



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI0609787-1 A2**

(22) Data de Depósito: 13/04/2006
(43) Data da Publicação: 11/10/2011
(RPI 2127)



(51) *Int.Cl.:*
G01B 11/16

(54) Título: MÉTODO PARA APLICAR UM SENSOR DE ESFORÇO A UMA ESTRUTURA CILÍNDRICA, PARA MONITORAR UMA DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA

(57) Resumo: MÉTODO PARA APLICAR UM SENSOR DE ESFORÇO A UMA ESTRUTURA CILÍNDRICA, PARA MONITORAR UM DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA. Método de determinar uma aplicação preferida de uma pluralidade de sensores de esforço a uma estrutura é revelado, para monitorar e formar imagem de deformação da estrutura quando ela é sujeita a várias forças.

(30) Prioridade Unionista: 15/04/2005 US 11/107270

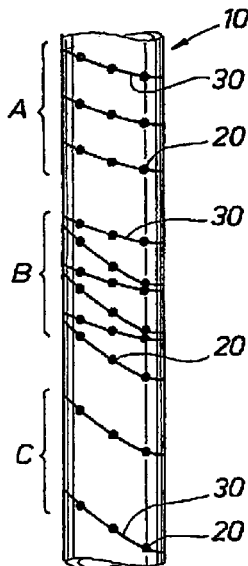
(73) Titular(es): SHELL INTERNATIONALE RESEARCH
MAATSCHAPPIJ B. V.

(72) Inventor(es): FREDERICK HENRY KREISLER RAMBOW

(74) Procurador(es): Momsen, Leonardos & CIA.

(86) Pedido Internacional: PCT US2006013823 de
13/04/2006

(87) Publicação Internacional: WO 2006/113327de
26/10/2006



“MÉTODO PARA APLICAR UM SENSOR DE ESFORÇO A UMA ESTRUTURA CILÍNDRICA, PARA MONITORAR UMA DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA”

Campo da Invenção

5 A presente invenção refere-se a um método para aplicar um sensor de esforço a uma estrutura cilíndrica, para monitorar a deformação da estrutura.

Fundamentos da Invenção

10 Poços em sedimentos compactáveis (ou áreas tectonicamente ativas) estão sujeitos a deformação no correr da vida produtiva do campo. O resultado é a perda catastrófica de zonas de produção até, e incluindo, à perda de um poço inteiro. O problema é exacerbado pelas taxas de descarga crescentemente rápidas e a completação de múltiplas zonas em um único poço. Um fenômeno observável é que, a princípio, um revestimento de poço
15 se curvará ou começará a se empenar, freqüentemente, em junções de revestimento, ou interfaces na formação. À medida que a compactação continua, o movimento resulta em um desalinhamento significativo do eixo de poço. O resultado pode ser a perda completa do investimento de poço, resultando no adiamento e/ou perda de produção, se não, no custo de substituição de um poço, o que é extremamente caro. A capacidade de
20 detectar precocemente a curvatura preveniria um empenamento ou colapso posterior e permitiria mudanças nas práticas de produção e/ou de ação remediadora. A detecção de forças de deformação, no local, pode se tornar um problema complexo, particularmente quando essas forças incluem tensões
25 axial, de arco e de cisalhamento.

A fibra óptica que é tratada com as Grades de Bragg de Fibra pode ser adequada para o uso em monitorar o esforço de compactação induzida sobre a estrutura tubular. As Grades de Bragg de Fibra podem ser feitas expondo-se lateralmente o núcleo de uma fibra de modo unitário a um

padrão periódico de luz UV intensa. Isso cria áreas de índice refrativo aumentado dentro da fibra. A modulação de índice fixada é referida como Grade de Bragg de Fibra (aqui “FBG”). Todos os sinais de luz refletidos se combinam coerentemente para uma grande reflexão a um comprimento de onda quando o período de grade é igual à metade do comprimento de onda de entrada. Para todos os intentos e propósitos, a grade é transparente para outros comprimentos de onda de luz. A luz, portanto, se move através da grade com atenuação insignificante ou variação de sinal com apenas o comprimento de onda de Bragg sendo afetado, ou seja fortemente refletida em cada sensor de FBG. Em outras palavras, a frequência de centro da grade está diretamente relacionada ao período de grade, que é afetado pelas mudanças térmicas ou mecânicas no ambiente. Desse modo, a temperatura, o esforço e outros parâmetros de engenharia podem ser calculados medindo-se a mudança normalizada no comprimento de onda refletido. Ser capaz de pré-ajustar e manter o comprimento de onda de grade é, desse modo, o que torna os sensores de FBG tão úteis. Ver “Fiber Bragg Grating” 3M US Online, de 27 de novembro de 2000.

A Patente US 6.854.327, incorporada aqui pela referência, descreve o uso de sensores de FBG curvados, ao invés de esticados, que alteram a reflexão de amplitude e a frequência alargada. Os sensores de FBG reagem às forças de deslocamento com uma resposta de comprimento de onda alterada previsível que pode ser comparada a uma curva de calibragem para calcular a forma e a magnitude do deslocamento. Um modo de realização é descrito como uma fibra óptica de forma helicoidal, onde os sensores de FBG são posicionados nas curvas da fibra óptica.

Existe, portanto, uma necessidade de determinar uma aplicação preferida dos sensores de esforço para uma estrutura tubular para detectar e medir grandes deformações da estrutura.

Sumário da Invenção

Em um modo de realização, é provido um método de aplicar um sensor de esforço a uma estrutura cilíndrica, para monitorar a deformação da estrutura, o método compreendendo:

5 selecionar uma sensibilidade desejada para o esforço axial na estrutura cilíndrica;

 determinar pelo menos um fator de esforço correspondendo à sensibilidade desejada, que em pelo menos um fator de esforço representa um coeficiente entre o esforço transmitido ao sensor de esforço como causado pelo esforço axial na estrutura cilíndrica e o esforço axial na estrutura
10 cilíndrica;

 determinar um ângulo de enrolamento preferido em relação a uma linha de referência imaginária se estendendo ao longo de uma superfície da estrutura cilíndrica, na dependência de pelo menos um fator de esforço determinado; e

15 aplicar o sensor de esforço à estrutura cilíndrica alinhado com o ângulo de enrolamento preferido para medir o esforço na direção do ângulo de enrolamento preferido.

 A invenção é baseada no discernimento de que, selecionando-se um ângulo de enrolamento preferido, a quantidade de esforço a que o sensor de esforço será exposto, e mesmo o sinal do esforço (tensão versus
20 compressão) podem ser regulados. Isso abre um caminho para várias aplicações, como será apresentado abaixo na descrição a seguir.

 Não foi proposta para o requerente uma aplicação preferida de um sistema de sensor de esforço, com base em um ângulo de enrolamento preferido. Com base na seleção do ângulo de enrolamento, a aplicação dos
25 sensores de esforço – particularmente um sistema de FBG – a uma estrutura tubular pode ser talhada exclusivamente para detectar e medir vários tipos e níveis de esforço que a estrutura tubular provavelmente encontrará em um ambiente particular. Desse modo, o esforço sobre a estrutura tubular pode ser

detectado mais precisamente, no local, e medido em tempo real. Como resultado, a deformação da estrutura tubular pode ser antecipada, se não impedida.

Esses e outros aspectos, características e vantagens da presente invenção serão descritos na descrição a seguir dos vários modos de realização e desenhos relacionados.

Breve Descrição dos Desenhos

A presente invenção é ilustrada em maior detalhe abaixo com referência às FIGS. de desenhos anexos, onde:

10 A FIG. 1 é uma vista elevacional de uma estrutura cilíndrica ilustrando uma pluralidade de sensores ou transdutores aplicados à estrutura ao longo de três seções (A, B, C) diferentes da estrutura;

a FIG. 1A é uma perspectiva linear da seção A na FIG. 1;

15 a FIG. 2 é um gráfico ilustrando a determinação do número preferido de sensores de esforço (N) e do número preferido de voltas necessárias para cobrir um comprimento predeterminado;

a FIG. 3 é um gráfico ilustrando a relação entre o fator de esforço (m) e vários ângulos de enrolamento (θ);

20 a FIG. 3A é um gráfico ilustrando a relação entre o fator de esforço (m) e o ângulo de enrolamento (θ) de acordo com um coeficiente de Poisson (ν) predeterminado;

a FIG. 4 é um gráfico ilustrando a relação entre o esforço (ϵ) aplicado ao aço e o correspondente coeficiente de Poisson (ν);

25 a FIG. 5 é um gráfico ilustrando a relação entre o comprimento da fibra de sensoreamento e o comprimento da estrutura tubular versus o ângulo de enrolamento (θ);

a FIG. 6 é uma ilustração gráfica da resposta de comprimento de onda resultante, em relação ao sensor de esforço numerado D_N , a partir de uma estrutura cilíndrica suportando cisalhamento de desvio em um teste

controlado;

a FIG. 7 é uma vista elevacional de uma estrutura cilíndrica ilustrando as forças de cisalhamento sobre a estrutura;

5 a FIG. 7A é uma imagem de uma resposta de comprimento de onda ilustrando o esforço correspondente medido pelos sensores de esforço na FIG. 7;

10 a FIG. 8 é um gráfico ilustrando a resposta de comprimento de onda resultante a partir da força lateral aplicada pelo peso de uma tubulação, plotado como troca de comprimento de onda ($\Delta\lambda$) versus o número de grade (D_N);

15 a FIG. 9 é um gráfico mostrando a resposta de comprimento de onda resultante a partir das forças provenientes de um peso suspenso a partir do centro da tubulação suspensa horizontalmente em cada extremidade, plotado como troca de comprimento de onda ($\Delta\lambda$) versus o número de grade (D_N);

a FIG. 10 é uma vista elevacional de uma estrutura cilíndrica ilustrando as forças de encurvamento sobre uma estrutura;

20 a FIG. 10A é uma imagem de uma resposta de comprimento de onda ilustrando o esforço correspondente medido pelos sensores de esforço na FIG. 10;

a FIG. 11 é um gráfico ilustrando a resposta de comprimento de onda resultante da aplicação de uma força de esmagamento aplicada próximo ao centro da tubulação da FIG. 8, plotado como troca de comprimento de onda ($\Delta\lambda$) versus o número de grade (D_N);

25 a FIG. 12 é um gráfico ilustrando a resposta de comprimento de onda para a tubulação da FIG. 11, plotado como troca de comprimento de onda ($\Delta\lambda$) versus o número de grade (D_N), onde os grampos próximos ao centro da tubulação foram girados 90 graus;

a FIG. 13 é uma vista elevacional de uma estrutura cilíndrica

ilustrando as forças de esmagamento ou de ovalização sobre a estrutura;

a FIG. 13A é uma imagem de uma resposta de comprimento de onda ilustrando o esforço correspondente medido pelos sensores de esforço na FIG. 13;

5 a FIG. 13B é uma vista de topo da FIG. 13;

a FIG. 14 é um gráfico ilustrando a relativa amplitude de esforço (W_A) como uma função do ângulo de azimute (ϕ) nos graus ao redor de uma estrutura tubular;

10 a FIG. 15 é um gráfico ilustrando o fator de esforço (m), e a troca de nm, versus o ângulo de enrolamento (θ) para um material estrutural suportando deformação plástica.

a FIG. 16 é um gráfico ilustrando a troca de comprimento de onda ($\Delta\lambda$) plotada versus número de grade (D_N) para níveis de variação do esforço axial aplicado;

15 a FIG. 17 é um gráfico comparando a resposta de comprimento de onda média, de pico e de raiz quadrada média (rms) com a resposta de comprimento de onda calculada ou esperada, plotado como troca de comprimento de onda $\Delta\lambda$ (nm) versus o esforço axial aplicado ϵ_a (%);

20 a FIG. 18 é um gráfico ilustrando a troca de comprimento de onda $\Delta\lambda$ média (real) sobre os sensores de esforço aplicados em cada nível do esforço axial aplicado ϵ_a (%), comparada à troca de comprimento de onda calculada;

25 a FIG. 19 é um gráfico da troca de comprimento de onda $\Delta\lambda$ (nm) versus o número de grade (D_N), ilustrando uma resistência axial de cerca de zero;

a FIG. 20 é um gráfico de troca de comprimento de onda $\Delta\lambda$ (nm) versus o número de grade (D_N), ilustrando um esforço axial aplicado de 0,25 por cento;

a FIG. 21 é um gráfico da troca de comprimento de onda $\Delta\lambda$

(nm) versus o número de grade (D_N), ilustrando um esforço axial aplicado de 0,75 por cento;

a FIG. 22 é uma vista elevacional de uma estrutura cilíndrica ilustrando forças de compressão sobre a estrutura;

5 a FIG. 22A é uma imagem de uma resposta de comprimento de onda ilustrando o esforço correspondente medido pelos sensores de esforço na FIG. 22;

a FIG. 23 é um gráfico teórico do esforço delta $\Delta\varepsilon$ versus a distância (d) ao longo de uma linha acima de um reservatório.

10 Descrição Detalhada dos Modos de Realização Preferidos

A matéria da presente invenção é descrita com especificidade, entretanto, a própria descrição não é pretendida para limitar o escopo da invenção. A matéria reivindicada, desse modo, também poderia ser corporificada de outras maneiras para incluir diferentes etapas ou
15 combinações de etapas semelhantes àquelas descritas aqui, em conjunto com outras tecnologias presentes ou futuras. Além do mais, embora o termo “etapa” possa ser usado aqui para sugerir diferentes métodos empregados, o termo não deveria ser interpretado como subentendendo qualquer ordem particular em meio a, ou entre várias etapas aqui reveladas, exceto quando a
20 ordem das etapas individuais for explicitamente descrita.

A descrição a seguir se refere ao uso dos sensores de esforço na forma de uma pluralidade de transdutores que podem compreender um ou mais sensores de FBG convencionais como, por exemplo, os transdutores descritos nas patentes US 5.798.521, 6.426.496, ou 6.854.327.

25 Opcionalmente, os sensores de FBG podem ser

i) especialmente tratados (chamejados por curto período) como descrito em “Characteristics of short-period blazed FBG sensors for use as macro-bending sensors”, APPLIED OPTICS, 41, 631-636 (2002), Baek, S., et al.; e/ou

ii) curvados como descrito em “Long-Period Fiber Grating Bending Sensors in Laminated Composite Structures”, SPIE Conference on Sensory Phenomena and Measurement Instrumentation for Smart Structures and Materials, março de 1998, San Diego, Califórnia, SPIE, volume 3330, 284-292, Du, W., et al.; e/ou

iii) embrulhados como descrito em “Ultrastrong Fiber Gratings and Their Applications”, SPIE Conference Phototonics East “Optical Fiber Reliability and Testing”, 3848-26, 20 de setembro de 1999, Starodubov, D. S., et al.

10 A presente invenção, entretanto, não está limitada ao uso dos sensores de tipo FBG e pode ser implementada com sensores ou transdutores convencionais capazes de detectar esforço axial e/ou radial como, por exemplo, níveis de esforço como os descritos em “Strain Gauge Technology”, A. L. Window (Editor), Elsevier Science Pub. Co., 2ª edição, novembro de 15 1992. Desse modo, as técnicas e métodos recentes descritos aqui podem ser implementados a aplicados através do uso de qualquer tipo de sensor ou transdutor de esforço capaz de detectar sinais e transmitir sinais, independentemente de se ele é um sensor de FBG, sensor ou transdutor de nível de esforço ou de outro tipo convencional. Além disso, o uso de uma 20 fibra óptica como um meio de transmissão para ilustrar várias aplicações da invenção descritas aqui não é exclusivo de outros meios de transmissão bem conhecidos que podem ser usados para conectar os transdutores como, por exemplo, fios elétricos, que são capazes de transmitir energia e sinal. Além disso, transdutores sem fio convencionais podem ser usados, desde que eles 25 incluam uma fonte de energia.

Com referência agora à FIG. 1, uma vista elevacional de uma estrutura cilíndrica 10, como, por exemplo, uma estrutura tubular (por exemplo, um tubo de perfuração) ou revestimento, é ilustrada com uma pluralidade de sensores de tipo FBG 20 aplicada à estrutura 10 sobre uma

fibra 30 a diferentes ângulos de enrolamento preferidos em seções A, B e C. A FIG. 1A é uma perspectiva linear da seção A na FIG. 1, ilustrando a fibra 30 enrolada ao redor da tubular 10 em um ângulo de enrolamento preferido representado por θ_1 ou θ_2 . O ângulo de enrolamento preferido pode ser medido em relação a uma primeira linha de referência imaginária 40 se estendendo longitudinalmente ao longo de uma superfície da estrutura 10. Alternativamente, o ângulo de enrolamento pode ser medido em relação a uma segunda linha de referência imaginária 50 circundando a estrutura 10, que também representa a circunferência (C) na FIG. 1A. Para o propósito de seguir a descrição, entretanto, o ângulo de enrolamento θ e o ângulo de enrolamento preferido θ_1 são definidos em relação à segunda linha de referência imaginária 50 e são representados por θ_1 . Apesar disso, θ_2 poderia ser usado, ao invés disso, simplesmente substituindo-se $\pi/2 - \theta_2$ por θ_1 ou calculando θ_1 com base em θ_2 como $\theta_1 = 90^\circ - \theta_2$.

Na FIG. 1A, o comprimento de uma volta da fibra 30 ao redor da estrutura 10 é representado como S. A distância ao longo da primeira linha imaginária 40, que pode ser a distância vertical entre cada volta da fibra 30, é representada como L. As relações entre θ_1 , L, X, S, e C são ilustradas por: $L=S*\text{sen}(\theta_1)$ e $C=S*\text{cos}(\theta_1)$. Nessa geometria transformada, S representa a hipotenusa de um triângulo reto formado por L, C e S.

O esforço axial ao longo do eixo da estrutura 10 causado pela compactação pode ser representado como $\varepsilon=\Delta L/L$. O esforço axial ao longo do eixo da estrutura 10 causado pela compactação pode ser traduzido para o esforço no sensor de esforço 20 e representado como $\varepsilon_f = \Delta S/S$, que pode se manifestar no sensor de esforço 20 como , tensão axial, de arco e/ou de cisalhamento. A relação entre o esforço (ε_f) no sensor de esforço 20 e sua resposta de comprimento de onda é, portanto, representada por:

$$\Delta\lambda = \lambda(1 - P_e)K\varepsilon_f$$

onde $\Delta\lambda$ representa uma troca de comprimento de onda de sensor de esforço

devida ao esforço (ϵ_f) imposto sobre o sensor de esforço 20 e λ representa o comprimento de onda médio do sensor de esforço 20. O coeficiente de adesão do sensor de esforço 20 a um substrato ou sistema sobre o qual o esforço deve ser medido é representado por K.

5 Uma resposta “combinada” para o encurvamento (também arqueamento, cisalhamento) e esforço axial pode ser representada por:

$$\Delta\lambda = \lambda(1 - P_e) \cdot K \cdot \left(-1 + \sqrt{\sin^2 \theta \cdot \left(1 - \left(\epsilon - \frac{r \cos \phi}{R}\right)\right)^2 + \cos^2 \theta \cdot \left(1 + \nu \left(\epsilon - \frac{r \cos \phi}{R}\right)\right)^2} \right)$$

onde $\Delta\lambda$ é a troca de comprimento de onda medida sobre uma dada grade e λ é o comprimento de onda original da grade que pode nominalmente ser de 1560 nanômetros. O termo $(1 - P_e)$ é uma resposta de fibra que é nominalmente de 0,8. O coeficiente de adesão K pode ser tipicamente de 0,9 ou maior. O ângulo de enrolamento (ou ângulo de orientação do sensor) com relação ao primeiro eixo imaginário da tubular é representado por θ . O esforço axial ϵ sobre a tubular que pode ser proveniente da compactação ou de outra fonte externa. O raio da estrutura tubular ou cilíndrica é representado por r, e ϕ é um ângulo de azimute arbitrário com relação a alguma referência ao longo do eixo da tubular que permite orientar a direção da deformação ou encurvamento com relação a esta. O R maiúsculo representa o raio de encurvamento da deformação ou encurvamento da tubulação. À medida que o raio de encurvamento se torna muito grande (tubulação inflexível reta), essa porção do sinal desaparece. O coeficiente de Poisson ν da estrutura pode mudar com o esforço. Uma medição independente pode ser empregada para extrair o valor ν . Pode-se, usando dois ângulos de enrolamento simultaneamente, resolver isso.

25 Por simplicidade, nos exemplos que seguem, o coeficiente de adesão (K) é presumido para ser constante. P_e representa o efeito de esforço e temperatura sobre o índice de refração do sensor de esforço 20. P_e pode ser uma função de esforço e temperatura, incluindo o torque sobre o sensor de

esforço 20, mas é insignificante nos exemplos a seguir. Visto que é bem conhecido que as variações de temperatura podem comunicar esforço adicional à fibra 30, aos sensores de esforço 20 e à estrutura 10, que afeta o índice de refração na fibra 30, as variações de temperatura podem ser consideradas independentemente para calibrar as medições de esforço. Isso pode facilmente ser feito tanto por uma medição de temperatura separada que poderia ser realizada desacoplando-se mecanicamente comprimentos curtos da fibra 30 da estrutura 10, usando uma fibra semelhante mas separada que é inteiramente desacoplada mecanicamente da estrutura 10 quanto por quaisquer outros meios de medir a temperatura na vizinhança da estrutura 10 suportando a medição de esforço.

As propriedades anteriores podem ser usadas para relacionar o esforço (ϵ_f) no sensor de esforço 20 ao esforço de compactação (ϵ) na estrutura 10. O esforço (ϵ_f) no sensor de esforço 20 pode ser relacionado ao ângulo de enrolamento preferido (θ_1) e ao esforço (ϵ) ao longo do eixo da estrutura 10 por:

$$\frac{\Delta S}{S} = -1 + \sqrt{\text{sen}(\theta_1)^2 * (1 - \epsilon)^2 + \text{cos}(\theta_1)^2 * (1 + \nu \epsilon)^2}$$

O coeficiente de Poisson (ν) é uma propriedade importante da estrutura 10, que é relevante para o esforço (ϵ) que a estrutura 10 pode encontrar, como ilustrado nos exemplos a seguir.

O fator de esforço relacionando o esforço axial (ϵ) na estrutura 10 ao esforço (ϵ_f) transmitido ao sensor de esforço 20 é representado por:

$$m = \frac{-1 + \sqrt{\text{sen}(\theta_1)^2 * (1 - \epsilon)^2 + \text{cos}(\theta_1)^2 * (1 + \nu \epsilon)^2}}{\epsilon}$$

que também pode ser traduzido para:

$$\Delta S / S = m * \Delta L / L = m * \epsilon.$$

A comparação do fator de esforço (m) com outras variáveis revela que ele é altamente sensível ao ângulo de enrolamento preferido (θ_1), um pouco sensível ao coeficiente de Poisson (ν), e bastante insensível ao esforço axial

aplicado (ϵ).

Aplicação dos sensores

As exigências primárias para sensibilidade e resolução são um número suficiente de sensores 20 posicionados ao redor da circunferência (C) da estrutura 10 e espaçamento vertical adequado entre os sensores 20, de modo que um padrão senoidal associado a uma força de encurvamento, deformação, cisalhamento ou esmagamento (ovalização) possa ser claramente detectado e com imagem formada. Como demonstrado pelas relações abaixo, a sensibilidade ao esforço axial e ao esforço radial, e, desse modo, ao esforço de encurvamento, também é uma função do ângulo de enrolamento preferido (θ_1).

De preferência, pelo menos dez sensores de esforço 20 por volta da fibra 30 podem ser usados para capturar adequadamente um ciclo do sinal senoidal produzido por uma deformação da estrutura 10. Também é desejável ter pelo menos de oito a dez giros ou voltas da fibra 30 cobrindo a distância vertical da estrutura 10 sobre a qual se espera que ocorra a deformação. Menos sensores de esforço 20 reduzirão a resolução e capacidade de distinguir de modo não ambíguo entre uma deformação de tipo encurvamento, deformação, cisalhamento ou esmagamento. Em termos do ângulo de enrolamento preferido (θ_1) e do diâmetro (D) (em polegadas) da estrutura 10, o comprimento da estrutura 10 (em pés) coberto por cada volta é representado como:

$$L_1 = \frac{\pi * D * \tan(\theta_1)}{12}$$

Para obter o comprimento em pés, o comprimento em metros deve ser dividido por 0,30. Para obter o diâmetro em polegadas, o diâmetro em centímetros deve ser dividido por 2,54.

Em termos do ângulo de enrolamento preferido (θ_1) e do diâmetro (D) (em polegadas) (1 pol = 2,54 cm) da estrutura 10, o comprimento de uma volta ao redor da estrutura 10 (em pés) (1 pé = 30,48

cm) é representado como:

$$S_1 = \frac{\pi * D * \cos(\theta_1)}{12}$$

O comprimento total da fibra 30 (em pés) com base em um número preferido de voltas (N_w) ao redor da estrutura 10 e no comprimento de uma volta (S_1) ao redor da estrutura 10 (em pés) é representado como:

$$S = S_1 * N_w$$

5 O comprimento axial da fibra 30 (em pés) ao longo da estrutura 10 é baseado em um número preferido de voltas (N_w) ao redor da estrutura 10 e o comprimento da estrutura 10 (em pés) coberto entre cada volta é representado como:

$$Z = L_1 * N_w$$

10 Desse modo, o número preferido de voltas (N_w) ao redor da estrutura 10 pode ser determinado pelo comprimento axial (Z) da estrutura 10 enrolada na fibra 30 dividido pelo comprimento (L_1) da estrutura 10 coberto entre cada volta da fibra 30. Em adição ao ângulo de enrolamento preferido (θ_1), o número preferido de voltas (N_w) pode ser usado para determinar uma aplicação preferida da fibra 30 e dos sensores de esforço 20 à estrutura 10.

15 O espaçamento de sensor de esforço pode ser tão curto quanto 1 centímetro ou tão longo quanto o necessário para acomodar um número judicioso de sensores de esforço 20 por volta da fibra 30 sobre uma estrutura 10 tendo um diâmetro maior. O número total de sensores de esforço 20 por volta da fibra 30 como uma função do espaçamento de sensor de esforço (S_g)
20 (em centímetros) e o comprimento de volta (S_1) é representado como:

$$n = \frac{2.54 * S_1 * 12}{S_g} = \frac{2.54 * \pi * D * \cos(\theta_1)}{S_g}$$

Presumindo que todos os sensores de esforço 20 sobre a fibra estejam dentro da porção enrolada da fibra 30, então, o número total de sensores de esforço 20 sobre a fibra 30 é representado como:

$$N = \frac{2.54 * S * 12}{S_g} = \frac{2.54 * N_w * \pi * D * \cos(\theta_1)}{S_g}$$

De modo semelhante, o espaçamento de sensor de esforço preferido (S_g) pode ser facilmente determinado com um número preferido conhecido de sensores de esforço (N) e um comprimento total predeterminado (S) da fibra 30.

Aproximadamente, o número máximo de sensores de esforço 20 que pode ser usado sobre uma fibra 30 com essa técnica pode ser de cerca de 1000. Desse modo, o ângulo de enrolamento preferido (θ_1), o número preferido de voltas (N_w) e o número preferido de sensores de esforço (N) podem ser usados para determinar uma aplicação preferida da fibra 30 e dos sensores de esforço 20 à estrutura 10.

Usando as equações anteriores, gráficos como aquele na FIG. 2 podem ser compilados e usados para determinar o número preferido de sensores de esforço (N) e o número preferido de voltas (N_w) necessários para cobrir um comprimento e diâmetro predeterminados para a estrutura 10 e o espaçamento de sensor de esforço preferido (S_g). Plotados sobre o eixo esquerdo estão o comprimento da fibra (S , em unidades de 0,30 metro), o comprimento axial (Z , em unidades de 0,30 metro) da estrutura 10 abraçada na fibra 30 e o número total (N) de sensores de esforço na forma de grades que podem ser comparadas a uma variação de ângulo de enrolamento para um número predeterminado de voltas (N_w) e um espaçamento de sensor de esforço predeterminado (S_g). Plotados sobre o eixo direito estão o número total de grades por volta (n) e o comprimento axial (L_1 em unidades de 0,30 metro) da estrutura 10 coberto entre cada volta que pode ser comparado a uma variação de ângulo de enrolamento (θ) e a um número preferido de voltas (N_w). Na FIG. 2, a linha 1 plota o comprimento da estrutura Z contra o ângulo (θ) para um caso por meio do qual $D = 15\text{cm}$; a linha 2 plota o comprimento da fibra (S) para o caso em que o número de voltas (N_w) = 100; a linha 3 plota o número de grades tendo um espaçamento (S) de 5,0mm; a linha 4 plota o número de grades por volta; e, a linha 5 plota o comprimento da estrutura Z

contra o ângulo de enrolamento (θ_1) por volta.

Na FIG. 2, $D = 152\text{mm}$, $N_w = 100$ e $S_g = 5\text{mm}$. Essa FIG. mostra que os ângulos de enrolamento entre 20 e 40 graus tendem a otimizar a resolução considerando o comprimento da fibra (S) e o comprimento da estrutura (Z) sendo monitorada. Essa informação pode ser usada com o fator de esforço (m) para projetar uma aplicação preferida da fibra 30 à estrutura 10.

A FIG. 3, ilustra a relação entre o fator de esforço (m) e o ângulo de enrolamento θ . Um coeficiente de Poisson predeterminado (ν) de 0,5 foi escolhido com base na observação do desempenho tubular de aço depois de produzir a altos esforços de compactação. Um esforço predeterminado (ϵ) de 5,0 por cento foi selecionado com base no esforço antecipado máximo que a estrutura pode encontrar.

Com base nesses parâmetros estruturais ($P(\nu)$, (ϵ)), o fator de esforço (m) pode ser determinado para cada ângulo de enrolamento ilustrado na FIG. 3. Os resultados na FIG. 3 revelam que o esforço que cada sensor de esforço experimenta pode ser diminuído ou mesmo revertido (compressão para tração) escolhendo-se cuidadosamente o ângulo de enrolamento preferido ($\theta = \theta_1$).

A capacidade de regular facilmente a quantidade de esforço a que a fibra e cada sensor de esforço serão expostos (tração versus compressão) é muito importante. Sensores de fibra mais convencionais fabricados de vidro podem ser expostos a não mais do que um ou dois por cento de esforço (em tração) antes de ocorrer dano ou falha. O esforço de compressão nos sensores de fibra fabricados de vidro é ainda mais problemático. Desse modo, o alto esforço de compressão axial exercido sobre estruturas tubulares em ambientes de compactação pode ser convertido em esforço de extensão suave no sensor de fibra simplesmente ajustando-se o ângulo de enrolamento. O mesmo princípio pode ser aplicado para re-calcular

a quantidade de esforço sobre outros sistemas de sensor convencionais que podem ser usados.

N FIG. 3A, o fator de esforço (m) é ilustrado para cada ângulo de enrolamento θ de acordo com um coeficiente de Poisson predeterminado (ν) de 0,3 e um esforço predeterminado (ϵ) de 0,10 por cento para a estrutura analisada. Essas condições poderiam corresponder a aplicações onde a compactação suave pode ser antecipada. Para a boa sensibilidade para esforços de compactação suaves (de compressão) e excelente sensibilidade para deformações laterais, pode ser vantajoso, com base na FIG. 3A, selecionar um ângulo de enrolamento preferido da ordem de 20 graus.

As FIGS. 3 e 3A ilustram que, a um ângulo de enrolamento de zero grau, o fator de esforço (m) é igual ao coeficiente de Poisson (ν). Em outras palavras, o esforço de compressão (ϵ) sobre a estrutura é traduzido para uma expansão axial definida pelo coeficiente de Poisson (ν). De modo semelhante, no limite de não enrolamento (aplicação vertical ao longo do revestimento ou um ângulo de 90 graus) a extensão ou compressão da estrutura pode ser medida diretamente. A ultima tem a desvantagem de que, em esforços de não compressão, a fibra e/ou os sensores de esforço são provavelmente danificados e/ou sustentam arqueamento e se desconectam mecanicamente da estrutura. Mas, para esforços de extensão suaves, como freqüentemente vistos em uma camada de formação sobrejacente, pode ser melhor escolher 90 graus ou próximo a 90 graus, tal como entre 80 e 90 graus (correspondendo à aplicação axial ou aplicação próxima à axial).

A FIG. 4 ilustra o coeficiente de Poisson (ν) para o aço versus o esforço aplicado. Para o aço que se comporta elasticamente, o coeficiente de Poisson nominal é próximo a 0,3. Foi observado que o coeficiente de Poisson (ν) das estruturas tubulares suportando altos esforços de compactação (além do limite elástico) fica melhor aproximado a 0,5. Este é um limite teórico para a conservação do volume. O coeficiente de Poisson (ν) pode, portanto, ser

predeterminado de acordo com o esforço antecipado ou máximo que a estrutura pode encontrar, entretanto, pode ficar entre cerca de 0,3 e cerca de 0,5 para estruturas em aço tubulares. Como regra geral, o coeficiente de Poisson (ν) pode ser aproximado a 0,5 se o esforço predeterminado for de pelo menos 0,3 por cento ou maior em uma estrutura de aço tubular.

Os princípios ilustrados na FIG. 3 e na FIG. 3A podem ser usados para determinar uma aplicação preferida dos sensores de esforço 20 à estrutura substancialmente cilíndrica 10 na FIG. 1A para monitorar a deformação da estrutura em vários ambientes de formação. De acordo com um método, uma variação de ângulo de enrolamento preferida (por exemplo, entre 0 e 90 graus) pode ser selecionada para determinar o relativo fator de esforço (m) associado a cada ângulo de enrolamento na variação de ângulo de enrolamento preferida. Uma variação de ângulo de enrolamento aproximada entre 0 grau e 90 graus pode ser preferida, entretanto, variações diferentes, mais estreitas, podem ser selecionadas. O fator de esforço (m) deveria ser determinado para pelo menos um ângulo de enrolamento dentro da variação de ângulo de enrolamento preferida. O ângulo de enrolamento preferido (θ_1) dentro da variação de ângulo de enrolamento preferida pode ser determinado com base em pelo menos um fator de esforço determinado (m), e usado para determinar a aplicação preferida dos sensores de esforço 20 à estrutura 10 na FIG. 1A. Como ilustrado na FIG. 2, um número de outras variáveis, incluindo o número preferido de sensores de esforço (N) e o número preferido de voltas (N_w), também pode ser considerado na determinação da aplicação preferida dos sensores de esforço 20 à estrutura 10 com base nas exigências de sensibilidade e resolução.

A determinação do ângulo de enrolamento preferido (θ_1) dentro da variação de ângulo de enrolamento preferida pode, alternativamente, ser baseada na variação de fator de esforço preferida que compreende uma pluralidade de fatores de esforço determinados da maneira

descrita acima. O fator de esforço determinado ou a variação de fator de esforço determinada podem ser selecionados para determinar o ângulo de enrolamento preferido (θ_1) dentro da variação de ângulo de enrolamento preferida com base em um esforço máximo que o sensor de esforço 20 e/ou a fibra 30 podem suportar. Se um meio de transmissão diferente da fibra 30 for usado, ou transdutores sem fio forem usados, então, o fator de esforço determinado ou a variação de fator de esforço determinada usados para determinar o ângulo de enrolamento preferido (θ_1) dentro da variação de ângulo de enrolamento preferida podem ser baseados em um esforço máximo que o meio de transmissão alternativo e/ou os transdutores, ou transdutores sem fio, podem suportar.

Na FIG. 3, por exemplo, o coeficiente de Poisson predeterminado (ν) e o esforço axial antecipado (ϵ) revelam uma necessidade de sensibilidade a altos esforços de compactação. Presumindo que os sensores de esforço e/ou a fibra são limitados a cerca de 2 por cento de esforço antes de ocorrer falha, então, então, o ângulo de enrolamento no qual os sensores de esforço e/ou a fibra podem falhar a esforço antecipado de 5 por cento sobre a estrutura é determinado dividindo-se o esforço máximo que o sensor de esforço e/ou a fibra podem suportar (0,02) pelo esforço antecipado (0,05), o que revela um fator de esforço (0,4) que corresponde a um ângulo de enrolamento de cerca de 15 graus. Conseqüentemente, um ângulo de enrolamento maior do que cerca de 15 graus é exigido para impedir o dano aos sensores de esforço e/ou à fibra e, de preferência, pode ser de cerca de 30 graus. Um ângulo de enrolamento maior do que cerca de 35 graus, onde o fator de esforço é zero, pode produzir compressão indesejável e arqueamento na fibra e/ou nos sensores de esforço.

Uma vez que uma aplicação preferida dos sensores de esforço tenha sido determinada, os sensores de esforço podem ser aplicados à estrutura 10 ao longo de uma linha de aplicação preferida representada pela

fibra 30 na FIG. 1A. O ângulo de enrolamento preferido pode ser formado entre a linha de aplicação preferida e a primeira linha de referência imaginária 40 ou a segunda linha de referência imaginária 50.

Os sensores de esforço 20 e a fibra 30 podem ser aplicados a
5 uma superfície exterior da estrutura 10 (como ilustrado na FIG. 1), a uma superfície interior da estrutura 10, a um canal dentro da estrutura 10 ou podem ser feitos como um componente integral da estrutura 10 quando formando ou fabricando a estrutura 10. Na eventualidade de que a estrutura tubular 10 compreenda uma montagem de tela tendo múltiplos componentes de tela,
10 incluindo uma tela de areia, os sensores de esforço 20 e a fibra 30 podem ser aplicados a uma superfície interior e/ou a uma superfície exterior de um dos múltiplos componentes de tela ou em um canal dentro de qualquer um dos múltiplos componentes de tela ou entre qualquer das duas camadas de componente. Adicionalmente, os sensores de esforço 20 e a fibra 30 podem
15 ser aplicados a uma superfície exterior de um dos múltiplos componentes de tela e à superfície interior de um outro dos múltiplos componentes de tela.

Além disso, os sensores de esforço 20 e a fibra 30 podem ser aplicados à estrutura 10 em uma bainha protetora e/ou uma lâmina protetora revestindo os sensores de esforço 20 e a fibra 30, provido que o revestimento
20 protetor seja capaz de transferir esforço da estrutura 10 para os sensores de esforço 20. Revestimentos protetores aceitáveis podem compreender, por exemplo, um metal, um polímero, um elastômero, um material compósito ou um tubo fino compreendendo um ou mais destes materiais, que é flexível e ainda capaz de ser aplicado à estrutura 10 de um modo que acopla o esforço
25 experimentado pela estrutura 10 aos sensores de esforço 20. No caso da estrutura 10 ter que passar por um furo de poço, os sensores de esforço 20 e fibra podem ser aplicados antes da estrutura 10 ser passada pelo furo de poço.

Alternativamente, os sensores de esforço 20 e a fibra 30 podem ser aplicados à estrutura 10 após ela ser passada para o furo do poço

usando um conduto, ou podem ser aplicados à superfície externa e interna da estrutura 10 após esta ter passado pelo furo de poço. Qualquer conduto convencional capaz de se acoplado à estrutura 10 é aceitável. Materiais aceitáveis para o conduto podem compreender, por exemplo, um metal, um polímero, um elastômero, um material compósito ou um tubo fino compreendendo um ou mais destes materiais que seja flexível e capaz de ser aplicado à estrutura 10 de um modo que acopla o esforço experimentado pela estrutura 10 aos sensores de esforço 20.

Os sensores de esforço 20 e a fibra 30 podem ser introduzidos em uma abertura no conduto e posicionada no mesmo com um fluido capaz de prender os sensores de esforço 20 e a fibra 30 dentro do conduto e transferir esforço sobre a estrutura 10 para cada sensor de esforço 20. O fluido pode, por exemplo, compreender qualquer polímero convencional, solução de polímero, precursor de polímero ou epóxi. O fluido pode ser usado também para conduzir os sensores de esforço 20 e a fibra 30 através do conduto. Adicionalmente, os sensores de esforço 20 e a fibra 30 podem ser posicionados no conduto com o fluido, pela aplicação de força em cada, ou, ambas as extremidades da fibra 30 para empurrar e/ou puxar a mesma através do conduto. Por exemplo, um objeto pesado pode se acoplado à extremidade de ataque da fibra 30 para impulsionar (empurrar) a fibra 30 e sensores de esforço 20 através do conduto. O conduto pode ser posicionado dentro da estrutura 10 ao longo da linha de aplicação preferida. Em qualquer caso, o ângulo de enrolamento preferido pode se formado entre a linha de aplicação preferida (representada pela fibra 30 na Fig. 1A) e a primeira linha de referência imaginária 40 ou a segunda linha de referência imaginária 50. Se a estrutura 10 compreender um conjunto de tela tendo múltiplos componentes de tela, o conduto pode ser posicionado dentro de um dos múltiplos componentes de tela ao longo da linha de aplicação preferida ou sobre um dos múltiplos componentes de tela ao longo da linha de aplicação preferida.

Aplicação dos sensores de esforço 20 e fibra 30 a uma estrutura 10 após ela ter sido posicionada em um furo de poço pode ser preferida, pelo fato desta técnica não exigir que a estrutura tubular seja girada ou um carretel de fibra seja girado ao redor da estrutura durante aplicação dos sensores de esforço 20 e fibra 30. Vantagens similares podem ser preferidas pela aplicação dos sensores de esforço 20 e a fibra 30 à estrutura 10 em uma lâmina protetora, que podem ser posicionados sobre a estrutura 10 e presos ao longo de um lado, como descrito adicionalmente na Patente US 6.854.327.

Ângulos de Enrolamento Múltiplos e Variáveis

À medida que a depleção do reservatório progride, as exigências de sensibilidade/resolução e fatores de esforço têm probabilidade de mudar. Pela combinação de múltiplos ângulos de enrolamento sobre uma única zona da formação, a faixa de dinâmica e sensibilidade das medições pode ser estendida. Por exemplo, uma fibra envolta a 20 graus pode falhar em um nível de esforço, enquanto a mesma fibra envolta a 30 graus ou mais pode não falhar no mesmo nível de esforço ou a um nível ligeiramente maior de esforço.

Outra vantagem de múltiplos ângulos de enrolamento é prover melhor caracterização da mudança no coeficiente de Poisson (ν) quando o material estrutural cede sob maiores esforços. Aço comum usado em tubulares pode ter um coeficiente de Poisson próximo a 0,3, enquanto elástico, mas tende a 0,5 após o material ceder. A aplicação de fibra 30 e sensores de esforço 20 em dois ou mais ângulos de enrolamento, conforme mostrado na Fig. 1, permite a caracterização desta mudança. Isto é particularmente importante para fibras envoltas próximo ao ângulo que anula o esforço de fibra. Este ponto de anulação muda primariamente em função do coeficiente de Poisson (ν) para a estrutura 10. Com múltiplos ângulos de enrolamento, este comportamento pode ser medido diretamente sobre a estrutura 10 no poço, enquanto ela sofre esforço de compactação. Desse

modo, se diferentes ângulos de enrolamento podem ser preferidos devido a forças diferentes atuando sobre a estrutura tubular, os métodos acima descritos em referência às Figs. 3 e 3A podem ser usados para determinar outro ângulo de enrolamento preferido dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida. A aplicação preferida dos sensores de esforço 20 pode ser baseada no ângulo de enrolamento preferido e outro ângulo de enrolamento preferido e aplicada à estrutura 10 sobre a mesma seção ou sobre diferentes seções como ilustrado pela seção B e seções A, C na Fig. 1, respectivamente. Em qualquer caso, o ângulo de enrolamento e outro ângulo de enrolamento preferido podem, cada um, ser determinado de acordo com um respectivo fator de esforço determinado (m). Cada respectivo fator de esforço predeterminado e outra força predeterminada a ser aplicada à estrutura 10, sobre a mesma seção ou sobre seções diferentes, que impacta a mesma por variações no coeficiente de Poisson (ν) e esforço axial (E).

Restrições sobre o número de sensores de esforço, o comprimento da volta e o espaçamento de sensor de esforço também podem ser superadas pelo uso de múltiplos ângulos de enrolamento. Por conseguinte, múltiplos ângulos de enrolamento podem ser usados para estender o comprimento de medição de uma única região ao longo da estrutura ou cobrir múltiplas zonas ao longo da estrutura como ilustrado nas seções A, B e C da Fig. 1. A adição de múltiplos ângulos de enrolamento pode também ser usada para ramificar em múltiplas estruturas, como poços multilaterais.

Embora a resposta de comprimento de onda seja mais complicada, a aplicação da fibra 30 e os sensores de esforço 20 a ângulos de enrolamento variáveis também pode ser desejável. Configurações utilizando múltiplos e variáveis ângulos de enrolamento sobre uma única seção da estrutura 10, como seção B na Fig. 1, podem ser preferidas. Outras configurações, como as sugeridas na Patente US 6.854.327 podem ser usadas, porém.

A presente invenção será descrita agora ainda mais com referência a sua aplicação em diferentes ambientes de formação como, por exemplo, cisalhamento de formação e compactação de formação. Em cada um dos exemplos a seguir, uma estrutura cilíndrica foi testada usando um sistema de 5
5 sensoreamento distribuído (DSS) fabricado por Luna Innovations® Inc. sob licença da NASA, O sistema de sensoreamento de distribuição (DSS) de LUNA INNOVATIONS® utiliza tecnologia cobrindo uma fibra óptica contendo múltiplos sensores FBG, e um dispositivo de dispensar e projeção ou monitor capaz de formar imagem de resposta de comprimento de onda 10
10 produzida pelos sensores FBG como resultado de esforço estrutural detectado pelos sensores FBG. A presente invenção, entretanto, não está limitada a tal tecnologia pelos exemplos a seguir, e outros meios de transmissão e transdutores e/ou sensores de esforço podem ser usados, como descrito acima.

Cisalhamento de Formação

15 Poços cortando uma zona de deslizamento ou de falha podem estar em perigo de cisalhamento. Uma zona de cisalhamento pode ser encontrada quando localizamos um poço ao longo de uma falha, através de sal e/ou ao longo de um folhelho fraco, numa área tectonicamente ativa, ou numa área sofrendo compactação, tal como uma formação sobrejacente.

20 Movimento de cisalhamento pode cisalhar completamente o poço ou pelo menos restringir a passagem da tubulação, equipamento de re-trabalho, e similares. Por isso, é desejado detectar e medir a taxa de cisalhamento de modo que a descarga do hidrocarboneto ou fluido, locação do poço, desenho do poço e considerações similares possam ser modificadas para 25
25 mitigar ou prevenir danos à estrutura tubular e/ou revestimento, no futuro.

Técnicas convencionais usadas para detectar e medir movimento de cisalhamento freqüentemente necessitam ferramentas tais como giroscópios e outros dispositivos para efetuar medidas. Por várias razões pode ser impraticável ou impossível passar tais ferramentas de registro

convencionais pelo poço. Por exemplo, o poço pode já ter sofrido dano considerável de modo que não possa ser percorrido.

No entanto, sensores de esforço podem ser pré-posicionados na estrutura tubular e/ou revestimento sem termos que descer ferramentas convencionais de registro no poço. Com isso, podem ser feitas medidas *in situ* das forças de cisalhamento a qualquer tempo, sem perturbar o poço e, essencialmente, sem custo adicional. O início do dano pode ser observado em tempo substancialmente real de modo que a ação de correção pode ser executada o mais cedo possível.

Experiência de campo mostra que cisalhamento e arqueamento podem resultar numa perda de vão livre ou no cisalhamento completo de intervalos de, tipicamente, cerca de 0,9 m a 1,8 m da estrutura tubular ou revestimento. Então, uma aplicação preferencial de sensores de esforço nesta estrutura, numa zona de cisalhamento, deve ser projetada para, pelo menos, esta sensibilidade.

Fig. 5, linha 1 representa graficamente o comprimento da estrutura Z (em unidades de 0,30 m) contra o ângulo de enrolamento (θ) para um revestimento para o qual $D = 7,6$ cm ; linha 2 representa graficamente o comprimento da fibra (S) para um revestimento onde o número de voltas (NW) = 80; linha 3 representa graficamente o número de grades tendo um espaçamento (S) de 2,0 mm; linha 4 representa graficamente o número de grades por volta; e, linha 5 representa graficamente o comprimento da estrutura Z contra o ângulo de enrolamento (θ) por volta.

Assumindo-se uma estrutura tubular com 76 mm de diâmetro para ser monitorada ao longo de uma zona de deslizamento ou cisalhamento, cuja localização sabe-se estar dentro de 3,05 m, requer, pelo menos, cobertura de 6,1 m ao longo da tubulação. A aplicação dos princípios ensinados pela presente invenção as variáveis conhecidas, mostradas na Fig. 5, revela que cerca de 20,4 m de fibra sensitiva são necessários para cobrir cerca de 7,3 m

da estrutura tubular assumindo-se um ângulo de enrolamento preferido de cerca de 21°. Considerando-se um espaçamento preferido entre os sensores de esforço de cerca de 2 cm, são recomendados cerca de 12 sensores de esforço por volta, o que é mais do que a recomendação mínima de 10 sensores de esforço por volta. O número total de sensores de esforço será cerca de 1000.

Também há a necessidade de se visualizar a deformação de um objeto, de modo a visualizar-se a forma e magnitude da deformação. A mesma técnica de enrolamento pode ser usada para visualizar, detectar e medir o dobramento e arqueamento da estrutura cilíndrica conforme será explicado nos exemplos que se seguem.

Exemplo 1

Fig. 6 mostra a resposta do comprimento de onda resultante, relativa a cada sensor de esforço numerado, de uma estrutura cilíndrica sofrendo desvio por cisalhamento num teste controlado. A estrutura cilíndrica tem setenta e seis (76) milímetros de diâmetro e seiscentos e dez (610) milímetros de comprimento. Embora o espaçamento do sensor de esforço, ao longo da fibra óptica neste teste, seja de cerca de 1 cm, um espaçamento de 2 cm pode ser adequado para medir a mesma resposta ao cisalhamento numa estrutura cilíndrica com o mesmo diâmetro. É usado um ângulo de enrolamento preferido de cerca de 20°. A variação detectável na resposta do comprimento de onda, representado o desvio lateral, foi de 0,025 mm até cerca de 15,24 mm.

Neste exemplo, um desvio lateral de 0,025 mm traduz-se numa sinuosidade na estrutura de cerca de menos de meio grau para cada seção de 30,5 m da estrutura, o que é irrelevante. No entanto, um desvio lateral de cerca de 2,54 m sobre o mesmo comprimento da estrutura traduz-se por uma sinuosidade de, aproximadamente, 48 ° para cada seção de 30,5 m da estrutura, o que pode impedir a entrada de ferramentas de produção de registro. Conhecendo-se a magnitude do desvio lateral (sinuosidade) antes de

uma tentativa de entrada pode, com isso, impedir a perda ou prisão das ferramentas de registro e a perda de poços.

A resposta de comprimento de onda mostrada na Fig. 6 pode ser visualizada, em tempo real, num dispositivo de projeção tal como os monitores fabricados pela Luna Innovations. A detecção de variações nas respostas dos comprimentos de onda em cada sensor de esforço enquanto a estrutura está sendo monitorada mostrará as mudanças na deformação da estrutura e que tipo de força está causando a deformação da estrutura. Variações na resposta do comprimento de onda são, então, reveladas pelas variações na amplitude da resposta do comprimento de onda em cada sensor de esforço. A capacidade de detectar esforço na estrutura e visualizar o mesmo sob a forma de uma resposta do comprimento de onda no dispositivo de projeção não está, no entanto, limitada a uma estrutura cilíndrica e pode ser aplicada na maior parte de objetos capazes de transferir esforço do objeto para o sensor de esforço.

Fig. 7 representa uma ilustração simples de uma força de cisalhamento aplicada à estrutura 10. Aqui, a estrutura 10 está submetida a uma força de cisalhamento 210 em um dos lados da estrutura 10 e outra força de cisalhamento 220 no outro lado da estrutura 10. A resposta do comprimento de onda, representando o esforço na estrutura 10 medido pelos sensores de esforço 20, associada com as forças de cisalhamento 210, 220 é periódica e aproximadamente senoidal como mostrada na Fig. 7A. A periodicidade da resposta ou sinal do comprimento de onda é igual à cerca de um ciclo por volta da fibra 30 em volta da estrutura 10. A amplitude do sinal periódico é determinada pela magnitude das forças de cisalhamento 210, 220. A resposta do comprimento de onda na Fig. 7A está posicionada adjacente à estrutura 10 na Fig. 7 para mostrar pontos de esforço na estrutura 10 e a resposta do comprimento de onda correspondente produzida como o resultado de tais esforços. Por exemplo, o esforço na estrutura 10 entre as forças de

cisalhamento 210, 220 é mínimo se comparado ao esforço na estrutura 10 próximo de cada força de cisalhamento 210, 220, como mostrado pela resposta máxima do comprimento de onda 230 e respostas mínimas do comprimento de onda 240A, 240B. As respostas mínimas do comprimento de onda 240A, 240B também mostram como as forças de cisalhamento 210, 220 fazem com que a estrutura 10 seja comprimida e estirada (por tração), respectivamente. A aplicação de sensores de esforço 20 pré-posicionados na estrutura 10 habilita, então, a detecção, *in situ*, de esforços na estrutura 10, que podem ser traduzidos por meios convencionais bastante conhecidos e visualizados em tempo real.

Compactação da Formação

Compactação axial normalmente é medida com etiquetas radiativas e ferramentas de registro especiais, que, tipicamente, exigem tamponamento no poço. No entanto, medidas de esforço na estrutura tubular, ou revestimento, inferiores a um por cento são difícil de serem alcançadas, com essas técnicas convencionais. Com esforços mais altos um dobramento ou um arqueamento no revestimento, ou estrutura tubular, também é difícil de detectar sem a retirada da tubulação de produção e a descida, no poço, de calibradores multidedos ou giroscópios.

As desvantagens associadas aos meios convencionais de detecção e medida de esforço induzido por compactação axial podem ser evitadas com sensores de esforço pré-posicionados. Em outras palavras, a aplicação de sensores de esforço pré-posicionados na estrutura pode ser usada para a detecção e medida, *in situ*, das forças de compactação axial pelo modo acima descrito.

Exemplo 2

Neste exemplo, os objetivos importantes são as medidas de esforços pequenos com alta sensibilidade ao dobramento e arqueamento induzidos pela força de compactação. Um tubo de PVC de parede fina foi

testado usando-se o peso do tubo, suspenso horizontalmente por suas extremidades, como sendo a força aplicada. Um ângulo de enrolamento preferido de cerca de 20° foi usado para aplicar os sensores de esforço e a fibra óptica numa seção de tubo com 3 m de comprimento com um diâmetro de 16,5 cm. Foi usado um sensor de esforço com espaçamento de 5 cm para determinar a resposta do comprimento de onda de uma deformação ou dobra.

Na Fig. 8, é mostrada a resposta do comprimento de onda resultante da força lateral aplicada pelo peso do tubo. Foi detectado um desvio lateral máximo de cerca de 1,78 mm. A resposta do comprimento de onda na Fig. 8 revela, claramente, uma dobra ou deformação, porque um período ou ciclo da resposta do comprimento de onda corresponde a uma volta da fibra. Um desvio lateral de 1,78 mm representa uma dobra ou deformação menor do que 7° para cada seção de 30,5 m do tubo, o que é significativo e pode ser detectado por calibrador convencional e ferramentas de visualização acústicas. De modo a descer tais ferramentas no poço, o poço deve ser fechado e a tubulação de produção deve ser puxada.

Exemplo 3

Neste exemplo, o mesmo tubo foi testado usando-se um peso pendurado no centro do tubo, que estava suspenso horizontalmente por suas extremidades. O desvio lateral devido a uma dobra é de cerca de 5,791 mm. Como mostrado na Fig. 9, um sinal periódico relativamente limpo está aparente em todos os lugares exceto nas extremidades e no centro da resposta do comprimento de onda onde o peso está pendurado e distorcendo o sinal. Os sinais distorcidos são um caso especial relacionado ao esmagamento do tubo causado pela carga localizada no tubo.

Fig. 10 representa uma ilustração simples de uma força lateral na estrutura 10 induzida por compactação axial. Aqui, a estrutura 10 está submetida a uma força lateral 310 num lado da estrutura 10. A resposta do comprimento de onda, representando o esforço na estrutura 10 medida pelos

sensores de esforço 20, associada com a força lateral 310 é periódica e aproximadamente senoidal conforme mostrado na Fig. 10A. O período da resposta ou sinal do comprimento de onda é igual à cerca de um ciclo por volta da fibra 30 em volta da estrutura 10. A amplitude do sinal periódico é determinada pela magnitude da força lateral 310. A resposta do comprimento de onda na Fig. 10A está posicionada adjacente à estrutura 10 na Fig. 10 para mostrar pontos de esforço na estrutura 10 e as respostas dos comprimentos de onda correspondentes produzidos como um resultado destes esforços. Por exemplo, o esforço na estrutura 10 perto da força lateral 310 é maior se comparado ao esforço na estrutura 10 em cada extremidade, conforme mostrado pelas respostas máxima do comprimento de onda 330A, 330B e a resposta mínima do comprimento de onda 320. As respostas máximos do comprimento de onda 330A, 330B também mostram como a força lateral 310 faz com que a estrutura 10 se comprima ou estire (por tração), respectivamente.

Exemplo 4

Além de detectar uma dobra ou uma deformação, o desvio por forças de ovalização ou esmagamento também pode ser detectado e diferenciado de uma dobra ou deformação. Uma força de ovalização ou esmagamento pura produziria uma resposta do comprimento de onda para uma ovalização pura. Neste exemplo, o mesmo tubo foi testado com abraçadeiras que foram aplicadas como uma força de esmagamento próximo do centro do tubo e ligeiramente apertadas com a orientação da força aplicada alinhada ao longo do diâmetro do tubo de modo a diminuir ligeiramente seu diâmetro transversal. A resposta do comprimento de onda resultante é mostrada na Fig. 11, e revela um período de cerca de dois ciclos por volta em oposição ao de um ciclo. Neste exemplo, O diâmetro foi diminuído de 1,27 mm devido à força de esmagamento aplicada.

Exemplo 5

Neste exemplo, o mesmo tubo foi testado girando-se as abraçadeiras, próximo ao centro do tubo, de 90°. A resposta do comprimento de onda resultante é mostrada na Fig. 12, e também revela um período de cerca de dois ciclos por volta. Neste exemplo, o diâmetro mínimo foi diminuído de 1,78 mm.

O aumento do esforço (e conseqüente deformação) torna-se claro quando comparamos as Fig. 11 e Fig. 12. É coisa simples escalonar o deslocamento resultante no comprimento de onda para um esforço e o esforço resultante para um esmagamento relativo.

Fig. 13 representa uma ilustração simples de uma força de esmagamento na estrutura 10 induzida por compactação axial. Aqui, a estrutura 10 está submetida a uma força de esmagamento 410 em todos os lados da estrutura 10. A resposta do comprimento de onda, representando esforço na estrutura 10 medido pelos sensores de esforço 20, associado com a força de esmagamento 410 é um sinal periódico substancialmente constante conforme mostrado na Fig. 13A. O período da resposta ou sinal do comprimento de onda é igual à cerca de dois ciclos por volta da fibra 30 em volta da estrutura 10, que é facilmente diferenciada da resposta do comprimento de onda exibida por uma dobra ou deformação discutida nos exemplos acima. A amplitude do sinal periódico é determinada pela magnitude da força de esmagamento 410. A resposta do comprimento de onda na Fig. 13A está posicionada adjacente à estrutura 10 na Fig. 13 para mostrar pontos de esforço na estrutura 10 e a resposta de comprimento de onda correspondente produzida como resultado de tais esforços. Por exemplo, o esforço na estrutura 10 é substancialmente constante em volta da estrutura 10 conforme mostrado pelas respostas de comprimento de onda substancialmente constantes 420A, 420B.

Na Fig. 13B, uma vista terminal da Fig. 13 mostra a força de esmagamento 410 e a deformação resultante da estrutura 10 mostrada pela

linha tracejada 430.

Fig. 14, além disso, mostra a amplitude relativa do esforço (WA), conforme medido por uma resposta do comprimento de onda no sensor FBG ou outro sensor de esforço ou transdutor, como uma função do azimute em volta da uma estrutura tubular submetida a uma força de esmagamento. O esforço de compressão máximo (sinal negativo) ocorre em 0° (ou 360°) e 180° . O esforço tensor máximo (sinal positivo) ocorre em 90° e 270° . O esforço neutro ocorre em 45° , 135° , 225° e 315° .

Exemplo 6

10 Neste exemplo, a sensibilidade é diminuída para permitir a medida de esforços axiais mais altos ($\varepsilon \approx 2\%$) numa estrutura tubular. Com o material estrutural começando a sofrer deformação plástica, o coeficiente de Poisson (ν) tenderá para 0,5 no limite da deformação plástica. Na Fig. 15, a linha sólida representa graficamente o fator de esforço m como uma função do ângulo de enrolamento θ , assumindo que $\nu = 0,50$ e $\varepsilon \approx 2,0\%$. Então, de acordo com a Fig. 15, é preferido um ângulo de enrolamento $\theta_1 = 30^\circ$ ou maior. Por exemplo, um ângulo de enrolamento de 30° retornará um fator de esforço (m) de 0,15, que traduz na fibra, um esforço de 1,5 % para um esforço de 10 por cento na estrutura. Um ângulo de enrolamento de 20° retornaria um fator de esforço de 0,33, que poderia traduzir-se num esforço de 3,3 % e poderia romper ou danificar a fibra. O ângulo de enrolamento preferido deve ser ligeiramente maior (cerca de 35°) para, o mais que puder, anular o esforço aplicado à fibra ($m = 0$) quando são esperados esforços axiais muito altos na estrutura tubular (na ordem de 10 por cento) e quando a
25 intenção for medir mais o arqueamento do que o esforço axial. A linha tracejada na Fig. 15 mostra o deslocamento $\Delta\lambda$ no lado direito do eixo.

Fig. 16 mostra o deslocamento do comprimento de onda ($\Delta\lambda$, em nm) para vários níveis de esforço axial puro, aplicado, (compressão) na mesma estrutura tubular, representado graficamente versus o número de grade

(DN). Na Fig. 16, as linhas e seus esforços axiais associados estão identificados como segue: **16a** = 0,1% de esforço axial; **16b** = 0,2% de esforço axial; **16c** = 0,3% de esforço axial; **16d** = 0,4% de esforço axial; **16e** = 0,5% de esforço axial; **16f** = 0,75% de esforço axial; **16g** = 1,0% de esforço axial; **16h** = 1,25% de esforço axial; e **16i** = 1,5% de esforço axial. O sinal, num ângulo de enrolamento de 30° é reduzido em relação ao do ângulo de enrolamento de 20° conforme descrito em referência à Fig. 15. A redução do sinal como uma função do ângulo de enrolamento segue, então, a forma mostrada na Fig. 15 e a equação do fator de esforço (m) descrita acima.

Um ângulo de enrolamento de 30° deveria, facilmente, acomodar e medir um esforço axial de até cinco por cento enquanto transmite somente uma fração deste esforço para a fibra. Com o esforço axial aumentando, o início do arqueamento e de outros modos mais elevados de deformação são revelados pela natureza periódica da resposta do comprimento de onda.

Embora a Fig. 16 revele o início do arqueamento tubular, a resposta do comprimento de onda como um todo, permanece substancialmente linear enquanto o esforço axial aumenta. Este conceito também é mostrado na Fig. 17, que compara a média (\square), o pico (\blacklozenge) e a raiz quadrada da média (rms) (\times) da resposta do comprimento de onda $\Delta\lambda$ com a resposta do comprimento de onda calculada (—) ou esperada à vários níveis do esforço axial aplicado ϵ_a . Com cerca de 1,5 por cento de esforço axial, a leitura do pico começa a divergir ligeiramente de uma resposta linear enquanto o material estrutural começa a deformar-se ligeiramente.

Uma das áreas mais sensível num poço à compactação e deformação é a zona de completação. Isto é particularmente verdadeiro para formações não consolidadas, altamente sujeitas à compactação, nas quais é exigido o controle de areia.

De modo a controlar áreas com formações compreendendo

areia, a tubulação base é geralmente equipada com um filtro, geralmente chamado de tela de areia. Um pacote de cascalho (areia cuidadosamente dimensionada) também pode ser usado entre a tela de areia e o revestimento externo ou formação. A tela de areia pode compreender uma tela de areia enrolada em arame e outros múltiplos componentes de tela convencionais (daqui em diante chamados de conjunto de tela). O arame envolvendo a tela é projetado para permitir que o fluido flua através das aberturas que são pequenas o suficiente para excluir partículas maiores.

Esforço axial alto, aplicado na tubulação base, pode fechar as aberturas do envoltório de arame e prejudicar o fluxo do fluido. Dobras e deformações na tubulação base também podem comprometer a integridade estrutural do conjunto de tela, causando, com isso, uma perda do controle de areia. Neste caso, o poço deve ser fechado até que possam ser feitos os reparos. Tais falhas requerem, no mínimo, uma retomada do poço e, em casos extremos, uma nova perfuração. Conseqüentemente, o monitoramento da estrutura para dobras, deformações e esforço axial na zona de completação é particularmente preferido onde seja necessário o controle de areia. Da mesma maneira, os sensores de esforço podem ser aplicados à tubulação base e/ou conjunto de tela num ângulo de enrolamento de cerca de 20°.

20 Exemplo 7

Neste Exemplo, uma estrutura tubular de 914mm tendo cerca de 76mm de diâmetro e um coeficiente de Poisson (ν) de cerca de 0,5, foi testada em um ambiente controlado usando um ângulo de enrolamento de 21 graus para a aplicação dos sensores de esforço e fibra. Várias intensidades de esforço axial ϵ_a foram aplicadas em cada extremidade da estrutura, que foram de outro modo não suportadas. A resposta de comprimento de onda médio (real, \blacklozenge) sobre os sensores de esforço aplicados em cada nível de esforço axial aplicado é comparada com a resposta de comprimento de onda calculada (\square) na Fig. 18. A esforço de cerca de 0,05%, há um afastamento de uma

reposta de comprimento de onda calculada linear sugerindo que uma dobra ou um arqueamento está começando a se formar na estrutura testada.

As FIGS. a seguir (Figs. 19, 20 e 21) ilustram progressivamente porque um afastamento da resposta de comprimento de onda calculada ocorre e como ele pode ser usado com um sinal periódico para detectar e determinar a magnitude da dobra ou arqueamento na mesma estrutura testada. Por conveniência, uma representação vertical da estrutura tubular, quando ela reage aproximadamente, esforço axial aplicado, está ilustrada (em preto) no meio das Figs. 19 a 21. Nas Figs. 19 a 21, a mudança de comprimento de onda $\Delta\lambda$ (nm) é plotada contra o número de gradeamento (D_n). Na Fig. 19, o esforço axial aplicado é nominal ou em torno de zero.

Na Fig. 20, o esforço axial aplicado é de 0,25%. Na Fig. 21, o esforço axial aplicado é aumentado para 0,75%. Na Fig. 20, a resposta de comprimento de onda ilustra o esforço aplicado, não havendo, porém, deformação aparente na estrutura.

Na Fig. 21, a resposta de comprimento de onda é notavelmente maior do que a resposta de comprimento de onda na Fig. 20, e parece haver uma dobra ou deformação na estrutura. Quando o esforço axial aplicado a cada extremidade da estrutura aumenta, a estrutura é comprimida, o que causa deformação na forma de uma dobra ou uma protuberância.

A Fig. 22 representa uma ilustração simples de esforço axial puro (força) aplicado à estrutura 10. Aqui, a estrutura 10 é sujeita a uma força axial 520. A resposta de comprimento de onda 530, representando esforço sobre a estrutura 10 medido pelos sensores de esforço 20, associada à força axial 520, é substancialmente constante, como ilustrado na Fig. 22A. Desse modo, a força axial 520 faz com que a estrutura 10 encurte ou comprima e se expanda na direção indicada pelas setas 510. Como resultado, a resposta de comprimento de onda 530 é substancialmente constante até que a estrutura 10 comece a se deformar na forma de uma dobra ou uma protuberância, como

demonstrado pela ilustração progressiva nas Figs. 19 a 21 acima.

Uma das áreas no poço onde a menor intensidade de esforço provavelmente ocorre na compactação de reservatórios está na formação sobrejacente. Os maiores esforços de tração são geralmente observados bem próximo à zona de compactação e a magnitude do esforço se reduz à medida que a distância da zona de compactação aumenta. Isto está refletido no gráfico teórico na Fig. 23, plotando esforço delta ($\Delta\epsilon$) versus a distância (d) ao longo da linha (em pés) como Delta S_{ext} ZZ (*), onde o reservatório sofre 8% de esforço de compactação e o esforço extensional máximo na formação sobrejacente é 1%.

A magnitude real do esforço extensional na formação sobrejacente logo acima do reservatório é altamente dependente da geometria do reservatório e das propriedades de material do reservatório e formação sobrejacente. A proporção do esforço extensional logo acima do reservatório e esforço compressivo no reservatório pode ser usada como um diagnóstico do desempenho do reservatório. Do mesmo modo, a intensidade de um esforço de tração na formação sobrejacente afeta coisas como sinais sísmicos usados para medições sísmica em 4D. Desse modo, os sensores de fibra e esforço são, de preferência, aplicados a cerca de 90 graus longitudinalmente ao longo da estrutura para aumentar a sensibilidade a esforços de tração. Quando os sensores de fibra e esforço são posicionados sobre uma estrutura tubular especificamente projetada para monitorar tal esforço, uma medição muito precisa pode se feita.

Além disso, três ou mais fibras contendo sensores de esforço podem ser longitudinal e equidistantemente posicionados ao redor da estrutura tubular de modo a detectar não só esforço axial sobre a estrutura, mas também esforço de dobramento. O esforço sobre o lado externo do raio de curvatura da dobra ou arqueamento será maior (em tração) do que o esforço sobre o raio interno. Desse modo, quando 3 ou mais fibras contendo

sensores de esforço são posicionados desta maneira, a detecção e medição de uma dobra de raio longo é possível, através da resposta de comprimento de onda irregular.

5 Tendo ilustrado modos de realização com particularidade, a invenção pode ser resumida em termos amplos como a seguir.

Em adição a um método de aplicar um sensor de esforço a um corpo cilíndrico, mais especificamente, a invenção refere-se a métodos para determinar uma aplicação preferida de uma pluralidade de transdutores ou sensores a uma estrutura cilíndrica para monitorar deformação da estrutura
10 quando esta for sujeita a várias forças. A presente invenção é, em outros aspectos, direcionada também a métodos para formar imagem de deformação de um objeto quando este estiver sujeito a várias forças.

Em vários modos de realização, é provido um método para formar imagem de deformação de um objeto compreendendo as etapas de:

15 aplicar uma pluralidade de sensores de esforço ao objeto a um ângulo de enrolamento preferido;

detectar deformação do objeto em cada sensor de esforço; e

formar imagem de deformação detectada em cada sensor de esforço sobre um dispositivo de projeção.

20 O objeto pode ser cilíndrico e cada sensor de esforço pode detectar esforço axial e radia sobre o objeto.

O método pode compreender adicionalmente as etapas de:

selecionar uma faixa de ângulo de enrolamento preferido;

25 determinar um fator de esforço para pelo menos uma volta dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida; e

determinar o ângulo de enrolamento preferido dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida sobre pelo menos um fator de esforço determinado.

A deformação detectada em cada sensor de esforço pode se

transmitida através de pelo menos uma de uma fibra óptica, meio conectado por fio ou sem fio ao dispositivo de projeção. A imagem de deformação pode ser exibida como uma resposta de comprimento de onda em cada sensor de esforço e um número de sensor de esforço correspondente.

5 A pluralidade de sensores de esforço pode ser aplicada a uma ou superfície interna e uma superfície externa da estrutura. Eles podem ser aplicados em pelo menos uma da uma bainha de proteção e uma lâmina de proteção. Eles podem ser aplicados a um de um canal dentro da estrutura e integralmente dentro da estrutura quando ela é formada. Cada um da
10 pluralidade de sensores de esforço pode ser acoplado sem fio a outro da pluralidade de sensores de esforço. A pluralidade de sensores de esforço pode ser independentemente energizada. Cada um da pluralidade de sensores de esforço pode ser acoplado a outro da pluralidade de sensores de esforço através de um meio de transmissão capaz de transmitir um sinal. A
15 pluralidade de sensores de esforço pode ser conectada por uma fibra óptica.

 O método pode compreender adicionalmente as etapas de:
 monitorar a resposta de comprimento de onda; e
 detectar variações na resposta de comprimento de onda em
20 cada sensor de esforço. As variações na resposta de comprimento de onda podem ser detectadas por variações em uma amplitude da resposta de comprimento de onda em cada sensor de esforço. Vários tipos de deformação podem ser detectados com base na resposta de comprimento de onda.

 É provido também um método de determinar uma aplicação preferida de uma pluralidade de sensores de esforço a uma estrutura cilíndrica
25 para monitorar deformação da estrutura compreendendo:

 selecionar uma faixa de ângulo de enrolamento preferida;
 determinar um fator de esforço para pelo menos um ângulo de enrolamento dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida;
 determinar um ângulo de enrolamento preferido dentro da

faixa de ângulo de enrolamento preferida com base em pelo menos um fator de esforço determinado; e

determinar a aplicação preferida da pluralidade de sensores de esforço à base da estrutura sobre o ângulo de enrolamento preferido.

5 A etapa de determinar o fator de esforço é, de preferência, baseado em um coeficiente de Poisson preferido para a estrutura, que pode ser baseado no esforço predeterminado para a estrutura. O esforço predeterminado para a estrutura pode ser baseado em um esforço máximo que a estrutura pode encontrar.

10 Este método pode compreender adicionalmente a etapa de aplicar a pluralidade de sensores de esforço à estrutura ao longo de uma linha de aplicação preferida. O ângulo de enrolamento preferido pode ser formado entre a linha de aplicação preferida e uma de uma primeira linha de referência imaginária se estendendo longitudinalmente ao longo de uma superfície da
15 estrutura e uma segunda linha de referência imaginária circunscrevendo a estrutura.

Ele pode compreender também as etapas de:

determinar o fator de esforço para cada ângulo de enrolamento dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida; e

20 determinar o ângulo de enrolamento preferido dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida com base em pelo menos um dos fatores de esforço determinados. A etapa de determinar o ângulo de enrolamento preferido dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida pode ser baseada em uma faixa de fator de esforço preferida compreendendo uma
25 pluralidade dos fatores de esforço determinados. A etapa de determinar o ângulo de enrolamento preferido dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida pode ser baseada em pelo menos um da pluralidade de fatores de esforço dentro da faixa de fator de esforço.

O método pode compreender também a etapa de selecionar

pelo menos um dos fatores de esforço determinados, e/ou a faixa de fator de esforço, com base em um esforço máximo de sensor de esforço.

O método pode compreender adicionalmente as etapas de:

5 determinar o fator de esforço para uma pluralidade de ângulos de enrolamento dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida;

determinar outro ângulo de enrolamento preferido dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida com base em pelo menos um dos fatores de esforço determinados; e

10 determinar a aplicação preferida da pluralidade de sensores de esforço à estrutura com base no ângulo de enrolamento preferido e outro ângulo de enrolamento preferido e, opcionalmente, as etapas de:

selecionar o pelo menos um fator de esforço determinado com base em uma força predeterminada a ser aplicada a uma área ou à estrutura; e

15 selecionar pelo menos outro dos fatores de esforço determinados com base em outra força predeterminada a ser aplicada a pelo menos uma da área da estrutura e outra área da estrutura.

Opcionalmente, a etapa de aplicar a pluralidade de sensores de esforço a pelo menos uma da área da estrutura e outra área da estrutura com base em pelo menos um do ângulo de enrolamento preferido e outro ângulo de enrolamento preferido é provida.

20

O método pode ainda compreender as etapas de:

introduzir pelo menos um da pluralidade de sensores de esforço em uma abertura em um conduto;

25 posicionar pelo menos um da pluralidade de sensores de esforço dentro do conduto; e

introduzir um fluido na abertura no conduto para, pelo menos parcialmente, solidificar e prender pelo menos um da pluralidade de sensores de esforço dentro do conduto.

Este conduto pode ser posicionado dentro da estrutura ao

longo de uma linha de aplicação preferida e o ângulo de enrolamento preferido é formado entre a linha de aplicação preferida e uma de uma primeira linha imaginária de referência se estendendo longitudinalmente ao longo de uma superfície da estrutura e uma segunda linha de referência imaginária circundando a estrutura. O conduto pode ser posicionado sobre a estrutura ao longo de uma linha de aplicação preferida e o ângulo de enrolamento preferido é formado entre a linha de aplicação preferida e uma de uma primeira linha de referência imaginária se estendendo longitudinalmente ao longo de uma superfície da estrutura e uma segunda linha de referência imaginária envolvendo a estrutura. Pelo menos um da pluralidade de sensores de esforço pode ser posicionado dentro do conduto por pelo menos uma força de compressão e força de tração.

Mais especificamente, é provido um método de determinar uma aplicação preferida de uma fibra óptica a uma estrutura cilíndrica, onde a fibra óptica inclui pelo menos um sensor, compreendendo:

selecionar uma faixa de ângulo de enrolamento preferida para a fibra óptica;

determinar um fator de esforço preferido para pelo menos um ângulo de enrolamento dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida;

determinar um ângulo de enrolamento preferido da fibra óptica à estrutura com base no ângulo de enrolamento preferido. Pelo menos um sensor pode detectar deformação da estrutura. A etapa de determinar o fator de esforço de fibra pode ser baseada em um coeficiente de Poisson predeterminado para a estrutura e um esforço predeterminado para a estrutura.

O método pode compreender adicionalmente a etapa de determinar um número preferido de voltas com base em um comprimento axial predeterminado da estrutura, um diâmetro para a estrutura e o ângulo de enrolamento preferido. De preferência, o número preferido de voltas é. Pelo menos oito.

O método pode compreender ainda a etapa de determinar a aplicação preferida da fibra óptica à seção transversal, com base no número preferido de voltas. Um espaçamento de sensor preferido pode ser determinado com base em um número preferido de sensores e um comprimento predeterminado de fibra, o número preferido de sensores pode ser pelo menos dez.

A etapa de determinar a aplicação preferida da fibra óptica à estrutura pode ser baseada no número preferido de sensores.

A faixa de ângulo de enrolamento preferida pode ficar entre 0° e cerca de 90° .

O método pode compreender adicionalmente as etapas de:
determinar o esforço de fibra para cada ângulo de enrolamento dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida; e

determinar o ângulo de enrolamento preferido para a fibra óptica dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida com base em pelo menos um dos fatores de esforço de fibra determinados.

Aqui, a etapa de determinar o ângulo de enrolamento preferido da fibra óptica dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida pode ser baseada em uma faixa de fator de esforço de fibra preferida compreendendo uma pluralidade de fatores de esforço de fibra determinados. A etapa de determinar o ângulo de enrolamento preferido para a fibra óptica dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida pode ser baseada em pelo menos um da pluralidade de fatores de esforço de fibra determinados dentro da faixa de fator de esforço de fibra.

O método pode adicionalmente compreender a etapa de selecionar pelo menos um dos fatores de esforço de fibra determinados e/ou a faixa de fator de esforço de fibra, com base em um esforço de fibra máximo.

O método pode compreender adicionalmente as etapas de:
determinar o fator de esforço de fibra para uma pluralidade de

ângulos de enrolamento dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida;

determinar outro ângulo de enrolamento preferido para a fibra óptica dentro da faixa de ângulo de enrolamento preferida com base em pelo menos outra dos fatores de esforço de fibra determinados; e

5 determinar a aplicação preferida da fibra óptica à estrutura com base no ângulo de enrolamento preferido e outro ângulo de enrolamento preferido e, opcionalmente, as etapas de:

10 selecionar pelo menos um dos fatores de esforço de fibra determinados com base em outra força predeterminada a ser aplicada a pelo menos uma da área da estrutura e outra área da estrutura. Opcionalmente, o método compreende adicionalmente a etapa de aplicar a fibra óptica a pelo menos uma da área da estrutura e outra área da estrutura, com base em pelo menos um dos ângulos de enrolamento preferidos e outro ângulo de enrolamento preferido.

15 A estrutura pode compreender um conjunto de tela, que pode compreender múltiplos componentes de tela. A pluralidade de sensores de esforço pode, então, ser aplicada a pelo menos uma de uma superfície interna e uma superfície externa de um dos múltiplos componentes de tela. A pluralidade de sensores de esforço é aplicada a um dos múltiplos
20 componentes de tela em pelo menos uma de uma bainha protetora e uma lâmina protetora. A pluralidade de sensores de esforço pode se aplicada a um canal dentro de um dos múltiplos componentes de tela.

25 Um conduto pode ser posicionado dentro de um dos múltiplos componentes de tela. Por exemplo, ele pode ser posicionado ao longo de uma linha de aplicação preferida e o ângulo de enrolamento preferido é formado entre a linha de aplicação preferida e uma de uma primeira linha de referência imaginária se estendendo longitudinalmente ao longo de uma superfície da estrutura e uma segunda linha de referência imaginária circundando a estrutura.

Pelo menos um da pluralidade de sensores de esforço pode ser introduzido em uma abertura no conduto e posicionado dentro do conduto. Um fluido pode ser introduzido na abertura no conduto para, pelo menos parcialmente, solidificar e prender pelo menos um da pluralidade de sensores de esforço dentro do conduto, como descrito acima.

A presente invenção pode ser utilizada para detectar e monitorar deformação de qualquer estrutura substancialmente cilíndrica em um furo de poço causada por esforço estrutural, a despeito do furo de poço ou atividade de formação. Como descrito aqui, a presente invenção pode ser feita sob medida exclusivamente para detectar e medir esforço induzido por compactação axial, cisalhamento, dobramento, arqueamento, e esmagamento (ovalização) sobre a estrutura do furo de poço devido à movimentação de falha e/ou compactação na formação. A presente invenção, desse modo, pode ser aplicada a qualquer estrutura substancialmente cilíndrica em um furo de poço para fins de detectar e monitorar deformação da estrutura durante produção ou outras operações não de produção, como, por exemplo, completação (por exemplo, obturação de cascalho/obturação de fratura), operações de estímulo e produção.

Conseqüentemente, a estrutura cilíndrica pode ser provida em forma de um tubular de furo de poço como, por exemplo, um tubo de perfuração, um tubo de produção, um tubo de revestimento, uma tela tubular, uma tela de areia.

A presente invenção poderia ser usada também em qualquer outra situação, na qual os tubos se expandem e contraem, ou são dobrados, como, por exemplo, refinarias, usinas de gás e tubulações. A presente invenção também pode ser útil para formar imagem de deformação (forma/magnitude/movimentação) de outros objetos não-cilíndricos e, assim, poderia ser usada para sensorear deslocamento usando os mesmos princípios aplicados a diferentes escalas de comprimento. A presente invenção pode

também ser usada para obter dados para outros tipos de modelagem geométrica, incluindo, por exemplo, barragens ou outras estruturas. Desse modo, é contemplado que várias situações, alterações e/ou modificações podem ser feitas aos modos de realização descritos sem se afastar do espírito e escopo da invenção como definidos pelas reivindicações anexas e seus equivalentes.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para aplicar um sensor de esforço a uma estrutura cilíndrica, para monitorar uma deformação da estrutura, o método caracterizado pelo fato de compreender:

5 selecionar uma desejada sensibilidade a esforço axial na estrutura cilíndrica;

 determinar pelo menos um fator de esforço correspondente à desejada sensibilidade, cujo pelo menos um fator de esforço representa uma proporção entre esforço transmitido ao sensor de esforço causado pelo esforço axial na estrutura cilíndrica e o esforço axial na estrutura cilíndrica;

10 determinar um ângulo de enrolamento preferido relativo a uma linha de referência imaginária se estendendo ao longo de uma superfície da estrutura cilíndrica, na dependência do pelo menos um fator de esforço determinado; e

15 aplicar o sensor de esforço à estrutura cilíndrica em alinhamento com o ângulo de enrolamento preferido para medir esforço na direção do ângulo de enrolamento preferido.

 2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato da etapa de determinar o pelo menos um fator de esforço ser baseado em um coeficiente de Poisson predeterminado para a estrutura.

20 3. Método de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato da etapa de determinar o pelo menos um fator de esforço ser baseado em um esforço predeterminado para a estrutura.

25 4. Método de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato da etapa de determinar o pelo menos um fator de esforço ser baseado em um esforço predeterminado para a estrutura e onde o coeficiente de Poisson predeterminado para a estrutura é baseado no esforço predeterminado para a estrutura.

 5. Método de acordo com a reivindicação 3 ou 4, caracterizado

pelo fato do esforço predeterminado ser baseado no esforço máximo que a estrutura pode encontrar.

5 6. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato da sensibilidade desejada ser baseada em um esforço de sensor de esforço máximo.

7. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato do sensor de esforço ser um de uma pluralidade de sensores de esforço que é aplicada ao longo de uma linha de aplicação, ao longo do ângulo de enrolamento preferido.

10 8. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado pelo fato do sensor de esforço ser um de uma pluralidade de sensores de esforço que são aplicados ao longo de uma linha de aplicação que se estende ao longo de vários ângulos de enrolamento dentro de uma faixa de ângulo de enrolamento, cuja faixa de ângulo de enrolamento inclui o ângulo de enrolamento preferido.

15 9. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 6, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender as etapas de:

determinar uma pluralidade de ângulos de enrolamento preferidos na dependência de uma pluralidade de fatores de esforço; e

20 aplicar uma pluralidade de sensores de esforço à estrutura cilíndrica ao longo de uma pluralidade de linhas de aplicação, ao longo da pluralidade de ângulos de enrolamento preferidos, por meio do que o mencionado sensor de esforço é um de uma pluralidade de sensores de esforço.

25 10. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 7 a 9, caracterizado pelo fato da pluralidade de sensores de esforço ser conectada por uma fibra óptica, e pelo fato da aplicação da pluralidade de sensores de esforço à estrutura cilíndrica incluir a aplicação da fibra óptica ao longo de uma linha de aplicação que inclui pelo menos uma seção direcionada

ao longo do ângulo de enrolamento preferido.

5 11. Método de acordo com a reivindicação 10, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender a etapa de determinar um número preferido de enrolamentos, com base em um comprimento axial predeterminado da estrutura, um diâmetro para a estrutura e o ângulo de enrolamento preferido.

12. Método de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato do número preferido de enrolamentos ser pelo menos oito.

10 13. Método de acordo com a reivindicação 10, 11 ou 12, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender a etapa de determinar um espaçamento de sensor de esforço preferido com base em um número preferido de sensores de esforço e um comprimento de fibra predeterminado.

15 14. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações 10 a 13, caracterizado pelo fato de cada sensor de esforço compreender um gradeamento de Bragg impresso na fibra óptica.

15 15. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender as etapas de:

20 introduzir o sensor de esforço em uma abertura em um conduto posicionada em relação à estrutura ao longo do ângulo de enrolamento preferido;

posicionar o sensor de esforço dentro do conduto; e introduzir um fluido na abertura no conduto para, pelo menos parcialmente, solidificar e prender o sensor de esforço dentro do conduto.

25 16. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender a etapa de:

prover a estrutura cilíndrica em forma de um tubular de furo de poço, de preferência, um tubo de revestimento.

FIG. 1

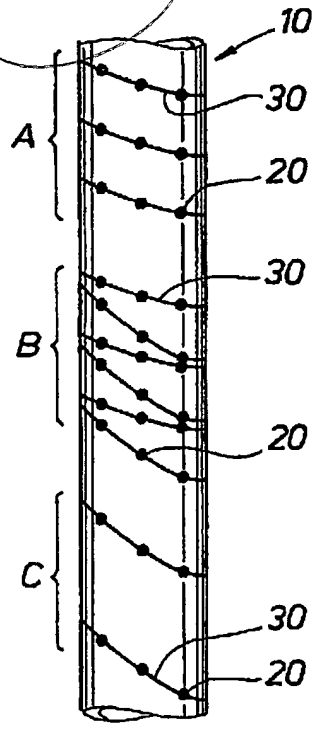


FIG. 1A

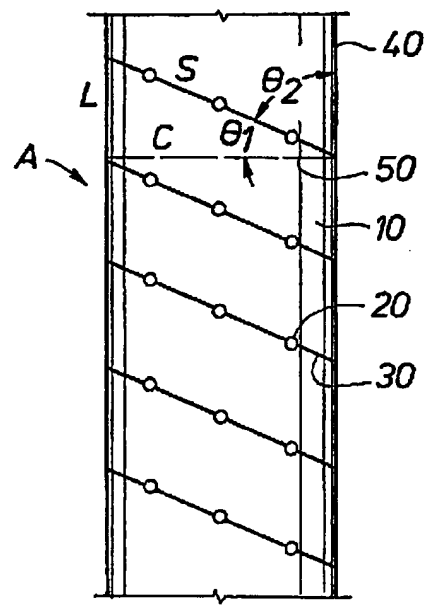


FIG. 7

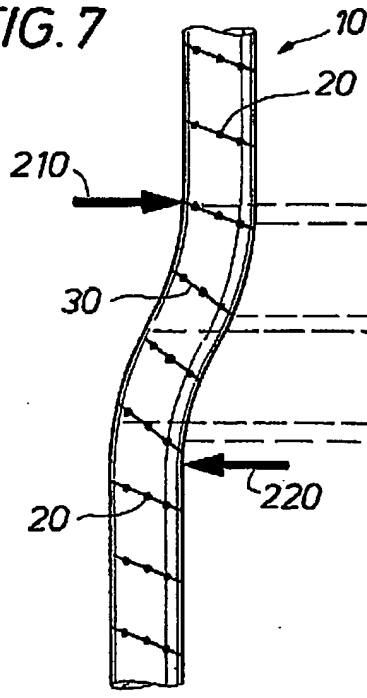


FIG. 7A

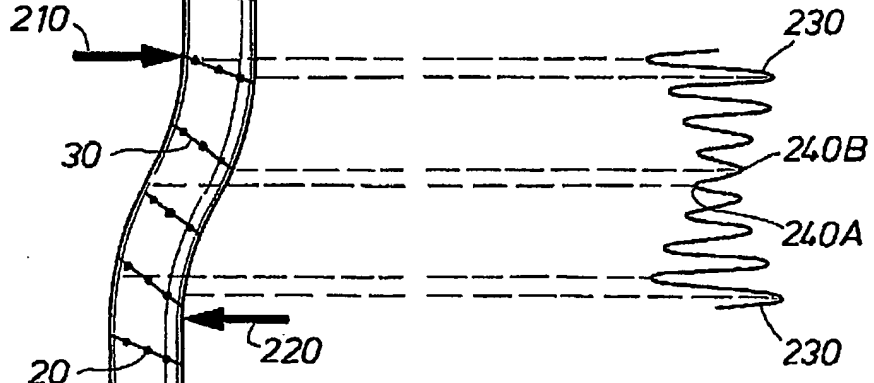


FIG. 2

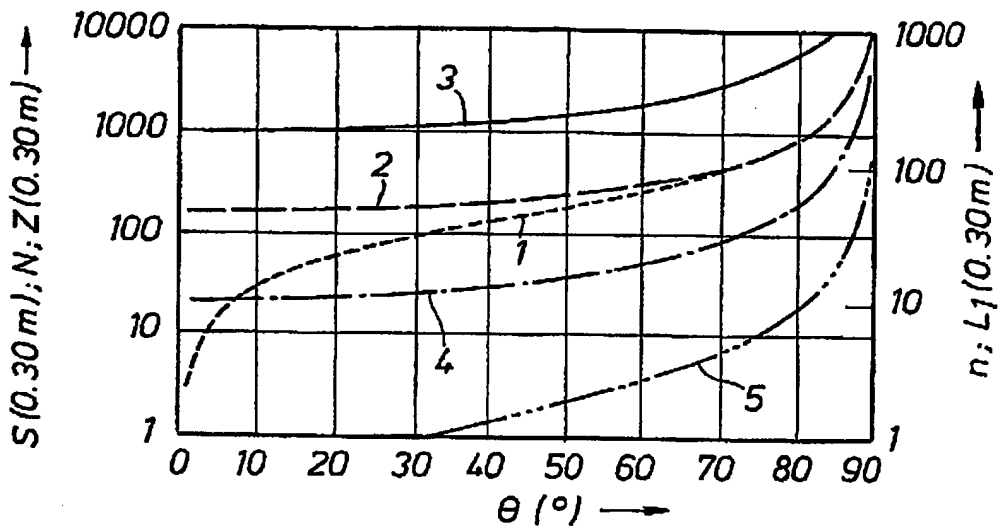


FIG. 3

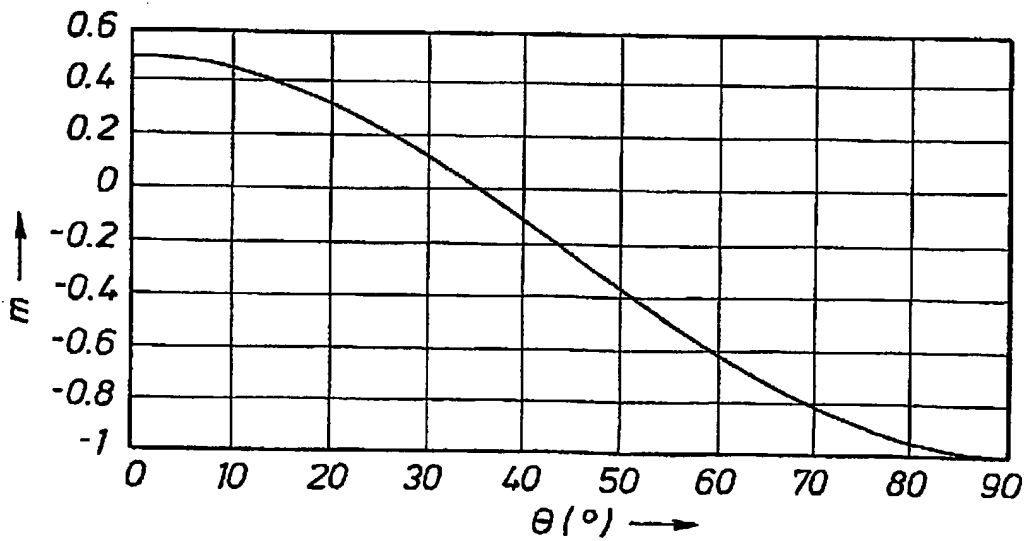


FIG. 3A

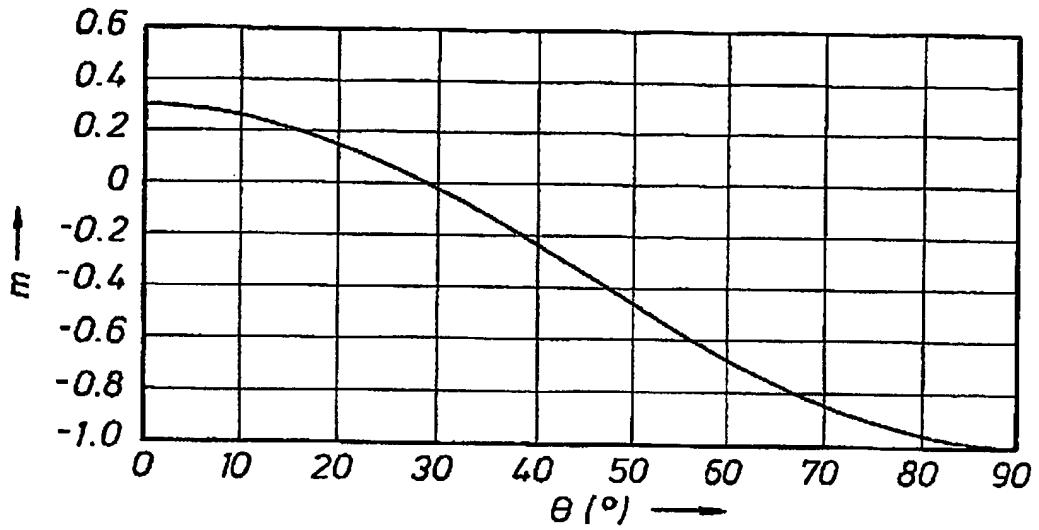
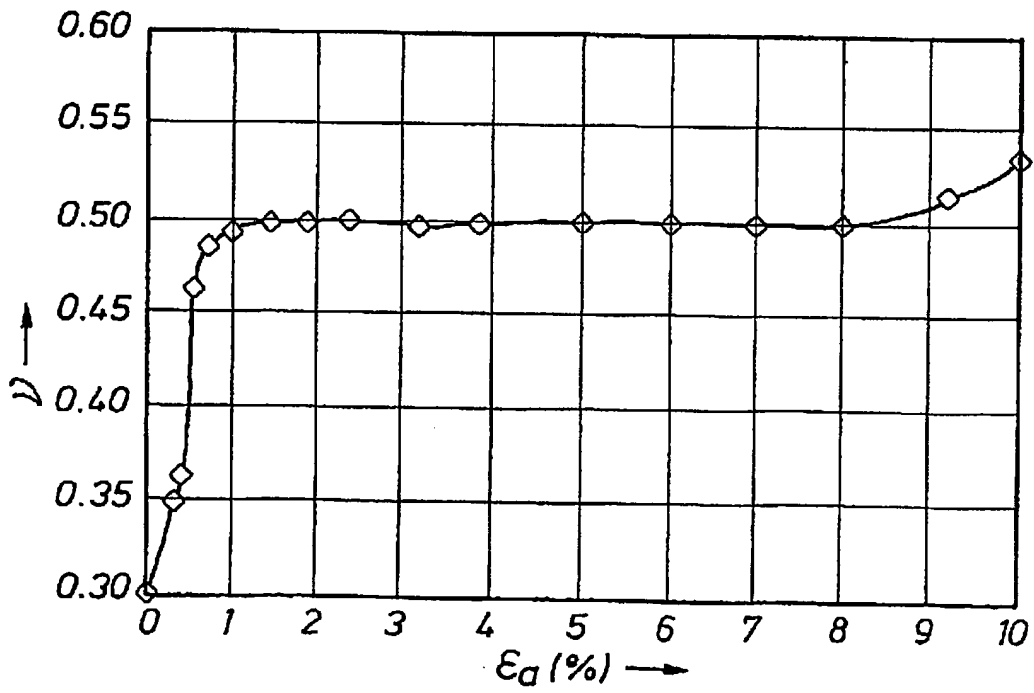


FIG. 4



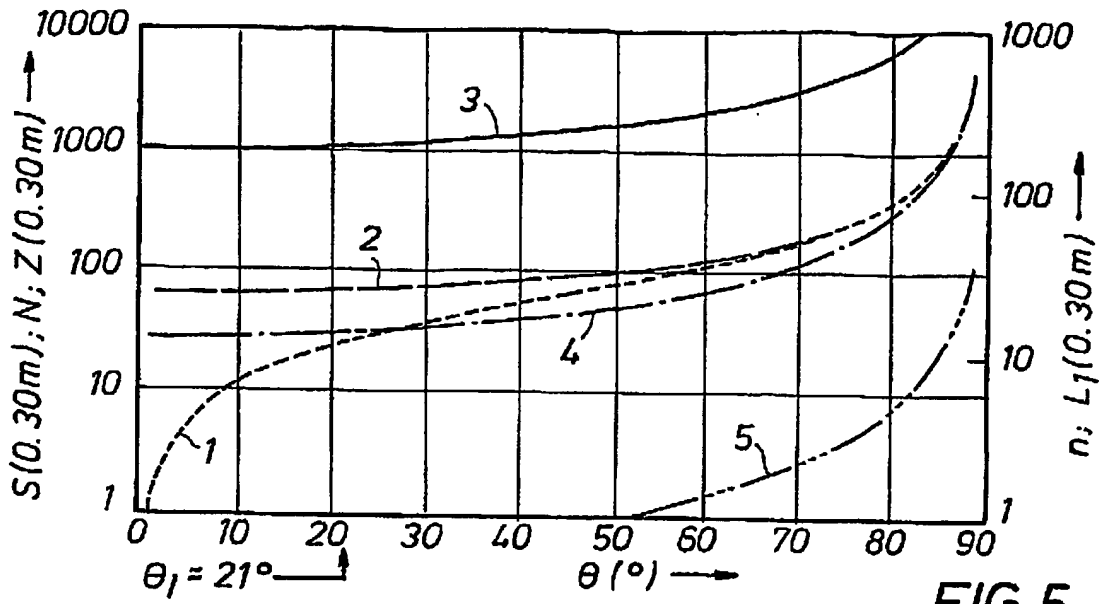


FIG. 5

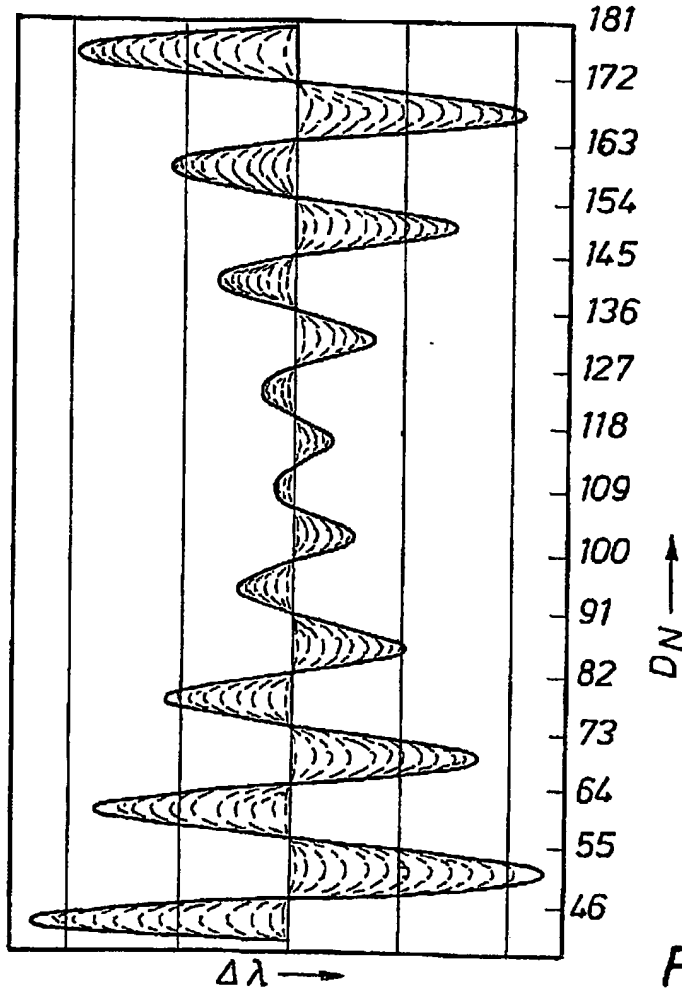


FIG. 6

FIG. 8

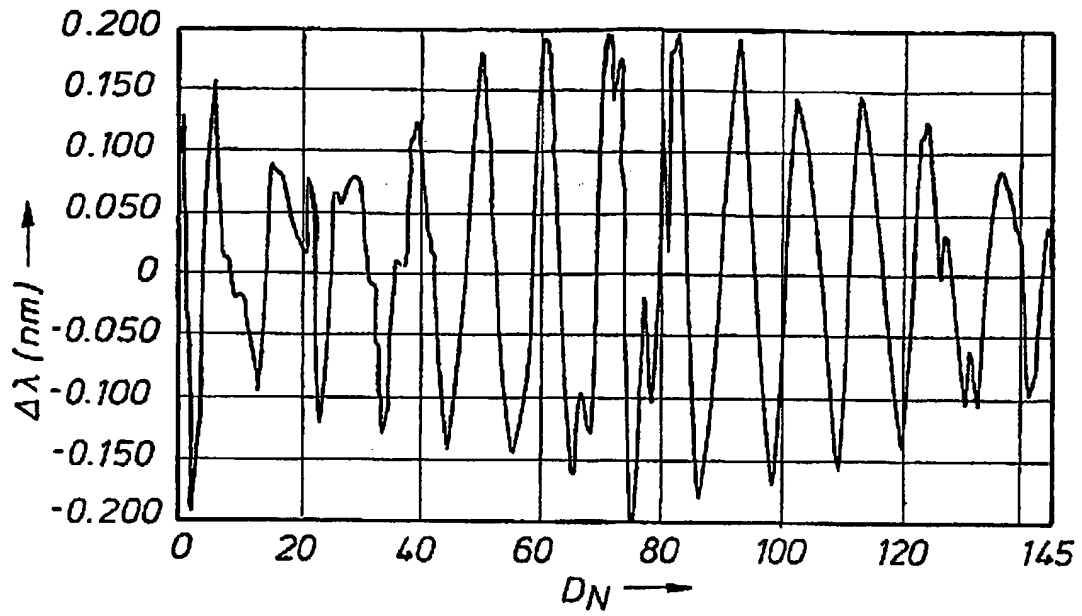


FIG. 9

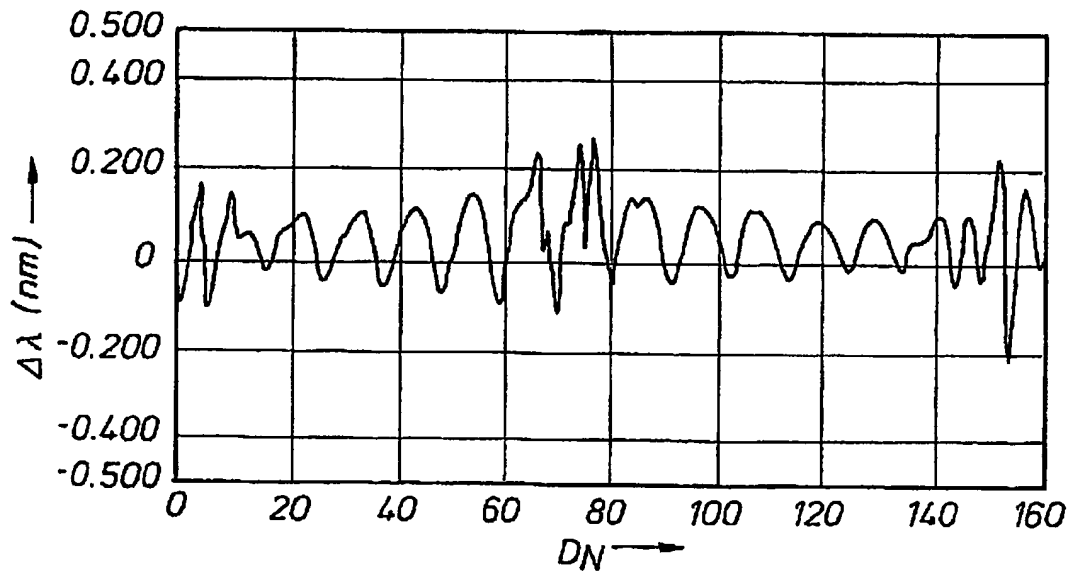


FIG. 10

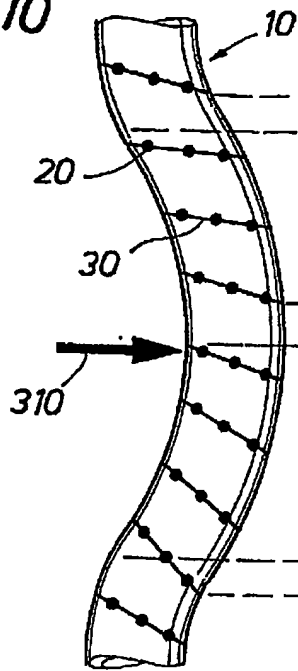


FIG. 10A

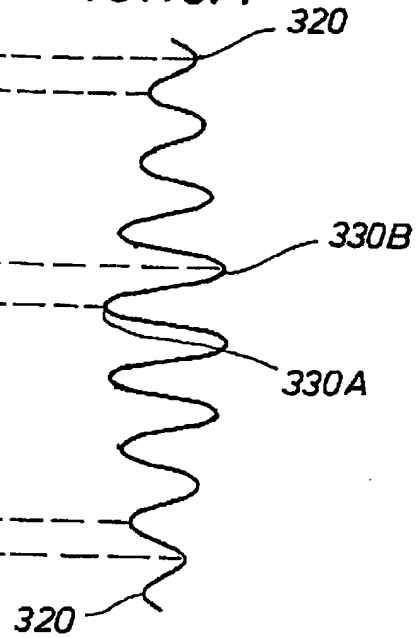


FIG. 13

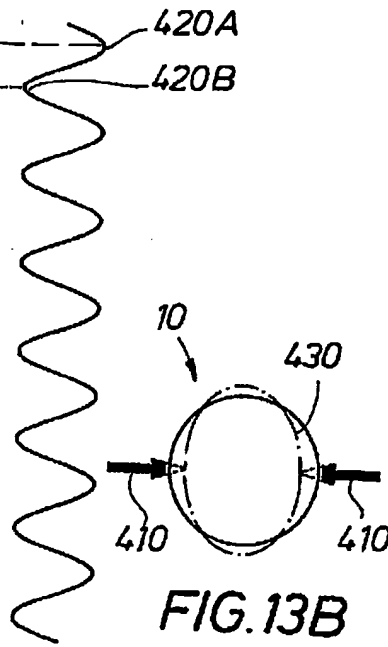
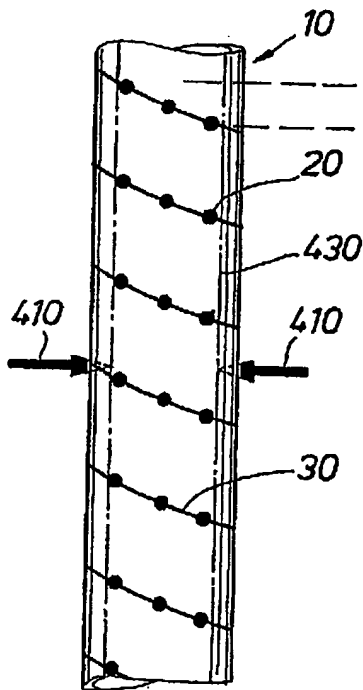


FIG. 13A

FIG. 13B

FIG. 22A

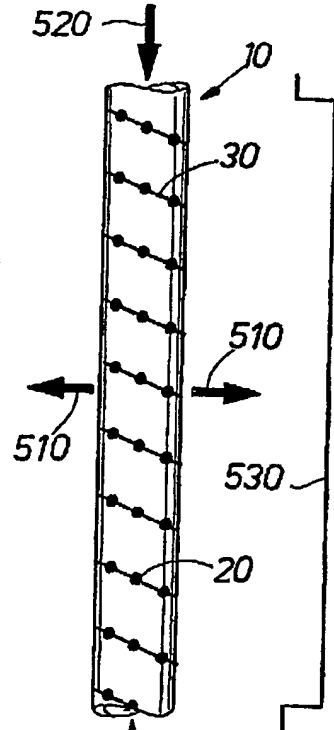


FIG. 22

FIG.11

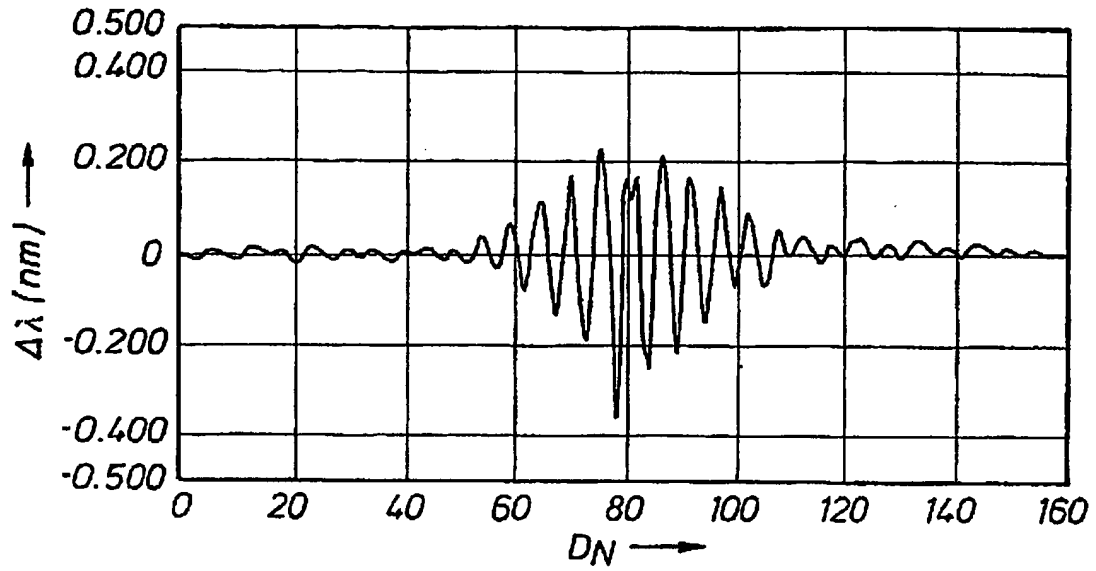


FIG.12

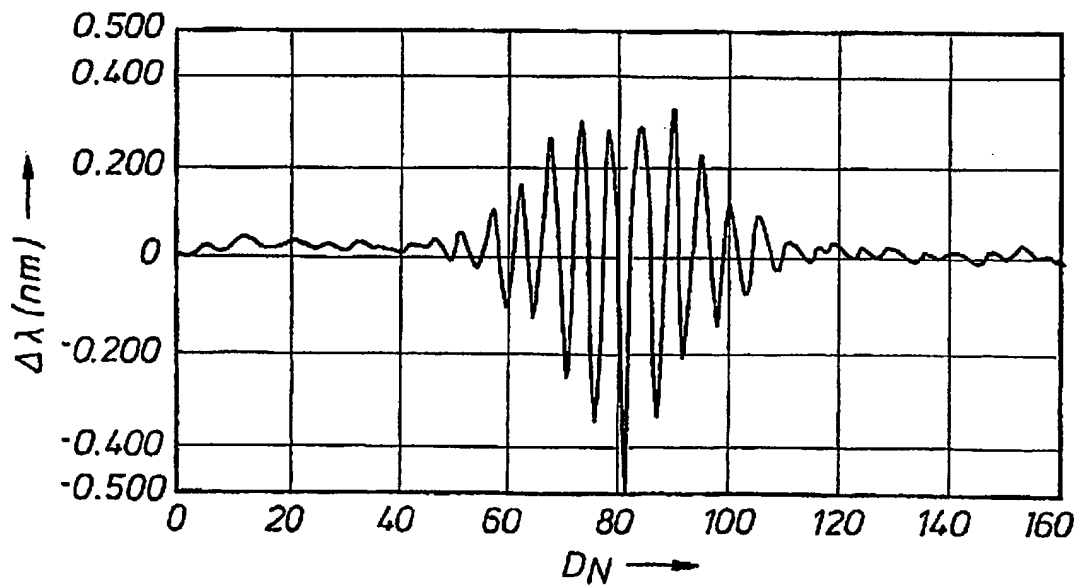


FIG. 14

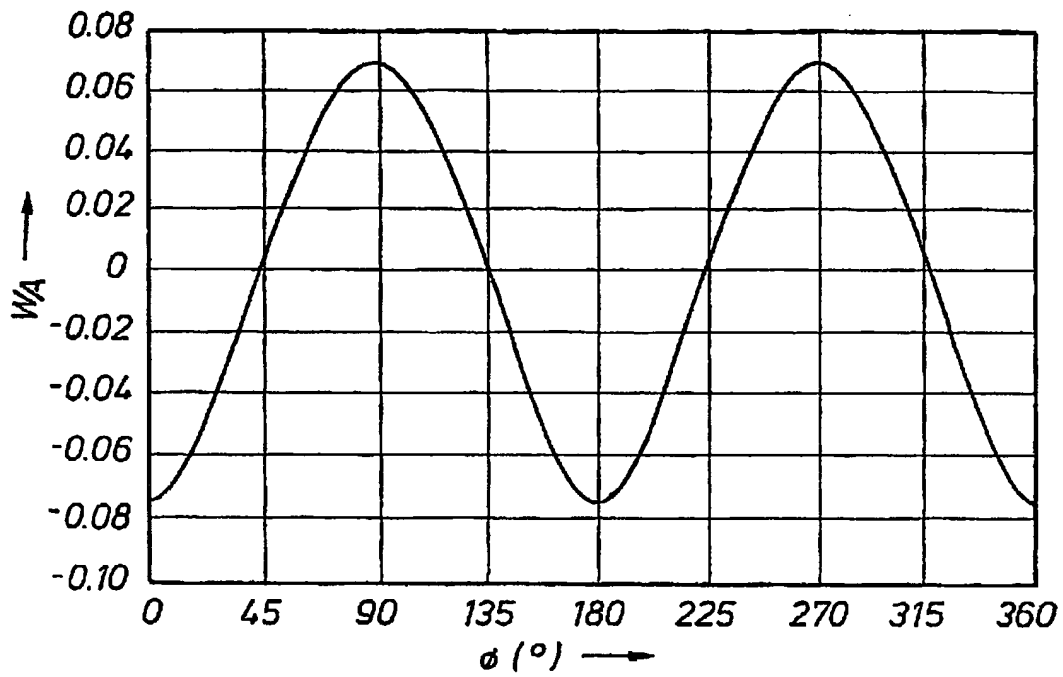


FIG. 15

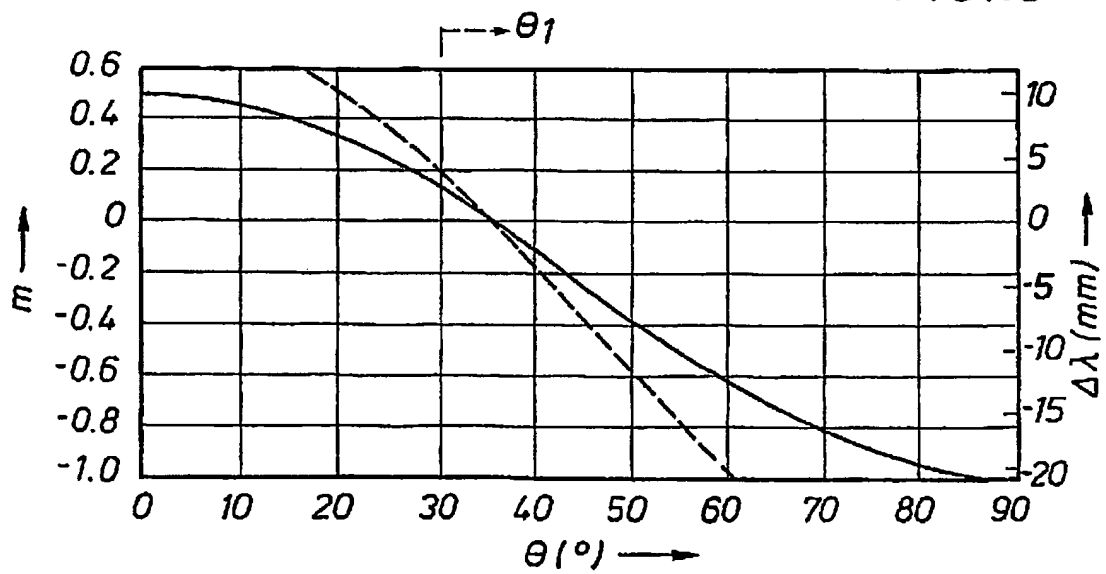


FIG.16

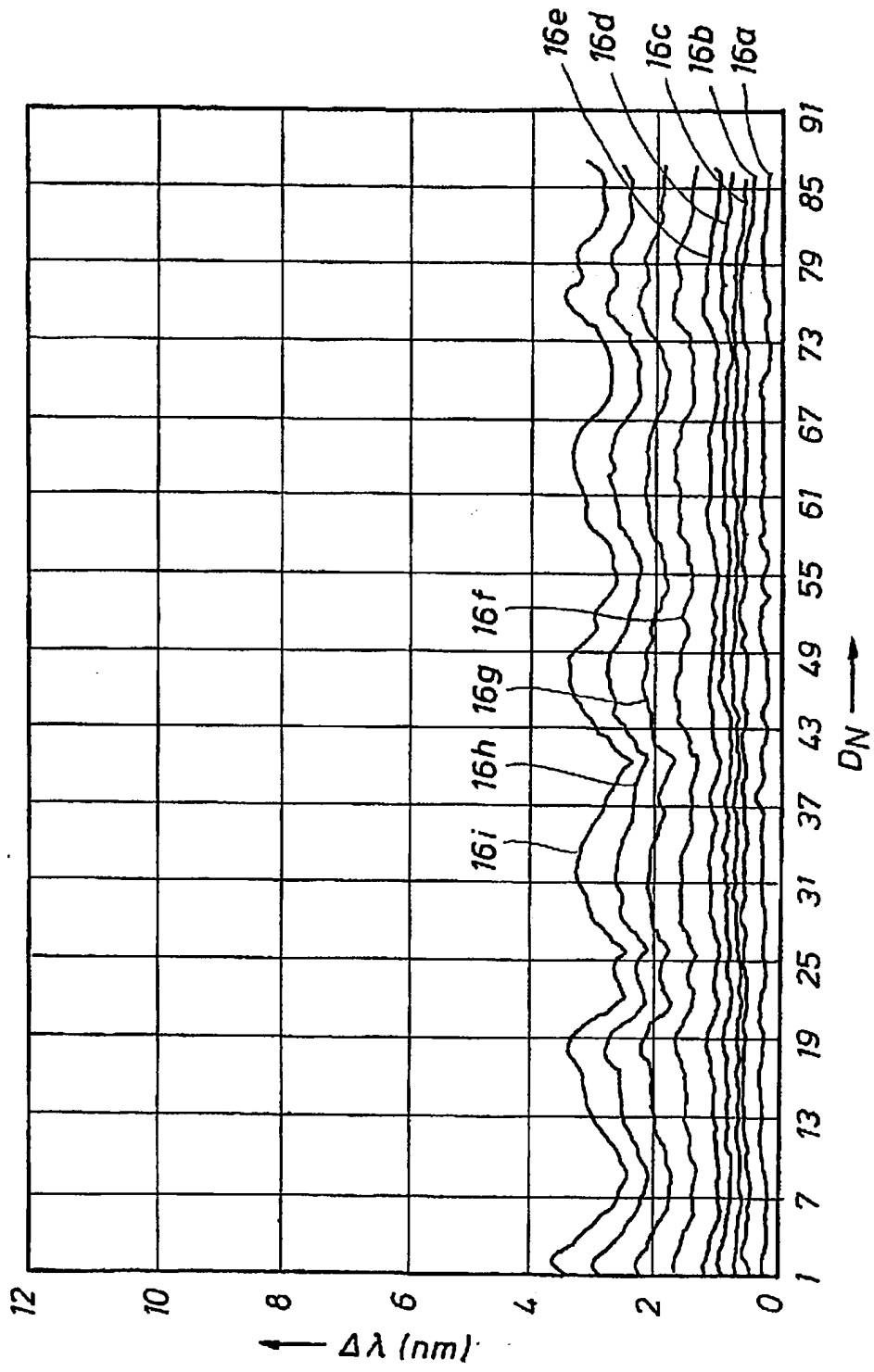


FIG.17

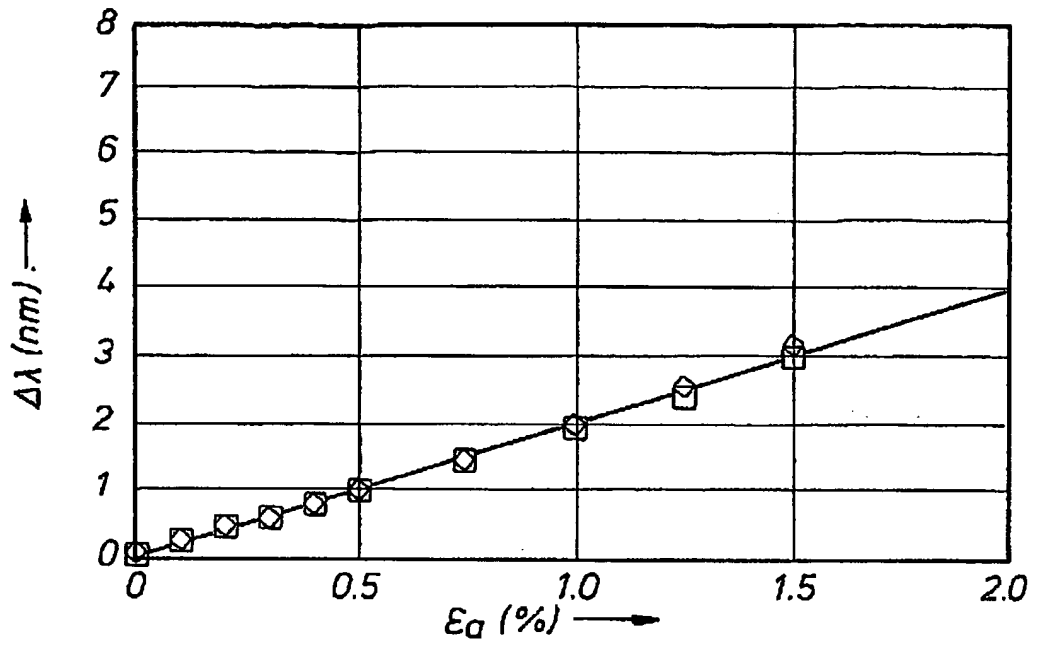


FIG.18

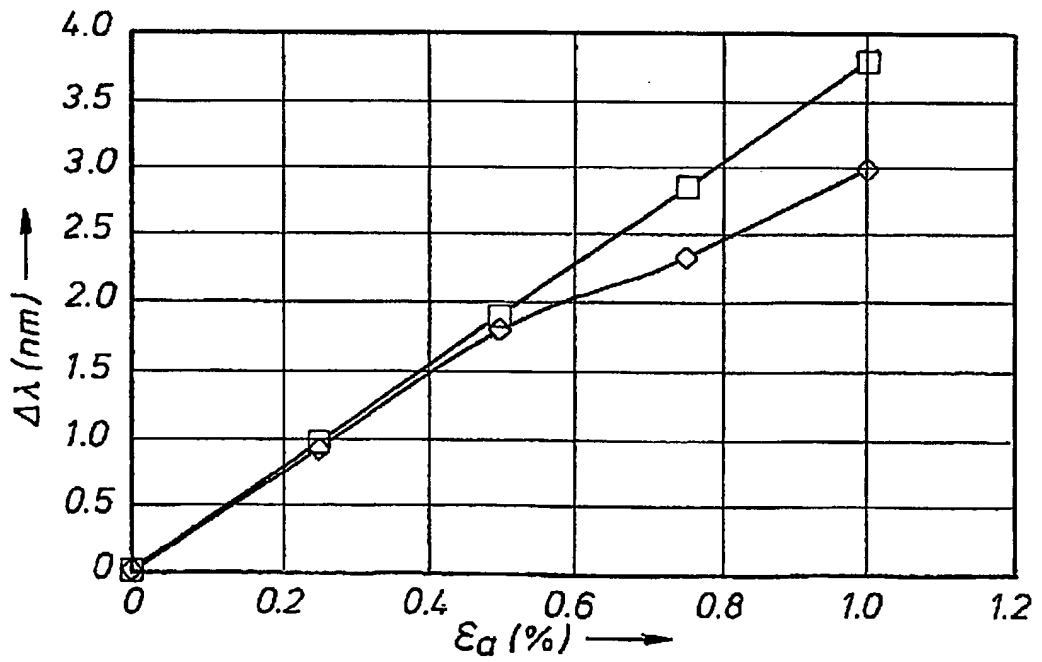


FIG. 19

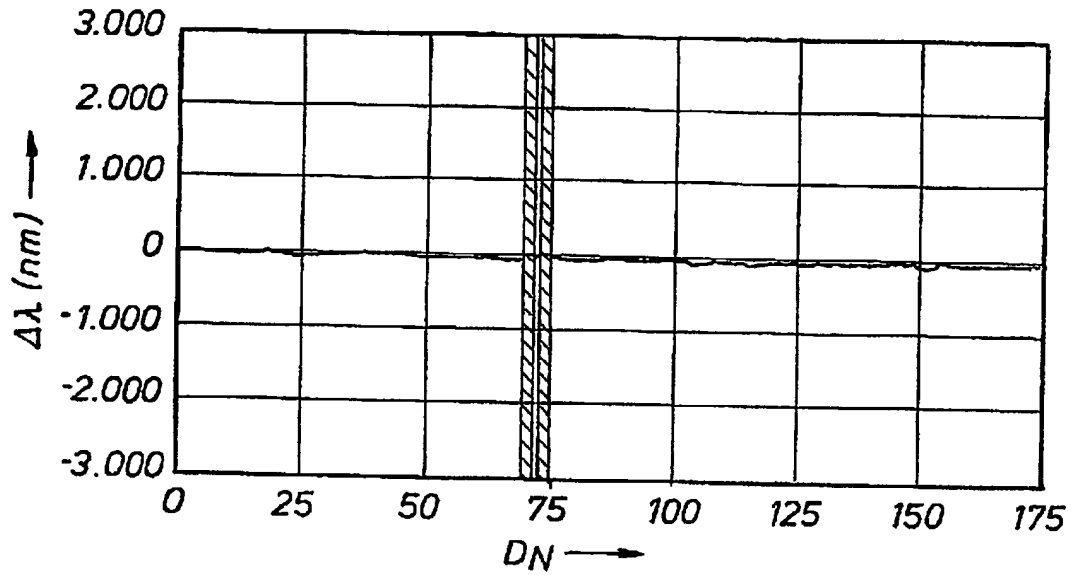


FIG. 20

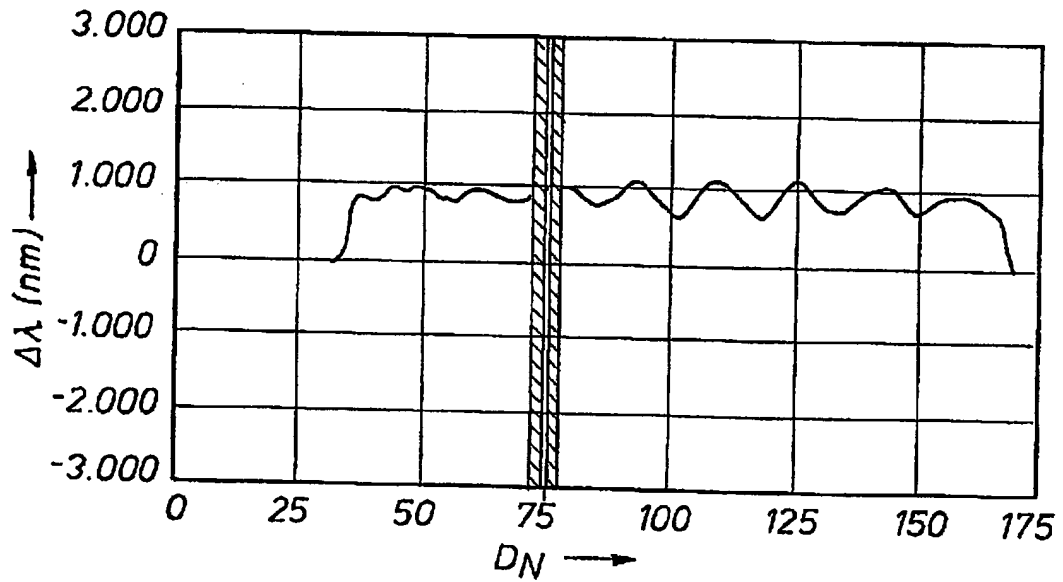


FIG. 21

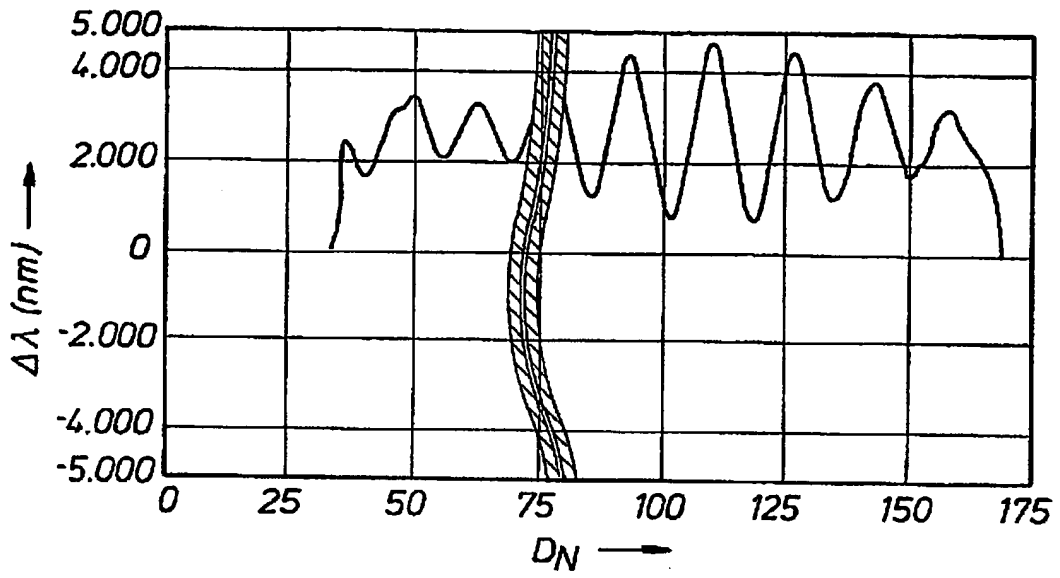
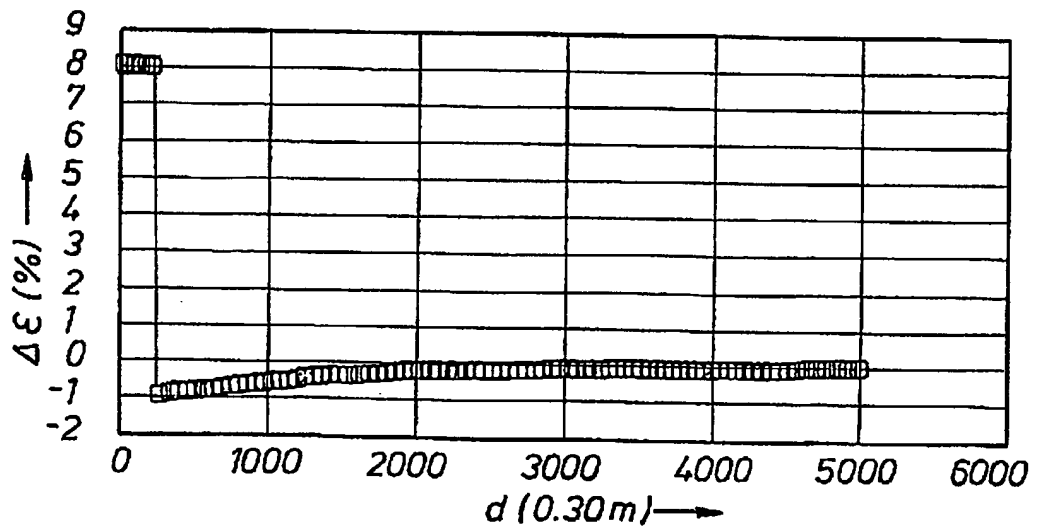


FIG. 23



RESUMO

“MÉTODO PARA APLICAR UM SENSOR DE ESFORÇO A UMA ESTRUTURA CILÍNDRICA, PARA MONITORAR UMA DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA”

5 Método de determinar uma aplicação preferida de uma pluralidade de sensores de esforço a uma estrutura é revelado, para monitorar e formar imagem de deformação da estrutura quando ela é sujeita a várias forças.