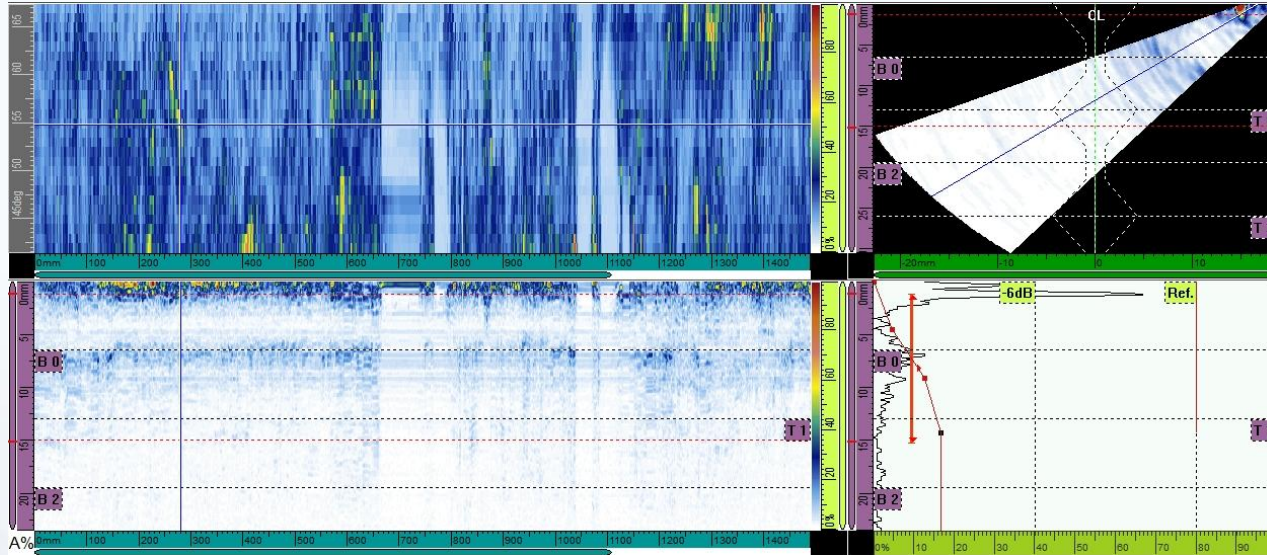
- Sinais de MMM dHx/dx não ultrapassam o limiar de 10 (A/m)/mm.
- Um ou dois sinais de canais isolados ultrapassam o limiar.

Sem indicações na região de interesse.



Nível baixo de indicações (Ultrassom *Phased Array*)

Baixo	<ul style="list-style-type: none">• Sinais de MMM dH_x/dx não ultrapassam o limiar de 10 (A/m)/mm.• Um ou dois sinais de canais isolados ultrapassam o limiar.	Sem indicações na região de interesse.
--------------	--	--

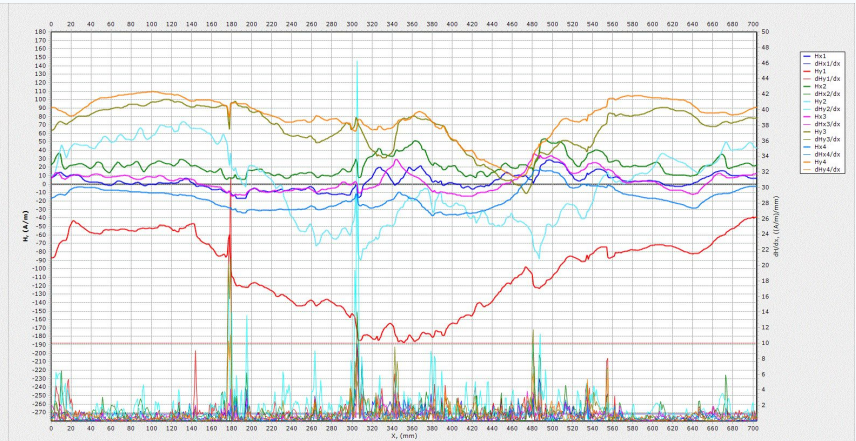
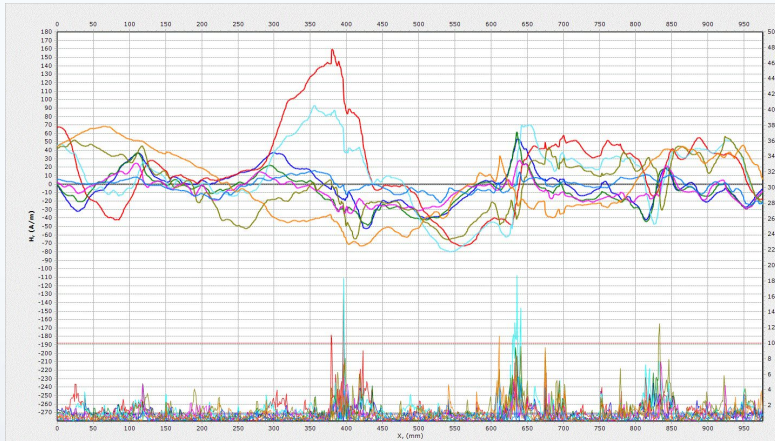


Nível médio de indicações (MMM)

Médio

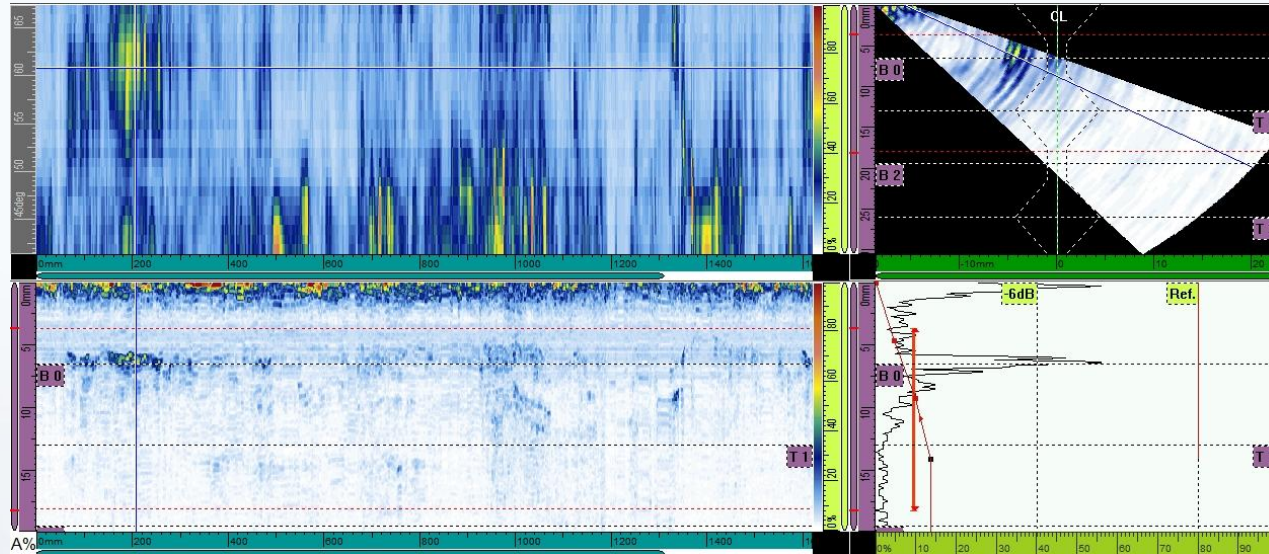
- Pelo menos três sinais dHx/dx de canais individuais ultrapassam o limiar.
- Pelo menos duas regiões de sinais com mais de um canal ultrapassam o limiar.

Regiões com indicações isoladas na área de interesse.



Nível médio de indicações (Ultrassom *Phased Array*)

Médio	<ul style="list-style-type: none">• Pelo menos três sinais dHx/dx de canais individuais ultrapassam o limiar.• Pelo menos duas regiões de sinais com mais de um canal ultrapassam o limiar.	Regiões com indicações isoladas na área de interesse.
--------------	--	---

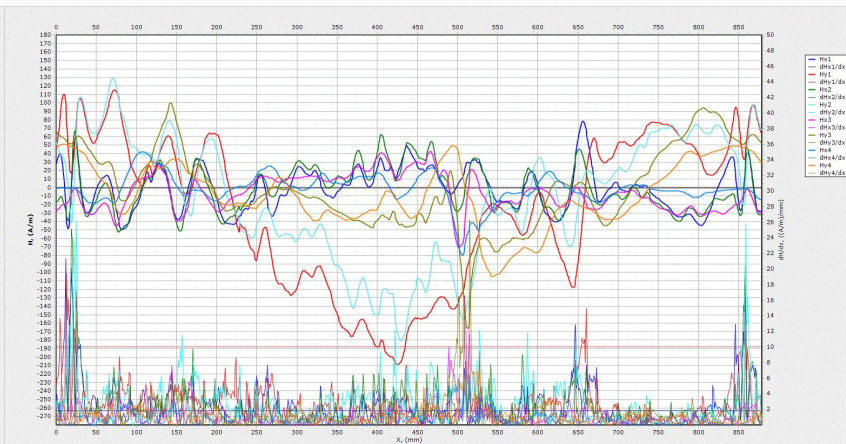
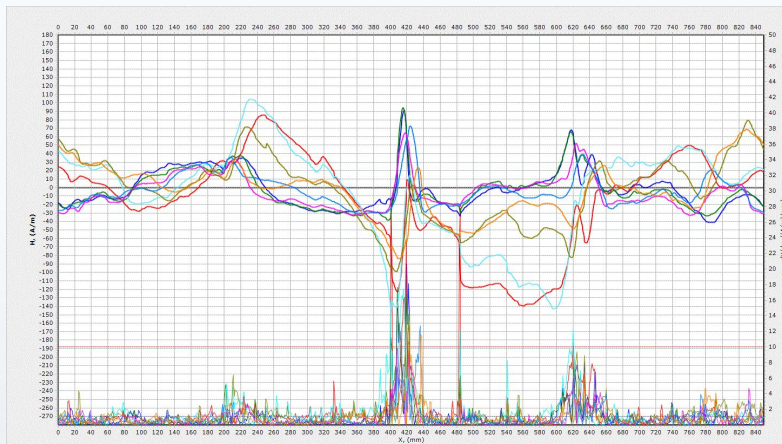


Nível alto de indicações (MMM)

Alto

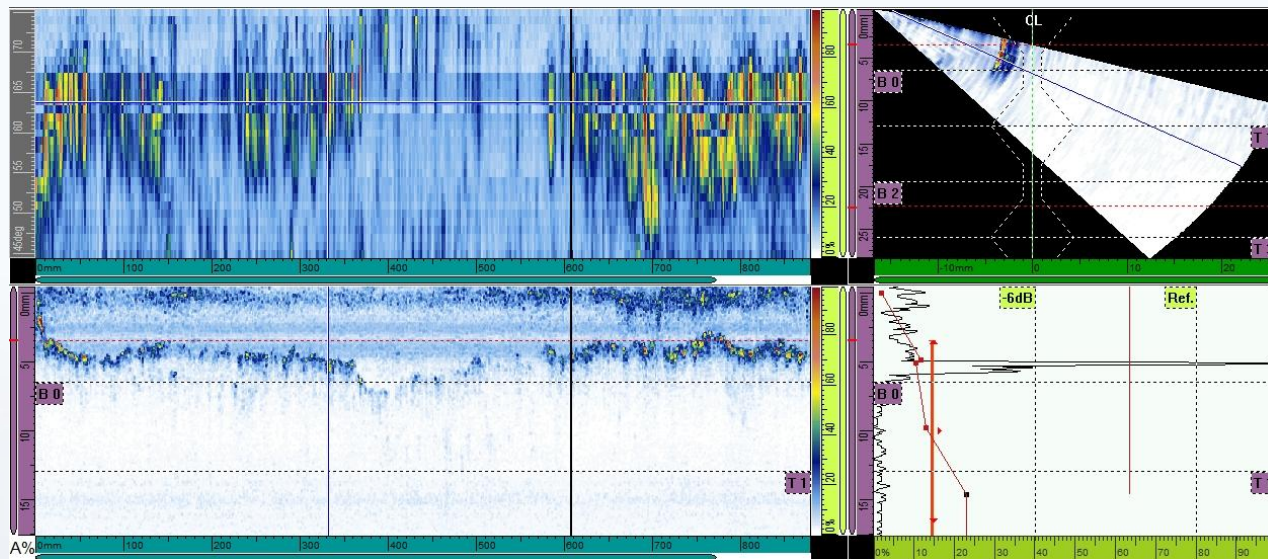
- Pelo menos três regiões com indicações dHx/dx com vários canais ultrapassando o limiar;
- Uma região com todos os canais ultrapassando o limiar.

Várias regiões com indicações na área de interesse.



Nível alto de indicações (Ultrassom *Phased Array*)

Alto	<ul style="list-style-type: none">• Pelo menos três regiões com indicações dHx/dx com vários canais ultrapassando o limiar;• Uma região com todos os canais ultrapassando o limiar.	Várias regiões com indicações na área de interesse.
-------------	---	---



Mesmo nível da indicações

- Das 56 juntas inspecionadas pelas 03 configurações de ensaio, 31 (ou ~55%) das juntas inspecionadas apresentaram o mesmo nível de indicações:

M-00	1251.1	Entrada do P-5124003	12"-IW-B14-027-S2	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(21)
M-00	1251.1	Entrada do P-5124003	12"-IW-B14-027-S4	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	
5111.1	M-00	Saída do FT-5111001D	18"-SW-B14-045-S2	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(08)
5111.1	M-00	Saída do P-5124002A	14"SW-B14-009-S3	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	
1251.1	M-00	By-pass das LV-1251001A/B	10"-IW-B14-025-S1	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(02)
1251.1	M-00	By-pass das LV-1251001A/B	10"-IW-B14-025-S4	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	

Mesmo nível da indicações

- Em mais 08 juntas o MMM apresentou o mesmo nível de indicações que uma das configurações do *Phased Array*:

5111.1	M-00	Descarga da B-5111001A	18"SW-B14-051-S3	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(04)
5111.1	M-00	Descarga da B-5111001B	18"SW-B14-053-S1	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(04)
1251.1	M-00	Jusante da LV-1251001B	10"-IW-B14-025-S1	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(03)
1251.1	M-00	By-pass das LV-1251001A/B	10"-IW-B14-025-S3	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(01)

Nível da indicações distintos

- 17 juntas apresentaram níveis distintos de indicações (30%) entre o ensaio MMM e o ensaio de ultrassom, sendo que em nenhum desses casos o MMM com nível baixo de indicações e as duas configurações de ultrassom com nível alto de indicações, e vice-versa. Em 08 casos o MMM foi mais conservador (incluindo a situação em que os resultados foram distintos para as três configurações) e em 09 casos o *Phased Array* foi mais conservador:

M-00	1251.1	Entrada do P-5124003	12"-IW-B14-027-S3	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(09)
1251.1	M-00	Montante da LV-1251001B	10"-IW-B14-025-S6	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(03)
1251.1	M-00	By-pass das LV-1251001A/B	10"-IW-B14-025-S2	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(04)

- 01 junta (dentre as 17) apresentou nível de indicação diferentes para as 03 configurações analisadas:

5111.1	M-00	Saída do FT-5111001A	18"-SW-B14-035-S1	MMM	Ultrassom PA 5L16-A10 SA10-N55S	Ultrassom PA 7.5CCEV35-16-A15 SA15-N60S	(01)
--------	------	----------------------	-------------------	-----	---------------------------------------	---	------

Visão geral comparativa

- MMM e US-PA - Mesmo nível de indicações
- MMM menor nível de indicações que US-PA
- Resultados distintos p/ 03 técnicas
- MMM mesmo nível c/ pelo menos um US-PA
- MMM maior nível de indicações que US-PA



Resultados distintos p/ 03 técnicas

2023

Nível da indicações - *Phased Array*

- Os ensaios de ultrassom *Phased Array* apresentaram o mesmo nível de indicações entre eles em 47 das 56 juntas, ou seja 84%.
- 09 juntas apresentaram resultados distintos entre as varreduras de ultrassom *Phased Array*, contudo sem que um apresentasse baixo nível e outro alto nível de indicações, e vice-versa; A configuração PA-01 apresentou maior nível de indicações que a configuração PA-02 em 04 situações, e o oposto ocorreu também em 05 situações.

Visão geral comparativa - Ultrassom *Phased Array*

■ US-PA01 e US-PA02 - Mesmo nível de indicações ■ PA-01 maior nível que PA-02 ■ PA-02 maior nível que PA-01



Visão geral comparativa - Ultrassom Phased Array

■ US-PA01 e US-PA02 - Mesmo nível de indicações ■ PA-01 maior nível que PA-02 ■ PA-02 maior nível que PA-01



Resultados *versus* Recomendações RTI

- Em avaliação por linhas, não foi possível ainda correlacionar os resultados com as recomendações de inspeção.
- Aprofundar a avaliação por cada solda individualmente
- O caráter aleatório das falhas dentro de uma linha e a dinâmicas das falhas dificultam esta análise.

Conclusões



Conclusões

- Foi possível observar diferenças entre as imagens das juntas soldadas e agrupá-las de maneira qualitativa entre nível baixo, médio e alto de indicações. De uma maneira geral, as técnicas MMM e *Phased Array* apresentaram boa correlação nos resultados.
- Os resultados obtidos são qualitativos, não permitindo prever espessura remanescente e, conseqüentemente, a vida útil das linhas. Entretanto, as informações obtidas podem ser úteis na priorização de acompanhamento e substituição das linhas.
- É importante acompanhar o comportamento futuro das linhas inspecionadas, relacionando eventuais falhas com os resultados apontados neste relatório, com o objetivo de validar as técnicas empregadas para esta situação.
- Novas metodologias de inspeção e análises de resultados podem ser empregadas futuramente, em função de novos desenvolvimentos nas técnicas utilizadas.

Recomendações / Sugestões



Recomendações / Sugestões

- Separação de juntas soldadas que forem substituídas para confecção de modelos (mockups) - em andamento.
- Possibilidade de desenvolvimento de sistemas de monitoramento de integridade (SHM - *Structural Health Monitoring*) com a técnica de MMM, pois a repetitividade das varreduras de uma mesma junta soldada indicam que o resultado possui “uma assinatura digital”.
- Uso de algoritmos de reconhecimento de padrões (AI/ML) não supervisionados (sem exemplos) para classificação dos resultados em agrupamentos.
- A partir da confecção de um banco de dados de gabarito, uso de algoritmos supervisionados de reconhecimento de padrões para classificação dos resultados dos ensaios e estudos dos parâmetros mais relevantes.

Sugestões p/ controle do processo corrosivo

- Uso de FBE (Fusion Bonded Epoxi), revestimento em pó epóxi de fusão, como alternativa ao Polietileno.
- Substituição do aço carbono por aço duplex.

Agradecimento a todos os envolvidos!

Obrigado pela atenção!

Contatos

Marcio Humberto Silva Siqueira
mhssiqueira@petrobras.com.br

Vinícius Machado Mansur
vmmansur@petrobras.com.br