

Melhoria de medição de espessura submarina por ultrassom via ROV

Improvement of subsea ultrasonic thickness measurement by ROV

João Paulo Urbano 

Petrobras, Macaé - Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: jpurbano@petrobras.com.br

Gustavo Pinto Pires 

Petrobras, Rio de Janeiro - Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: gustavopires@petrobras.com.br

Milton dos Santos 

Petrobras, São José dos Campos - São Paulo, Brasil. E-mail: milsjr@petrobras.com.br

Samuell Costa de Souza 

Petrobras, Macaé - Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: samuell.costa@petrobras.com.br

Romario de Carvalho

Nunes 

Petrobras, Macaé - Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: romario.carvalho@petrobras.com.br

Palavras-chave:

Espessura.
Inspeção.
Ensaios.
Ultrassom.
Transdutor.

Keywords:

Thickness.
Inspection.
Transducer.
Thickness.
ROV.

Recebido:

19 de dezembro de 2024

Aceito para publicação:

27 de janeiro de 2025

Publicado:

26 de fevereiro de 2025

<https://doi.org/10.70369/0ssh1088>



RESUMO

A medição de espessura tem papel crucial na gestão de dutos e equipamentos submarinos, verificando o status de integridade deles. Os valores obtidos nas medições impactam nos futuros gastos e rendimentos da empresa, na geração de valor e em SMS. Este trabalho apresenta conceitos da medição de espessura por ultrassom através de ROV, o estudo que foi realizado para aprimorá-la, quais as melhorias aplicadas, os resultados obtidos pela Petrobras e os próximos passos. O estudo envolveu análise de técnicas de ultrassom e relatórios de serviços, testes submersos offshore e onshore em laboratórios, definição de capacidade profissional para os colaboradores a realizarem as inspeções e reuniões com fabricantes, especialistas de ultrassom, empresas contratadas pela Petrobras e ABENDI. Dentre as melhorias aplicadas, citam-se: requerimento de profissional certificado para os serviços; adição de novas técnicas ultrassônicas e gráfico A-scan; adequação da marinização; aplicação de novo adaptador de manuseio à ferramenta; aprimoramento de relatórios de serviços; ampliação das aferições das ferramentas; elaboração de padrão Petrobras específico para esse tipo de inspeção; desenvolvimento de patentes. Como resultados, houve redução dos tempos dos serviços e das paradas operacionais por falhas técnicas e aumento do tempo produtivo. Adicionalmente, gerou-se economia financeira e maior qualidade e confiabilidade das inspeções e ganhos em SMS. Consequentemente, este trabalho trouxe soluções, conhecimentos e perspectivas às práticas desse segmento para a indústria de energia.

ABSTRACT

Thickness measurement plays a crucial role in the management of pipelines and subsea equipment, checking their integrity status. The values obtained in the measurements impact the company's future expenses and income, value generation and SMS. This work presents concepts of thickness measurement by ultrasound using ROV, the study that was carried out to improve it, what improvements were applied, the results obtained by Petrobras and the next steps. The study involved analysis of ultrasound techniques and service reports, offshore and onshore submerged tests in laboratories, definition of professional capacity for employees to carry out inspections and meetings with manufacturers, ultrasound specialists, companies contracted by Petrobras and ABENDI. Among the improvements applied are: requirement for a certified professional for services; addition of new ultrasonic techniques and A-scan chart; adequacy of marination; applying a new handling adapter to the tool; improvement of service reports; expansion of tool measurements; preparation of a specific Petrobras standard for this type of inspection; patent development. As a result, there was a reduction in service times and operational stops due to technical failures and an increase in production time. Additionally, financial savings and greater quality and reliability of inspections and gains in HSE were generated. Consequently, this work brought solutions, knowledge and perspectives to the practices of this segment for the energy industry.

1. INTRODUÇÃO

A medição de espessura desempenha um papel crucial na gestão de dutos e equipamentos submarinos, verificando o status de integridade deles, visto que o desempenho eficaz de uma estrutura é, em muitos casos, limitado pela sua corrosão. A alta complexidade das operações e riscos envolvidos no setor petrolífero promovem ainda mais a sua importância, em especial para o QHSE (Quality, Health, Safety, and Environment). Com os resultados da aplicação desta técnica, decisões são tomadas em relação à continuidade operacional da estrutura, como, eventual limitação de seu funcionamento ou até mesmo a sua substituição. Assim, os valores obtidos nas medições impactam nos futuros gastos e rendimentos da empresa e na sua geração de valor.

O cenário de corrosão das estruturas submarinas analisadas pode variar drasticamente, dependendo de diversos fatores como, por exemplo, temperatura, pressão e velocidade do fluido escoado, material de construção da estrutura submarina e, entre as principais, o tempo operacional. Na Figura 1 temos tubulações metálicas rígidas corroídas internamente.

Figura 1. Amostras de tubulações rígidas corroídas internamente.



Fonte: elaborado pelos autores.

A maioria das estruturas metálicas submarinas tem prevista a medição de espessura nos seus planos de inspeção. O ultrassom é a técnica mais utilizada pela indústria para isso. Essa técnica foi aprimorada pela Petrobras de forma disruptiva nos últimos anos, gerando maior qualidade, economia e segurança de processos. O presente artigo tem o objetivo de abordar conceitos de medição de espessura por ultrassom através de ROV (Remotely Operated Vehicles), o estudo que foi realizado pela Petrobras para aprimorá-la, quais as melhorias aplicadas, os resultados e as conquistas obtidas e os próximos passos.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem o objetivo de abordar conceitos de medição de espessura por ultrassom através de ROV, o estudo que foi realizado pela Petrobras para aprimorá-la, quais as melhorias aplicadas, os resultados e conquistas obtidas pela Petrobras e os próximos passos.

3. TÉCNICAS DE ULTRASSOM PARA MEDIÇÃO DE ESPESSURA

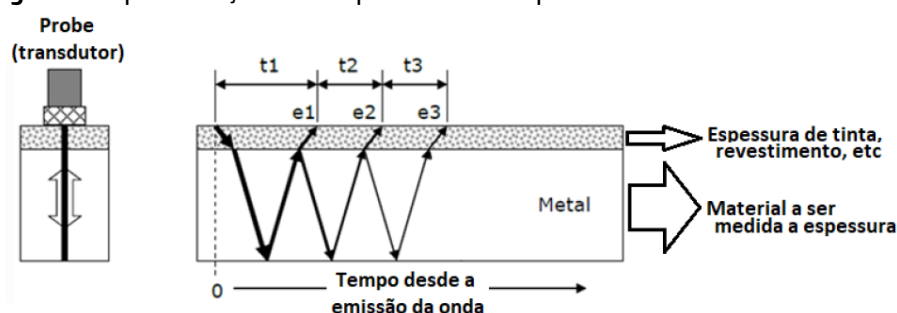
Os sons produzidos refletem ou reverberam nas paredes do meio em que estão contidos, podendo ainda ser transmitidos a outros meios adjacentes. Por Martin (2012), este fenômeno físico constitui o fundamento da medição de espessura no método de ultrassom. No ensaio por ultrassom uma onda mecânica é emitida por um transdutor (cabecote) sobre o material cuja espessura deseja-se medir.

A onda, ao chegar à superfície oposta do material, é parcialmente refletida de volta e, ao encontrar o transdutor novamente, é lida (reconvertida em sinal elétrico) e interpretada pelo aparelho. Sabendo o tipo de material a ser medido e o tempo de propagação entre a onda emitida e a recebida de volta pelo transdutor, é possível inferir a espessura da superfície, conforme detalhado por Rose (2004). A onda mecânica ao retornar para o transdutor é parcialmente refletida e segue novamente para atravessar o material. Assim, esse pulso ultrassônico propaga-se pela espessura do material diversas vezes através de reflexões sucessivas e, com o tempo, vai perdendo sua energia, já que parte da onda também é refratada e absorvida. O primeiro trecho de onda mecânica que retorna ao transdutor (e é transformado em sinal elétrico) é chamado de primeiro eco, o segundo, de segundo eco, e assim por diante.

Explicado por Brook (2012), todo aparelho de medição de espessura por ultrassom registra dois parâmetros fundamentais de um eco: sua amplitude (relacionada à energia) e o tempo de propagação no material até o retorno ao transdutor. O tempo é comumente transformado em unidade de distância baseada no conhecimento da velocidade de propagação da onda no meio em questão. Existem basicamente três técnicas de medição de espessura aplicadas pelas ferramentas ultrassônicas, são elas explicadas abaixo e ilustradas na Figura 2:

- Single-echo: utiliza somente o primeiro eco (e1 da Figura 2). Multiplicando-se a velocidade do som no material (conhecida a priori ou medida na calibração) pelo tempo de retorno desse primeiro eco (t1 na figura abaixo) se obtém a espessura. Caso o material tenha alguma camada de revestimento, ela será computada no resultado final;
- Echo-echo: utiliza o primeiro (e1) e o segundo (e2) ecos. Obtém-se a espessura através da multiplicação da velocidade do som no material pelo intervalo de tempo entre o momento de chegada do primeiro e do segundo ecos. Caso o material tenha uma pequena camada de revestimento, ela poderá ser descontada do resultado final;
- Multi-echo: utiliza o primeiro (e1), segundo (e2) e terceiro (e3) ecos. Realiza o mesmo cálculo que a técnica echo-echo, e adicionalmente, aplica essa mesma metodologia com o intervalo entre o segundo e o terceiro ecos. Caso esses dois valores obtidos sejam iguais (dentro de uma pequena tolerância), a medição é considerada confiável e o valor é informado como a espessura medida.

Figura 2. Representação do comportamento do pulso sonoro em um material.



Fonte: manual da ferramenta cygnus ROV a-scan.

Durante a medição, quanto maior a corrosão na superfície interna do material (considerando que não seja corrosão uniforme), mais as ondas mecânicas irão se espalhar à cada reflexão, conforme delineado por Olympus (2007). Assim, sucessivamente os ecos ao chegarem ao transdutor ficarão com menos

energia, se tornando mais difíceis de serem lidos pelo transdutor. Como consequência, as técnicas que utilizam mais ecos para a indicação da espessura podem se tornar inviáveis e não indicarem a espessura ou, pior, indicarem um valor errado. É o caso principalmente da técnica multi-echo, por utilizar os três primeiros ecos.

4. ESTUDOS E MELHORIAS IMPLANTADAS

Em função da importância da medição de espessura por ultrassom através de ROV, foi realizado um amplo e detalhado estudo para aprimoramento dela. O estudo foi desenvolvido envolvendo diversas frentes. Foi realizado um levantamento dos certificados e características dos medidores de espessura utilizados correntemente pelas embarcações da Petrobras de manutenção e inspeção submarina. Estudou-se profundamente as técnicas de ultrassom e foram selecionadas as melhores para os cenários de corrosão lidados nas operações. Analisamos detalhadamente os procedimentos, relatórios de serviços realizados, contratos de navios com Petrobras e outros documentos pertinentes relacionados. Foram feitos testes offshore submersos através de ROVs em navios e *onshore* em laboratórios da Petrobras, que envolveram também ferramentas de diferentes fabricantes e características. Lideramos reuniões com fabricantes de medidores de espessura, empresas de serviços de ROV, ABENDI (Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivo e Inspeção) e internas da Petrobras. Acompanhamos em navios contratados pela Petrobras diversas inspeções realizadas de medição de espessura por ultrassom. Fizemos revisões de especificações técnicas contratuais e seguimos um processo de melhoria contínua baseado no PDCA.

A partir desse estudo realizado, foram implantadas diversas melhorias, cujas principais abordamos a seguir.

4.1. Adição de novos recursos de ultrassom

A técnica de medição de espessura aplicada na inspeção é crucial para o sucesso da medição. As principais a serem aplicadas em caso de corrosão alveolar da superfície interna do material são a echo-echo e, para os casos de corrosão ainda mais severa, single-echo. Os aparelhos de medição de espessura para ROV que estavam na frota disponibilizavam somente a técnica multi-echo, que pode apresentar maiores dificuldades para os casos de corrosão alveolar da superfície interna do material. Em pesquisa ao mercado comercial mundial, não foi identificada ferramenta de medição de espessura adaptada para ROV que tivesse as técnicas echo-echo e multi-echo. Porém, após um tempo, a mesma empresa fornecedora das ferramentas utilizadas nos navios desenvolveu um aparelho operado por ROV com todas as três técnicas informadas acima. Quando esse novo aparelho ficou disponível comercialmente, a Petrobras pode contar com essa melhoria embarcada em navios de manutenção e inspeção submarina que entraram para a frota. Isso foi possível por atualização contratual, em que as técnicas necessárias de ultrassom passaram a ser cobradas das contratadas.

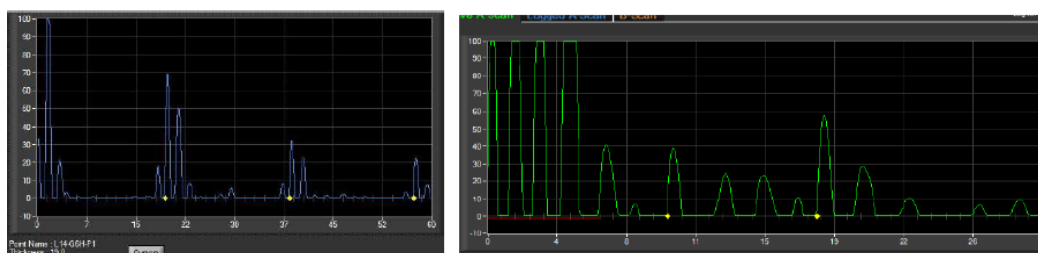
Assim, atualmente os serviços de medição de espessura estão sendo realizados somente pelas embarcações que têm esses aparelhos novos com as técnicas necessárias. Essa atualização possibilitou ampliar significativamente as regiões inspecionadas, incluindo medições em locais com a superfície interna corroída de forma considerável, mesmo em casos de corrosão severa.

4.2. Adição de gráfico a-scan

Colocando-se as amplitudes de ecos lidas pelo transdutor (eixo vertical) em função do tempo (eixo horizontal) tem-se o gráfico A-scan. Normalmente o eixo horizontal é transformado em uma escala de distância, em milímetros, por se saber a velocidade do som no material. Esse gráfico permite avaliar a qualidade e confiabilidade da medição realizada, visto que pode fornecer a informação sobre o comportamento e interações do feixe ultrassônico no material, conforme explicado por Cheeke (2002). Esse gráfico não estava disponível nas ferramentas de medição de espessura por ultrassom via ROV. Somente após comunicação da Petrobras às fabricantes, enfatizando a importância desse recurso, que uma delas aplicou essa solução. Ela entrou junto com a ferramenta que tinha as três técnicas de ultrassom, informada no tópico anterior. Assim, o gráfico A-scan também passou a ser cobrado nos contratos de navios de inspeção e manutenção assinados pela Petrobras.

Na figura a seguir temos um exemplo da importância do A-scan para verificar a confiabilidade da medição de espessura. À esquerda tem-se uma medição com sucesso, enquanto à direita, o valor está errôneo, pois é possível verificar falhas na medição uma vez que os ecos não apresentam, por exemplo, semelhança de perfil.

Figura 3. Gráfico A-scan de medição com sucesso (esquerda) e com falhas (direita).



Fonte: elaborado pelos autores.

A implementação desse gráfico tem sincronia as utilizações das técnicas novas indicadas no item 3.1 pois com ele é possível checar a correta aplicação dessas técnicas pela ferramenta.

4.3. Adequação da marinização

O medidor de espessura por ultrassom via ROV nos contratos da Petrobras sempre foi especificado para operar, no mínimo, a até 3.000 m de profundidade. A especificação do aparelho medidor dos fabricantes estavam, nominalmente, atendendo esse requisito.

Porém, o presente estudo constatou que eram necessárias melhorias na estrutura da ferramenta de medição de espessura correntemente utilizada pelas embarcações. Isso porque periodicamente ocorriam falhas nela decorridas de ingresso de água em seu interior. Em testes realizados, verificou-se que elas não estavam adequadamente adaptadas para operar em todo o range de pressão hidrostática que vai até 3000m. Em profundidades maiores que 1500m de LDA, aumentava-se consideravelmente a frequência de falhas de marinização.

O fabricante dos aparelhos foi acionado pela Petrobras e pelas contratadas a fim de solucionar o problema. Ele desenvolveu então um aparelho com um transdutor novo, com anéis de vedação, parede

mais espessa e modificou o material do transdutor para um mais resistente. O material novo do transdutor também forneceu a vantagem de ser mais estável fisicamente. O transdutor do equipamento antigo era revestido por uma camada de proteção de silicone ou teflon, bem sensíveis mecanicamente. No transdutor novo elas foram totalmente trocadas por uma camada de acrílico, que é muito mais resistente. As camadas de proteção antigas eram constantemente danificadas durante as operações por serem riscadas e rasgadas pelo ROV nas superfícies a serem medidas nas tentativas de leitura de valores. Isso gerava a necessidade periódica de interrupção das operações, a fim de retornar o ROV para o convés do RSV para trocar a camada danificada por outra nova. Com a camada de acrílico esse problema não existe mais.

Na imagem central da Figura 4 pode-se observar imagem do transdutor novo. Após outros ajustes que foram necessários para a adequada marinização, chegou-se então ao modelo atual do medidor de espessura, extremamente mais resistente à profundidade.

Figura 4. Atualização do transdutor antigo (à esquerda) para o novo (à direita).



Fonte: elaborado pelos autores e manual da ferramenta utilizada.

4.4. Adequação do handle de manuseio do aparelho

O handle é o adaptador onde é colocado o transdutor do medidor de espessura e serve para possibilitar a medição através do seu manuseio pelo manipulador do ROV. Ele é importante para manter o transdutor na posição correta de medição de espessura, que é a perpendicular à superfície a ser medida. Além disso, ele deve absorver o movimento inevitável do ROV de forma a não causar choques e pressões inaceitáveis ao transdutor. Ao se analisar os handles disponíveis nas embarcações, verificou-se que eles eram mais adequados para medições em superfícies planas, e não curvas, que são a maioria das realizadas, como em spools rígidos de ANMs (Árvores de Natal Molhadas). Foi então alinhado e desenvolvido em cooperação com as Contratadas da Petrobras e a fabricante da ferramenta um novo handle, que encaixava em superfícies curvas, além de ter variados graus de liberdade.

A Figura 4 mostra essa mudança. O local onde o manipulador do ROV segurava o handle era único e o manipulador somente podia manusear esse handle a partir de um ângulo fixo. Foram então adicionados mais dois pontos de pega, possibilitando o manuseio por três graus de liberdade. Consequentemente, viabilizou-se inspecionar locais que antes eram inacessíveis. As medições de espessura por ultrassom agora ocorrem somente com este novo handle.

Figura 5. Atualização do handle antigo (à esquerda) para novo.

Fonte: elaborado pelos autores.

4.5. Necessidade de inspetor certificado acompanhando as operações

Certificação de pessoas é o reconhecimento formal, por um organismo de certificação, que uma pessoa atende aos requisitos preestabelecidos em normas específicas, para o exercício de uma determinada atividade. A Petrobras passou a requerer profissional certificado por empresa qualificada reconhecida pela Petrobras na técnica de medição de espessura por ultrassom via ROV para acompanhamento dos serviços. Assim, se aumenta a qualidade e confiabilidade das inspeções, visto que os profissionais que as realizam estão com garantia de preparação e treinamento. No Brasil, o Sistema Nacional de Qualificação e Certificação de Pessoal em Ensaios Não Destrutivos e Inspeção da ABENDI é uma referência, inclusive na área de certificação para inspetores de medição de espessura via ultrassom. Através de um comitê, com a participação da Petrobras, a ABENDI inaugurou em 2018 a certificação para medição de espessura via ROV.

4.6. Aprimoramento de relatórios

A máscara dos relatórios de serviços de medição de espessura foi revisada e adicionadas diversas novas informações. Essa revisão levou em conta as outras melhorias realizadas abordadas neste artigo. Por exemplo, houve a adição do gráfico A-scan, em formato de imagem e dados do software da ferramenta, ao relatório do serviço. A nova máscara dos relatórios também foi atingida após reuniões com inspetores de ultrassom da Petrobras e as diversas gerências internas da empresa relacionadas ao processo.

4.7. Adição de aferição submersa

A aferição de um equipamento é realizada para evitar imprecisão, visto que a exatidão é essencial para uma medição adequada. Anteriormente, os medidores de espessura eram aferidos somente com o ROV no convés, antes e após as operações. Com este estudo passou-se também a se aferir com a ferramenta submersa, na profundidade de trabalho, antes de iniciar o serviço e ao término dele. Isso porque as condições extremas de pressão e movimento do ROV de descida à profundidade de trabalho podem causar danos aos cabos e aos componentes do medidor de espessura e ao próprio ROV, além de possíveis falhas no sistema do aparelho que compensa a pressão. Para a implantação dessa melhoria, foram construídos blocos padrão submersos adaptados para uso via ROV, algo inédito na empresa.

4.8. Elaboração e atualização documental

Existem diversos documentos necessários para serem seguidos durante a realização das medições de espessura por ROV, como, por exemplo, a norma ABNT NBR 16794 2020 e os procedimentos da Contratada, da Petrobras e do fabricante do aparelho. Porém, essas informações espalhadas em

diversos documentos dificultavam o decorrer dos serviços e esses documentos ainda não estavam abrangendo as melhorias implantadas por este estudo. Assim, foi criado um padrão da Petrobras que integra os diversos documentos requeridos para o serviço e complementa com diversas informações novas, como, por exemplo: introdução à medição de espessura e apresentação das técnicas; pré-requisitos para a realização dos serviços; sugestões de análises; máscara de relatório editável; recomendações para as medições; análise de centenas de gráficos A-scan. Devido à atualização do processo de medição de espessura por ultrassom via ROV por causa do estudo abordado neste artigo, foi atualizada a Especificação Técnica Contratual para navios a serem contratados pela Petrobras para manutenção e inspeção submarina, contemplando todas as melhorias implantadas.

4.9. Preparação da superfície a ser medida

A forma de preparação da região a ter a espessura medida foi atualizada. Foram definidas novas metodologias de limpeza e retirada de tinta de locais a serem medidas as espessuras por ultrassom via ROV. Para isso, foram consideradas as características das regiões a serem inspecionadas, como a integridade, dimensões e materiais de fabricação.

5. RESULTADOS E COMPARATIVOS ANTES E DEPOIS DAS MELHORIAS

Aqui abordaremos quais foram os resultados conquistados pela aplicação de todas as melhorias descritas anteriormente. Para isso, foram analisados mais de cem serviços realizados. Foram considerados nas análises da comparação de antes e depois da implantação das melhorias, por exemplo, parâmetros de tempos operacionais retirados de sistemas de controle de cronológicos das embarcações, consultas a relatórios de serviços, a contratos de navios e a especialistas certificados e qualificados em ultrassom. Com o adaptador/handle novo de manuseio da ferramenta, aumentou-se em cerca de 23% a quantidade de pontos medidos por ter melhorado o acesso da ferramenta aos locais de medição. Após a implantação das melhorias, mais de 99,9% dos locais atualmente acessados geram valores efetivamente medidos, ou seja, quase a totalidade. Com as melhorias implantadas, as medições tiveram menos falhas/problemas. Devido a isso, o tempo de paradas operacionais por falhas de medição de espessura caiu em cerca de 95%. A ferramenta antiga tinha somente a técnica multi-echo. Já o medidor de espessura novo tem também as técnicas single-echo e echo-echo, estas duas com melhor performance para superfícies corroídas internamente pelo tipo alveolar. Devido a isso, analisando as medições de espessura realizadas recentemente em milhares de locais, verificou-se que, ao menos 50% dessas medições feitas somente foram possíveis por causa dessas duas novas técnicas implantadas. Ou seja, mais da metade dos valores atualmente medidos são somente possíveis graças à ampliação das técnicas utilizadas pelo medidor de espessura por ultrassom.

Como resultados das melhorias realizadas, houve uma redução de cerca de 50% dos tempos médios dos serviços de medição de espessura por ultrassom via ROV. Se considerarmos esse ganho de produtividade e a quantidade e tempo desse tipo de serviço realizado após as melhorias implantadas, já foram economizadas milhares de horas de serviços de navios. Considerando o custo médio da taxa diária de um navio de inspeção e manutenção submarina, já foram economizados pela Petrobras dezenas de milhões de reais até agora decorrentes das melhorias aplicadas pelo trabalho do presente artigo.

6. PRÓXIMOS PASSOS

A continuidade é um dos fundamentos da melhoria contínua. Planejar, fazer, verificar e agir é um ciclo sem fim com o objetivo de aprimorar as atividades e processos. Visto isso, melhorias continuarão sendo estudadas e aplicadas, no intuito de não só fornecer os resultados esperados, mas também de superar expectativas. Um novo adaptador/handle, liderado pela equipe deste artigo, está em processo de patenteamento pela Petrobras, em que aumentará consideravelmente o acesso a locais de difícil acesso, agilizará a obtenção das medições, dará maior confiabilidade às medições e maior segurança ao realizar medições em superfícies mais sensíveis em sua integridade. Para atingir esses objetivos, o adaptador foi desenvolvido, inclusive, com sistemas de absorção de impacto, rotação e posicionamento de imageamento remoto.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A medição de espessura submarina por ROV tem excepcional importância no papel da gestão de integridade de estruturas submarinas metálicas e a sua adequada qualidade é um objetivo que traz valor para a Petrobras. Com essa visão, essa técnica foi altamente aprimorada. As melhorias obtidas no processo de medição de espessura remetem a percepção dos pontos necessários para aprimoramento, análise da aparelhagem e metodologia, recomendações e solicitações de implantação de melhorias, exigências quanto à qualidade necessária para as medições e aplicação das ações e soluções pertinentes. Os desafios para o desenvolvimento do estudo foram grandes, envolvendo reuniões, pesquisas, testes, desenvolvimentos ferramentais, atualizações documentais e mudanças metodológicas. As oportunidades geradas foram consistentes, como a nova ferramenta muito mais adequada para superfícies corroídas internamente, a nova certificação de medição de espessura por ultrassom via ROV da ABENDI e a disponibilização do gráfico A-scan. A partir das melhorias aplicadas e resultados obtidos, este trabalho trouxe novas soluções disruptivas, conhecimentos e perspectivas às práticas do segmento de medição de espessura por ultrassom via ROV para a indústria de energia. Dessa forma, contribui para que essa indústria como um todo possa também desfrutar das oportunidades trazidas e de seus benefícios, tendo nossos resultados alcançados como exemplos de ganhos em produtividade, qualidade e QHSE.

Trabalho originalmente apresentado no Congresso ROG em 2024. Acesse [aqui](#).

REFERÊNCIAS

- Brook, M. V. (2011). *Ultrasonic Inspection Technology Development and Search Unit Design* (1st ed.). Wiley.
- Cheeke, J. D. N. (2017). *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves* (2nd ed.). CRC Press.
- Dubè, N. (2004). *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications* (4th ed.). Olympus.
- Martin, C. C. (2012). *Ultrassom* (1st ed.). Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção.
- Rose, J. L. (2003). *Ultrasonic Waves in Solid Media* (1st ed.). Cambridge University Press.