

ANÁLISE DE GAMAGRAFIAS DE TUBOS FLEXÍVEIS POR PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Vitor de Almeida Montenegro, vitormontenegro@gmail.com¹
Fabiana Rodrigues Leta, fabiana@ic.uff.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Niterói, Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

Resumo: Neste artigo apresenta-se a metodologia adotada para desenvolver um programa de computador que permite analisar, por meio de técnicas de processamento análise de imagens, fotos obtidas de filmes de gamagrafia de amostras de tubos flexíveis submetidos a ensaios dinâmicos. Atualmente, a análise de gamagrafias em tubos flexíveis é feita de forma visual, limitada à verificação de eventuais quebras nas armaduras de tração. Através do modelo proposto é possível ampliar de forma significativa a extração de informações dos filmes de gamagrafia. O foco deste artigo foi quantificar variações angulares das armaduras de tração do tubo durante as diversas etapas do ensaio dinâmico. Os resultados obtidos demonstram sua eficácia na prática.

Palavras-chave: processamento digital de imagens, tubo flexível, gamagrafia.

1. INTRODUÇÃO

A indústria do petróleo e gás atualmente possui um grande destaque na economia mundial. Sabe-se que essa indústria demanda um intenso desenvolvimento tecnológico, visto que a busca pelo petróleo e seus derivados está em constante ascensão e que grande parte das jazidas petrolíferas estão localizadas em águas profundas e ultra-profundas. O Brasil é reconhecido mundialmente pela sua capacidade na extração petrolífera.

Em decorrência de tais fatos, tornou-se de extrema importância a fabricação de estruturas que possibilitassem transporte de grandes quantidades de fluidos quando submetidos às ações de ondas, ventos e correntes. Surgiu então a necessidade de se desenvolverem tubos flexíveis para a extração e exportação de óleo, gás, água, etc. Essas linhas são divididas em flexíveis para serviços dinâmicos, “risers”, e para serviço estático, “flowlines”. Ambas são estruturas tubulares, formadas pela superposição de camadas metálicas e poliméricas, que lhes conferem a capacidade de resistir às pressões do fluido interno, à profundidade e às cargas dinâmicas de operação.

Pesquisas vêm sendo desenvolvidas visando à qualidade da manufatura destes elementos. Larsen (1992) realizou uma análise estática e dinâmica de tubos flexíveis. Métodos de análise estática e dinâmica de risers flexíveis e seu comportamento no ambiente offshore, em condições arbitrárias de carregamento também vem sendo objeto de estudo (McNamara, 1988) (Lyons et al., 1996) (Souza et al., 2009).

O design de um tubo flexível passa por rigorosos testes de qualificação antes de ser utilizado em campo. Parte importante deste processo são os ensaios dinâmicos, realizados para se avaliar o comportamento do tubo sob cargas cíclicas, bem como para se determinar sua vida útil em fadiga. Durante estes ensaios, é necessária a verificação da integridade das armaduras metálicas da amostra ensaiada. Portanto é comum a inspeção da amostra, de forma não-destrutiva, através de uma técnica de radiografia industrial que utiliza radiação gama, chamada gamagrafia. As aplicações da gamagrafia vem se expandindo cada vez mais, no caso de inspeção de conjuntos/sistemas complexos, soldas e materiais de fundição, análise de desgaste de peças em decorrência do atrito, redução de espessura das paredes em função da corrosão e erosão (Shinohara et al., 2002). Atualmente, a verificação dos filmes de gamagrafia em amostras de tubos flexíveis se limita a uma análise visual, visando à identificação de eventuais quebras nas Armaduras de Tração.

O objetivo deste trabalho é possibilitar a ampliação da quantidade de informações obtidas dos filmes de gamagrafia, pela análise digital de fotos destes filmes. Serão apresentados algoritmos de processamento digital de imagens com a finalidade de reconhecer as Armaduras de Tração da amostra, e descrevê-las geometricamente, para a obtenção do ângulo de helicóide no qual estas estão acomodadas.

2. TUBOS FLEXÍVEIS

Os tubos flexíveis têm como objetivo principal interligar os poços petrolíferos com as plataformas, promovendo o transporte de fluidos como óleo, fluidos de injeção, gás ou água, conforme esquematizado na Fig. (1).

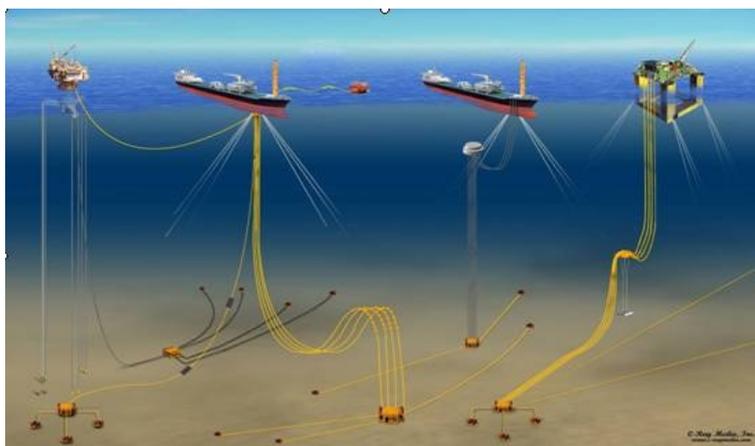


Figura 1. Vista esquemática de um campo de exploração petrolífera (cortesia da Wellstream do Brasil).

Do ponto de vista da engenharia, os tubos flexíveis são estruturas constituídas de camadas cilíndricas poliméricas e camadas metálicas com arranjo helicoidal, cada uma atuando com uma determinada função e característica. A disposição e dimensionamento dessas camadas têm como objetivo a melhor adaptação da estrutura a determinadas aplicações. As camadas poliméricas têm como finalidade a vedação, ou seja, manter o fluido em seu interior e impedir a entrada de água. Podem também ajudar no isolamento térmico, proteção anticorrosão e redução do atrito entre as camadas metálicas. As camadas helicoidais metálicas, também chamadas de armaduras metálicas, têm função estrutural, ou seja, suportam os carregamentos impostos ao tubo em serviço.

A Fig. (2) mostra a composição típica de um tubo flexível, com suas principais camadas.

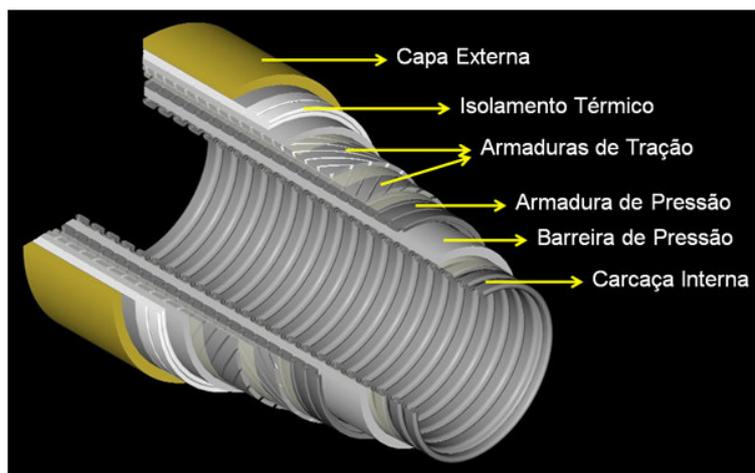


Figura 2. Camadas típicas de um tubo flexível (cortesia da Wellstream do Brasil).

A Carcaça Interna é uma estrutura metálica, feita geralmente de aço inoxidável que possui diâmetro interno e espessura que podem variar dependendo dos requisitos exigidos pela empresa contratante. É feita a partir de planos pré-formados, bobinados em uma espiral em torno de um mandril interbloqueando cada seção em conjunto, o que faz com que haja um aumento significativo da resistência ao colapso, assim como aumento da rigidez axial.

A Barreira de Pressão é uma camada de polímero extrudada sobre a Carcaça Interna com a finalidade de não deixar que o fluido atinja as outras camadas do tubo flexível, sendo assim, o seu material é selecionado de forma a se obter

resistência química ao fluido e também não deixar que as condições de operação sejam alteradas. Atualmente, a extrusão dessa camada é feita com HDPE (polietileno de alta densidade), PVDF (fluido de polivinildene), PA11 (Nylon 11), TPE (elastômero termoplástico).

A Armadura de Pressão é uma camada metálica (normalmente aço carbono) intertravada, cuja função é suportar as pressões oriundas da Barreira de Pressão e os carregamentos de pressões internas. É constituído circunferencialmente de arames perfilados. Este arame, por sua vez, é fabricado em forma de “S” para que suas arestas possam interagir entre si ao redor do tubo. Para aplicações dinâmicas a armadura de pressão deve ser lubrificada.

As Armaduras de Tração consistem em arames de aço carbono planos e retangulares, aplicados helicoidalmente no tubo, que podem ser de diversos tamanhos, dependendo do projeto. Os arames de aço têm como função a resistência ao carregamento axial. Geralmente são utilizados pares de arames enrolados em sentidos opostos com a finalidade de evitar que a estrutura sofra torção ao receber cargas trativas.

O Isolamento Térmico tem por função limitar a perda de calor através da parede do tubo para o ambiente circundante. Seu material depende fundamentalmente da profundidade da água e das condições de serviço. Tipicamente o Isolamento Térmico é composto de camadas de fita de espuma expandida de polipropileno.

A Capa Externa é uma camada polimérica que funciona como uma barreira contra danos mecânicos e contra a intrusão da água do mar na tubulação. Os polímeros normalmente usados são HDPE ou NYLON 11, e são geralmente coloridos seguindo os requisitos dos clientes. A coloração está diretamente ligada a proteção contra raios ultra-violetas aos quais eles podem estar sujeitos.

2.1. Ensaios Dinâmicos de Tubos Flexíveis

Os Ensaios Dinâmicos consistem em submeter uma amostra de tubo flexível a uma série de blocos de carregamentos cíclicos de tração e flexão, aplicados em fase, com diferentes amplitudes, frequências e número de ciclos. O número total de ciclos varia entre dois e quatro milhões, devendo sempre ser suficiente para representar a vida útil especificada, ou seja, o objetivo é atingir 100% de dano em fadiga na amostra, em um carregamento que represente a vida útil predita. A escolha das cargas de tração e flexão aplicadas neste ensaio parte de um estudo do campo no qual o tubo será utilizado.

Um exemplo de bancada para execução de testes dinâmicos está apresentado na Fig. (3).



Figura 3. Bancada para ensaios dinâmicos em tubos flexíveis (Deepflex, Universal Pipe Tester).

Durante o teste, parâmetros como temperatura, número de ciclos, pressão interna, ângulos e carregamentos de tração aplicados, devem ser monitorados e arquivados.

Ao final de cada bloco de carregamento, a amostra deve ser submetida a um ensaio não-destrutivo (preferencialmente gamagrafia), para identificar possíveis quebras, trincas ou deslocamentos nas Armaduras de Tração, no tubo ou no interior do conector. A amostra é também submetida a um teste hidrostático, devendo suportar 1,25 vezes a máxima pressão de projeto por um período de 24 horas.

O teste é considerado bem sucedido quando, atingido um dano teórico de fadiga igual a 100%, a amostra não apresentar defeitos ou vazamentos.

2.2. Gamagrafia em Tubos Flexíveis

Gamagrafia é o nome que se dá ao ensaio não destrutivo de radiografia industrial fundamentado na impressão de radiação gama em filme fotográfico.

Este ensaio consiste em posicionar a amostra, ou região de interesse, entre a fonte radioativa e o filme fotográfico. O filme é composto por uma base, usualmente de poliéster transparente, com uma camada de emulsão contendo cristais de prata. A radiação penetrante atravessa o espécime em ensaio. Uma parte da radiação é absorvida, e a restante vai causar impressão num filme fotográfico, onde se pode visualizar toda a estrutura do corpo de prova ou parte dela.

Em tubos flexíveis, a técnica radiográfica utilizada para inspeção do corpo tubular é a Parede Dupla Vista Simples (PDVS), que consiste posicionar a fonte próxima da parede oposta à região de interesse, de modo que apenas esta seja revelada no filme, conforme ilustrado abaixo na Fig. (4).

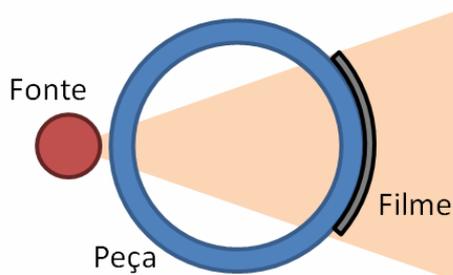


Figura 4. Parede Dupla Vista Simples

O resultado da inspeção por gamagrafia de uma determinada região do corpo tubular é apresentado na Fig. (5).

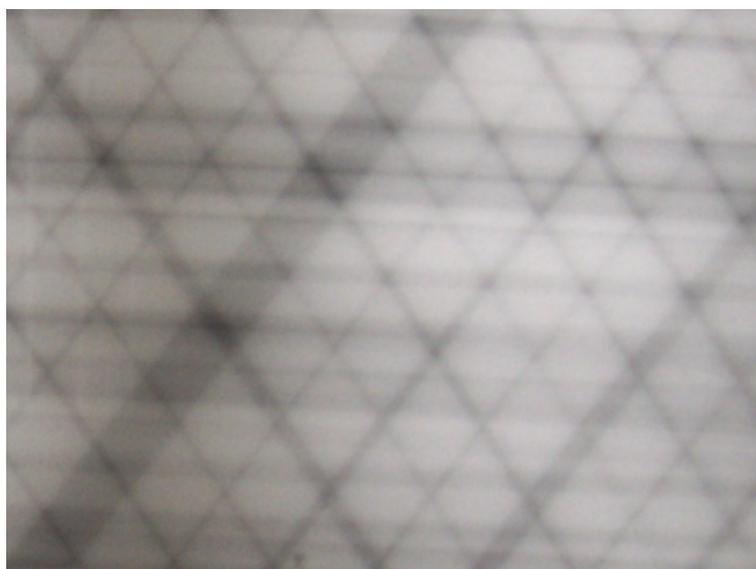


Figura 5. Exemplo de um filme de gamagrafia (cortesia da Wellstream do Brasil).

Observa-se claramente o par de Armaduras de Tração (faixas inclinadas), bem como a Armadura de Pressão (faixas horizontais).

3. SEGMENTAÇÃO DAS ARMADURAS DE TRAÇÃO EM GAMAGRFIAS DE TUBOS FLEXÍVEIS

O filme de gamagrafia mostrado na Fig. (5) foi utilizado como amostra para a implementação dos algoritmos de reconhecimento das Armaduras de Tração. Os algoritmos são fundamentados no fato de que uma imagem digital em escala de cinza pode ser representada através de uma matriz de pixels, na qual os valores e os índices representam a tonalidade de uma cor e sua posição na imagem, respectivamente. Em uma imagem em escala de cinza, valores baixos definem tonalidades escuras, e valores altos definem tonalidades claras, sendo 0 (zero) o preto e 255 o branco.

3.1. Contraste

O contraste de uma imagem pode ser definido como a faixa de tonalidades na qual a imagem está inserida. Se os pixels que formam uma imagem possuem valores muito próximos uns dos outros, significa que a imagem utiliza uma faixa bastante restrita de tonalidades, e conseqüentemente a imagem apresentará um baixo contraste, ou seja, pouca definição perceptível dos objetos que a compõe.

A fim de se maximizar o contraste da amostra, ou seja, fazer com que a amostra utilize toda a faixa de tonalidades disponível (0 a 255), o seguinte processamento foi implementado:

Seja $K[i, j]$ o valor de tonalidade de pixel de uma imagem na posição $[i, j]$, e K_{max} e K_{min} respectivamente o maior e o menor valor de tonalidades observadas nesta imagem.

A imagem será considerada em máximo contraste quando $K_{min} = 0$ e $K_{max} = 255$. A seguinte fórmula foi utilizada para se forçar o contraste máximo na imagem (Conci et al, 2008):

$$K'_{[i,j]} = \frac{255}{(K_{max} - K_{min})} (K_{[i,j]} - K_{min}) \quad (1)$$

Onde:

$K'_{[i, j]}$ é o valor do pixel, na posição $[i, j]$ da imagem em máximo contraste (nota-se que o valor de $K'_{[i, j]}$ será 255 quando $K_{[i, j]} = K_{max}$, e 0 quando $K_{[i, j]} = K_{min}$).

3.2. Filtro Direcional

Um filtro direcional tem por objetivo indicar variações de tonalidade numa dada direção. Isto é possível quando se compara os valores de tonalidade nas vizinhanças de um pixel, em uma determinada direção.

Como o objeto de interesse se encontra inclinado, as direções diagonais foram escolhidas para a aplicação do filtro direcional. Sejam $A[i, j]$ e $B[i, j]$ os valores de tonalidade para as direções diagonais do filtro. Logo,

$$\begin{aligned} A_{[i,j]} &= |K_{[i+1,j-1]} - K_{[i-1,j+1]}| \\ B_{[i,j]} &= |K_{[i+1,j+1]} - K_{[i-1,j-1]}| \end{aligned} \quad (2)$$

Onde

$K_{[i, j]}$ é a tonalidade do pixel na imagem original, na posição $[i, j]$.

Para ambas as diagonais (A e B) na Eq. (2), foram geradas imagens nas quais todos os valores de tonalidade de pixel foram obtidos pelas equações apresentadas. O contraste foi melhorado pela Eq. (1). A Fig. (5) foi utilizada como imagem original. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. (6).

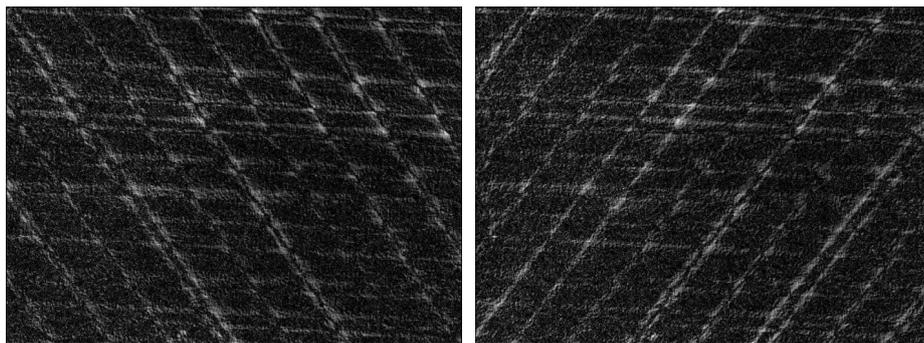


Figura 6. Filtros direcionais diagonais (imagens geradas pelo programa).

Na Fig. (6), a imagem à esquerda é o resultado da aplicação da diagonal A apresentada na Eq. (2), e a imagem à direita representa a diagonal B. As imagens geradas apresentam uma aproximação razoável dos pares de armaduras de tração.

3.3. Identificação das Armaduras de Tração

A etapa inicial do algoritmo de reconhecimento de Armaduras de Tração consiste em gerar todas as retas que passam por um determinado ponto da imagem, $K_{[i, j]}$, e armazenar aquela com maior “densidade de tonalidade”.

O termo “densidade de tonalidades” foi o nome atribuído ao termo H_R da Eq. (3):

$$H_R = \frac{(K_1 + K_2 + \dots + K_n)}{n} \quad (3)$$

Onde:

H_R = densidade de tonalidades de uma determinada região R da imagem

K_1, K_2, \dots, K_n = valores das tonalidades dos pixels que formam a região R

n = numero total de pixels que formam a região R

Como as regiões R desejadas são retas que, com um determinado ângulo θ atravessam um determinado ponto $K_{[i,j]}$ da imagem, a forma de obtenção dos pixels de cada região era função unicamente da posição $[i, j]$ e do ângulo θ , conforme a Eq. (4):

$$K_{[g,h]} \in R_{\theta,i,j} \leftrightarrow [(h-j) = (i-g) \tan \theta] \quad (4)$$

Onde:

$K_{[g,h]}$ é um ponto qualquer da imagem, na posição (g, h)

$R_{\theta,i,j}$ é a reta que passa pela posição $[i, j]$ da imagem, com um ângulo θ em relação à vertical.

A lógica geométrica da Equação 4 está ilustrada na Fig. (7).

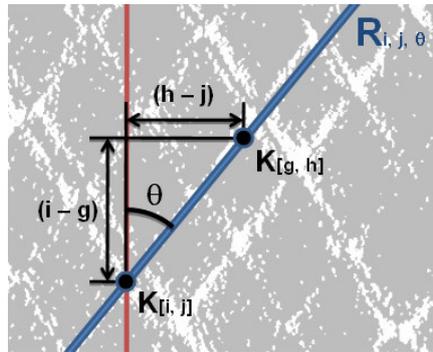


Figura 7. Representação geométrica da Eq. (4).

É importante ressaltar que a condição $[(h-j) = (i-g) \tan \theta]$ da Eq. (4) é uma igualdade entre números inteiros. O lado direito desta condição será truncado como inteiro antes de ser comparado com o lado esquerdo.

Desta forma, para um dado ponto $K_{[i,j]}$ da imagem, são armazenadas as densidades de tonalidade das diferentes regiões R possíveis para a posição $[i, j]$, fazendo-se o valor de θ variar de -90° até 90° por incrementos de $0,1^\circ$. Este incremento é a precisão nominal do programa, e pode ser aumentado quando se desejar diminuir o custo computacional, ou diminuído quando se desejar uma maior precisão.

As imagens geradas pelo filtro direcional foram utilizadas como *input* do algoritmo de identificação das armaduras de tração. A diagonal A (Equação 2) foi utilizada para valores negativos de θ , e a diagonal B (Equação 2) para valores positivos de θ .

Obviamente, se o ponto $K_{[i,j]}$ em questão pertencer a uma reta de interface da Armadura de Tração, e o ângulo θ estiver na direção desta reta, a densidade de tonalidade armazenada será alta. Em contrapartida, se o ponto $K_{[i,j]}$ não pertencer a uma reta de interface da Armadura de Tração, ou o ângulo θ não estiver na direção desta reta, o valor de densidade armazenado será baixo.

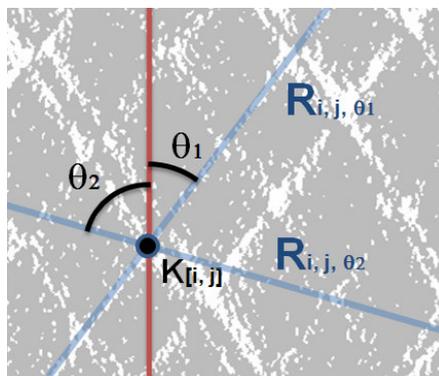


Figura 8. Exemplo de regiões com baixa e alta densidade de tonalidades.

A Fig. (8) ilustra dois exemplos de regiões, obtidas de uma mesma posição $[i, j]$, mas com diferentes ângulos, θ_1 e θ_2 . Nota-se que a região formada a partir de θ_1 contém uma quantidade maior de pixels claros que a região formada a partir de θ_2 . Obviamente, sua densidade de tonalidade será maior.

3.4. Resultado

Após uma criteriosa filtragem das retas geradas pelos algoritmos descritos nas seções anteriores, uma representação gráfica das retas foi elaborada, de modo que se pudesse avaliar os resultados obtidos. A imagem obtida está apresentada na Fig. (9).

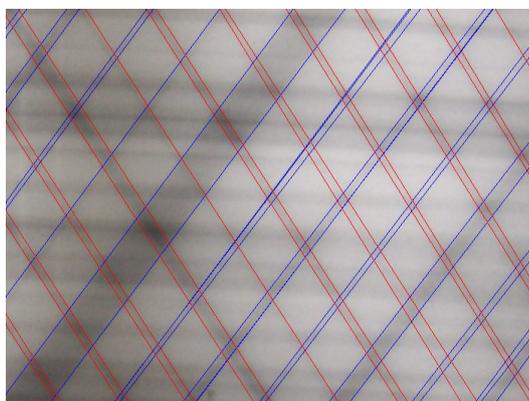


Figura 9. Resultado após filtragem (imagem gerada pelo programa).

As linhas azuis e vermelhas na Fig. (9) foram geradas pelo programa, e representam o reconhecimento dos pares de Armaduras de Tração do tubo. O resultado obtido foi considerado satisfatório. Cada uma das retas é descrita matematicamente através da posição e ângulo que a originou, conforme a Eq. (3) e Eq. (4). Estas informações são devidamente armazenadas pelo programa.

A seqüência de aplicação dos algoritmos descritos nesta seção está apresentada na Fig. (10).

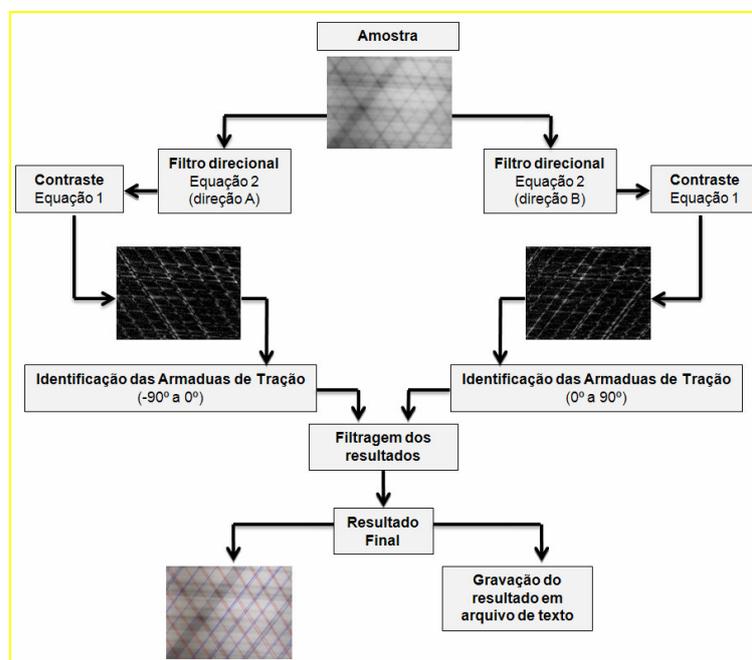


Figura 10. Seqüência de aplicação dos algoritmos.

4. APLICAÇÃO DO PROGRAMA EM UM ENSAIO REAL

O programa desenvolvido foi utilizado para analisar o comportamento de uma determinada região de uma amostra de Tubo Flexível submetido a um ensaio dinâmico.

Uma inspeção por gamagrafia foi executada ao final de cada etapa do ensaio dinâmico, totalizando 5 inspeções.

A região inspecionada foi dividida em 4 posições. Para cada posição, foi calculado o valor médio dos ângulos positivos subtraído do valor médio dos ângulos negativos. A este valor, foi dado o nome de “Ângulo entre Armaduras”. Este procedimento foi adotado para eliminar o erro provocado por possíveis giros na amostra ao longo das inspeções. Os resultados obtidos são apresentados na Fig. (11).

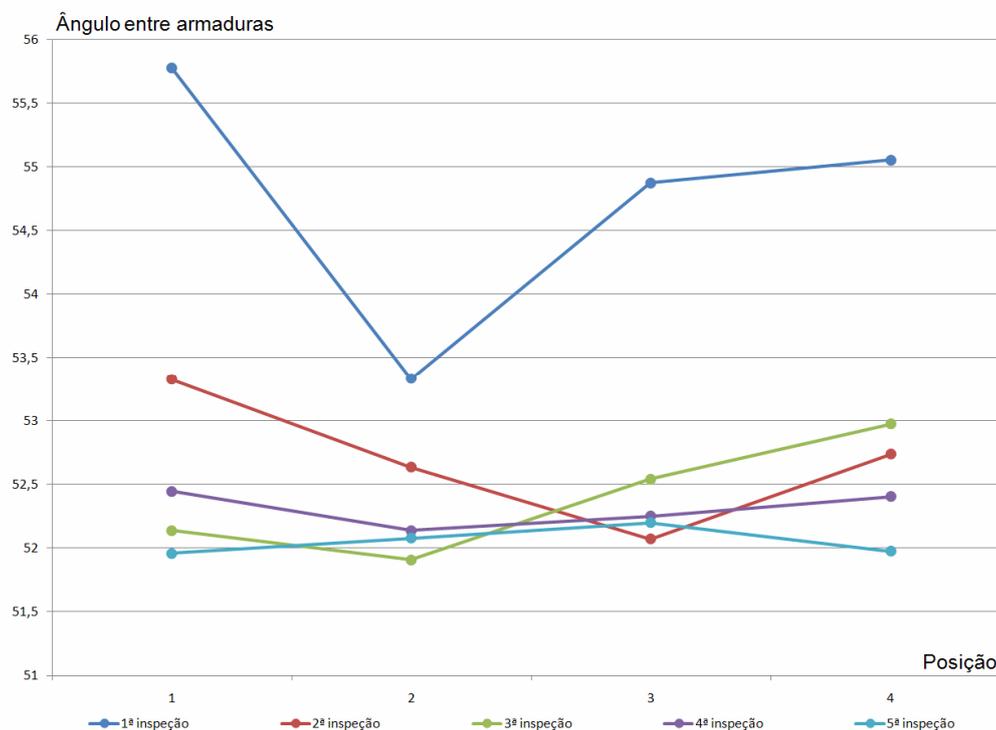


Figura 11. Resultados obtidos nas 5 análises.

Observa-se que os ângulos entre armaduras apresentam uma tendência a se tornarem constantes com o passar dos blocos de carregamento. Isso pode significar uma acomodação das Armaduras de Tração ao longo do ensaio dinâmico.

Também é importante observar que os resultados demonstram um comportamento de convergência ao longo das inspeções analisadas. Sendo assim, é possível que após um determinado número de ciclos, a suposta acomodação das armaduras alcance um valor estável.

5. CONCLUSÕES

Observa-se que a análise de gamagrafias por processamento digital de imagens é uma técnica viável, que possibilita a aquisição de informações até então desconhecidas a respeito do comportamento das Armaduras de Tração de um tubo flexível ao longo de sua vida em serviço.

O programa de reconhecimento de Armaduras de Tração foi elaborado a partir de equações e algoritmos simples. Contudo, as informações por ele fornecidas possuem valor, uma vez que é possível elas serem aplicadas em casos reais. Os testes até o momento realizados demonstram a viabilidade de seu uso para a aquisição de dados estatísticos, que permitam avaliar a conformidade dos raisers quanto as suas armaduras.

Neste sentido, a continuidade desta pesquisa seria um levantamento estatístico dos resultados obtidos em gamagrafias de diferentes ensaios dinâmicos, preferencialmente digitalizadas por um *scanner* específico. A comparação dos dados obtidos após estas análises poderão fornecer padrões importantes a serem considerados em futuros projetos de tubos flexíveis.

6. AGRADECIMENTOS

À Wellstream do Brasil, por investir na idéia desta pesquisa, em especial ao grupo de Tecnologia, pelo apoio e pelas orientações. À FAPERJ pelo apoio financeiro (No. E-26/171.362/2001).

7. REFERÊNCIAS

- Chandwani, R., Larsen, I. Design of Flexible Risers. Workshop on Subsea Pipelines, COPPE/UFRJ. 1997
 Conci, A., Azevedo, E. Leta, F.R. Computação Gráfica, Vol. 2, Ed. Campus Elsevier, RJ,2008.

Petrobras. Norma N-2409, Revisão A. 2003

Larsen, Carl M. Flexible riser analysis — comparison of results from computer programs. Marine Structures Volume 5, Issues 2-3, Pages 103-119, 1992.

McNamara, J.F., O'Brien, P. J., Gilroy, S. G. Nonlinear Analysis of Flexible Risers Using Hybrid Finite Elements, J. Offshore Mech. Arct. Eng., Volume 110, Issue 3, 197-204, 1988.

Möller, Sergio V.. “Aplicações Industriais das Radiações Ionizantes”. Universidade Federal do Rio Grande do Sul Montenegro, Vitor de Almeida. Análise de Gamagrafias de Tubos Flexíveis por Processamento Digital de Imagens. Projeto Final de Graduação. Universidade Federal Fluminense. Departamento de Engenharia Mecânica. 2009.

Shinohara, A. H., Acioli, E., Khoury, H. J. Avaliação da Técnica de Radiografia Digital em Gamagrafia, 6ª COTEQ - Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos, 2002.

Lyons, Witz, G.J. J.A., Brown, D.T. Measurements from the Emerald instrumented flexible riser, Engineering Structures. Volume 18, Issue 8, August, Pages 615-627, 1996.

Sousa, José R.M. de, Magluta, Carlos, Roitman, Ney, Ellwanger, Gilberto B., Lima, Edison C.P., Papaleo, Arnaldo On the response of flexible risers to loads imposed by hydraulic collars Applied Ocean Research, Volume 31, Issue 3, Pages 157-170, 2009.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS OF FLEXIBLE PIPE GAMMA RAY INSPECTIONS BY DIGITAL IMAGE PROCESSING

Vitor de Almeida Montenegro, vitormontenegro@gmail.com¹
Fabiana Rodrigues Leta, fabiana@ic.uff.br¹

¹Universidade Federal Fluminense, Niterói, Rio de Janeiro (RJ), Brazil

Abstract: *This project aims to establish a program that allows the analyzing, by digital image processing, photos taken of gamma ray films from inspection on samples of flexible pipes subjected to dynamic tests.*

Currently, the gamma ray analysis of flexible pipes is done visually, limited to verifying any breaks in the tensile armor. The digital image processing can significantly increase the extraction of information from gamma ray films. The project focus is to quantify angular changes in the tensile armor of the pipe during the test.

Keywords: *digital image processing, flexible pipe, gamma ray inspection.*