



APLICAÇÃO DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA NA INSPEÇÃO DE RISERS FLEXÍVEIS PARA A SEGURANÇA NA INDÚSTRIA OFFSHORE

**Adriana J. P. Moreira, Anderson G. Paula, Soraia R. Azeredo, Olga M. O. Araujo,
Alessandra S. Machado, Ricardo T. Lopes, Davi F. Oliveira**

Laboratório de Instrumentação Nuclear/PEN/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 21941-914, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
adrianajpmoreira@coppe.ufrj.br

Palavras-Chave: Tomografia Computadorizada; Inspeção de Risers Flexíveis; Integridade Estrutural de Risers Flexíveis; Imagens por Raios X

RESUMO

O crescimento global e a evolução populacional destacam a importância crucial do setor energético como a base para o progresso industrial. Dentro desse cenário, os risers flexíveis emergem como componentes-chave na indústria offshore, transportando petróleo e gás das fontes de produção para as unidades de processamento. Compostas por camadas sobrepostas de polímeros e metais, essas estruturas são projetadas para suportar altas pressões e curvaturas, mas exigem monitoramento constante para garantir sua integridade ao longo do tempo. A inspeção das camadas de armadura de tração é essencial para prevenir falhas catastróficas e vazamentos. Este estudo tem o objetivo de avaliar a eficácia da Tomografia Computadorizada (TC) na detecção de defeitos como, microfissuras, visando melhorar a confiabilidade estrutural dos risers para a indústria offshore de petróleo e gás. Três amostras de risers flexíveis retiradas de operação foram inspecionadas utilizando Tomografia Computadorizada (TC). Para cada amostra, foram capturadas 360 projeções, obtidas em passos angulares de 1 grau. As imagens adquiridas foram posteriormente reconstruídas por meio de um software especializado. Após a reconstrução, as imagens passaram por processamento para segmentação e quantificação dos defeitos detectados. A análise inicial revelou que a TC não detectou rupturas ou fissuras na primeira amostra, mas identificou variações no espaçamento dos fios nas camadas de tração. Por outro lado, a segunda amostra apresentou rupturas totais nos fios da armadura de tração interna, enquanto a terceira amostra exibiu defeitos que se estendiam por toda a estrutura, incluindo rupturas parciais e totais nas armaduras de tração interna e externa. Os resultados sugerem que a Tomografia Computadorizada pode ser utilizada para detectar falhas críticas em risers flexíveis, o que contribui para a manutenção da integridade estrutural dos sistemas offshore de petróleo e gás.

1. INTRODUÇÃO

Os risers flexíveis são vitais para os sistemas de produção de petróleo e gás offshore, conectando poços submarinos a plataformas flutuantes, como FPSOs. Compostas por camadas de materiais como metal, polímero e aço [1], essas estruturas são amplamente utilizadas devido à sua confiabilidade e comportamento dinâmico favorável.

A exploração em águas profundas aumentou significativamente a demanda por tubos flexíveis. No entanto, inspeções regulares têm revelado danos como corrosão, fadiga da armadura de tração e instabilidade torcional, que ameaçam a integridade estrutural e podem resultar em falhas graves. Esses danos são agravados pelo estresse mecânico e pelo ambiente marinho corrosivo [2,3], destacando a necessidade de monitoramento contínuo.

A estrutura concêntrica e em camadas dos risers é essencial para alta conformidade à flexão [4]; no entanto, ela dificulta a inspeção das camadas internas pela maioria das técnicas de ensaio não



destrutivo, representando um desafio significativo para a inspeção da integridade estrutural. Para mitigar esses problemas, técnicas de monitoramento têm sido aplicadas, sendo os sistemas baseados em sensores os mais comuns [5]. Além disso, estratégias para correlacionar diferentes técnicas, como radiografia, ultrassom e análise por correntes parasitas com pigs, são utilizadas [6-8]. No entanto, muitas dessas técnicas são intrusivas ou não oferecem sensibilidade adequada em diferentes regiões da estrutura do riser.

Em resposta a esse desafio, a Tomografia Computadorizada por Raios X emergiu como uma técnica não invasiva e não destrutiva, capaz de gerar imagens 3D de alta resolução, essenciais para visualizar estruturas internas [9, 10], além de realizar avaliações qualitativas e quantitativas da amostra estudada. Portanto, este estudo visa utilizar a Tomografia Computadorizada de Alta Energia para detectar o início de defeitos nas camadas metálicas dos risers flexíveis.

2. METODOLOGIA

Três amostras de risers flexíveis retiradas da área de operação da indústria offshore foram inspecionadas utilizando Tomografia Computadorizada (TC). Para a aquisição das imagens, foi empregado um sistema composto por um acelerador de partículas BETATRON PXB6M (JME) de 6 MeV e um detector flat panel (GE) DXR250U-W, com tamanho de pixel de 200 μm , área ativa de 2048 x 2048 e faixa dinâmica de 14 bits. O riser 1, com 1,5 m de comprimento e 152,40 mm de diâmetro, foi escaneado a uma distância fonte-detector de 1170 mm, com tempo de exposição de 50 s e aquisição de 10 quadros por passo angular de 1 grau, resultando em 360 projeções. O fator de ampliação de 1,5x gerou um tamanho de pixel efetivo de aproximadamente 133 μm . O riser 2, com 2,0 m de comprimento, foi submetido à mesma geometria e parâmetros de aquisição do riser 1, também gerando 360 projeções. O riser 3, com 2,1 m de comprimento e 281 mm de diâmetro externo, foi escaneado com uma distância fonte-detector de 1075 mm, tempo de exposição de 100 s e 10 quadros por passo angular de 2 graus, totalizando 180 projeções. O fator de ampliação de 1,2x resultou em um tamanho de pixel efetivo de aproximadamente 167 μm .

Durante a reconstrução, as imagens de projeção convertidas do formato TIFF para DICOM foram processadas utilizando o software NRecon/Skyscan. Este software permite a reconstrução de fatias 2D com ajustes como Compensação de Desalinhamento, Suavização, Redução de Artefatos de Anel e Correção de Endurecimento de Feixe para minimizar a ocorrência de artefatos e ruídos. As fatias foram então visualizadas e alinhadas nos planos transversal, coronal e sagital usando o programa Data Viewer. Posteriormente, utilizando os softwares CTan e Avizo, as imagens foram visualizadas e analisadas, e as regiões de interesse (ROIs) foram delineadas [11], permitindo a segmentação precisa das camadas do riser. As camadas foram submetidas a uma análise detalhada, cobrindo aspectos qualitativos e quantitativos. Para a reconstrução do modelo 3D dos risers e ajustes de cores personalizados, foi utilizado o software CTVox® Bruker.

3. RESULTADOS

A Fig. 1 mostra as camadas metálicas isoladas do riser. Devido ao processo de segmentação de imagem foi possível analisar de forma independente todas as camadas que compõem o riser: as camadas de armadura de tração externa e interna são representadas pelas cores verde e azul, respectivamente; a camada de armadura de pressão é mostrada em laranja e a carcaça intertravada é exibida em marrom. A Fig. 2 mostra imagens de TC de cada estrutura metálica separadamente.

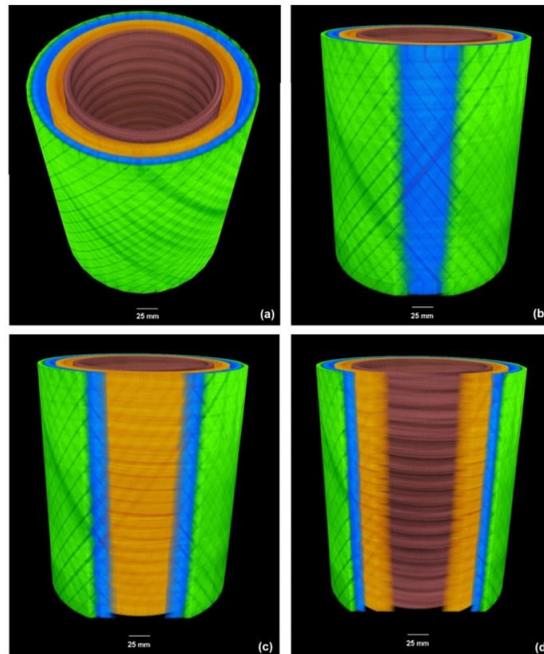


Fig. 1. Imagens de TC do riser flexível. (a) seção transversal e (b) camadas de armadura de tração externa e interna (verde e azul, respectivamente); (c) camada de armadura de pressão (laranja); e (d) carcaça intertravada (marrom).

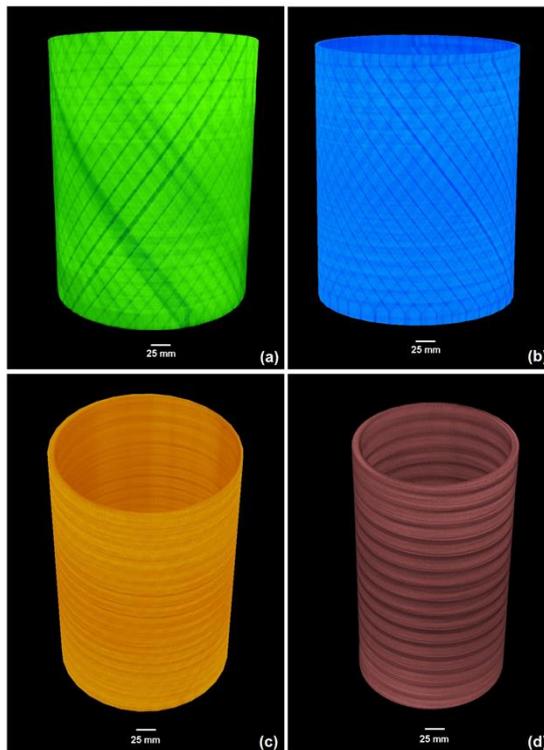


Fig. 2. Imagens de TC das estruturas metálicas isoladas: (a) armadura de tração externa, (b) armadura de tração interna, (c) armadura de pressão e (d) carcaça interna intertravada.

A análise realizada na imagem 3D não revelou rupturas nos fios das camadas de tração. No entanto, foi observado um espaçamento entre os fios na camada de armadura de tração interna. Na Fig. 3 pode ser vista uma análise detalhada do espaçamento entre dois fios da armadura de tração interna do riser 1, quantificado em mm^3 . Destaca-se o gráfico que ilustra a distribuição do tamanho dos defeitos ao longo da região analisada. Além disso, a escala de cores utilizada, variando de azul (0 mm) a vermelho (6 mm), indica a amplificação dos vazios na direção radial do tubo, fornecendo uma visualização clara da profundidade e intensidade dos defeitos no material examinado. Essa abordagem analítica ajuda a compreender de forma abrangente a integridade estrutural das camadas do riser.

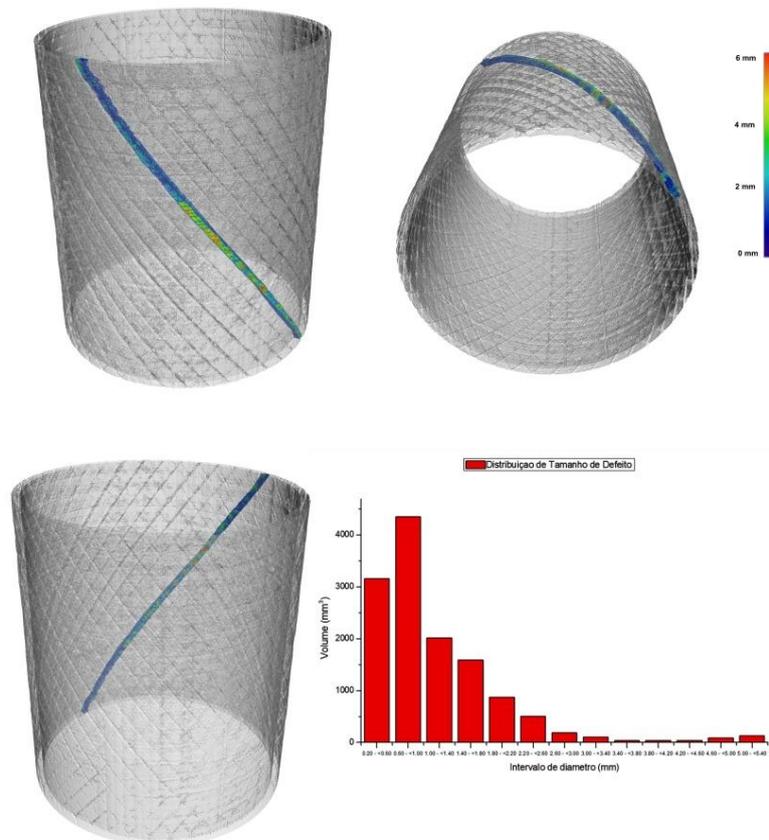


Fig. 3. Quantificação do espaçamento entre dois fios na camada de armadura de tração interna.

Na análise do riser 2, a Fig. 4 destaca cinco rupturas totais nos fios da camada de armadura de tração interna, apresentadas em três dimensões com uma escala de cores na imagem 3D, onde os tamanhos dos defeitos variam de 0 mm (azul) a 10 mm (vermelho). Ao girar a imagem do riser em 90 graus, a Fig. 5 revela duas rupturas totais adicionais na camada de tração interna, exibidas de forma semelhante na imagem 3D com a mesma escala de cores.

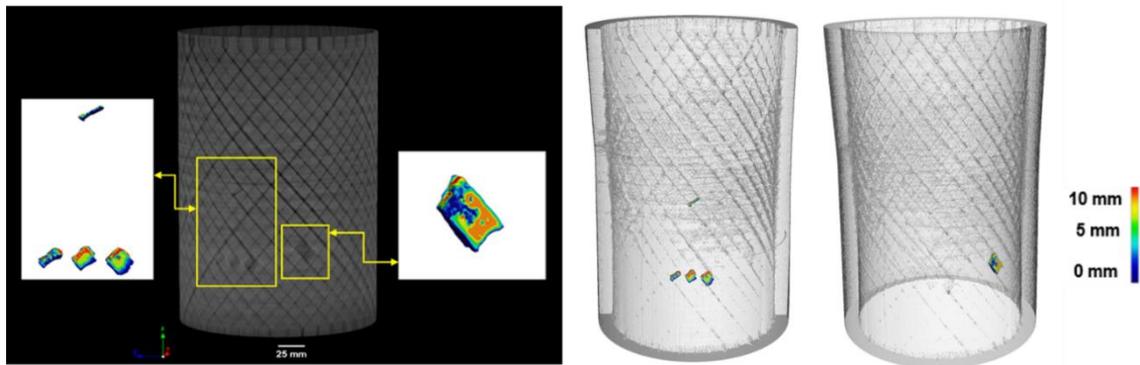


Fig. 4. Imagens de Tomografia Computadorizada (TC) destacando as cinco falhas detectadas nos fios da camada de armadura de tração interna do riser, representadas por uma escala de cores na imagem 3D.

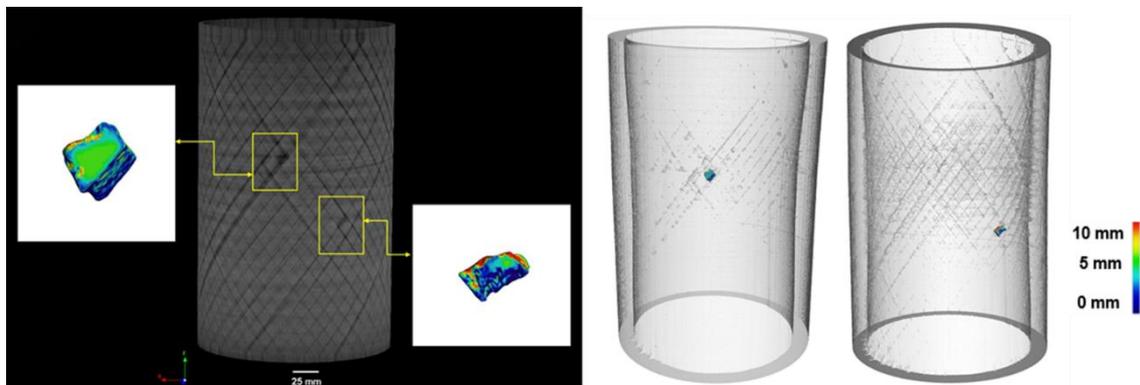


Fig. 5. Imagens de Tomografia Computadorizada (TC) destacando as duas falhas detectadas nos fios da camada de tração interna, apresentadas com uma rotação de 90 graus. Os defeitos são exibidos com escalas de cores na imagem 3D.

Durante a análise do riser 3, foram encontrados defeitos ao longo das camadas de tração externa e interna. Os arames da camada de armadura de tração externa apresentaram rupturas totais e defeitos circulares, sendo a menor ruptura com $10,01 \pm 0,2$ mm de comprimento e $3,13 \pm 0,2$ mm de diâmetro. O menor defeito circular é mostrado na Fig. 6, com $4,00 \pm 0,2$ mm de profundidade e $1,74 \pm 0,2$ mm de diâmetro. Nos fios da camada de armadura de tração interna, a Fig. 7 mostra três defeitos identificados: duas rupturas totais com distâncias de 7,84 mm e 8,87 mm, respectivamente, e um defeito circular com diâmetro de 2,84 mm. A Fig. 8 apresenta o corte 3D da região onde o defeito circular na camada de tração interna foi encontrado.

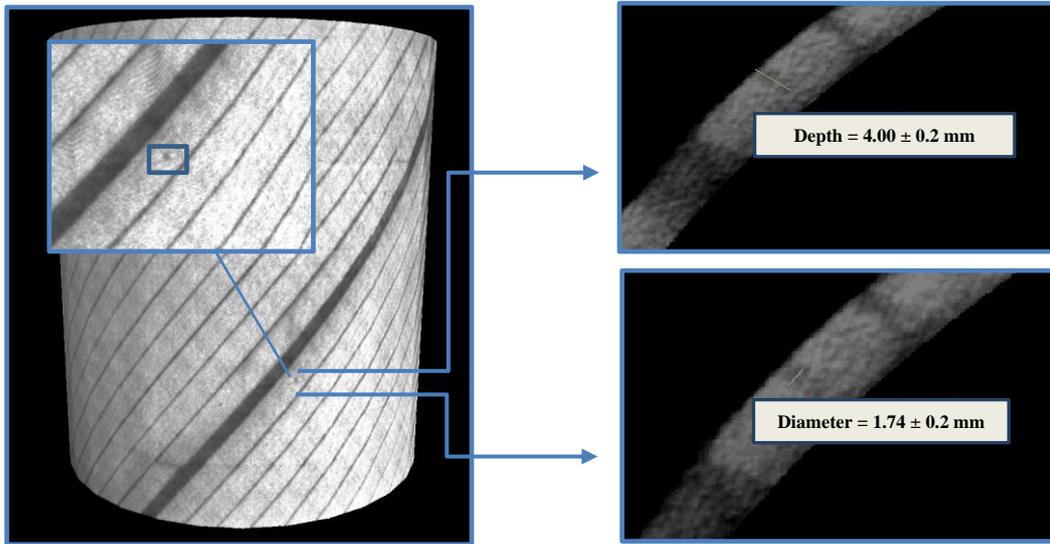


Fig. 6. Imagem de TC destacando o menor defeito circular identificado na camada de armadura de tração externa: Medidas lineares – Profundidade/Diâmetro.

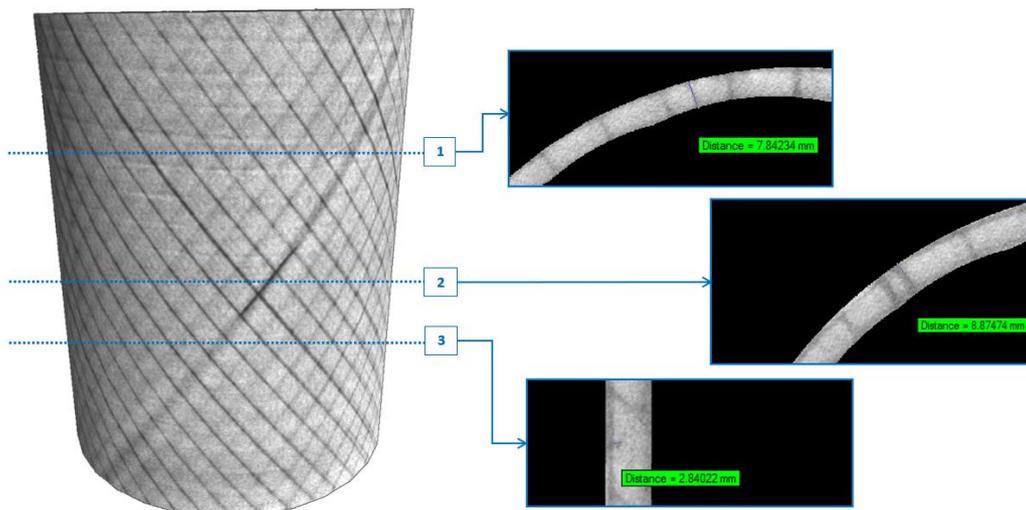


Fig. 7. Imagem de TC da camada de armadura de tração interna mostrando os três defeitos identificados: Medidas lineares – Profundidade.

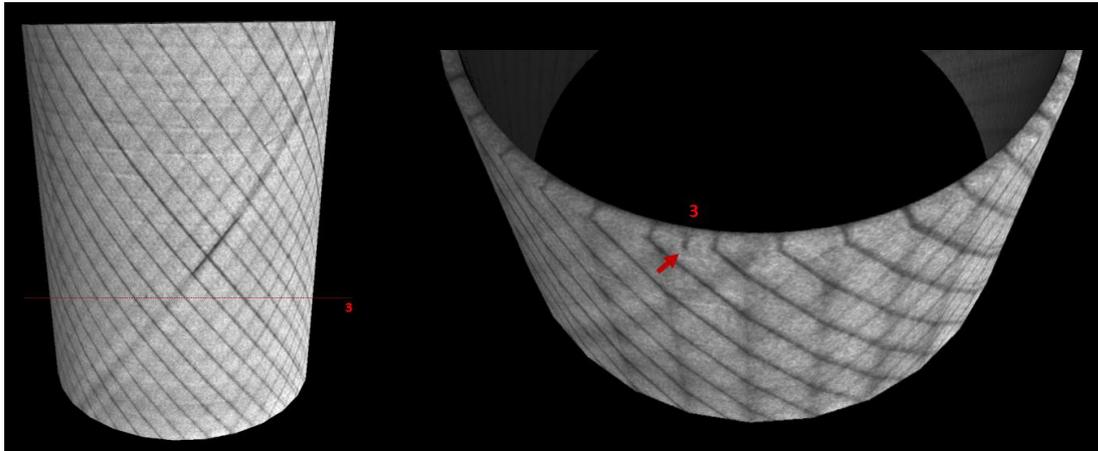


Fig. 8. Imagem tridimensional (3D) do riser mostrando a identificação do defeito circular na camada de tração interna, com uma seção 3D destacando a região do defeito.

4. CONCLUSÃO

Este estudo indica que a Tomografia Computadorizada (TC) de Alta Energia apresenta grande potencial como técnica para a detecção de defeitos em risers flexíveis. As inspeções realizadas em três amostras proporcionaram uma visualização detalhada e quantificação precisa dos defeitos nas camadas metálicas de tração, incluindo variações no espaçamento dos fios e rupturas. Esses resultados destacam a relevância da TC como uma técnica não invasiva, adequada para o monitoramento e a manutenção preventiva dos risers, contribuindo para a integridade estrutural e segurança das operações offshore. A detecção precoce de falhas possibilita a implementação de ações corretivas, promovendo maior confiabilidade e longevidade dos sistemas de produção de petróleo e gás. Portanto, a Tomografia Computadorizada de Alta Energia pode ser considerada uma inovação significativa na inspeção e manutenção de risers flexíveis.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho está inserido no CNPQ/INCT-Instituto Nacional de Ciências e Tecnologia em Instrumentação Nuclear e Aplicações na Indústria e Saúde (INAIS) (projeto 406303/2022-3). Os autores agradecem ao financiamento parcial dos órgãos de fomento FAPERJ, CAPES e CNPQ.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] X. Li et al., A review on predicting critical collapse pressure of flexible risers for ultra deep oil and gas production, *Applied Ocean Research*, Vol. 80, pp. 1-10, (2018).
- [2] N. J. R. Nielsen et al., Managing fatigue in deepwater flexible risers, *Conference Proceedings of the Offshore Technology Conference 2008*, Houston, Texas, USA, 5-8 may (2008).
- [3] T. Clarke et al., RELIABLE RADIOGRAPHIC INSPECTION OF FLEXIBLE RISERS FOR THE OIL INDUSTRY, *Engineering Structures*, Vol.33, pp. 1181-1186, (2011).
- [4] Hz. Yang et al., Enhanced multi-layer fatigue-analysis approach for unbonded flexible risers, *China Ocean Eng.*, Vol. 28, pp. 363-379 (2014).
- [5] R. Jacques et al., Monitoring the structural integrity of a flexible riser during dynamic loading with a combination of non-destructive testing methods, *NDT & E International*, Vol. 43, pp. 501-506 (2010).



- [6] M. Ho et al., Inspection and monitoring systems subsea pipelines: A review paper, *Structural Health Monitoring*, Vol. 19, pp. 606-645 (2019).
- [7] A. Kaur et al., RiserSure: Automated Deployment of Digital Radiography for Subsea Inspection of Flexible Risers, *Conference Proceedings of the IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp. 736-742, Turin, Italy, 04-07 september (2018).
- [8] E. Cheilakou et al., Digital Radiography Inspection of Flexible Risers in Offshore Oil and Gas Industry, *Conference Proceedings of the International Conference on Welding and Non-Destructive Testing*, Athens, Greece, 22-23 October (2018).
- [9] L. De Chiffre et al., Industrial applications of computed tomography, *CIRP Annals*, Vol. 63, pp. 655-677 (2014).
- [10] A. Machado et al., Industrial applications of computed microtomography (microCT) technique, *Conference Proceedings of the 10th Industrial Computed Tomography (iCT) 2020*, e-Journal of Nondestructive Testing, Vol. 25, Wels, Austria, 04-07 february (2020).
- [11] O. Araújo et al., Enhancement of microCT images of steel cracks using mathematical filters, *Conference Proceedings of the 10th Industrial Computed Tomography (iCT) 2020*, e-Journal of Nondestructive Testing, Vol. 25, Wels, Austria, 04-07 february (2020).