



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

**(11) PI 0919941-1 B1**



**(22) Data do Depósito: 22/10/2009**

**(45) Data de Concessão: 09/07/2019**

**(54) Título:** PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE CONTROLE ÓPTICO DE CURVATURA

**(51) Int.Cl.:** E21B 17/01; E21B 47/00; G01M 11/08.

**(52) CPC:** E21B 17/017; E21B 47/0001; G01M 11/088.

**(30) Prioridade Unionista:** 24/10/2008 FR 0805942.

**(73) Titular(es):** TECHNIP FRANCE.

**(72) Inventor(es):** YANN NICOLAS; PHILIPPE LEMBEYE.

**(86) Pedido PCT:** PCT FR2009052023 de 22/10/2009

**(87) Publicação PCT:** WO 2010/046602 de 29/04/2010

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 20/04/2011

**(57) Resumo:** PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE CONTROLE ÓPTICO DE CURVATURA. A invenção se refere a um processo de calibração de um dispositivo de controle da curvatura de um enrijecedor (18) de um conduto flexível marinho, esse dispositivo de controle sendo munido de uma haste deformável (26) que apresenta um eixo central (C) e de pelo menos três sensores ópticos (29, 30, 31) mantidos aplicados contra o perímetro da dita haste (26), que compreende as etapas que consistem em: - para diferentes orientações sucessivas de planos de flexão em torno do dito eixo central: fletir a haste (26) de acordo com um mesmo raio de curvatura; - medir a deformação dos sensores (29, 30, 31) por ocasião da flexão; - extrapolar deformações medidas, uma função sinusoidal da deformação para cada sensor em função da orientação do plano de flexão; - calcular coeficientes de correção de erro em função da decalagem angular entre as funções sinusoidais extrapoladas e em função das amplitudes das curvas sinusoidais extrapoladas

## “PROCESSO DE CALIBRAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE CONTROLE ÓPTICO DE CURVATURA”

**[0001]** A invenção se refere ao domínio do controle óptico de deformação, e em especial ao controle de estruturas tais como condutos flexíveis marinhos ou obras de arte.

**[0002]** Condutos flexíveis marinhos são habitualmente utilizados para o transporte de hidrocarbonetos extraídos de jazidas offshore. Tais condutos são notadamente descritos no documento normativo API RP 17B “Recommended Practice for Flexible Pipe” publicado pelo American Petroleum Institute. Os condutos flexíveis ascendentes (“flexible risers” em inglês) ligam uma instalação de fundo, por exemplo uma cabeça de poço ou um coletor que repousa no fundo marinho, a uma instalação de superfície, por exemplo uma unidade flutuante de produção. Um conduto flexível ascendente deve poder suportar grandes solicitações mecânicas, notadamente aquelas geradas por seu próprio peso, pelas pressões interna e externa, e pelas variações de curvatura geradas pelos movimentos da instalação de superfície sob o efeito do marulho e das correntes marinhas.

**[0003]** Uma solução conhecida que permite reduzir as tensões dinâmicas suportadas por tais condutos consiste em utilizar enrijecedores que formam luvas, adaptados a circundar os mesmos a fim de enrijecê-los e de limitar a curvatura dos mesmos nas zonas críticas, notadamente na parte superior dos mesmos na proximidade da instalação de superfície. De acordo com uma aplicação especial desses enrijecedores nos condutos ascendentes, eles apresentam uma extremidade superior solidarizada à instalação de superfície com o auxílio de um flange e ele se prolongam ao longo do conduto em um comprimento variável. O conduto flexível é enfiado no enrijecedor de modo coaxial. Desse modo, apesar dos efeitos do marulho e das correntes marinhas na proximidade da superfície, o conduto flexível conserva um raio de curvatura nitidamente superior a seu raio de curvatura mínimo aceitável “MBR” (para Minimum Bending Radius, em língua inglesa) e desse modo não é deteriorado. Esses enrijecedores são também suscetíveis de ser enfiados em porções de conduto que se estendem próximo do fundo para limitar mais uma vez a

curvatura das mesmas.

**[0004]** Esses enrijecedores sendo componentes essenciais bastante solicitados, é verificado necessário se assegurar de da integridade dos mesmos durante um tempo de serviço que pode exceder 20 anos. Assim, foi imaginado registrar sistematicamente as deformações desses enrijecedores com o auxílio de dispositivos de controle inseridos na espessura dos mesmos a fim de controlar o bom funcionamento dos mesmos. Essas medidas podem também servir para determinar as tensões dinâmicas cumuladas suportadas pelo conduto ou pelo enrijecedor ao longo do tempo a fim de estimar o estado de fadiga dos mesmos.

**[0005]** O documento WO 2005-088375 descreve um dispositivo de controle da flexão de uma estrutura. Esse dispositivo de controle compreende uma haste rígida deformável que apresenta um eixo central de revolução. A haste central é tipicamente realizada em resina epóxido reforçada por fibra de vidro. A haste rígida deformável é equipada com três sensores ópticos de deformação distribuídos e fixados em seu perímetro. Os sensores ópticos compreendem fibras ópticas paralelas à haste e munidas de redes de Bragg foto-inscritas, que se comportam como calibres ópticos de deformação. As três redes de Bragg têm comprimentos idênticos da ordem de alguns milímetros. Elas são todas as três situadas no mesmo lado axial ao longo da haste, quer dizer que seus três centros são incluídos em um mesmo plano perpendicular ao eixo da haste. As fibras ópticas são alojadas em ranhuras feitas na periferia da haste. Um dispositivo optoeletrônico ligado a esses três sensores permite medir os comprimentos de onda refletidos pelas redes de Bragg e deduzir daí as três deformações axiais  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$ ,  $\varepsilon_c$ , sofridas pelas três fibras ópticas ao nível das ditas três redes de Bragg. Uma vez que essas três deformações axiais foram assim medidas, é possível deduzir daí por cálculo as três incógnitas que são o raio de curvatura  $\rho$  da haste rígida deformável ao nível das três redes de Bragg, a orientação angular  $\psi$  do plano de flexão em relação à haste rígida deformável, e finalmente o alongamento axial homogêneo  $\varepsilon$  sofrido pela haste rígida deformável, o dito alongamento axial homogêneo resultando por exemplo de tensões externas de tração/compressão ou de fenômenos de dilatação térmica.

Esse cálculo, detalhado na página 29 do documento precitado, faz também intervir parâmetros supostos conhecidos sobre a geometria da haste rígida deformável e sensores, notadamente na posição relativa das três redes de Bragg em relação ao eixo da haste rígida deformável.

**[0006]** A haste rígida deformável equipada com os sensores de um tal dispositivo de controle pode ser embutida na espessura de um enrijecedor em uma parte própria para fletir, e paralelamente ao eixo do enrijecedor e ao conduto. Desse modo, quando o conduto flexível está em serviço, os movimentos do enrijecedor provocam a flexão da haste rígida deformável e assim, os sensores fornecem sinais representativos da curvatura do enrijecedor. Com base nesses sinais, a orientação do plano de flexão da haste e o raio de curvatura são calculados. Esses dados podem em seguida ser tratados em tempo real, por exemplo para disparar um alarme se o raio de curvatura se torna inferior a um limite crítico predefinido, ou registrados para tratamento em tempo diferido, por exemplo para estimar o dano por fadiga e a duração de vida restante.

**[0007]** Tais dispositivos são notadamente descritos nos documentos FR2871511, WO2006-021751, e na publicação “Fatigue Monitoring of Flexible Risers Using Novel Shape-Sensing Technology” referência OTC19051, Offshore Technology Conference, Houston, 30 de abril a 3 de maio de 1007, documentos esses que divulgam por outro lado o emprego de hastes rígidas deformáveis de geometria diferente de cilíndrica, por exemplo octogonal ou triangular.

**[0008]** Na publicação OTC19051, a haste rígida deformável compreende quatro sensores ópticos de deformação do tipo rede de Bragg, o quarto tendo sido acrescentado para criar uma redundância. Essa publicação divulga também na página 2 um método de cálculo da curvatura da orientação do plano de flexão a partir das quatro deformações axiais  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ,  $\epsilon_3$ ,  $\epsilon_4$  medidas. Esse método de cálculo faz também intervir a posição relativa das quatro redes de Bragg em relação ao eixo da haste rígida deformável.

**[0009]** Os raios de curvatura aplicados aos enrijecedores variam na prática entre alguns metros e o infinito. Na prática, é necessário que as hastes rígidas

deformáveis de medição de curvatura que equipam esses enrijecedores possam medir precisamente raios de curvatura  $\rho$  superiores a 3 m. A curvatura  $C_u$  sendo o inverso do raio de curvatura ( $C_u = 1/\rho$ ), é possível indiferentemente considerar uma ou outra dessas duas grandezas, mas é mais simples utilizar a curvatura para tratar os problemas de precisão de medição. A faixa de medição de curvatura é portanto de 0 a  $0.33 \text{ m}^{-1}$ . A precisão de medição de curvatura exigida para essa aplicação deve tipicamente ser melhor que  $\pm 0,0015 \text{ m}^{-1}$ , esse nível de precisão sendo necessário para uma análise de dano em fadiga.

**[0010]** Além disso, a fim de facilitar a fabricação, a estocagem, o transporte e a instalação dessas hastes rígidas deformáveis, que podem ter um comprimento total superior a várias dezenas de metros, é desejável que essas últimas possam ser enroladas a um raio mínimo de curvatura da ordem de 0.5 a 1 m. Ora, as fibras ópticas que equipam as hastes rígidas deformáveis não devem ser submetidas a alongamentos relativos superiores a 0,5 %, senão elas apresentariam o risco de ser danificadas. É por essa razão que as hastes rígidas deformáveis destinadas a equipar os enrijecedores dos condutos flexíveis offshore têm na prática um diâmetro pequeno, tipicamente da ordem de 5 mm a 10 mm, o que permite reduzir os alongamentos máximos sofridos pelas fibras ópticas quando a haste rígida deformável é curvada a seu raio mínimo (Ver a página 25 de WO 2005-088375). Esse pequeno diâmetro tem, no entanto, como inconveniente contribuir para reduzir a precisão das medições de curvatura, de tal modo que o objetivo de precisão de  $\pm 0,0015 \text{ m}^{-1}$  seja na prática especialmente difícil de atingir no caso em que o diâmetro da haste deformável é da ordem de 10 mm ou menos.

**[0011]** Um outro fator agravante em relação a esse problema de precisão de medição é que a haste rígida deformável é realizada em resina reforçada com fibra de vidro, de modo que dispersões não desprezáveis são introduzidas em diferentes parâmetros geométricos: diâmetro da haste, forma das ranhuras, desvio angular entre as fibras ópticas, distância entre as fibras ópticas e o eixo central da haste... A fixação das fibras ópticas no perímetro da haste com resinas epóxicas gera também tensões na origem de erros de medição. Tais materiais compósitos, devido a seu

processo de fabricação, têm geralmente tolerâncias dimensionais medíocres, da ordem de mais ou menos alguns décimos de mm. Essas tolerâncias medíocres induzem por outro lado erros que são ainda maiores quanto menor for o diâmetro da haste. Assim, na prática, no caso de uma haste rígida deformável feita de fibra de vidro com diâmetro de 10 mm, foi constatado que o erro de medição de curvatura pode com frequência ultrapassar  $\pm 0,003 \text{ m}^{-1}$ , o que não é satisfatório.

**[0012]** Uma primeira solução para resolver esse problema consiste em testar sistematicamente a precisão de medida de cada haste rígida deformável depois de sua fabricação, e em só conservar aquelas que têm a precisão exigida. No entanto, essa solução gera uma taxa de refugo grande e não é economicamente viável.

**[0013]** Uma segunda solução consiste em realizar a haste rígida deformável a partir de um perfil metálico de alto limite elástico fabricado com uma grande precisão, por exemplo um perfil feito de titânio obtido por trefilação a frio e que apresenta tolerâncias dimensionais no centésimo de milímetro. No entanto, essa solução é pouco vantajosa economicamente.

**[0014]** Uma terceira solução para resolver esse problema consiste em aumentar o diâmetro da haste deformável como é ensinado na publicação OCT19051, esse documento propondo um diâmetro igual a 75 mm. Essa solução permite melhorar a precisão de medição no caso de grandes raios de curvatura. No entanto, ela apresenta o inconveniente de aumentar o raio de curvatura mínimo que a haste rígida deformável pode admitir sem risco de dano das fibras ópticas, o que por um lado apresenta problemas de estocagem e de manipulação da dita haste, e por outro lado impede as medições de pequenos raios de curvatura. Na prática, uma haste rígida deformável com diâmetro de 75 mm deveria ser estocada em bobina com diâmetro de 15 m e não poderia ser utilizada para medir duravelmente, sem risco de ruptura prematura em fadiga, raios de curvaturas inferiores a 15 m a 20 m, raios que o enrijecedor é suscetível de atingir somente por condições de tempo ruim ou de tempestade.

**[0015]** A invenção visa resolver esse problema de precisão de medição de curvatura, ao mesmo tempo em que evita os inconvenientes precitados. A invenção

tem como objeto um processo de calibração de um dispositivo de controle da curvatura de um enrijecedor de um conduto flexível marinho, esse dispositivo de controle sendo munido de uma haste deformável que apresenta um eixo central e de pelo menos três sensores ópticos mantidos aplicados contra o perímetro da dita haste, que compreende as etapas que consistem em:

- para diferentes orientações sucessivas de planos de flexão em torno do dito eixo central:

- fletir a haste de acordo com um mesmo raio de curvatura;

- medir a deformação dos sensores por ocasião da flexão;

- extrapolar deformações medidas, uma função sinusoidal da deformação para cada sensor em função da orientação do plano de flexão;

- calcular coeficientes de correção de erro em função do desvio angular entre as funções sinusoidais extrapoladas e em função das amplitudes das curvas sinusoidais extrapoladas.

**[0016]** De acordo com uma variante, o cálculo dos coeficientes de correção de erro compreende o cálculo das posições reais dos pelo menos três sensores ópticos em relação ao eixo central em função das amplitudes das curvas sinusoidais extrapoladas.

**[0017]** De acordo com mais uma variante, a haste é levada de volta para uma posição substancialmente retilínea depois de cada flexão.

**[0018]** De acordo com mais uma outra variante, a haste é fletida por aplicação contra seu perímetro de um elemento de calibração que apresenta uma curvatura predefinida.

**[0019]** De acordo com uma outra variante, a haste é imobilizada em rotação em relação a seu eixo central, o elemento de calibração sendo montado com rotação em torno desse eixo central.

**[0020]** De acordo com mais uma variante, dois suportes asseguram a manutenção em posição da haste, o elemento de calibração sendo aplicado contra a haste entre os suportes, os suportes permitindo o pivotamento da haste em torno de dois eixos substancialmente perpendiculares ao eixo central da haste.

**[0021]** De acordo com mais uma outra variante, cada sensor óptico compreende um segmento de fibra óptica que compreende uma rede de Bragg e que é mantido aplicado contra o perímetro da haste.

**[0022]** De acordo com uma variante, as redes de Bragg dos diferentes segmentos de fibra são dispostos no mesmo nível de acordo com o eixo central da haste.

**[0023]** De acordo com uma outra variante, a flexão é aplicada ao nível das ditas redes de Bragg.

**[0024]** De acordo com mais uma variante, a extrapolação da função sinusoidal de um sensor estabelece uma função do tipo:

$$\varepsilon_j = A_{j0} + A_{j1} \cdot \cos(\alpha) + B_{j1} \cdot \sin(\alpha)$$

$A_{j1}$  sendo a componente em fase e  $B_{j1}$  a componente em quadratura de fase do harmônico fundamental, essas componentes sendo determinadas por um método de séries de Fourier com base em medidas de deformação,  $\alpha$  sendo a orientação do plano de flexão em torno do eixo central.

**[0025]** De acordo com mais uma outra variante, pelo menos um harmônico de posição superior ao harmônico fundamental é determinado por um método de séries de Fourier, e as medições de deformação são repetidas se a relação entre o harmônico de posição superior e o harmônico fundamental ultrapassa um limite.

**[0026]** Outras características e vantagens da invenção se destacarão claramente da descrição que é feita da mesma abaixo, a título indicativo e de nenhuma forma limitativo, em referência aos desenhos anexos, nos quais:

- a figura 1 é uma vista em corte de lado de um conduto flexível equipado com um enrijecedor ao nível de sua junção com uma estação de superfície;
- a figura 2 é uma vista em corte de cima do enrijecedor munido de um dispositivo de controle;
- a figura 3 é uma vista de lado de um banco de calibração do dispositivo de controle com um aferidor de curvatura afastado de uma haste;
- a figura 4 é uma vista em corte de frente do banco da figura 3;
- a figura 5 é uma vista de lado de um banco de calibração do dispositivo

de controle com um aferidor de curvatura em contato com a haste;

- a figura 6 é uma vista em corte de frente do banco da figura 4;
- a figura 7 é uma vista em corte de frente do banco para uma outra posição angular do aferidor, esse último sendo afastado da haste;
- a figura 8 é uma vista em corte de frente do banco para essa posição angular do aferidor, esse último estando em contato com a haste;
- a figura 9 é uma vista em corte de frente de um suporte de haste do banco;
- a figura 10 é uma vista em corte de lado do suporte de haste da figura 9;
- a figura 11 é uma vista em corte de cima do suporte de haste da figura 9, durante uma flexão da haste;
- a figura 12 é uma vista em corte de lado do suporte de haste da figura 9, durante uma outra flexão da haste;
- a figura 13 é uma vista em corte de lado do suporte da figura 9 munido de uma fixação da haste, essa última estando em repouso;
- a figura 14 é uma vista em corte de lado do suporte da figura 9 munido de uma fixação da haste, essa última estando fletida;
- a figura 15 é uma vista em corte de lado do suporte da figura 9, a haste estando em repouso e munida de uma bainha de proteção;
- a figura 16 é uma vista em corte de lado do suporte da figura 9, a haste estando fletida e munida de uma bainha de proteção;
- a figura 17 representa curvas sinusoidais extrapoladas de uma nuvem de pontos de medição do dispositivo de controle.

**[0027]** A invenção propõe um processo de calibração de um dispositivo de controle da curvatura de uma estrutura, notadamente uma obra de arte ou um enrijecedor de conduto submarino. Esse dispositivo de controle é munido de uma haste deformável que apresenta um eixo central e de pelo menos três sensores ópticos mantidos contra o perímetro da haste. A invenção propõe aplicar flexões de acordo com um mesmo raio de curvatura, mas em planos de flexão diferentes sobre a haste deformável. A partir dessas medições de deformação dos sensores, funções

sinusoidais da deformação em função do plano de flexão são extrapoladas, para deduzir coeficientes de correção de erro dos sensores ópticos.

**[0028]** O cálculo dos coeficientes de correção de erro pode notadamente compreender o cálculo das posições reais dos pelo menos três sensores ópticos em relação ao eixo central C. Esse processo de calibração permite, portanto, determinar de modo preciso e não destrutivo as características geométricas principais da haste que têm uma influência sobre a medição de curvatura, em especial as posições em relação ao eixo central C da haste de sensores ópticos tais como redes de Bragg. O cálculo das posições reais dos sensores é interessante para levar em consideração um comportamento não linear da deformação dos sensores ópticos em função da curvatura da haste. Esse comportamento não linear é especialmente marcado quando a haste deformável apresenta tolerâncias dimensionais medíocres. O cálculo das posições reais dos sensores ópticos permite assim realizar uma modelação geométrica precisa da haste deformável e de seus sensores.

**[0029]** Desse modo, mesmo se a haste deformável apresenta tolerâncias dimensionais medíocres, quer dizer se existem diferenças grandes entre por um lado as cotas nominais em plantas e por outro lado as cotas reais depois de fabricação, permanece apesar de tudo possível obter uma boa precisão de medição de curvatura. A precisão de medição será notadamente mais precisa reutilizando-se para isso as cotas reais calculadas no lugar das cotas nominais por ocasião do cálculo da curvatura em função das medições de alongamento, como será detalhado mais adiante. A invenção permite, portanto, reduzir os refugos de hastes deformáveis instrumentadas, conservar um processo de fabricação e de instalação econômico, assim como um sensor de pequeno diâmetro próprio para medir os pequenos raios de curvatura, ao mesmo tempo em que aumenta bastante a precisão de medição de curvatura, inclusive para os grandes raios de curvatura.

**[0030]** A Figura 1 mostra um conduto flexível 10, comumente chamado “riser” que se estende substancialmente verticalmente a partir da superfície 12 para o fundo marinho 14. Esse conduto flexível 10 apresenta uma extremidade de superfície 16 que é solidária de uma instalação de superfície não representada. Por

outro lado, essa extremidade de superfície 16 é enfiada em um enrijecedor 18 do qual a extremidade superior 20 é mantida em posição fixa sobre uma plataforma e do qual a extremidade inferior 22 é prolongada em torno do conduto 10 na direção do fundo marinho 14 em uma distância, por exemplo entre 5 e 10 metros. Em repouso e não encurvado, esse enrijecedor 18 apresenta um eixo de simetria A. O enrijecedor 18 serve para limitar a amplitude de flexão do conduto 10 na proximidade da superfície 12. O enrijecedor 18 é tipicamente realizado em um material polimérico, por exemplo poliuretano. O material do enrijecedor 18 será vantajosamente mais rígido do que o material do conduto flexível. Na figura 1, o enrijecedor 18 apresenta uma seção anular que diminui da extremidade superior 20 para a extremidade inferior 22. Em todo o comprimento do enrijecedor 18, sensores de deformação 24 são instalados para controlar ao mesmo tempo a amplitude de flexão do enrijecedor 18 e a orientação do plano de flexão.

**[0031]** Agora será feita referência à Figura 2 para descrever um dispositivo de controle associado ao enrijecedor 18. A Figura 2 ilustra em seção reta um bastão que forma uma haste rígida deformável. O bastão 26 é embutido na espessura do enrijecedor 18 até a proximidade de sua extremidade inferior 22. Esse bastão 26 apresenta uma seção circular de eixo central C. Esse bastão 26 apresenta um diâmetro da ordem da dezena de milímetros, por exemplo compreendido entre 4 e 15 mm. A intervalos angulares regulares em torno do eixo C, ranhuras longitudinais 28 são dispostas em todo o comprimento do dito bastão 26. As ranhuras longitudinais 28 são nesse caso aproximadamente deslocadas de 120° umas em relação às outras.

**[0032]** Em cada uma dessas ranhuras 28, uma fibra óptica 29, 30, 31 é retida com o auxílio de uma resina, por exemplo epóxi. Essas fibras ópticas 29, 30, 31 se estendem longitudinalmente em todo o comprimento do dito bastão 26 que ele próprio se estende em todo o comprimento do enrijecedor 18. Desse modo, as fibras ópticas 29, 30, 31 se estendem da extremidade inferior 22 até a extremidade superior 20 e para além para ser conectadas a meios de tratamento do sinal. Redes de Bragg são impressas nas fibras ópticas 29, 30, 31 de acordo com um processo

de foto-inscrição conhecido por outro lado. Cada rede de Bragg tem um comprimento da ordem de alguns milímetros e se comporta como um sensor óptico de medição do alongamento da fibra óptica paralelamente a seu eixo principal. Esse eixo principal é por outro lado substancialmente paralelo ao eixo central C do bastão 26. Cada fibra óptica é equipada com várias redes de Bragg, tipicamente 3 a 10 redes distribuídas no comprimento do enrijecedor, o resto da fibra óptica servindo como canal de transmissão para os sinais ópticos, de acordo com um princípio de medição distribuída bem conhecido e notadamente descrito no documento WO2005-088375. As fibras ópticas 29, 30, 31 compreendem o mesmo número de redes de Bragg, as redes sendo distribuídas de modo idêntico e com as mesmas cotas ao longo das três fibras 29, 30, 31. Uma zona elementar de medição de curvatura, vista de acordo com um plano de corte perpendicular ao eixo central C do bastão 26, compreende três redes de Bragg perpendiculares ao dito plano de corte, essas três redes de Bragg sendo impressas nas três fibras ópticas 29, 30, 31 a cotas idênticas, de modo que elas cortam todas as três o dito plano de corte. Em seguida, o bastão 26 compreende várias zonas elementares de medição de curvatura, tipicamente 3 a 10 zonas distribuídas no comprimento do enrijecedor.

**[0033]** O bastão 26 pode ser realizado em materiais compósitos reforçados por fibras de vidro. Um tal material, é ao mesmo tempo rígido e flexível e absolutamente adaptado para sustentar sensores ópticos. Por outro lado, um tal material é adaptado para acompanhar as deformações longitudinais do enrijecedor 18. O bastão 26 poderá ser incluído dentro de uma bainha de proteção.

**[0034]** Se há um interesse mais precisamente em uma das zonas de medição de curvatura, tal como representada na Figura 2, essa última compreende, portanto, três sensores ópticos constituídos por três redes de Bragg impressas nas três fibras ópticas 29, 30, 31, e distribuídas no perímetro do bastão 26. Os três sensores permitem determinar inteiramente, ao nível dessa zona de medição, a orientação do plano de flexão do bastão 26 e a amplitude da flexão e, por isso mesmo a deformação do enrijecedor 18. Dois dos três sensores são suficientes para determinar completamente o plano de flexão do bastão 26 e a amplitude dessa

flexão, o terceiro sensor permitindo corrigir o sinal fornecido pelos dois outros quando o bastão 26 é submetido além da curvatura a uma deformação axial homogênea de amplitude desconhecida. Essa deformação axial do bastão 26 no enrijecedor 18 é essencialmente devida aos atritos entre o bastão 26 e o enrijecedor 18, e/ou a efeitos ligados às variações de temperatura (dilatação térmica).

**[0035]** A posição das três redes de Bragg impressas nas três fibras ópticas 29, 30, 31, determinada em relação ao eixo central C no plano de corte da Figura 2, e expressa em coordenadas cilíndricas, faz intervir cinco cotas principais  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$  que intervêm na medição de curvatura. Os raios  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  são as distâncias que separam respectivamente o eixo central C das três fibras 29, 30, 31, essas três distâncias sendo expressas no plano de corte transversal que corresponde à zona de medição de curvatura considerada. O ângulo  $\varphi_2$  é o ângulo entre por um lado o segmento que liga o eixo central C e a primeira fibra 29 e por outro lado o segmento que liga o eixo central c e a segunda fibra 30, esse ângulo sendo medido no plano de corte transversal que corresponde à zona de medição de curvatura considerada. O ângulo  $\varphi_3$  é o ângulo entre por um lado o segmento que liga o eixo central C e a primeira fibra 29 e por outro lado o segmento que liga o eixo central C e a terceira fibra 31, esse ângulo sendo medido no plano de corte transversal que corresponde à zona de medição de curvatura considerada.

**[0036]** Se o bastão 26 fosse realizado de modo perfeito, as cotas reais depois de fabricação seriam iguais às cotas nominais em planta: os três raios  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  seriam iguais, e os dois ângulos  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$  valeriam respectivamente  $120^\circ$  e  $240^\circ$ . Nesse caso ideal, é possível calcular precisamente a curvatura a partir por um lado dos alongamentos  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  medidos respectivamente pelos três sensores ópticos 29, 30, 31, e por outro lado das cotas nominais precitadas do bastão 26. Um exemplo de método de cálculo aplicável a esse caso ideal é detalhado na página 29 do documento WO2005-088375.

**[0037]** No entanto, no caso de um bastão real, as cotas reais depois de fabricação podem ser significativamente diferentes das cotas nominais. Assim, como ilustrado na Figura 2, as cotas  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$  não são iguais aos valores

nominais, notadamente em razão do processo de fabricação do bastão 26 e mais especialmente do tamanho das ranhuras 28 nas quais as fibras 29, 30, 31 são coladas. No caso de um bastão 26 feito de fibra de vidro com diâmetro médio de 10 mm, a diferença entre as cotas nominais e reais pode facilmente ultrapassar 0.2 mm para os raios  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  e  $5^\circ$  para os ângulos  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$ . Nesse caso, utilizando-se as cotas nominais no lugar das cotas reais para calcular a curvatura a partir dos alongamentos  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ , se poderia gerar um erro de cálculo na curvatura que pode facilmente ultrapassar  $0,0003 \text{ m}^{-1}$ . Esse erro ligado à geometria do bastão 26 apresenta um nível inaceitável para a aplicação visada, isso ainda mais visto que esse erro vem se adicionar a outros erros de medição e notadamente àqueles relativos às medições de alongamento e às tensões residuais.

**[0038]** Os erros de medição de alongamento são aqueles das redes de Bragg e dos dispositivos optoeletrônicos associados. As técnicas atuais permitem atingir uma precisão de medição de alongamento relativo da ordem de  $3 \text{ } \mu\text{m/m}$  (quer dizer  $3 \cdot 10^{-6} = 0.0003 \%$ ). Esse erro nas medições de alongamento gera por sua vez um erro nas medições de curvatura globalmente inversamente proporcional ao diâmetro médio do bastão 26. No caso de um bastão de diâmetro 10 mm, o erro induzido nas curvaturas é da ordem de  $\pm 0.0006 \text{ m}^{-1}$ .

**[0039]** Mesmo quando o bastão 26 está em repouso, na ausência de flexão ou de deformação axial, as fibras ópticas 29, 30, 31 sofrem, apesar de tudo, tensões residuais. Essas tensões residuais são notadamente induzidas nas fibras ópticas 29, 30, 31 quando essas últimas são fixadas por colagem nas ranhuras 28. A secagem da cola induz notadamente uma tensão prévia em repouso nas fibras ópticas 29, 30, 31. Essas tensões residuais induzem um desvio nas medições de alongamento realizadas pelas redes de Bragg. Esse desvio pode facilmente ultrapassar  $100 \text{ } \mu\text{m/m}$ , e, portanto, induzir erros de medição de curvatura muito grandes, tipicamente superiores a  $0,01 \text{ m}^{-1}$ .

**[0040]** Uma solução que permite corrigir os erros ligados às tensões residuais consiste em medir os três alongamentos  $\varepsilon_{1r}$ ,  $\varepsilon_{2r}$ ,  $\varepsilon_{3r}$  dos três sensores ópticos 29, 30, 31 quando o bastão 26 está em repouso e estendido de modo retilíneo, e em

subtrair em seguida esses três valores de referência às medições de alongamento  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  efetuadas em serviço. Essa correção apresenta, no entanto, um problema prático que limita sua eficácia. De fato, o bastão 26 foi geralmente enrolado por ocasião da fabricação e do transporte, de modo que é difícil estendê-lo de modo perfeitamente retilíneo sem lhe impor uma tração, essa tração gerando tensões que vêm se adicionar às tensões residuais precitadas e, portanto, falsear parcialmente a correção. É, portanto, preferível reduzir ao máximo a tração por ocasião da etapa de medição dos alongamentos  $\varepsilon_{1r}$ ,  $\varepsilon_{2r}$ ,  $\varepsilon_{3r}$  ligados às tensões residuais utilizando para isso meios adaptados de manutenção do bastão 26 na posição retilínea, por exemplo um suporte do tipo tubo metálico retilíneo do qual a perfuração é precisamente ajustada ao diâmetro exterior do bastão. Na prática, se tais precauções são tomadas, o erro de medição de curvatura ligado às tensões residuais pode ser trazido para aquém de  $\pm 0.0005 \text{ m}^{-1}$ .

**[0041]** Assim, no caso de um bastão 26 feito de fibra de vidro com diâmetro de 10 mm, o erro total de medição de curvatura é obtido adicionando-se os diferentes erros precitados, a saber um erro de  $0.0005 \text{ m}^{-1}$  ligado às tensões residuais (depois de correção), um erro de  $0.0006 \text{ m}^{-1}$  ligado às medições de alongamento, e finalmente no caso em que as cotas nominais do bastão 26 são utilizadas para o cálculo de curvatura, um erro ligado às imperfeições geométricas do bastão 26 que pode atingir  $0.003 \text{ m}^{-1}$ . O erro total pode, portanto, nesse caso ultrapassar  $\pm 0.004 \text{ m}^{-1}$ , o que não é de nenhuma forma satisfatório visto que a precisão exigida para a aplicação é  $\pm 0.0015 \text{ m}^{-1}$ .

**[0042]** É possível reduzir consideravelmente o erro ligado às imperfeições geométricas do bastão 26, se determinado para isso previamente, as cotas reais principais do bastão 26, e utilizando-se em seguida essas cotas reais no lugar das cotas nominais para efetuar os cálculos de curvatura. Além disso, esse processo permite determinar as cotas reais principais do bastão 26 com uma grande precisão, na prática da ordem de alguns centésimos de milímetros, tipicamente  $\pm 0.02 \text{ mm}$ . Em seguida, utilizando-se essas cotas reais no lugar das cotas nominais no cálculo de curvatura, o erro ligado às imperfeições geométricas do bastão 26 pode ser

reduzido a um nível inferior a  $\pm 0.0005 \text{ m}^{-1}$ . Nesse caso, o erro total de medição de curvatura pode ser mantido a um nível satisfatório da ordem de  $\pm 0.0015 \text{ m}^{-1}$ .

**[0043]** As figuras 3 e 5 representam esquematicamente em vista de lado um banco de calibração 4 do dispositivo de controle. As figuras 4 e 6 representam esse mesmo banco 4 em vista de frente. O banco de calibração 4 compreende um elemento de calibração 40 que apresenta uma face destinada a entrar em contato com a haste 26. Essa face apresenta uma canelura que se estende de acordo com um raio de curvatura predefinido, por exemplo da ordem de 10 metros. Esse raio de curvatura será suficientemente reduzido para limitar a amplitude dos erros de aferições. A canelura é destinada a receber a haste 26 para aplicar a ela esse raio de curvatura.

**[0044]** O elemento de calibração 40 é montado em uma coroa de guia 42, de modo a descrever um círculo em torno da haste 26. A rotação do elemento de calibração 40 é efetuada em torno do eixo central C. O banco de calibração 4 compreende suportes 44 e 45 afastados um do outro. O elemento de calibração 40 é disposto substancialmente à meia distância entre os suportes 44 e 45. O elemento de calibração 40 é montado com rotação sobre a coroa de guia 42 por intermédio de um macaco 41. O macaco 41 permite deslocar o elemento de calibração 40 radialmente, seja para afastá-lo seja para aplicá-lo contra a haste 26. Os suportes 44 e 45 apresentam respectivamente articulações 46 e 47, destinadas a definir os graus de liberdade da haste 26 em relação ao banco 4. A zona de medição de curvatura em decorrer de calibração, constituída por três redes de Bragg dispostas nas três fibras ópticas é vantajosamente disposta na proximidade do centro do elemento 40, à meia distância entre os suportes 44 e 45.

**[0045]** Durante a calibração, as fibras ópticas da haste 26 são ligadas a um dispositivo optoeletrônico 48 de medição dos comprimentos de onda característicos das redes de Bragg. O dispositivo 48 determina em tempo real, a partir desses comprimentos de onda, a deformação axial das redes de Bragg de cada uma das fibras 29, 30, 31, de acordo com um método conhecido em si pelo profissional. As deformações medidas variam tipicamente entre mais ou menos  $1500 \mu\text{m/m}$  ( $\pm 0.15$

%). O dispositivo 48 é conectado a um sistema informático 50 de modo a registrar as medições de deformação das fibras para as diferentes orientações do plano de flexão. O sistema informático 50 é munido de meios de tratamento que permitem extrapolar uma função sinusoidal da deformação de cada sensor em função do ângulo do plano de flexão.

**[0046]** Nas figuras 3 e 4, a haste 26 está em repouso. O macaco 41 mantém o elemento de calibração 40 afastado da haste 26. Nas figuras 5 e 6, a haste 26 está fletida de acordo com um raio de curvatura predefinido pelo elemento de calibração 40. O macaco 41 mantém o elemento de calibração 40 aplicado contra a haste 26.

**[0047]** Durante a calibração, o elemento 40 é disposto em diferentes posições angulares em torno do eixo C. Em cada uma dessas posições angulares, o elemento 40 vem fletir a haste 26 de modo a aplicar a ela seu raio de curvatura. A cada posição angular do elemento 40 corresponde uma orientação de um plano de flexão da haste 26. O elemento 40 poderá fletir a haste 26 de acordo com incrementos angulares. O elemento 40 poderá notadamente aplicar uma flexão a cada 5, 10 ou 20° em torno da haste 26.

**[0048]** Nas figuras 7 e 8, o elemento 40 é colocado em uma posição angular deslocada de um ângulo  $\alpha_1$  em relação à vertical. Na figura 8, o elemento 40 é acionado pelo macaco 41 e vem fletir a haste 26 de modo a aplicar a ela seu raio de curvatura. O plano de flexão da haste 26 apresenta uma inclinação do ângulo  $\alpha_1$ . Durante essa flexão, as deformações induzidas pela flexão são medidas pelos três sensores.

**[0049]** Vantajosamente, entre duas flexões sucessivas da haste 26, essa última é levada de volta para uma posição de repouso substancialmente retilínea. Assim, evita-se aplicar esforços de torção sobre a haste 26 suscetíveis de introduzir erros de medição. Como ilustrado nas figuras 3, 4 e 7, o elemento 40 é mantido afastado da haste 26. Desde então, a haste 26 é levada de volta para sua posição de repouso na qual ela é substancialmente retilínea. É possível também considerar que um gabarito retilíneo leve de volta a haste 26 para sua posição de repouso.

**[0050]** No exemplo, a face do elemento de calibração 40 que entra em contato

com a haste 26 é convexa. É possível também considerar aplicar o raio de curvatura predefinido mantendo-se a haste 26 em posição entre o elemento de calibração 40 e um aferidor côncavo disposto confrontante.

**[0051]** As figuras 9 a 12 representam a estrutura de um exemplo preferencial do suporte 45. Essa estrutura é destinada a limitar os momentos de flexão na haste 26 ao nível de sua manutenção em posição em relação ao suporte 45, permitindo para isso uma rotação da haste 26 em torno de eixo perpendiculares a seu eixo central C. A extremidade superior do suporte 45 apresenta uma extremidade superior em forma de forquilha. A articulação 47 é montada pivotante entre duas faces opostas da forquilha. A articulação 47 compreende um primeiro e um segundo quadros 471 e 472. O primeiro quadro 471 é montado pivotante em relação ao suporte 45 em torno de um eixo D substancialmente perpendicular ao eixo central C da haste 26 em repouso. O primeiro quadro 471 é montado pivotante por intermédio de árvores 473. A guia em rotação das árvores 473 em relação à forquilha pode ser realizada com o auxílio de rolamentos de esferas ou de gaiola das agulhas a fim de limitar os atritos e as tensões parasitas na haste 26 durante sua flexão. Os eixos C, D e E são secantes.

**[0052]** Nas figuras 9 e 10, a articulação 47 é disposta em sua posição quando a haste 26 está em repouso. Na figura 11, uma flexão é aplicada sobre a haste 26 em um plano de flexão que inclui o eixo D. Na figura 12, uma flexão é aplicada à haste 26 em um plano de flexão normal ao eixo D.

**[0053]** Nesse modo de realização, o elemento 40 é diretamente aplicado contra a haste 26. A haste 26 adota assim o raio de curvatura predefinido com uma precisão muito grande. No entanto, esse modo de aplicação pode induzir uma ligeira tração axial na haste 26. Para limitar essa última, o suporte 44 apresentará vantajosamente uma estrutura similar ao suporte 45, que permite a rotação da haste 26 de acordo com dois eixos perpendiculares ao eixo central C.

**[0054]** As figuras 13 e 14 representam o suporte 45 munido de uma luva 52 por intermédio da qual a haste 26 é montada na articulação 47. A luva 52 apresenta uma seção transversal da qual a periferia tem uma forma substancialmente retangular. O

segundo quadro 472 apresenta uma perfuração de forma correspondente, a fim de impedir qualquer rotação da luva em relação ao segundo quadro 472. O ajuste da luva 52 em relação ao segundo quadro 472, seu estado de superfície e o material presente em sua periferia serão escolhidos de modo que a luva 52 deslize com um mínimo de atritos no segundo quadro 472 de acordo com o eixo central C. A luva 52 apresenta uma perfuração longitudinal em sua parte mediana. Essa perfuração longitudinal é atravessada pela haste 26.

**[0055]** A luva 52 dispõe de um órgão 56 que vem comprimir a haste 26 a fim de impedir uma rotação dessa última em torno do eixo central C. É possível também considerar impedir a rotação da haste 26 em torno do eixo C por outros meios. É possível notadamente considerar utilizar uma luva que apresenta uma ranhura longitudinal que desemboca na perfuração longitudinal. Por meios de aperto, é possível aproximar as faces dessa ranhura a fim de reduzir o diâmetro da perfuração e assim bloquear a rotação da haste 26.

**[0056]** A fim de aplicar uma tração constante na haste 26 e a fim de solicitar essa última para sua posição em repouso entre duas flexões, o banco 4 apresenta vantajosamente meios de retorno que induzem uma tração sobre a haste de acordo com o eixo central C. No exemplo ilustrado, os meios de retorno compreendem uma mola de compressão 54. A mola 54 é destinada a ser comprimida entre um batente da luva 52 e uma extremidade longitudinal do segundo quadro 472. A luva 52 poderá apresentar localmente uma seção transversal da qual a periferia é circular, a fim de receber uma mola 54 helicoidal.

**[0057]** Não é necessário que o suporte 44 seja também munido de uma mola de retorno. A haste 26 poderá assim ser montada na articulação 46 por intermédio de uma luva não ilustrada encastrada nessa articulação 46.

**[0058]** Na figura 13, a haste 26 está em repouso. A mola 54 pode eventualmente aplicar uma tensão nessa posição, a fim de garantir que a haste 26 permaneça reta contra o suporte em repouso. Uma medição de deformação da haste 26 em repouso poderá ser efetuada para determinar decalagens de medição induzidas por essa tensão. Na figura 14, uma flexão é aplicada sobre a haste 26. Devido ao

alongamento da parte da haste presente entre os suportes 44 e 45, a luva 52 se translata de acordo com o eixo C na direção do suporte 44. Assim, a mola 54 é comprimida.

**[0059]** No exemplo ilustrado nas figuras 13 e 14, os meios de retorno da haste são dispostos ao nível da articulação 47. No entanto, outras alternativas podem também ser consideradas. É possível notadamente considerar que um dos suportes 44 ou 45 seja montado em translação de acordo com o eixo C em relação ao solo, como meios de retorno.

**[0060]** As figuras 15 e 16 representam uma alternativa de retenção da haste 26 pelos suportes 44 e 45. A fim de proteger a haste 26, essa última é disposta dentro de uma bainha flexível 43 que se estende entre os suportes 44 e 45. A luva 52 aloja uma extremidade da bainha 43 e um ressalto forma um batente para as translações da bainha flexível 43 de acordo com o eixo C. A bainha flexível 43 é imobilizada em rotação em torno do eixo C por todos os meios apropriados. A bainha flexível 43 apresenta um diâmetro interior ligeiramente superior ao diâmetro exterior da haste 26, a diferença entre esses dois diâmetros devendo ser preferencialmente inferior a 3 mm a fim de minimizar as diferenças de curvatura entre a bainha flexível 43 e a haste 26. Assim, por exemplo, no caso em que o elemento de calibração 40 apresenta um raio de curvatura igual a 5 m, em que a haste 26 apresenta um diâmetro exterior igual a 10 mm e em que a bainha flexível 43 apresenta um diâmetro interior igual a 12 mm, a diferença máxima de curvatura entre a haste 26 e a bainha flexível 43 é da ordem de  $0.00008\text{ m}^{-1}$ , de modo que o erro de calibração ligado a essa diferença é pequeno em relação à precisão visada ( $\pm 0.0015\text{ m}^{-1}$ ). De preferência, a bainha flexível 43 será realizada de modo que os atritos com a haste 26 sejam reduzidos ao máximo. O diâmetro interior da bainha flexível 43 poderá notadamente ser revestido ou constituído por um material de baixo coeficiente de atrito tal como politetrafluoretileno. Nesse exemplo, o elemento de calibração 40 entra em contato com a bainha flexível 43 para aplicar seu raio de curvatura. Assim, a haste 26 está protegida do contato com o elemento 40. Como no exemplo das figuras 13 e 14, uma mola de retorno 54 é colocada em compressão entre a luva 52

e o segundo quadro 472 de acordo com o eixo C. Meios não representados permitem impedir a rotação de acordo com o eixo C da haste 26 em relação à bainha flexível 43. Esse grau de liberdade em rotação de acordo com o eixo C pode por exemplo ser bloqueado comprimindo-se localmente a haste 26 contra a luva 52 com meios de aperto desmontáveis.

**[0061]** No modo de realização que utiliza a bainha flexível 43, a correção dos erros ligados às tensões residuais pode ser efetuada por medições de alongamento quando a haste volta para sua posição retilínea. Devido à presença da bainha 43, as tensões axiais sobre a haste serão relativamente limitadas. Vantajosamente, uma medição de alongamento pode ser realizada depois de diferentes ângulos de curvatura aplicados à haste. As medições de alongamento apresentarão assim uma certa redundância, garantindo a precisão do cálculo das tensões residuais.

**[0062]** Os meios de tratamento utilizam as nuvens de pontos de medição para determinar de modo conhecido em si funções sinusoidais que têm um período conhecido antecipadamente, no caso presente  $360^\circ$  ou  $2\pi$  radianos. Cada função poderá notadamente ser determinada com o auxílio de um método dos mínimos quadrados iterativo, impondo para isso por exemplo o período da função sinusoidal a determinar. A utilização de um número grande de medições introduz uma redundância na calibração do dispositivo de controle. As funções sinusoidais extrapoladas dessas medições apresentam, portanto, uma grande precisão, os erros de tipo gaussiano sendo eliminados.

**[0063]** Um método de cálculo da função sinusoidal baseado nas séries de Fourier é também descrito abaixo. Esse método é baseado na decomposição em séries de Fourier de uma função periódica que interpola os pontos de medição.

**[0064]** Na seqüência,  $i$  será o índice de uma medição de flexão,  $i$  variando entre 1 e  $n$ ,  $n$  sendo o número de medições de flexão efetuadas.  $\alpha_i$  designará o ângulo do plano de curvatura para a medição de índice  $i$ .

**[0065]** Nesse exemplo, basear-se-á em medições de flexão de acordo com planos de flexão espaçados de um incremento de ângulo  $\Delta\alpha$  fixo.  $\Delta\alpha$  é assim definido por  $\Delta\alpha = 2\pi/n$  (em radianos). É possível assim exprimir  $\alpha_i$  por  $\alpha_i = (i-1)*\Delta\alpha =$

$(i-1) \cdot 2 \pi/n$ . Assim, para  $\Delta\alpha = 5^\circ$  (em graus),  $n = 72$ . A utilização de planos de flexão distantes de um ângulo fixo permite facilitar a automatização do banco de calibração e simplificar bastante os cálculos de extrapolação da função sinusóide.

**[0066]** Exprimir-se-á a função sinusoidal  $\varepsilon_j$  de deformação a extrapolar para um sensor de índice  $j$  sob a forma seguinte:

$$\varepsilon_j = A_{j0} + A_{j1} \cdot \cos(\alpha) + B_{j1} \cdot \sin(\alpha)$$

$$A_{j0} = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n (\Delta\alpha \cdot \varepsilon_{ji}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji}$$

**[0067]**  $A_{j0}$  corresponde a um valor de desvio do sensor  $j$ , valor ligado por um lado às tensões residuais de colagem do sensor  $j$  na haste 26, e por outro lado à tensão aplicada pela mola de retorno 54. No caso em que o banco de calibração está equipado com uma bainha flexível 43 que apresenta um baixo coeficiente de atrito,  $A_{j0}$  está essencialmente ligado às tensões residuais de colagem das fibras

$$A_{j1} = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n (\Delta\alpha \cdot \varepsilon_{ji} \cdot \cos \alpha_i) = \frac{\Delta\alpha}{\pi} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji} \cdot \cos \alpha_i = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji} \cdot \cos \alpha_i$$

**[0068]**  $A_{j1}$  é a componente em fase do harmônico fundamental do sensor  $j$ .

$$B_{j1} = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^n (\Delta\alpha \cdot \varepsilon_{ji} \cdot \sin \alpha_i) = \frac{\Delta\alpha}{\pi} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji} \cdot \sin \alpha_i = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ji} \cdot \sin \alpha_i$$

**[0069]**  $B_{j1}$  é a componente em quadratura de fase do harmônico fundamental do sensor  $j$ .

**[0070]** A função sinusoidal  $\varepsilon_j$  pode também ser expressa sob a forma seguinte

$$\varepsilon_j = A_{j0} + D_{j1} \cdot \cos(\alpha - \varphi_j)$$

**[0071]**  $\varphi_j$  sendo a diferença angular entre o sensor de índice  $j$  e o sensor de índice 1.  $\varphi$  é portanto nulo. O valor  $D_{j1}$  é extrapolado dos valores calculados antes, como se segue:

$$D_{j1} = \sqrt{A_{j1}^2 + B_{j1}^2}$$

E:

$$\varphi_j = \text{Arctan}(B_{j1}/A_{j1}) \text{ se } A_{j1} \neq 0$$

$$\varphi = \pi/2 \text{ se } A_{j1} = 0$$

**[0072]** A figura 17 representa nuvens de pontos de medição de deformações obtidos por ocasião de um ciclo de calibração, e funções sinusoidais extrapoladas desses pontos  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  as deformações respectivas das fibras 30 são assim expressas sob a forma de funções sinusoidais da forma seguinte:

$$\varepsilon_1 = D_{11}\cos(\alpha) + A_{10}$$

$$\varepsilon_2 = D_{21}\cos(\alpha - \varphi_2) + A_{20}$$

$$\varepsilon_3 = D_{31}\cos(\alpha - \varphi_3) + A_{30}$$

**[0073]** Os termos  $D_{11}$ ,  $D_{21}$  e  $D_{31}$  permitem calcular as cotas reais  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  representadas na figura 2. De fato:

$$r_1 = R \cdot D_{11}$$

$$r_2 = R \cdot D_{21}$$

$$r_3 = R \cdot D_{31}$$

**[0074]** R sendo a curvatura aplicada ao centro C da haste 26 pelo elemento de calibração 40. Esse parâmetro é, portanto, conhecido antecipadamente.

**[0075]** As defasagens  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$  entre as sinusóides são respectivamente iguais às cotas angulares  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$  representadas na figura 2.

**[0076]** Os termos  $A_{10}$ ,  $A_{20}$  e  $A_{30}$  estão ligados às tensões residuais de colagem, como foi explicado mais acima.

**[0077]** Para aumentar a precisão da calibração, funções sinusoidais poderão ser extrapoladas para medições realizadas com outros raios de curvatura, utilizando-se elementos de calibração que apresentam raios de curvatura diferentes.

**[0078]** Esse processo de calibração pode naturalmente ser aplicado a uma haste que compreende um número de sensores ópticos superior a 3, por exemplo uma haste que compreende 4 fibras como aquela divulgada na publicação OTC19051 referenciada mais acima.

**[0079]** Nesse caso, obtém-se no final de um ciclo de calibração tantas nuvens de pontos de medição de deformações e tantas sinusóides que extrapolam esses

pontos, quantos forem os sensores ópticos. A meia amplitude  $D_{j1}$  de cada sinusóide número  $j$  permite determinar as distâncias  $R_j$  que separam o sensor óptico correspondente do eixo central  $C$  da haste deformável ( $r_j = R \cdot D_{j1}$ ). A defasagem  $\varphi_j$  entre a sinusóide número  $j$  e aquela número 1 é igual à cota angular correspondente entre o sensor óptico número  $j$  e aquele número 1.

**[0080]** Um tal processo de calibração permite obter uma calibração precisa do dispositivo de controle, mesmo em presença de outras fontes de dispersão, como uma bainha flexível de proteção que circunda a haste 26. Os dados de calibração são memorizados no dispositivo de tratamento em tempo real dos sinais ópticos dos diferentes sensores quando o dispositivo de controle está em serviço. As cotas reais calculadas de acordo com um tal processo de calibração permitem garantir cálculos de curvatura de uma precisão muito grande.

**[0081]** Para ilustrar esses cálculos, será tomado o exemplo de uma haste que compreende 3 sensores ópticos do tipo daquela da figura 2, e que teria sido previamente submetida ao processo de calibração que é objeto do presente pedido. As cotas reais  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $\varphi_2$  e  $\varphi_3$  foram, portanto, determinadas com precisão. Além disso, as decalagens (offsets)  $\varepsilon_{1r}$ ,  $\varepsilon_{2r}$ ,  $\varepsilon_{3r}$  nas medições de alongamento ligadas às tensões residuais foram também determinadas quando a haste está estendida retilineamente e em repouso de acordo com o método descrito mais acima. Quando a haste está em serviço, os três sensores ópticos fornecem com intervalo temporal constante, por exemplo a cada décimo de segundo, três medições de alongamento  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ . A partir dessas três medições de alongamento, é preciso calcular as três incógnitas que são o raio de curvatura  $\rho$  da haste, a orientação angular  $\psi$  do plano de flexão em relação à haste, e finalmente o alongamento axial homogêneo  $\varepsilon$  da haste. Na prática, isso é o mesmo que resolver o sistema de equações seguinte:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \varepsilon_{1r} + \varepsilon + (r_1/\rho) \cos(\psi) \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_{2r} + \varepsilon + (r_2/\rho) \cos(\psi - \varphi_2) \\ \varepsilon_3 &= \varepsilon_{3r} + \varepsilon + (r_3/\rho) \cos(\psi - \varphi_3)\end{aligned}$$

**[0082]** Esse sistema de 3 equações com 3 incógnitas pode ser resolvido analiticamente, por exemplo começando-se por calcular o ângulo  $\psi$  do seguinte

modo:

$$\operatorname{tg}(\Psi) = \frac{-L + M \frac{\varepsilon'_1/2 + \varepsilon'_3/2 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_3}}{K + N \frac{\varepsilon'_1/2 + \varepsilon'_3/2 - \varepsilon'_2}{\varepsilon'_1 - \varepsilon'_3}}$$

Com:

$$\varepsilon'_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon_{1r}$$

$$\varepsilon'_2 = \varepsilon_2 - \varepsilon_{2r}$$

$$\varepsilon'_3 = \varepsilon_3 - \varepsilon_{3r}$$

$$\beta_2 = \varphi_2 - \pi/2$$

$$\beta_3 = \varphi_3 - \pi$$

$$K = r_2 \cos(\beta_2) + \frac{r_3 \sin(\beta_3)}{2}$$

$$L = r_2 \sin(\beta_2) + \frac{r_1 - r_3 \cos(\beta_3)}{2}$$

$$M = r_1 + r_3 \cos(\beta_3)$$

$$N = r_3 \sin(\beta_3)$$

**[0083]** Uma vez que o ângulo  $\psi$  foi assim calculado, é possível deduzir o raio de curvatura  $\rho$  do seguinte modo:

$$\rho = \frac{K \sin(\Psi) + L \cos(\Psi)}{\varepsilon'_1/2 + \varepsilon'_3/2 - \varepsilon'_2}$$

**[0084]** Finalmente, uma vez que  $\psi$  e  $\rho$  foram calculados, o alongamento axial homogêneo pode ser facilmente deduzido:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_{1r} - (r_1/\rho) \cos(\psi)$$

**[0085]** Esses cálculos podem ser efetuados em velocidade muito grande por um microcomputador de potência corrente. Na prática, os tempos de cálculos são desprezáveis diante dos tempos de medição dos alongamentos. É assim possível medir em tempo real várias centenas de curvaturas por segundo.

**[0086]** Devido à melhoria substancial da precisão do dispositivo de controle, um número reduzido desses dispositivos poderá ser montado em um enrijecedor ou uma obra de arte sem prejudicar bastante a precisão das medições efetuadas.

**[0087]** No que diz respeito ao processo de calibração, será possível também determinar harmônicos de posição mais elevada, com base nessas mesmas medições. Em função da relação entre a amplitude desses harmônicos e a amplitude do harmônico fundamental, será possível determinar se a qualidade da calibração é suficiente para determinar com precisão as cotas reais da haste.

**[0088]** A partir do método baseado nas séries de Fourier detalhados antes, será possível notadamente calcular os principais harmônicos de posição superior a 1, por exemplo os harmônicos ímpares de posição compreendida entre 3 e 11, e comparar os mesmos com o harmônico fundamental (de posição 1) calculando-se uma taxa de harmônicos igual à relação entre por um lado a média harmônica das amplitudes de posição superior a 1 e por outro lado a amplitude do harmônico fundamental. Se essa taxa de harmônicos excede um certo limite, isso significa que a nuvem de pontos correspondente está afastada demais de uma sinusóide e que houve provavelmente um problema durante o ciclo de calibração (por exemplo o bloqueio de uma articulação ou de uma mola de retorno). Nesse caso, o banco de calibração exigirá automaticamente que sejam verificadas as montagens mecânicas e que seja executado de novo um ciclo de medições de flexão.

**[0089]** Ainda que a invenção tenha sido descrita em especial com sensores ópticos formados por redes de Bragg, outros sensores ópticos conhecidos podem ser utilizados, por exemplo sensores de medição distribuída de deformações axiais que utilizam um método de reflexometria Brillouin.

## REIVINDICAÇÕES

1. Processo de calibração de um dispositivo de monitoração da curvatura de uma estrutura, esse dispositivo de monitoração sendo munido de uma haste deformável (26) que apresenta um eixo central (C) e de pelo menos três sensores ópticos (29, 30, 31) mantidos aplicados contra o perímetro da dita haste (26), caracterizado pelo fato de que compreende as etapas que consistem em:

- para diferentes orientações sucessivas de planos de flexão em torno do dito eixo central:

- fletir a haste (26) de acordo com um mesmo raio de curvatura;
- medir a deformação dos sensores (29, 30, 31) durante a flexão;
- extrapolar a partir das deformações medidas, uma função senoidal da deformação para cada sensor em função da orientação do plano de flexão;
- calcular coeficientes de correção de erro em função do desvio angular entre as funções senoidais extrapoladas e em função das amplitudes das curvas senoidais extrapoladas.

2. Processo de calibração, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a dita estrutura é um enrijecedor (18) de um conduto flexível marinho.

3. Processo de calibração, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a dita estrutura é uma construção.

4. Processo de calibração, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado pelo fato de que o cálculo dos coeficientes de correção de erro compreende o cálculo das posições reais dos pelo menos três sensores ópticos em relação ao eixo central (C) em função das amplitudes das curvas senoidais extrapoladas.

5. Processo de calibração de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado pelo fato de que a haste (26) é levada de volta para uma posição substancialmente retilínea depois de cada operação de flexão.

6. Processo de calibração, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 5, caracterizado pelo fato de que a haste (26) é fletida por

aplicação contra seu perímetro de um elemento de calibração (40) que apresenta uma curvatura predefinida.

7. Processo de calibração, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que a haste (26) é impedida de rotação em relação a seu eixo central (C), o elemento de calibração (40) sendo montado de modo que possa girar em torno desse eixo central.

8. Processo de calibração, de acordo com a reivindicação 6 ou 7, caracterizado pelo fato de que dois suportes mantêm a haste em posição, o elemento de calibração (40) sendo aplicado contra a haste (26) entre os suportes, os suportes permitindo o pivotamento da haste em torno de dois eixos substancialmente perpendiculares ao eixo central (C) da haste.

9. Processo de calibração, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 8, caracterizado pelo fato de que cada sensor óptico (30) compreende um segmento de fibra óptica que compreende uma rede de Bragg e que é mantido aplicado contra o perímetro da haste.

10. Processo de calibração, de acordo com a reivindicação 9, caracterizado pelo fato de que as redes de Bragg dos diferentes segmentos de fibra são dispostos no mesmo nível de acordo com o eixo central da haste.

11. Processo de calibração de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de que a flexão é aplicada na região das ditas redes de Bragg.

12. Processo de calibração de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 11, caracterizado pelo fato de que a extrapolação da função senoidal de um sensor estabelece uma função do tipo:

$$\varepsilon_j = A_{j0} + A_{j1} \cdot \cos(\alpha) + B_{j1} \cdot \sin(\alpha)$$

$A_{j1}$  sendo a componente em fase e  $B_{j1}$  a componente em quadratura de fase do harmônico fundamental, essas componentes sendo determinadas por um método de séries de Fourier com base em medidas de deformação,  $\alpha$  sendo a orientação do plano de flexão em torno do eixo central.

13. Processo de calibração, de acordo com a reivindicação 12,

caracterizado pelo fato de que pelo menos um harmônico de posição superior ao harmônico fundamental é determinado por um método de séries de Fourier, e em que as medições de deformação são repetidas se a relação entre o harmônico de posição superior e o harmônico fundamental ultrapassa um valor limite.

Fig.1

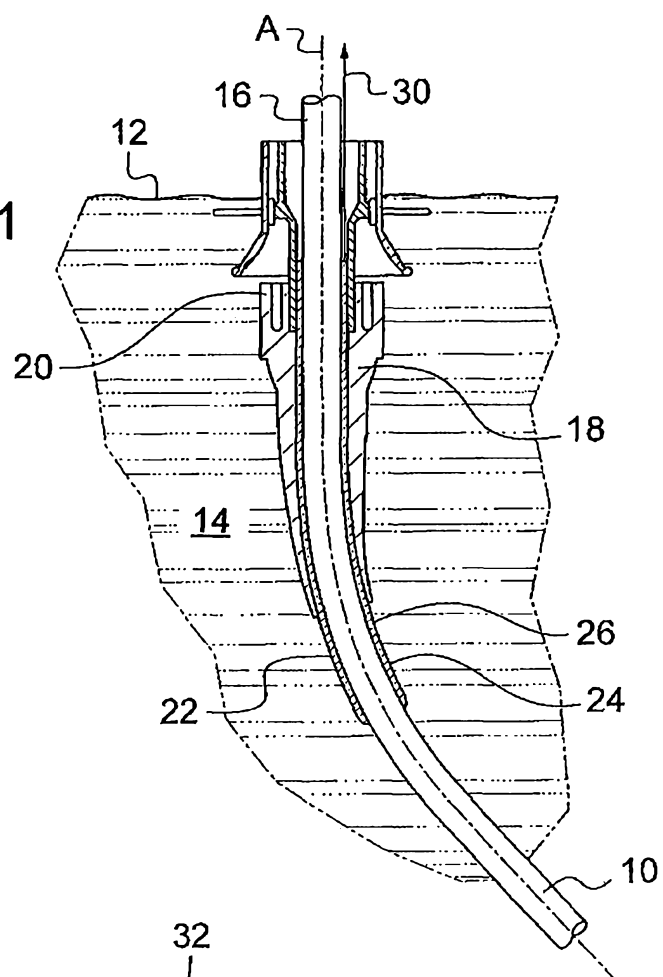
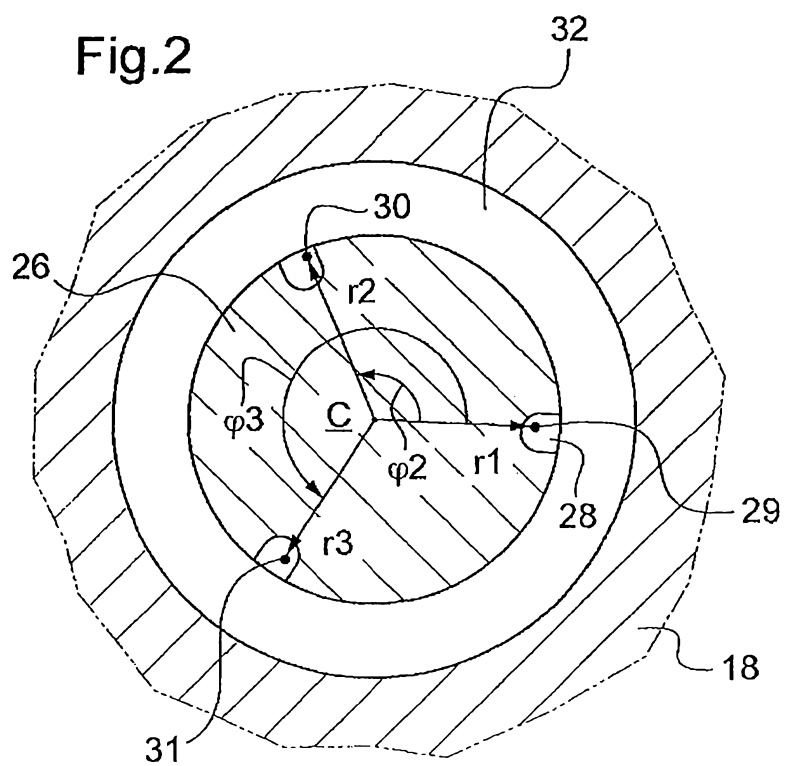


Fig.2



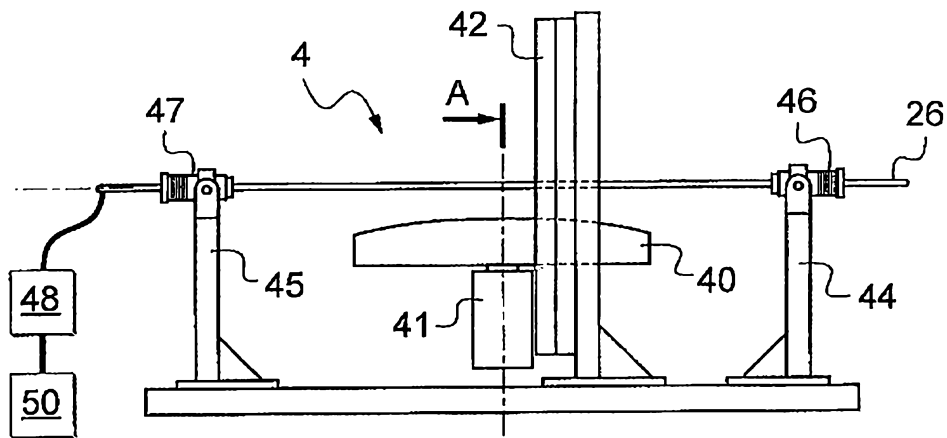


Fig. 3

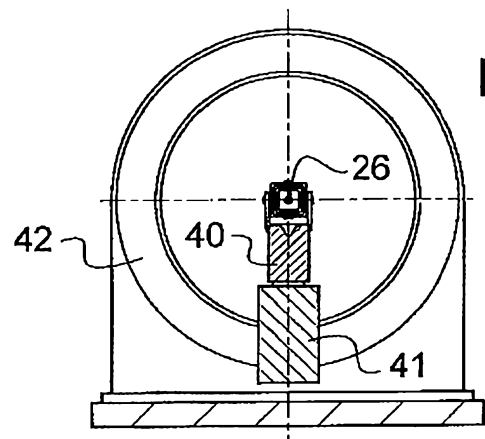


Fig. 4

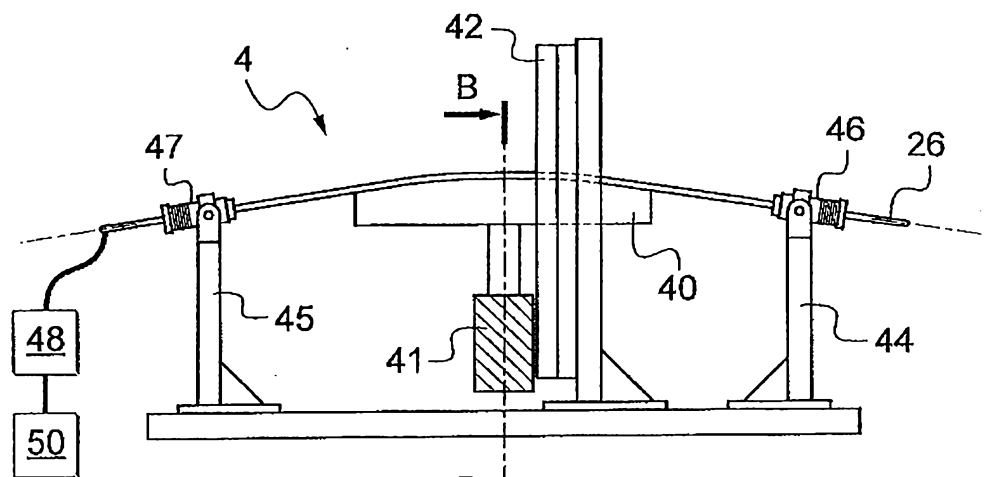


Fig. 5

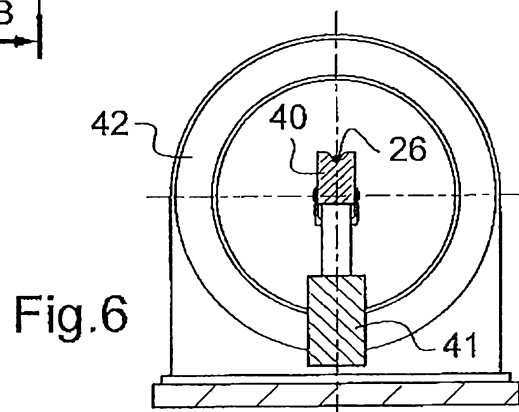


Fig. 6

