



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102017016471-3 A2



(22) Data do Depósito: 31/07/2017

(43) Data da Publicação Nacional: 19/03/2019

(54) **Título:** SISTEMA E MÉTODO DE INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE ARAMES DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE DUTO OU CABO FLEXÍVEIS

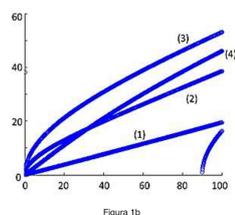
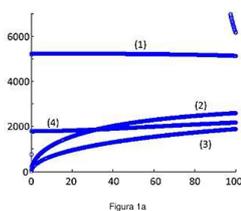
(51) **Int. Cl.:** G01N 29/14; G01N 29/04; G01N 29/34; G01N 21/88; G01N 21/00.

(52) **CPC:** G01N 29/14; G01N 29/04; G01N 29/34; G01N 21/88; G01N 21/00.

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL; SIFT MONITOR ENGENHARIA LTDA.

(72) **Inventor(es):** THOMAS GABRIEL ROSAURO CLARKE; EDUARDO BECKER GROTH; TONI ROGER SCHIFELBAIN DE LIMA; ALBERTO BISOGNIN.

(57) **Resumo:** SISTEMA E MÉTODO DE INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE ARAMES DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE DUTO OU CABO FLEXÍVEIS. A presente invenção se refere a um sistema e método de inspeção ou monitoramento de arames de armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis. O sistema compreende a captação de ondas acústicas por sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas, posicionados internamente à estrutura, acoplados diretamente aos arames de tração e sensores eletromagnético-acústicos acoplados externamente à estrutura, gerando ondas guiadas acústicas em arames de tração da estrutura. Permitindo a detecção de defeitos nos arames (como corrosão, trincas, rupturas, delaminações), a ocorrência de alagamento do anular, e a perda de adesão entre os arames de tração e resinas de fixação em conectores ou terminações. A presente invenção se aplica nas áreas de Engenharia Mecânica, Engenharia Naval e Engenharia do Petróleo, mais especificamente nos campos de monitoramento de dutos.



## **Relatório Descritivo de Patente de Invenção**

### **SISTEMA E MÉTODO DE INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE ARAMES DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE DUTO OU CABO FLEXÍVEIS**

#### **Campo da Invenção**

**[0001]** A presente invenção descreve um sistema e método de inspeção e monitoramento de arames de armadura de tração de duto ou cabo flexíveis por meio da captação de ondas acústicas por sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas. A presente invenção se aplica nas áreas de Engenharia Mecânica, Engenharia Naval e Engenharia do Petróleo, mais especificamente nos campos de monitoramento de dutos.

#### **Antecedentes da Invenção**

**[0002]** Dutos e cabos flexíveis são utilizados em larga escala na indústria petrolífera para transporte de produtos (no caso de dutos) ou de energia elétrica, gases comprimidos, fibras ópticas e linhas hidráulicas e pneumáticas (no caso de cabos). Em comum, as duas estruturas possuem condutos internos e camadas metálicas, poliméricas, ou de material compósito, que possuem diferentes finalidades, seja garantir a proteção externa, a resistência mecânica da estrutura, a estanqueidade interna e externa, evitar a fricção excessiva entre camadas, etc. Cabos deste tipo são convencionalmente chamados de “umbilicais”, enquanto dutos são usualmente chamados de “risers”, quando em posição ascendente, ou “flowlines” quando posicionados no leito do oceano.

**[0003]** O modo de falha destas estruturas geralmente se dá pela ruptura progressiva dos arames que lhe conferem resistência à tração. Estes, estão presentes na estrutura em números e configurações variáveis, que são função principalmente do diâmetro da estrutura e dos carregamentos esperados, e que estão usualmente dispostos em forma de helicóides ao redor do núcleo central longitudinal da estrutura, em camadas que geralmente estão presentes em números pares, e que formam as chamadas “armaduras de tração”. A

disposição helicoidal dos arames em cada camada é geralmente feita em direções alternadas, de maneira a garantir um balanceamento dos carregamentos. A falha destes arames, que podem ser metálicos ou de material compósito, geralmente ocorre por mecanismos de fadiga ou corrosão-fadiga nas seguintes condições: a) em regiões onde ocorrem transições bruscas de rigidez, ou em que existam grandes concentrações de tensões (como no caso dos conectores que acoplam a estrutura a uma unidade marítima flutuante); ou, b) quando água do mar ou produtos internos adentram as camadas da estrutura, devido ao rasgamento ou perfuração de camadas poliméricas de vedação interna ou externa, e podem reagir com gases prejudiciais à resistência mecânica de metais, como H<sub>2</sub>S e CO<sub>2</sub>, que permeiam as camadas poliméricas provindos do produto transportado em seu interior. Esta permeação de gases não é necessariamente causada por dano a alguma camada de vedação, e pode ocorrer também naturalmente, através de camadas poliméricas intactas.

**[0004]** A ruptura de um número excessivo de arames das armaduras de tração pode levar à perda da tubulação ou cabo, levando a altos riscos de acidentes com impactos ambientais e humanos, além de gerar paradas de produção onerosas. A importância destas estruturas para a exploração de petróleo off-shore é tão grande que muitas empresas começaram recentemente a exigir o uso de algum sistema de monitoramento em todos os risers de suas plataformas e unidades marítimas.

**[0005]** Detalhes sobre estes tipos de estrutura podem ser encontrados nos documentos da American Petroleum Institute, API 17B (para tubulações flexíveis), e API 17E (para cabos submarinos flexíveis).

**[0006]** Na busca pelo estado da técnica em literaturas científica e patentária, foram encontrados os seguintes documentos que tratam sobre o tema:

**[0007]** O documento PI 0801011-0, "Sistema para Monitoração da Integridade Estrutural de uma Tubulação Flexível Submarina Ascendente e

Método”, baseia-se no uso de sensores do tipo extensômetros, preferencialmente aqueles do tipo redes de *Bragg* em fibras ópticas, para medidas de deformação longitudinal em arames de tração, com o objetivo de detectar rupturas pela redistribuição de tensões que teoricamente ocorre na estrutura na ocorrência de um destes eventos. Por serem sensores que realizam uma medida pontual e localizada de deformação, estes devem ser acoplados individualmente sobre cada arame da estrutura, durante eventos onde ocorre a exposição destes arames, por exemplo, durante a montagem do conector (ou terminação, *end-fitting*).

**[0008]** O documento BR 102013007957-0 A2, “Sistema de Monitoramento de Arames da Armadura de Tração de Dutos Flexíveis e Método de Aplicação”, refere-se a um sistema baseado também em extensômetros, preferencialmente do tipo redes de Bragg em fibras ópticas, os quais seriam utilizados para medições de deformações longitudinais em cada um dos arames. Tais sensores seriam combinados com um ou mais acelerômetros (sensores de vibração, independentes dos extensômetros), e este conjunto de sensores dissimilares seria acoplado diretamente aos arames na armadura externa do riser através de uma cápsula de inspeção visual, popularmente conhecida como “olho mágico”, que permite acesso aos arames através de aberturas na região do conector, e cujo conceito é registrado em PI 1100228-0.

**[0009]** Dessa forma, os documentos PI 0801011-0 e BR 10 2013 007957-0 A2 referem-se exclusivamente ao uso de sensores baseados em rede de Bragg em fibras ópticas como extensômetros, e portanto, executando as medições de deformações de forma “estática”, visto que as taxas de aquisição de dados utilizadas são baixas, da ordem de 1kHz. E portanto, as aplicações mencionadas no documento falhariam na medição de eventos de deformação dinâmicos, como por exemplo, vibrações da estrutura ou propagação de ondas mecânicas ou acústicas em certos elementos da estrutura.

**[0010]** Ainda, outro problema decorrente da utilização de sensores do tipo extensômetro mencionado pelos ditos documentos é relacionado ao fato de que as redistribuições das tensões suportadas pelos arames que estes almejam detectar em caso de rupturas podem não ocorrer de forma imediata, ou não ocorrer por completo, devido a efeitos de travamento e fricção interna na estrutura. A distribuição de tensões resultante é também, na maioria das vezes, imprevisível, levando a situações onde uma medida deste tipo pode não ser suficiente para confirmar uma ruptura.

**[0011]** O documento BR 10 2013 007957-0 A2 menciona o uso de um ou mais acelerômetros posicionados dentro da cápsula de inspeção visual, junto aos extensômetros (sensores baseados em redes Bragg em fibras ópticas, doravante denominado sensor óptico), para detecção de eventos dinâmicos provenientes da ruptura de arames, visto que estes eventos liberam energia mecânica na forma de vibrações e som. Os ditos acelerômetros são sensores independentes dos sensores ópticos. Um problema relacionado ao uso de acelerômetros independentes, é que estes são sensores baseados em elementos piezoelétricos, que precisam ser certificados para operação em atmosfera explosiva, sob risco de emissão de faíscas em evento de curto-circuito, sendo, portanto, arriscada a sua inserção no interior de um riser, uma vez que é um ambiente com potencial explosivo.

**[0012]** Além do dito problema da segurança de operação, no sistema e método detalhado no documento BR 10 2013 007957-0 A2, apenas sinais provenientes de eventos dinâmicos relacionados à ruptura de arames (a liberação repentina de energia em um evento de ruptura de um arame leva à emissão de ondas mecânicas vibratórias e acústicas) seriam detectados pelos acelerômetros. Estes sinais seriam então analisados em conjunto com as informações estáticas (deformações) registradas pelos sensores ópticos, para identificação de rupturas. A ocorrência de algum dano como ruptura de arame, propagação de trinca, corrosão e alagamento do anular, altera a forma como as ondas mecânicas acústicas interagem com os arames da armadura de tração

e, conseqüentemente, também ocorre alteração da assinatura do sinal captado pelos sensores ópticos.

**[0013]** Assim, do que se depreende da literatura pesquisada, não foram encontrados documentos antecipando ou sugerindo os ensinamentos da presente invenção, de forma que a solução aqui proposta possui novidade e atividade inventiva frente ao estado da técnica.

**[0014]** Dessa forma, existem dificuldades na detecção de defeitos em dutos e cabos flexíveis o que compromete a segurança de sistemas que utilizam esse tipo de dutos e cabos e também compromete a averiguação de necessidade de manutenção dos ditos dutos e cabos.

### **Sumário da Invenção**

**[0015]** Dessa forma, a presente invenção tem por objetivo resolver os problemas constantes no estado da técnica a partir do uso de sensores do tipo redes de *Bragg* em fibras ópticas acoplados diretamente aos arames de tração de um *riser* flexível para detecção de passagem de ondas mecânicas, geradas na estrutura por meio de sistemas de sensores eletromagnético-acústicos, posicionados externamente ao *riser*, por sobre a sua camada polimérica externa, a uma distância de alguns metros da região de acoplamento dos sensores ópticos.

**[0016]** Em um primeiro objeto, a presente invenção apresenta um sistema de inspeção e monitoramento de arames da armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis compreendendo ao menos:

- a) sensores ópticos;
- b) módulos de captação óptica (14) ; e
- c) unidade central de controle (16) compreendendo meios de processamento ininterrupto;

em que,

- os sensores ópticos são acoplados aos arames de tração;
- módulos de captação óptica (14) são comunicantes com os sensores ópticos;

- a unidade central de controle (16) é eletronicamente comunicante aos módulos de captação óptica (14);
- a unidade central de controle (16) compreende meios de aquisição e processamento de dados.

**[0017]** Em um segundo objeto, a presente invenção apresenta um método de inspeção e monitoramento de arames da armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis implementado no sistema de acordo com o primeiro objeto e compreendendo ao menos as etapas de:

- a. aquisição de sinal provindo de sensores ópticos na unidade central de controle (16) interruptamente;
- b. processamento e análise de sinal na unidade central de controle (16); e
- c. detecção de ocorrência de evento dinâmico.

**[0018]** Dessa forma, a presente invenção promove a detecção e localização de rupturas de arames, até mesmo na ausência de redistribuição de tensões perceptível, e de eventos anteriores às rupturas, permitindo ao operador maior tempo para mitigação das consequências de rupturas incrementais de arames. Ainda, propicia a inspeção ou monitoramento desde a zona de variação de maré (ZVM) até o conector ou terminação de acoplamento do *riser* a uma unidade flutuante E a capacidade de detecção de eventos dinâmicos propositais ou não com segurança inerente podendo ser instalado no interior do *riser* com baixos ou isenção de riscos.

**[0019]** Estes e outros objetos da invenção serão imediatamente valorizados pelos versados na arte e pelas empresas com interesses no segmento, e serão descritos em detalhes suficientes para sua reprodução na descrição a seguir.

### **Breve Descrição das Figuras**

**[0020]** São apresentadas as seguintes figuras:

**[0021]** A Figura 1 mostra curvas de dispersão para modos de ondas guiadas acústicas, que propagam em arames de seção retangular, similares àqueles presentes em dutos flexíveis, apresentadas de duas formas.

**[0022]** A Figura 1a revela curvas de dispersão relacionando a velocidade de propagação de cada modo de onda na direção longitudinal do arame (eixo das ordenadas) em função da frequência de excitação da onda (eixo das abscissas).

**[0023]** Figura 1b - são apresentadas curvas de dispersão que relacionam o número de onda de cada modo de onda (eixo das ordenadas) em função da frequência de excitação da onda (eixo das abscissas).

**[0024]** Figura 2 - mostra a forma de vibração de cada modo (ou tipo) de onda guiada existente na faixa de frequências de interesse a esta aplicação. A escala de cores mostra o valor do deslocamento total normalizado (u.a.).

**[0025]** Figura 3 - mostra a relação vetorial entre a corrente induzida no arame e o campo magnético aplicado no arame, que é necessária para geração das forças de Lorentz, necessárias a esta aplicação, no arame. Quando a corrente ou o campo magnético são alternados na frequência de interesse, esta configuração gera o modo de onda guiada de interesse nos arames de tração da estrutura.

**[0026]** Figura 4a - mostra a estrutura típica de uma tubulação submarina flexível multicamadas, e a configuração típica de uma terminação convencional.

**[0027]** Figura 4b - mostra a configuração do sistema de inspeção ou monitoramento proposto, em terminação com cápsula de inspeção, indicando a posição dos sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas (sensores ópticos) em relação aos sensores eletromagnéticos (EMATs) utilizados para geração das ondas guiadas.

**[0028]** Figura 5a – mostra em esquema a vista superior de uma configuração possível para um colar de excitação de ondas guiadas.

**[0029]** Figura 5b – mostra em esquema a vista lateral desta possível configuração de um colar de excitação.

**[0030]** Figura 5c – mostra em esquema o acoplamento de um colar bipartido de excitação de ondas guiadas no exterior de um duto ou cabo flexível.

**[0031]** Figura 6a - mostra um exemplo de sinal captado por um sensor óptico caso não haja dano no arame.

**[0032]** Figura 6b - mostra um exemplo de sinal captado por um sensor óptico caso haja ruptura do arame em local entre os sensores EMAT e o sensor óptico.

**[0033]** Figura 6c - mostra um exemplo de sinal captado por um sensor óptico caso haja uma ruptura dentro do conector.

**[0034]** Figura 7a - mostra um exemplo de sinal captado por um sensor óptico caso haja uma corrosão, trinca no arame, ou ingresso de líquido na região dos arames, entre os sensores EMAT e os sensores ópticos.

**[0035]** Figura 7b - mostra um exemplo de sinal captado por um sensor óptico caso haja uma corrosão, trinca no arame, ingresso de líquido na região dos arames, ou perda de adesão entre o arame e a resina de ancoragem, dentro do conector.

### **Descrição Detalhada da Invenção**

**[0036]** Em um primeiro objeto, a presente invenção apresenta um sistema de inspeção e monitoramento de arames da armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis compreendendo ao menos: sensores ópticos, módulos de captação óptica (14), e unidade central de controle (16) compreendendo meios de processamento ininterrupto.

**[0037]** Os sensores ópticos, em uma concretização, são sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas acoplados diretamente aos arames de tração, em acessório que possibilite o acesso a estas camadas, para captação de ondas guiadas geradas.

**[0038]** Os módulos de captação óptica (14) são módulos eletrônicos associados (eletronicamente comunicantes) aos sensores ópticos, sendo

capazes de interrogar os ditos sensores ópticos acoplados no arame de tração, em local de acesso a estes, de forma ininterrupta e apresentando taxa de aquisição suficiente para que seja possível a aquisição de ondas acústicas geradas por eventos dinâmicos.

**[0039]** A unidade central de controle (16) é comunicante aos módulos de captação óptica (14) e aos sensores ópticos por meios de transmissão de dados. A dita unidade central de controle (16) é adaptada para execução de controle e gerenciamento de dados e é capaz de adquirir e processar de forma ininterrupta dados provenientes dos módulos de captação óptica (14) e dos sensores ópticos por compreender meios de aquisição e processamento de dados.

**[0040]** Ainda, o sistema de inspeção e monitoramento apresenta um conjunto de sensores eletromagnético-acústico (13) e módulos de captação eletromagnético-acústica.

**[0041]** O conjunto de sensores eletromagnético-acústico (13) é acoplado externamente à estrutura do duto ou cabo flexível e é associado aos módulos de captação eletromagnética acústica para excitação e leitura dos sensores do conjunto (13). Os sensores eletromagnético-acústicos (EMATs) são posicionados para geração de ondas mecânicas acústicas nos arames de tração.

**[0042]** Os módulos de captação acústica compreendem meios de excitação e leitura dos ditos sensores eletromagnéticos-acústicos (EMTAS) do conjunto (13).

**[0043]** Em um segundo objeto, a presente invenção apresenta um método compreendendo as etapas de aquisição de sinal provindo de sensores ópticos na unidade central de controle (16) ininterruptamente, processamento e análise de sinal na unidade central de controle (16) e detecção de ocorrência de evento dinâmico.

**[0044]** O sistema executa o processamento e análise de forma ininterrupta na unidade central de controle (16) dos sinais coletados a fim de

detectar a ocorrência de eventos dinâmicos e as ondas acústicas resultantes destes eventos.

**[0045]** O conjunto de sensores (13) e os módulos correspondentes (15), em intervalos pré-estabelecidos são utilizados para geração proposital de ondas acústicas guiadas nos arames.

**[0046]** A unidade central de controle (16) sincroniza os sinais coletados a partir dos sensores ópticos e módulos de captação óptica (14) com dados provenientes do conjunto de sensores eletromagnéticos-acústicos (13) e dos módulos eletromagnéticos-acústicos (15), de forma a identificar a recepção das ondas acústicas guiadas, e de suas características de interação com os arames, pelos sensores ópticos

**[0047]** Estas ondas acústicas podem propagar dezenas de metros na direção longitudinal dos arames, efetivamente utilizando a geometria do arame como guia de onda. Por conta deste efeito, estas ondas são chamadas “ondas guiadas” acústicas (para discerni-las das “ondas guiadas” eletromagnéticas, que não fazem parte do escopo deste documento). Por conta de seu modo de operação, que será detalhado abaixo, os sensores EMATs podem atuar com afastamento de dezenas de milímetros em relação ao objeto, permitindo que as ondas guiadas possam ser geradas em arames de tração mesmo com o sensor operando externamente ao duto ou cabo flexível, por sobre uma camada polimérica espessa que protege os componentes metálicos de seu interior do meio externo. Um sensor EMAT posicionado por sobre a capa polimérica externa do duto ou cabo poderia, portanto, gerar uma onda guiada acústica nos arames de tração da estrutura, que propagaria algumas dezenas de metros caso não houvesse dano nos arames. Caso haja dano nos arames, que cause mudança na área da seção do arame (como uma trinca ou perda de espessura por corrosão), a onda emitida seria parcialmente refletida nestas regiões, e ocorreria também a geração de modos de onda diferentes daquele excitado pelo EMAT (através de fenômenos denominados “conversão de modos”). Caso o arame esteja rompido haveria a reflexão total da onda guiada incidente.

**[0048]** Uma das principais características das ondas guiadas acústicas é que estas têm caráter dispersivo, ou seja, sua velocidade muda em função da frequência em que elas são excitadas. Curvas de dispersão são fundamentais para qualquer desenvolvimento envolvendo ondas guiadas. Estas são obtidas através de equacionamento matemático amplamente divulgado na literatura, e descrevem a relação entre o número de onda ( $k$ ) e a frequência ( $f$ ) para cada um dos modos de onda guiadas que podem propagar em uma determinada geometria de guia de onda. O número de onda “ $k$ ” (unidade  $1/m$ ) é o inverso do comprimento de onda “ $\lambda$ ”, e a frequência (unidade Hz, ou  $1/s$ ) é o inverso do período “ $T$ ”. Portanto, a partir destas curvas pode-se obter a relação entre velocidade de propagação de cada modo em função da frequência de excitação. A Figura 1 mostra curvas de dispersão para modos (ou tipos) de ondas guiadas acústicas que propagam em arames de seção retangular de dimensões similares àqueles encontrados em armaduras de tração de dutos flexíveis. Na Figura 1a são apresentadas as curvas de velocidade de fase em função da frequência, enquanto na Figura 1b são apresentadas as curvas correspondentes ao número de onda em função da frequência. A Figura 2 mostra o formato de cada modo (ou tipo) de ondas guiadas que pode propagar em um arame com esta geometria, na faixa de frequências de interesse para esta aplicação. A direção de propagação (5) é sempre no sentido longitudinal do arame. As escalas de cores apresentadas na Figura 2 correspondem ao valor do deslocamento total normalizado.

**[0049]** Em referência à Figura 1, esta mostra o modo de onda guiada longitudinal (1), que possui características que o tornam o mais interessante para esta aplicação, sendo este praticamente não dispersivo (sua velocidade não varia significativamente com a frequência, na faixa de frequências de interesse, de 5kHz a 100kHz) e ele é o modo, dentre os quatro disponíveis na faixa de frequências de interesse, que possui a menor atenuação quando em contato com camadas poliméricas. Os outros modos presentes nesta faixa de frequências são dois modos assimétricos (polarizados na direção da espessura

(2) ou largura (3) do arame) e um modo torcional (4). Todos os últimos citados possuem em seu modo de vibração deslocamentos intensos nas direções normais às faces do arame (como pode ser visto na Figura 2, que mostra os deslocamentos característicos dos quatro modos de ondas guiadas, para uma frequência de excitação de 50kHz), o que os torna mais propensos à atenuação quando em contato com materiais visco-elásticos (como são as camadas de materiais poliméricos do duto ou cabo). Já o modo longitudinal (1) possui deslocamentos de maior amplitude na direção longitudinal do arame, o que reduz a sua atenuação nestas condições. A operação com um modo que tenha baixa atenuação é importante para que a máxima distância de propagação em um arame de tração possa ser atingida, e, com isto, a maior cobertura do sistema de inspeção e monitoramento possa ser obtida. O modo longitudinal (1) propaga com facilidade distâncias entre 15 e 30m ao longo do arame em condições reais.

**[0050]** A Figura 3 mostra as relações vetoriais que precisam estar presentes para que um sensor EMAT baseado em forças de Lorentz possa gerar o modo de onda guiada longitudinal (1). Um campo magnético (6) aplicado na direção normal à maior face do arame (direção “z” na figura), quando interage com um campo de correntes elétricas induzidas na mesma superfície (corrente parasita (7)), mas na direção perpendicular ao campo magnético (5) e na direção transversal do arame (direção “y” na figura), leva ao surgimento de uma força mecânica (força de Lorentz (8)) na direção longitudinal do arame (direção “x” na figura). Quando o campo magnético (6) ou a corrente parasita (7) são induzidos com corrente alternada, a força de Lorentz (8) gerada será alternada. Se a alternância de direções da força de Lorentz (8) no eixo “x” se dá em umas das frequências de interesse a esta aplicação (usualmente entre 5 e 100kHz), têm-se a geração de uma onda guiada de modo longitudinal (1). A indução de um campo magnético (6) e de correntes parasitas (7) no arame é possível mesmo com afastamentos de alguns centímetros entre o arame e os transdutores.

**[0051]** A Figura 4a mostra a geometria típica de um riser flexível, particularmente em relação à disposição dos arames que formam as armaduras de tração (9), que formam helicoides ao redor do núcleo central do duto ou cabo flexível. A Figura mostra também uma terminação (10) de um riser flexível, onde os arames são expostos e conformados de maneira a adentrar a carcaça da terminação (11), onde são ancorados com resina polimérica. A exposição dos arames durante o procedimento de montagem da terminação (10) torna possível a sua instrumentação com sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas, que ficariam inseridos no conector e embebidos na resina. Esta opção foi contemplada no registro de propriedade intelectual PI 0801011-0 (porém naquele documento é reivindicado apenas o uso dos sensores ópticos para medidas estáticas de deformação, e não para medidas dinâmicas, que possibilitariam a captação de ondas acústicas geradas propositalmente ou acidentalmente na estrutura, como sugere a presente invenção). Outro possível local de instrumentação dos arames com sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas é demonstrado na Figura 4b: a chamada cápsula de inspeção (12) que algumas terminações (10) possuem. A cápsula de inspeção em si é descrita em PI 1100228-0, enquanto que a instrumentação deste local dos arames com sensores ópticos (novamente, apenas para medidas estáticas de deformação) é descrita em BR 10 2013 007957-0 A2. A Figura 4b mostra também a configuração onde um conjunto de sensores eletromagnético-acústicos (13) é acoplado ao redor de um duto flexível, por sobre a sua capa polimérica externa a uma distância selecionada da terminação. Este conjunto de sensores eletromagnético-acústicos (13), que em uma concretização é um colar de EMATS, excita ondas guiadas em modo longitudinal (1) em todos os arames, de maneira simultânea ou individual, que propagam ao longo dos arames helicoidais, o que acaba por resultar em uma propagação longitudinal ao longo do duto ou cabo flexível (5). Caso não haja ruptura ou danos nos arames, estas ondas propagam algumas dezenas de metros até alcançar a região da terminação (10), onde são captadas por

sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas acopladas aos arames dentro da carcaça da terminação (10) ou na cápsula de inspeção (12). Os módulos de captação óptica (14) (em altas taxas de aquisição, o que permite a medida de eventos dinâmicos, como a passagem de ondas guiadas ou emissões acústicas) e os módulos de captação eletromagnética-acústica (15) estão posicionados em local afastado, ligados aos respectivos sensores por cabos ou módulos sem fio. Os módulos de captação óptica e eletromagnética-acústica ((14) e (15)) são conectados a uma CPU central de sincronização, controle, aquisição, processamento, manipulação, e visualização dos dados coletados (unidade central de controle (16)).

**[0052]** Como visto na Figura 3, para que haja a geração do modo de onda longitudinal (1) por um sensor EMAT baseado em forças de Lorentz (8), é necessária a indução de um campo de correntes parasitas perpendicular ao comprimento do arame (7). Dada a disposição dos arames em forma de helicóide (9) ao redor do núcleo do duto ou cabo flexível, torna-se necessária a utilização de uma bobina toróide (ou, preferencialmente, um padrão em PCB flexível (17)) com enrolamento (ou geometria) conforme demonstrado na Figura 5a e 5b ou seja, com orientação perpendicular ao ângulo de enrolamento dos arames do duto ou cabo. Neste caso, o campo de correntes parasitas induzido nos arames será perpendicular à direção longitudinal do arame, como deve ser para a correta geração de forças de Lorentz (8) na direção longitudinal do arame (a efetiva geração sendo condicionada à interação deste campo de correntes (7) com um campo magnético (6) na direção radial do duto). O campo magnético (6) na direção radial do duto ou cabo é conferido pela presença de ímãs permanentes ou eletroímãs (18) dispostos ao redor da circunferência do duto ou cabo. Finalmente, a bobina toróide ou o PCB, os ímãs ou eletroímãs, e os cabos e componentes elétricos/eletrônicos, necessários para correta operação, são montados dentro de um invólucro para proteção mecânica e contra ação do ambiente. O conjunto de sensores eletromagnético-acústicos resultante (13), sendo um colar nesta concretização, que é bipartido para

permitir seu acoplamento ao duto ou cabo (como mostra a Figura 5c), pode ser instalado e removido, quando utilizado em modo de inspeção, ou pode ser instalado permanentemente, quando utilizado em modo de monitoramento contínuo.

**[0053]** Quando o sistema de monitoramento, compreendido pelo conjunto de sensores eletromagnético-acústicos (13) e seus módulos de captação eletromagnética-acústica (15), pelos módulos de captação óptica (14), e pela unidade central de controle (16), está corretamente instalado no duto ou cabo flexível, adota-se um método de inspeção ou monitoramento, sendo que as Figuras 6 e 7 mostram possíveis resultados deste método, através de gráficos de amplitude de sinal em função do tempo.

**[0054]** Quando acionado, conjunto de sensores eletromagnético-acústico (13) emite pulsos de ondas guiadas (1) ao longo dos arames (5), que são eventualmente captados pelos sensores ópticos individualmente instalados nos arames, o que é possibilitado pela eletrônica de alta taxa de aquisição dos módulos de captação óptica (14). Esta captura resulta no surgimento de um primeiro pulso (19) que é registrado pela unidade central de controle (16) conforme mostra a Figura 6a. Cada sensor óptico instalado individualmente sobre cada arame receberá um sinal similar ao da Figura 6a caso não haja dano naquele arame. Sabendo-se o local de instalação do conjunto de sensores eletromagnético-acústicos (13), sendo nesta concretização um colar de EMATs, e a distância deste até a terminação (10), pode-se determinar o tempo exato da chegada deste pulso através da velocidade dada pela curva de dispersão da Figura 1a para o modo longitudinal (1), para a frequência de geração estipulada pelo operador. A onda guiada, após passar pelos sensores ópticos, continua propagando até ingressar no restante da terminação (10), uma região geometricamente complexa, com curvaturas acentuadas dos arames e pontos de variação das condições do entorno dos arames, que geram muitas reflexões da onda incidente. Estas reflexões interferem de forma construtiva e destrutiva, e a onda refletida resultante propaga na direção oposta

à de incidência, novamente em direção aos sensores ópticos, onde é captada pelos módulos de captação óptica (14) e registrada na unidade central de controle (16), formando um sinal complexo (20), que não permite a identificação de reflexões individuais e nem a correlação de cada reflexão ao refletor que a gerou.

**[0055]** A Figura 6b mostra o resultado esperado caso haja uma ruptura completa de um dos arames da estrutura. Basicamente, não haverá captação de nenhum sinal acústico pelo sensor óptico acoplado ao arame rompido, resultando no desaparecimento dos pulsos (19) e (20) do sinal captado pelos módulos de captação óptica (14) e visualizado na unidade central de controle (16). A Figura 6c mostra o resultado esperado caso haja uma ruptura de um arame dentro da terminação (10). O padrão de interferências construtivas e destrutivas de reflexões providas do interior da terminação (10) será alterado devido à presença de uma reflexão de alta intensidade resultante da interação da onda guiada com a ruptura, levando ao surgimento de um sinal (21), que será diferente de (20). Por diferenciação entre os sinais providos de arames não rompidos (20) e rompidos (21), ou por comparação entre o sinal (21) e um sinal (20) obtido antes da ruptura do arame em questão, é possível perceber a mudança de conteúdo do sinal. A identificação desta alteração é imediata devido à grande amplitude da nova reflexão, provinda da ruptura.

**[0056]** Já a Figura 7a mostra o sinal esperado caso haja um evento que cause atenuação da onda incidente no arame. Tal situação é típica de um defeito que ainda não possui tamanho suficiente para levar o arame à ruptura completa (o defeito tem dimensões que ainda são menores que o tamanho de defeito crítico do arame), e que, portanto, ainda oferece alguma área remanescente de sua seção transversal, por onde a onda pode continuar propagando até chegar nos sensores ópticos. A redução de área de seção transversal, no entanto, causa a reflexão de uma parcela da energia da onda incidente, levando à captação de uma onda de amplitude reduzida pelos sensores ópticos e módulos de captação óptica (14) e unidade central de

controle (16). Exemplos de defeito que levam à atenuação de sinal são corrosão, trincas, e ingresso de líquidos na região dos arames (evento chamado “alagamento”). No caso dos líquidos, a seção transversal do arame pode estar intacta, mas o contato da superfície com o fluido leva a uma atenuação da onda. Este evento é importante, pois muitas vezes o líquido em questão é água do mar (quando há um rompimento da capa polimérica externa) ou produto interno (quando há ruptura de alguma camada interna de vedação), e ambos possuem efeitos deletérios à resistência dos arames, por mecanismos de corrosão ou corrosão-fadiga. A detecção deste tipo de evento possibilitaria, portanto, uma previsão de vida útil dos arames afetados. A Figura 7a mostra que os sinais (19) e (20) teriam uma redução em amplitude de todas as frequências contidas no sinal, ou, em alguns casos, uma atenuação dependente da frequência, resultando em novos sinais (22) e (23). Novamente, por comparação com sinais provindos de arames não defeituosos, ou com sinais coletados anteriormente para o arame afetado, seria possível identificar a mudança.

**[0057]** Caso haja um evento que cause atenuação da onda guiada dentro do conector (todos os eventos listados anteriormente, ou ainda perda de adesão entre o arame e a resina de ancoragem do arame no interior do conector (10), que leva a uma redução na atenuação causada pelo contato do arame com a resina), haveria uma mudança conforme demonstrado na Figura 7b, ou seja, haveria uma alteração na amplitude e conteúdo de frequências das reflexões (23) provindas do interior da terminação (10), que poderia ser identificada por comparação com sinais do próprio arame antes do evento, ou de arames não afetados (20).

**[0058]** Dessa forma, a presente invenção propicia a detecção e localização de rupturas de arames de tração, ou elementos estruturais similares, em dutos (risers ou flowlines) ou cabos (umbilicais) flexíveis, de eventos anteriores à ruptura de arames, como presença de trincas, corrosão, ingresso de líquidos na região dos arames, e perda de adesão entre os arames

e resinas de fixação destes em conectores ou terminações. Sendo capaz de inspecionar ou monitorar dezenas de metros da estrutura a partir de dois locais (ou regiões) de acoplamento de sensores, um interno e outro externo à estrutura, e permite a inspeção ou monitoramento de um trecho que compreende potencialmente desde a zona de variação de maré (ZVM) até o conector ou terminação de acoplamento do riser a uma unidade flutuante.

### **Exemplos**

**[0059]** Os exemplos aqui mostrados têm o intuito somente de exemplificar uma das inúmeras maneiras de se realizar a invenção, contudo sem limitar, o escopo da mesma.

#### **Exemplo I – sensores ópticos**

**[0060]** Novos desenvolvimentos em termos de eletrônica de operação destes sensores ópticos garante que eles possam ser interrogados com taxas de aquisição mais altas, o que permite o uso do mesmo sensor para captação de eventos de vibração ou acústica. Exemplo disto é a publicação “Full-spectrum interrogation of fiber Bragg gratings at 100kHz for detection of impact loading”, de T. Vella, S. Chadderdon, R. Selfridge, S. Schultz, S. Webb, C. Park, K. Peters e M. Zikry, Measurement Science and Technology, 21 (2010), que trata de sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas foram utilizados para detecção de eventos de impacto através do uso de interrogadores com taxas de aquisição da ordem de 100kHz. Também na publicação “Detection of fundamental shear horizontal mode in plates using fibre Bragg gratings”, de A.V. Harish, P. Ray, P. Rajagopal, K. Balasubramanian e B. Srinivasan, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2016, são relatados sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas foram utilizados para detecção de um modo de ondas guiadas, e foi possível atingir frequências de aquisição de até 1MHz com uma eletrônica especial de interrogação. Outras referências, detalhando diferentes sistemas e eletrônicas que permitem o uso de sensores baseados em redes de Bragg em

fibras ópticas para captação de ondas mecânicas, podem ser facilmente encontradas na literatura.

**[0061]** O sistema proposto na presente invenção, em uma concretização, utiliza os sensores ópticos posicionados diretamente sobre os arames de tração, como sugerido em PI 0801011-0 e BR 10 2013 007957-0 A2, ou seja, no interior de conectores que possuam ou não cápsulas de inspeção visual, para captação das ondas guiadas geradas a metros de distância por sensores EMATs posicionados por sobre a capa externa do riser.

**[0062]** Os versados na arte valorizarão os conhecimentos aqui apresentados e poderão reproduzir a invenção nas modalidades apresentadas e em outras variantes, abrangidas no escopo das reivindicações anexas.

### Reivindicações

1. Sistema de inspeção e monitoramento de arames da armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis **caracterizado** por compreender ao menos:

- a) sensores ópticos;
- b) módulos de captação óptica (14) ; e
- c) unidade central de controle (16) compreendendo meios de processamento ininterrupto;

em que,

- os sensores ópticos são acoplados aos arames de tração;
- módulos de captação óptica (14) são comunicantes com os sensores ópticos;
- a unidade central de controle (16) é eletronicamente comunicante aos módulos de captação óptica (14);
- a unidade central de controle (16) compreende meios de aquisição e processamento de dados.

2. Sistema de inspeção e monitoramento de arames da armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de os sensores ópticos estarem dispostos em redes de Bragg em fibras ópticas.

3. Sistema de inspeção e monitoramento de arames da armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 e 2, **caracterizado** por compreender adicionalmente:

- a. conjunto de sensores eletromagnético-acústico (13) e
- b. módulos de captação eletromagnético-acústica (15), em que:
  - o conjunto de sensores eletromagnético-acústicos (13) é acoplado externamente à estrutura do duto ou cabo flexível;
  - os sensores do conjunto (13) são associados aos módulos de captação eletromagnético-acústica (15) compreendendo meios de controle e de excitação do conjunto de sensores eletromagnético-acústicos (13);

- os módulos de captação eletromagnética-acústica (15) são comunicantes a unidade central de controle (16).

4. Sistema de inspeção e monitoramento de arames da armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, **caracterizado** pelo fato de o conjunto de sensores eletromagnético-acústico (13) ser um colar de EMATs.

5. Sistema de inspeção e monitoramento de arames da armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis, de acordo com qualquer uma das reivindicações 2 a 4, **caracterizado** pelo fato de o módulo central (16) apresentar meios de sincronização e processamento de dados provindos dos módulos de captação óptica (14), módulos de captação eletromagnético-acústica (15), sensores ópticos e conjunto de sensores eletromagnético-acústicos (13).

6. Método de inspeção e monitoramento de arames da armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis, **caracterizado** por ser implementado no sistema de acordo com as reivindicações 1 a 4 e por compreender ao menos as etapas de:

- a. aquisição de sinal provindo de sensores ópticos na unidade central de controle (16) interruptamente;
- b. processamento e análise de sinal na unidade central de controle (16); e
- c. detecção de ocorrência de evento dinâmico.

7. Método de inspeção e monitoramento, de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado** pelo fato de compreender a detecção de ondas acústicas resultantes de ocorrência de evento dinâmico.

8. Método de inspeção e monitoramento, de acordo com qualquer uma das reivindicações 6 e 7, **caracterizado** por compreender a geração de ondas acústicas guiadas nos arames por meio do conjunto de sensores (13) e dos módulos de captação eletromagnética-acústica (15), em intervalos pré-estabelecidos.

9. Método de inspeção e monitoramento, de acordo com qualquer uma das reivindicações 6 a 8, **caracterizado** pelo fato da unidade central de controle (16) sincronizar os sinais coletados a partir dos sensores ópticos e módulos de captação óptica (14) com dados provenientes do conjunto (13) e dos módulos de captação eletromagnético-acústica (15), de forma a identificar a recepção das ondas acústicas guiadas, e de suas características de interação com os arames, pelos sensores ópticos.

10. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações de 6 a 9, **caracterizado** pelo fato do módulo central ser capaz de detectar a ocorrência de rupturas, defeitos, e eventos de interesse, através da percepção e quantificação de alterações no primeiro sinal de recepção da onda acústica guiada (19), e do padrão de reflexões (20) provenientes da região da terminação (10), nos sinais coletados nos arames pelos sensores ópticos e módulos de captação óptica (14).

FIGURAS

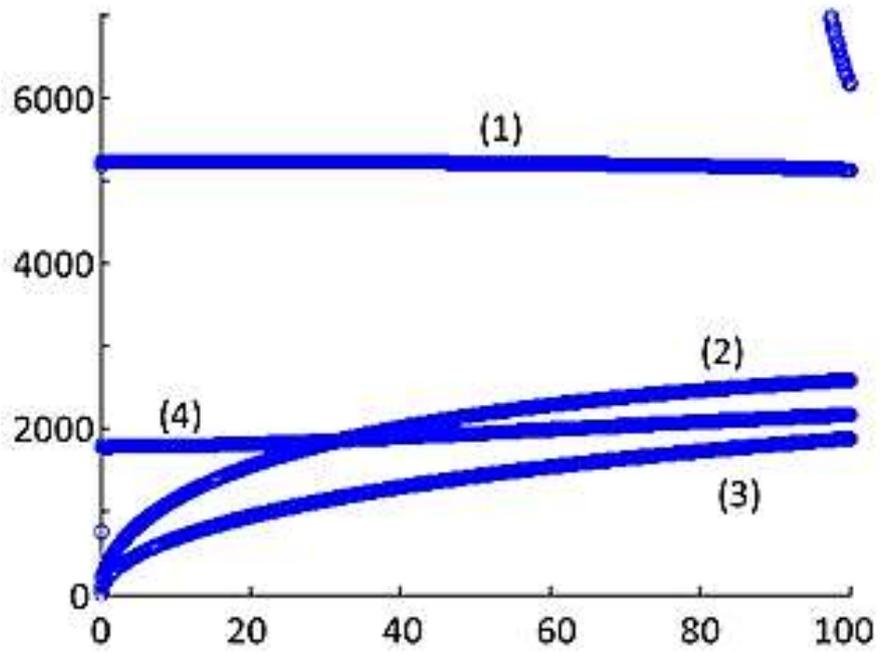


Figura 1a

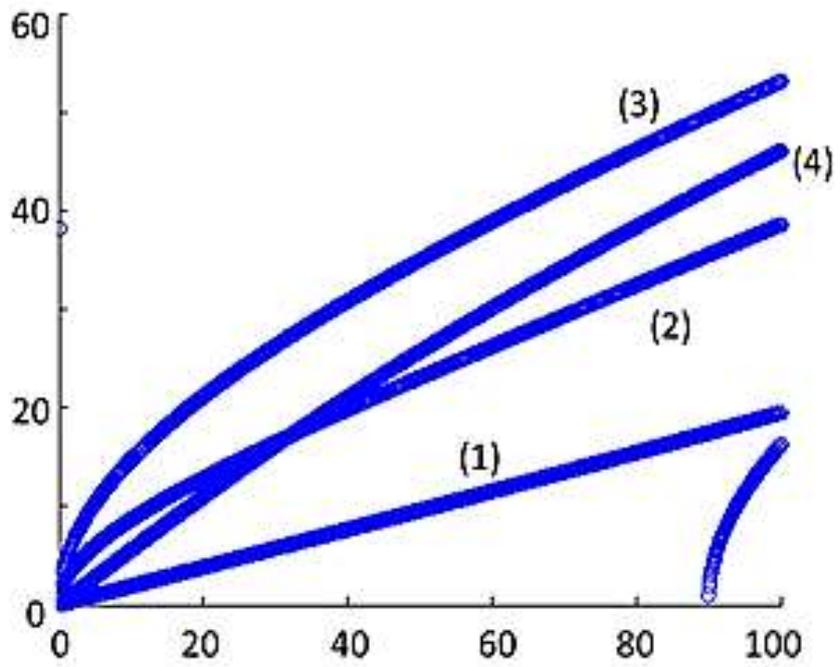


Figura 1b

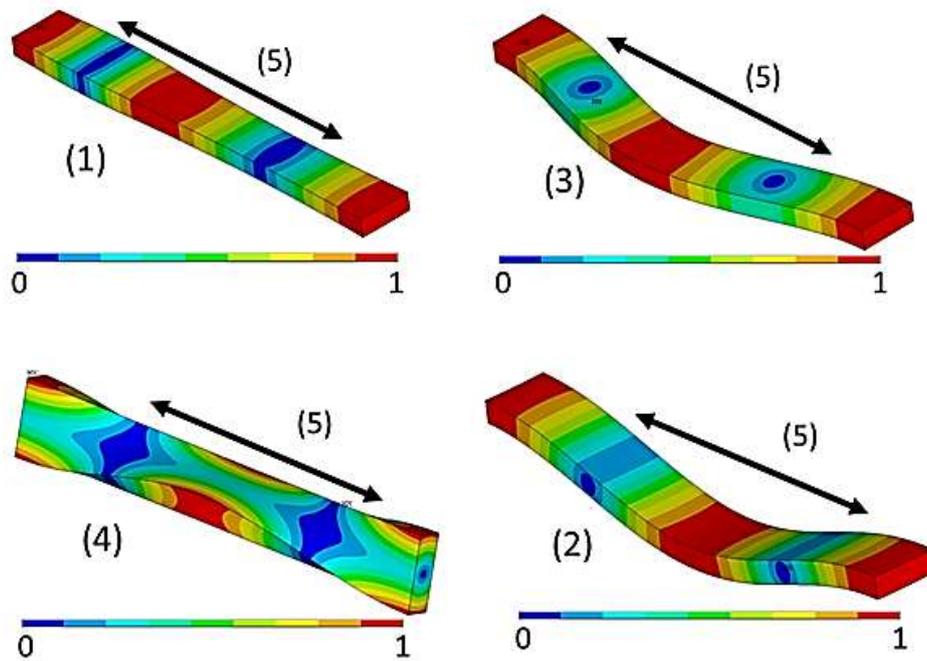


Figura 2

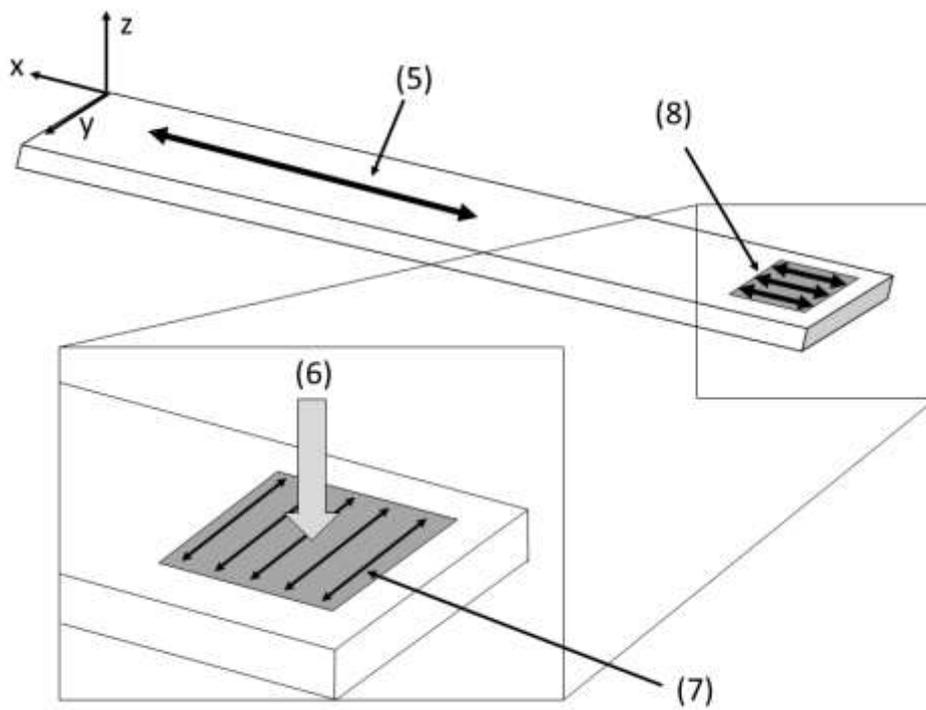


Figura 3

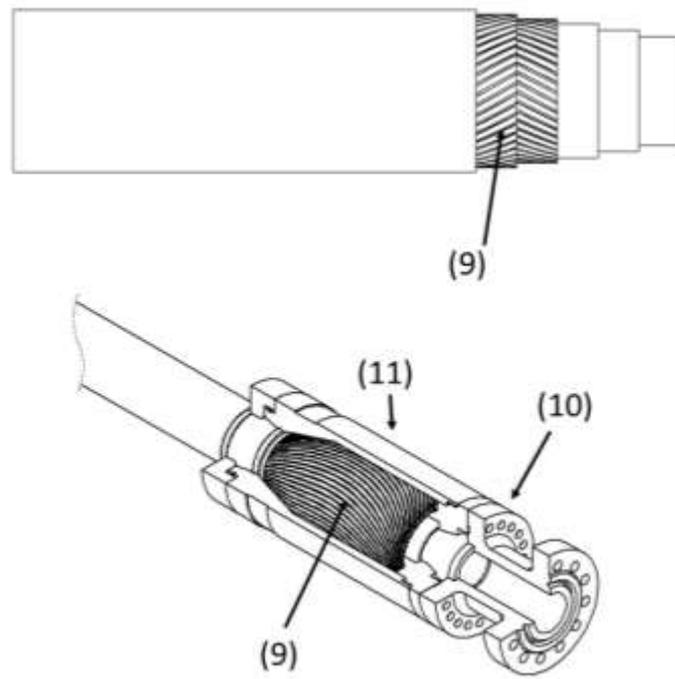


Figura 4a

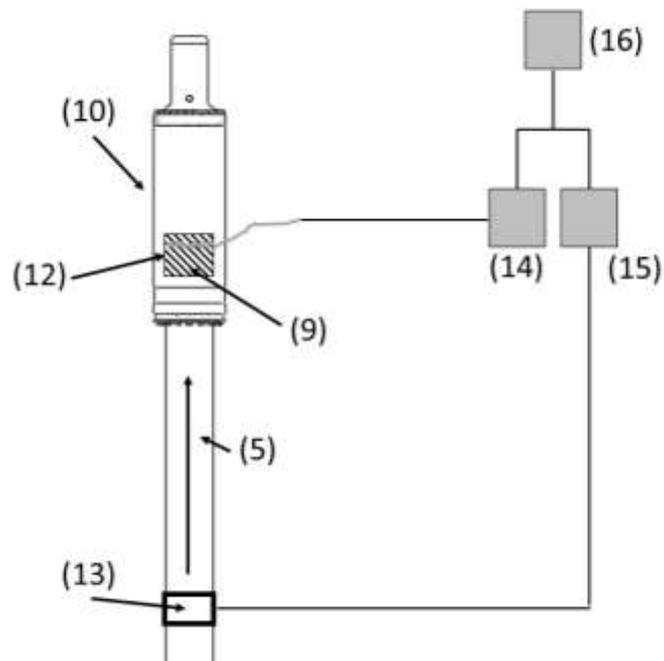


Figura 4b

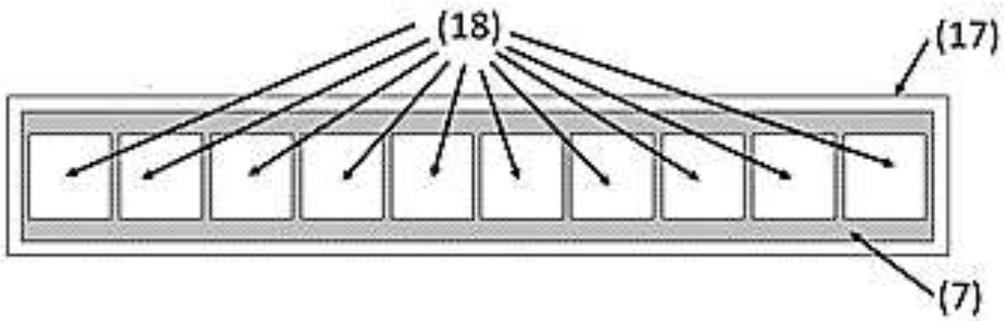


Figura 5a

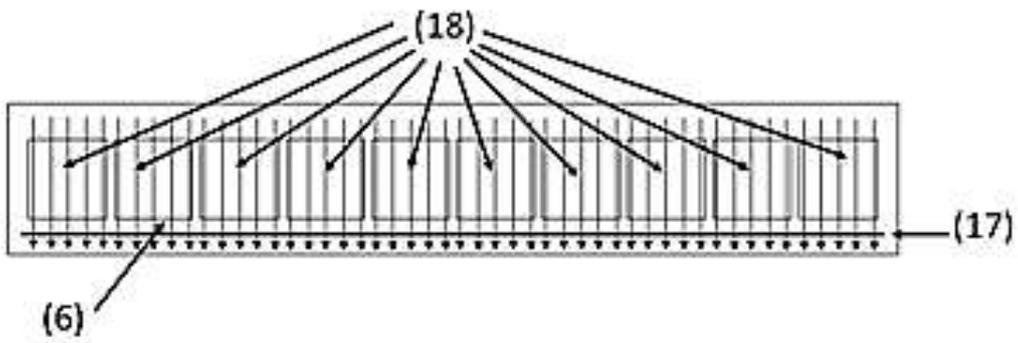


Figura 5b

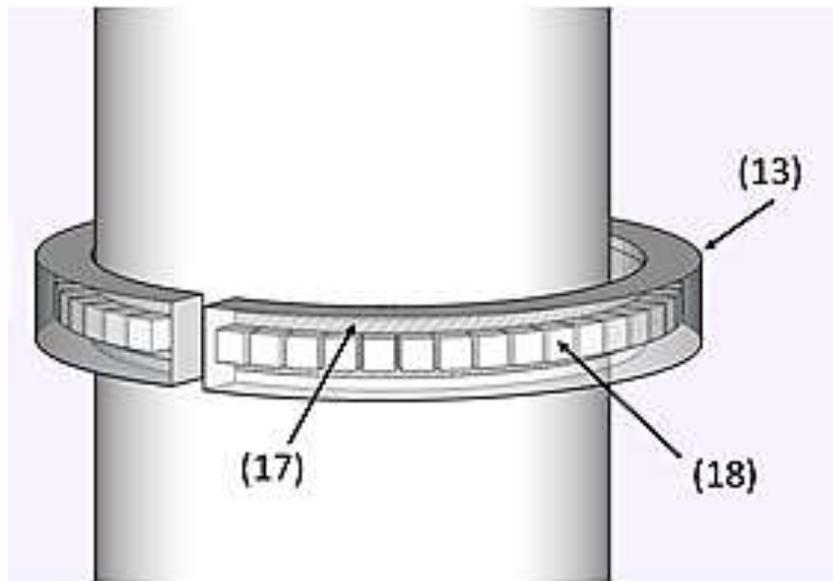


Figura 5c

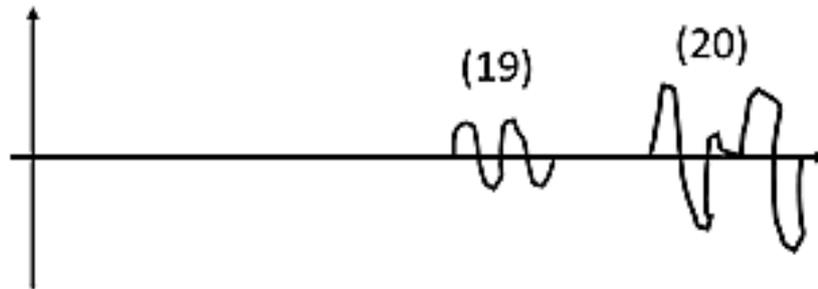


Figura 6a



Figura 6b

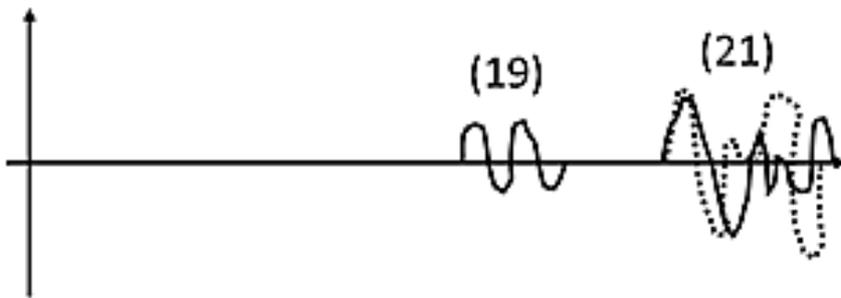


Figura 6c

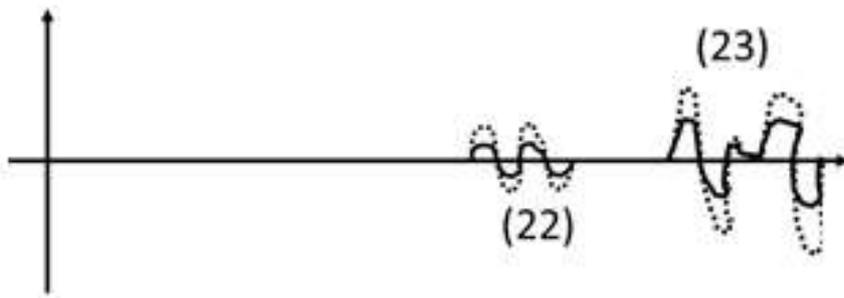


Figura 7a

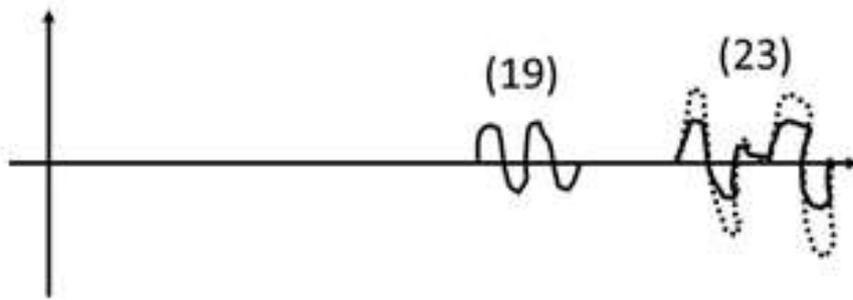


Figura 7b

**Resumo****SISTEMA E MÉTODO DE INSPEÇÃO E MONITORAMENTO DE ARAMES DE ARMADURA DE TRAÇÃO DE DUTO OU CABO FLEXÍVEIS**

A presente invenção se refere a um sistema e método de inspeção ou monitoramento de arames de armadura de tração de dutos ou cabos flexíveis. O sistema compreende a captação de ondas acústicas por sensores baseados em redes de *Bragg* em fibras ópticas, posicionados internamente à estrutura, acoplados diretamente aos arames de tração e sensores eletromagnético-acústicos acoplados externamente à estrutura, gerando ondas guiadas acústicas em arames de tração da estrutura. Permitindo a detecção de defeitos nos arames (como corrosão, trincas, rupturas, delaminações), a ocorrência de alagamento do anular, e a perda de adesão entre os arames de tração e resinas de fixação em conectores ou terminações. A presente invenção se aplica nas áreas de Engenharia Mecânica, Engenharia Naval e Engenharia do Petróleo, mais especificamente nos campos de monitoramento de dutos.