



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

**(21) PI 0807606-5 A2**



\* B R P I 0 8 0 7 6 0 6 A 2 \*

(22) Data de Depósito: 19/02/2008  
(43) Data da Publicação: 22/07/2014  
(RPI 2272)

**(51) Int.Cl.:**  
G01B 17/02  
G01B 17/06  
G01B 17/08  
G01N 29/04  
G01N 29/52

**(54) Título:** MÉTODOS DE MODELAR UMA SUPERFÍCIE DE UM OBJETO, DE MONITORAR UMA TUBULAÇÃO E DE PROVER UMA MEDIDA DE UNIFORMIDADE DE UMA SUPERFÍCIE DE UM OBJETO, PRODUTOS DE PROGRAMA DE COMPUTADOR, DISPOSITIVO, E, SISTEMA PARA MONITORAR UMA TUBULAÇÃO

**(57) Resumo:**

**(30) Prioridade Unionista:** 19/02/2007 EP 07102653.8

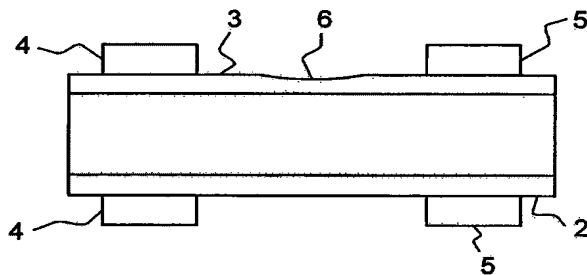
**(73) Titular(es):** Nederlandse Organisatie Voor Tegepast - Natuurwetenschappelijk Onderzoek Tno

**(72) Inventor(es):** Arno Willem Frederick Volker, Thomas Geertruida Henricus Basten

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

**(86) Pedido Internacional:** PCT NL2008050091 de 19/02/2008

**(87) Publicação Internacional:** WO 2008/103036de 28/08/2008



“MÉTODOS DE MODELAR UMA SUPERFÍCIE DE UM OBJETO, DE MONITORAR UMA TUBULAÇÃO, E DE PROVER UMA MEDIDA DE UNIFORMIDADE DE UMA SUPERFÍCIE DE UM OBJETO, PRODUTO DE PROGRAMA DE COMPUTADOR, DISPOSITIVO, E, SISTEMA  
5 PARA MONITORAR UMA TUBULAÇÃO”

A presente invenção refere-se a monitoramento ultra-sônico de superfície. Mais em particular, a presente invenção refere-se a um método e a um dispositivo para modelar a superfície de um objeto usando transdutores ultra-sônicos.

10 É bem conhecido o uso de ondas ultra-sônicas para obter informação sobre as superfícies de um objeto, por exemplo, um poste ou um tubo. Tipicamente, os pulsos ultra-sônicos são transmitidos para o objeto, os pulsos refletidos são recebidos e os tempos de deslocamento dos pulsos são registrados. Todas as diferenças em tempos de deslocamento ("tempo do  
15 vôo") dos pulsos são indicativas das diferenças na altura relativa da superfície e, assim, da espessura de parede do objeto. Um exemplo desta técnica conhecida é apresentado na patente US 3.930 404. Este tipo de método tem a desvantagem das medidas serem extremamente locais: a superfície é sondada somente nos pontos do impacto (e de reflexão) das ondas ultra-sônicas. Para  
20 se obter informação sobre a parte restante da superfície, os transdutores ultra-sônicos têm que ser movidos em relação ao objeto, e os tempos de deslocamento têm que ser medidos em muitos outros pontos de superfície.

O pedido de patente internacional WO 2006/000.668 apresenta um método para a caracterização dimensional de um objeto cilíndrico. Sondas  
25 faceando pontos de medição sobre a superfície do objeto transmitem ondas ultra-sônicas pulsadas a estes pontos de medição e recebem as ondas pulsadas refletidas. Para obter informação dimensional sobre a superfície inteira do objeto sem exigir um número infinito de pontos de medição, uma curva característica da superfície é obtida por interpolação. Embora informação

sobre outros pontos de superfície possa ser obtida com a interpolação, o nível de detalhe desta informação é limitado pelo número de pontos de medição. Este método conhecido tem também, conseqüentemente, a desvantagem fundamental da informação da superfície ser obtida somente de um pequeno  
5 número de pontos de medição, e de um número relativo grande de pontos de prova e/ou movimentação das pontas de prova relativas ao objeto ser necessário para obter informação dimensional detalhada.

A patente US 5.965.818 apresenta um método usando ondas ultra-sônicas de Lamb para medir a redução de espessura de parede devido à  
10 corrosão localizada em suportes de tubo. São usados dois transdutores para fazer uma onda de Lamb se deslocar ao longo da parede de tubo em uma direção circunferencial. Comparando os dados de tempo do vôo medidos a mudança no tempo do vôo devido à corrosão pode ser quantificada. A corrosão é detectada apenas na direção circunferencial do tubo, não na direção  
15 longitudinal.

A patente US 5.767.408 apresenta um método de obter características próximas à superfície de um material gerando uma onda ultra-sônica de Rayleigh de banda larga incluindo uma pluralidade de componentes. Velocidades de componentes selecionados da onda de Rayleigh  
20 são determinadas nas freqüências selecionadas. Entretanto, as trajetórias da onda são muito limitadas e, conseqüentemente, a informação referente à superfície testada também é limitada.

O pedido de patente britânico GB 2.383.413 apresenta um sistema para detectar defeitos em trilhos usando a velocidade, atenuação,  
25 dispersão, ressonância e as propriedades absorventes de freqüência de ondas de superfície acústicas. Este sistema conhecido é totalmente específico para linhas de estradas de ferro e usa técnicas eletro-acústicas para testar os trilhos em sua direção longitudinal.

O pedido de patente japonês JP 57.187.609 apresenta outro

método convencional de medir a espessura de parede usando ondas de superfície tendo frequência aumentada e detecção de tempos de deslocamento. As ondas de superfície têm trajetórias limitadas em apenas uma direção e, conseqüentemente, provêm apenas informação limitada.

5                   É um objetivo da presente invenção superar estes e outros problemas da técnica anterior e prover um método e um dispositivo para modelar a superfície de um objeto usando transdutores ultra-sônicos, cujo método e dispositivo provejam mais detalhe da superfície usando um número limitado de transdutores.

10                   É um objetivo adicional da presente invenção prover um método e um dispositivo para modelar a superfície de um objeto usando transdutores ultra-sônicos, cujo método e dispositivo provejam a informação detalhada sobre a superfície embora exigindo um esforço computacional limitado.

15                   Conseqüentemente, a presente invenção provê um método de modelar uma superfície de um objeto usando transdutores ultra-sônicos montados sobre a superfície, o método compreendendo as etapas de:

- prover um modelo da superfície, o modelo compreendendo um conjunto dos pontos de superfície indicativos da altura da superfície,
- 20                   - transmitir ondas pulsadas de um primeiro transdutor para um ou mais segundos transdutores, o primeiro transdutor e cada segundo transdutor definindo um respectivo caminho ao longo da superfície,
- medir tempos de deslocamento das ondas pulsadas ao longo de cada caminho,
- 25                   - calcular os tempos de deslocamento baseado no modelo da superfície,
- ajustar o modelo da superfície em resposta a quaisquer discrepâncias entre os tempos de deslocamento medidos e os tempos de deslocamento calculados, e

- repetir as etapas de transmitir, medir, calcular e ajustar até que as discrepâncias sejam menores do que um limiar predeterminado,

5 onde a etapa de calcular os tempos de deslocamento compreende a sub-etapa de interpolar o conjunto de pontos de superfície de modo a obter um conjunto expandido de pontos de superfície, os tempos de deslocamento sendo calculados usando o conjunto expandido.

10 Transmitindo ondas pulsadas de um primeiro transdutor montado sobre a superfície para um segundo transdutor montado sobre a superfície, o tempo de deslocamento de cada onda pulsada depende do caminho de onda sobre e/ou abaixo da superfície e, conseqüentemente, contém muito mais informação do que a medição do único ponto da técnica anterior explicada acima, baseada na reflexão, em vez de, em caminhos de superfície.

15 Ajustando-se repetidamente um modelo de superfície para casar melhor os tempos de deslocamento calculados e medidos resulta em um modelo de superfície ótimo que prognostica, com precisão, os tempos de deslocamento das ondas pulsadas. Estas técnicas são conhecidas *per si* e são referidas tipicamente como inversão tomográfica ou reconstrução tomográfica. Os modelos resultantes podem ser exibidos em uma tela de  
20 exibição apropriada e/ou analisados, por exemplo, para determinar partes relativamente finas de uma parede de tubulação.

25 Uma vantagem importante da presente invenção é o fato de apenas um número limitado de pontos de superfície ser usado no modelo, reduzindo, desse modo, significativamente, o número de cálculos envolvidos no método. A precisão do modelo não é afetada, uma vez que o número menor de pontos de superfície usado no modelo é compensado pela interpolação. Como resultado, o conjunto expandido de pontos de superfície usado para ajustar o modelo é muito maior do que o conjunto de pontos de superfície do modelo real. Em um modo de realização vantajoso, por

exemplo, o conjunto de pontos de superfície é constituído por menos de 100 pontos, preferivelmente, menos de 50 pontos, enquanto o conjunto expandido de pontos de superfície é constituído por mais de 200 pontos, preferivelmente, mais de 500 pontos. Outros números também são possíveis. Por exemplo, o modelo poderia usar um conjunto de apenas 20 pontos de superfície, enquanto o conjunto expandido teria cerca de 1.000 pontos de superfície.

A altura da superfície como modelada pela presente invenção é, na maior parte dos modos de realização, a altura relativa para os transdutores. Ou seja, a presente invenção modela a altura relativa da superfície considerando a altura (absoluta) dos transdutores como pontos de referência. Como a altura da superfície de uma parede de um objeto é relacionada freqüentemente à espessura de parede, a presente invenção também provê um modelo da espessura de parede de um objeto.

Diversos tipos de ondas pulsadas ultra-sônicas podem ser usados na presente invenção. Em um primeiro modo de realização, as ondas pulsadas são ondas de Rayleigh. Como as ondas de Rayleigh se propagam ao longo da superfície do objeto, seu tempo de deslocamento será afetado por variações na altura (relativa) da superfície. Estas variações podem ser causadas por, por exemplo, danos e/ou corrosão. As variações nos tempos de deslocamento medidos destas ondas de superfície permitem que o modelo do objeto seja, conseqüentemente, ajustado.

Em um segundo modo de realização, as ondas pulsadas são ondas guiadas. Como a velocidade destas ondas depende da espessura de parede do objeto, estas ondas são bem apropriadas para modelar um objeto, em particular um objeto vazado. A dependência da espessura de parede das ondas pulsadas é realçada quando são usadas ondas pulsadas dispersivas.

Alguns tipos de ondas, em particular ondas dispersivas, podem tornar-se distorcidos ao se propagar ao longo de seus caminhos. Esta distorção pode resultar em uma medição de tempo de deslocamento incorreta.

Conseqüentemente, um modo de realização preferido da presente invenção compreende, adicionalmente, a etapa de aplicar uma correção de fase aos tempos de deslocamento medidos das ondas pulsadas.

5 O método da presente invenção pode ser praticado usando apenas um único primeiro transdutor. Entretanto, é preferido usar múltiplos primeiros transdutores. Para permitir uma medição efetiva dos respectivos tempos de deslocamento das ondas pulsadas, é preferido que as etapas de transmitir as ondas pulsadas e medir os tempos de deslocamento sejam realizadas para dois primeiros transdutores, sucessivamente. Ativando os  
10 primeiros transdutores sucessivamente, as ondas que transmitem podem ser detectadas separadamente. O intervalo de tempo entre transmissões sucessivas dos primeiros transdutores será relacionado ao máximo desvio possível dos tempos de deslocamento.

Embora qualquer número de primeiros transdutores possa ser  
15 usado, por exemplo, um, dois, três, quatro ou seis, independente do número de segundos transdutores, é preferido que o número de primeiros transdutores seja igual ao número de segundos transdutores.

No método de modelagem definido acima, ondas guiadas e/ou ondas de Rayleigh podem ser usadas. Os inventores também perceberam que  
20 as ondas de Rayleigh podem igualmente ser usadas para escaneamento e/ou detecção de superfície na ausência da modelagem descrita acima. Conseqüentemente, a presente invenção também provê um método de prover uma medida de uniformidade de uma superfície de um objeto usando transdutores ultra-sônicos montados sobre a superfície, o método  
25 compreendendo as etapas de:

- transmitir ondas pulsadas de um primeiro transdutor para um ou mais segundos transdutores, o primeiro transdutor e cada segundo transdutor definindo um respectivo caminho ao longo da superfície,

- medir tempos de deslocamento das ondas pulsadas ao longo

de cada caminho, e

- calcular a medida de uniformidade baseado nos tempos de deslocamento medidos,

onde as ondas pulsadas são ondas de Rayleigh.

5 A medida de uniformidade pode ser expressa em um modelo da superfície, mas isto não é essencial e, a medida de uniformidade pode ser constituída por um único número indicativo da uniformidade relativa ou absoluta da superfície.

10 A presente invenção provê adicionalmente um método de monitorar uma tubulação, o método de monitoramento compreendendo o método de modelagem de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes. O método de monitoramento pode compreender adicionalmente a etapa de produzir um alerta quando a altura da superfície cair abaixo de um valor de limiar e/ou quando o modelo indicar que a tubulação tornou-se fraca.

15 A presente invenção também provê um produto de programa de computador para executar o método como definido acima. Um produto de programa de computador pode compreender um conjunto de instruções executáveis de computador armazenadas em um portador de dados, como um CD, ou um DVD. O conjunto de instruções executáveis de computador, que  
20 permita que um computador programável execute o método como definido acima, também pode igualmente estar disponível para baixar de um servidor remoto, por exemplo, via Internet.

A presente invenção provê, adicionalmente, um dispositivo para modelar uma superfície de um objeto usando transdutores ultra-sônicos  
25 montados sobre a superfície, o dispositivo compreendendo:

- uma unidade da memória para armazenar um modelo da superfície, o modelo compreendendo um conjunto de pontos de superfície indicativos da altura da superfície,

- um primeiro transdutor e pelo menos um segundo transdutor,

o primeiro transdutor e cada segundo transdutor definindo um respectivo caminho ao longo da superfície,

- uma unidade de transmissão para transmitir ondas pulsadas ao longo de respectivos caminhos do primeiro transdutor para um ou mais segundos transdutores, e

- uma unidade de processamento arranjada para:

- medir tempos de deslocamento das ondas pulsadas ao longo de cada caminho,

- calcular os tempos de deslocamento baseado no modelo da superfície,

- ajustar o modelo armazenado da superfície em resposta a quaisquer discrepâncias entre os tempos de deslocamento medidos e os tempos de deslocamento calculados, e

- repetir as etapas de transmitir, medir, calcular e ajustar até que as discrepâncias sejam menores do que um limiar predeterminado,

onde a unidade de processamento é arranjada adicionalmente para interpolar o conjunto dos pontos de superfície de modo a obter um conjunto expandido de pontos de superfície, e para calcular os tempos de deslocamento usando o conjunto expandido.

As ondas pulsadas podem ser ondas guiadas e/ou ondas de Rayleigh. De acordo com um aspecto adicional da presente invenção, ondas de Rayleigh também podem ser usadas na ausência da modelagem descrita acima. Conseqüentemente, a invenção também provê um dispositivo provendo uma medida de uniformidade de uma superfície de um objeto usando transdutores ultra-sônicos montados sobre a superfície, o dispositivo compreendendo:

- um primeiro transdutor e pelo menos um segundo transdutor, o primeiro transdutor e cada segundo transdutor definindo um respectivo caminho ao longo da superfície,

- uma unidade de transmissão para transmitir ondas pulsadas, ao longo dos respectivos caminhos, do primeiro transdutor para o um ou mais segundos transdutores, e

- uma unidade de processamento arranjada para:

5 - medir tempos de deslocamento das ondas pulsadas ao longo de cada caminho, e

- calcular a medida de uniformidade baseado nos tempos de deslocamento medidos, onde as ondas pulsadas são ondas de Rayleigh.

10 A presente invenção provê, adicionalmente, um sistema para monitorar uma tubulação, o sistema compreendendo um dispositivo como definido acima, bem como, pelo menos um primeiro transdutor e pelo menos um segundo transdutor. Preferivelmente, o dispositivo e os transdutores são capazes de comunicação sem fio.

15 A presente invenção será explicada, adicionalmente, abaixo, com referência a modos de realização exemplificativos ilustrados nos desenhos anexos, nos quais:

a Fig. 1 mostra esquematicamente um objeto do qual uma superfície é modelada de acordo com a presente invenção.

20 A Fig. 2 mostra esquematicamente um modelo de objeto 3-dimensional de acordo com a presente invenção.

A Fig. 3 mostra esquematicamente um modelo de objeto 2-dimensional de acordo com a presente invenção.

As Figs. 4A e 4B mostram esquematicamente pulsos ultrassônicos usados na presente invenção.

25 A Fig. 5 mostra esquematicamente um dispositivo de modelagem de superfície de acordo com a presente invenção.

O tubo 2, mostrado na Fig. 1 simplesmente como um exemplo não limitativo, compreende uma superfície 3 a ser modelada. No exemplo mostrado, a superfície 3 tem uma seção rebaixada 6 que pode ser causada, por

exemplo, por corrosão. Modelando-se apropriadamente a superfície 3, a extensão e altura (relativa) da seção rebaixada 6 podem ser determinadas.

As primeiras unidades de transdutores 4 e as segundas unidades de transdutores 5 são montadas sobre o tubo 2, sobre um ou outro lado da superfície 3. Embora, ambas, as primeiras e segundas unidades de transdutores possam ser capazes de transmitir e receber ondas ultra-sônicas, na presente invenção, as primeiras unidades de transdutores 4 são usadas para transmitir ondas pulsadas ultra-sônicas, enquanto as segundas unidades de transdutores 5 são usadas para receber estas ondas. As unidades de transdutores podem ser conhecidas *per si* e podem ser unidades piezelétricas.

As ondas pulsadas, ou pulsos, produzidas pelos primeiros transdutores 4 têm uma duração definida de, por exemplo, vários  $\mu$ s (microsegundos). A duração real pode depender da aplicação particular, por exemplo, as dimensões e distâncias mútuas das unidades de transdutores. O número de transdutores pode variar. Pelo menos um primeiro transdutor 4 e pelo menos um segundo transdutor 5 deveriam ser providos, embora seja preferido usar múltiplos segundos transdutores 5, por exemplo, dois, três, quatro, oito de mais segundos transdutores 5. Usando-se uma pluralidade de segundos transdutores 5 resulta em uma pluralidade de caminhos percorridos pelas ondas pulsadas e, desse modo, uma modelagem aperfeiçoada da superfície. Similarmente, é preferido usar mais de um primeiro transdutor 4. No exemplo das Figs. 2 e 3, oito primeiros transdutores 4 e oito segundos transdutores 5 são usados, embora a invenção não esteja limitada a estes números particulares: Os transdutores de uma pluralidade de primeiros e/ou segundos transdutores são espaçados, de preferência, uniformemente, embora isto não seja essencial.

Um modelo tridimensional exemplificativo está ilustrado na Fig. 2, enquanto os caminhos percorridos pelas ondas pulsadas e a redução dos pontos de superfície, de acordo com a presente invenção, estão ilustrados

por um modelo bidimensional na Fig. 3. O modelo tridimensional da Fig. 2 é baseado no modelo bidimensional 72 da Fig. 3.

O modelo 70, da Fig. 2, representa a superfície (externa) de um tubo, por exemplo, o tubo 2, da Fig. 1. Os eixo x e o eixo y se estendem em um plano de seção transversal do modelo tubular, enquanto o eixo z se estende em sua direção longitudinal. As dimensões deste exemplo estão providas em metros (m). O modelo tridimensional da Fig. 2 é, de fato, uma reconstrução do objeto 2, da Fig. 1. As reconstruções tridimensionais são conhecidas *per si* no campo da tomografia.

A superfície modelada na Fig. 2 se estende entre um conjunto de primeiros transdutores 4 e um conjunto de segundos transdutores 5. Caminhos 71 se estendem entre cada um dos primeiros transdutores 4 e cada um dos segundos transdutores 5. Os tempos de deslocamento dos pulsos ao longo destes caminhos são proporcionais aos comprimentos dos caminhos. Um caminho que se estenda ao longo de uma superfície lisa, reta será mais curto do que um caminho cruzando o rebaixo 6, da Fig. 1. Conseqüentemente, os tempos de deslocamento ao longo destes caminhos diferirão e os pulsos chegarão a tempos diferentes.

O modelo calculará os tempos de chegada dos pulsos ao longo dos vários caminhos. Se o modelo assumir inicialmente que todos os caminhos têm comprimentos iguais, uma discrepância entre os tempos de deslocamento medidos e os tempos de deslocamento calculados ocorrerá para os caminhos que cruzam o rebaixo 6. Esta discrepância pode ser compensada ajustando-se o modelo. Os valores iniciais do modelo podem ser baseados em medidas do objeto corrente (como um tubo) e/ou em considerações teóricas.

No exemplo bidimensional da Fig. 3, o eixo horizontal se estende ao longo da circunferência R do modelo tubular, enquanto o eixo z se estende em sua direção longitudinal. As dimensões estão providas em metros (m).

Como pode ser visto na Fig. 3, os primeiros transdutores 4 e segundos transdutores 5 estão espaçados uniformemente ao longo da circunferência do modelo. Os pulsos produzidos pelos primeiros transdutores serão detectados pelos segundos transdutores. Os tempos de chegada e, desse modo, os tempos de deslocamento, corresponderão pelo menos aproximadamente ao conjunto de caminhos 71 se estendendo entre cada primeiro transdutor 4 e os segundos transdutores 5. Para clareza do desenho, apenas um destes conjuntos de caminhos 71 está mostrado na Fig. 3.

Como explicado acima, o modelo contém informação sobre a superfície do objeto (3 na Fig. 1). Esta informação pode compreender um conjunto de valores representando a altura (relativa ou absoluta) da superfície em um número de pontos. Como ilustrado na Fig. 1, a altura da superfície no rebaixo 6 é menor do que no primeiro transdutor 4. De modo a modelar precisamente a superfície, é necessário um grande número de pontos de superfície, por exemplo, centenas, ou mesmo milhares, de pontos de superfície. Entretanto, determinar os pontos de superfície diretamente dos tempos de deslocamento medidos exigiria um número muito grande de computações. Por este motivo, a invenção provê um modelo mais eficiente que contenha apenas um número limitado de pontos de superfície, reduzindo, desse modo, significativamente, o número de computações.

De acordo com a presente invenção, o modelo contém apenas um conjunto limitado de pontos de superfície 73. Estes pontos de superfície de "núcleo" são armazenados no modelo e ajustados, se necessário, para casar com os tempos de deslocamento observados. No exemplo mostrado, apenas 24 pontos de superfície são usados no modelo, provendo, desse modo, uma economia significativa comparada às centenas, ou milhares, de pontos mencionados acima. Será compreendido que o número de pontos de superfície do "núcleo" pode variar dependendo das dimensões da superfície modelada e da precisão exigida, e que este número também pode ser maior,

ou menor, do que 24, por exemplo, 16, 30, ou 50.

De modo a modelar precisamente a superfície e calcular os tempos de deslocamento, é necessário, tipicamente, um número maior de pontos de superfície. De acordo com um aspecto adicional da presente invenção, um conjunto expandido de pontos de superfície é obtido por interpolação. Ou seja, o conjunto de pontos de superfície do modelo ("núcleo" dos pontos de superfície) é interpolado para prover um conjunto expandido de pontos de superfície usado para calcular os tempos de deslocamento e prover informação de superfície mais detalhada, se requerido. Desta maneira, o número exemplificativo de 24 pontos de superfície pode ser expandido para, por exemplo, 1024 pontos de superfície.

Conseqüentemente, o modelo usado na presente invenção pode ser considerado um modelo de dois níveis. Em um nível básico, um conjunto limitado de pontos de superfície (por exemplo, 24) é determinado e armazenado. Estes pontos de superfície de "núcleo" são ajustados de acordo com os tempos de deslocamento medidos. Em um nível mais elevado, um conjunto expandido de pontos de superfície (por exemplo, 1024) é determinado por interpolação e (temporária, ou permanentemente) armazenado. Estes pontos de superfície de "expansão" são, conseqüentemente, derivados indiretamente dos tempos de deslocamento medidos, ao contrário dos pontos de superfície do "núcleo" que são derivados diretamente.

Usando o conjunto expandido, os tempos de deslocamento, de acordo com o modelo, podem ser determinados precisamente usando-se técnicas numéricas que podem ser conhecidas *per si*. Tipicamente, cada caminho 71 é dividido em um grande número de seções. Para cada caminho, os tempos de deslocamento de todas as seções de caminho são calculados usando a informação de altura contida no conjunto expandido de pontos de superfície derivado do modelo. Desse modo, o tempo de deslocamento de

cada caminho é determinado adicionando-se os tempos de deslocamento das seções do caminho particular, resultando em tempos de deslocamento calculados.

Os tempos de deslocamento medidos são determinados subtraindo-se tempos de transmissão dos pulsos de seus tempos de chegada. Os tempos de transmissão são determinados tipicamente registrando-se os pontos no momento em que um sinal de ativação é enviado para uma primeira unidade de transdutor, enquanto os tempos de chegada são determinados tipicamente registrando-se os pontos no momento em que sinais de detecção são recebidos das segundas unidades de transdutores.

A seguir, os tempos de deslocamento calculados são comparados com os tempos de deslocamento medidos e quaisquer discrepâncias são registradas. Um procedimento de otimização que pode ser conhecido *per si*, é usado, então, para otimizar o modelo de modo que as discrepâncias sejam removidas. Procedimentos de otimização conhecidos apropriados são os procedimentos de Levenberg-Marquardt e de Gauss-Newton.

No método da presente invenção, são usadas ondas de superfície. As ondas de superfície têm a vantagem de, cada pulso, obter informação de um caminho, não apenas de um ponto. Descobriu-se que ondas de Rayleigh são ondas de superfície bem apropriadas uma vez que seguem a superfície. Como resultado, seus tempos de deslocamento provêm informação bastante precisa sobre a estrutura da superfície.

Entretanto, ondas guiadas também são bem apropriadas, em particular quando não apenas informação a respeito da superfície, mas, também, relacionada à espessura de parede do objeto, é requerida. Em particular, é utilizado o comportamento dispersivo vantajoso das ondas guiadas: dado a frequência, a velocidade de propagação das ondas depende da espessura da parede. Conseqüentemente, quaisquer mudanças de velocidade

medidas são indicativas de variações da espessura da parede.

Uma combinação de ondas de Rayleigh (pulsadas) e ondas de superfície (pulsadas) também pode ser usada.

De acordo com um aspecto adicional da presente invenção, ondas de Rayleigh podem ser usadas para prover uma medida de uniformidade de uma superfície, também na ausência de um modelo de reconstrução, como mostrado na Fig. 2. Ou seja, um método de prover uma medida de uniformidade de uma superfície de um objeto usando transdutores ultra-sônicos montados sobre a superfície pode compreender as etapas de transmitir ondas pulsadas de um primeiro transdutor para um ou mais segundos transdutores, o primeiro transdutor e cada segundo transdutor definindo um respectivo caminho ao longo da superfície, medir tempos de deslocamento das ondas pulsadas ao longo de cada caminho, e calcular a medida de uniformidade baseado nos tempos de deslocamento medidos, as ondas pulsadas sendo ondas de Rayleigh. Conseqüentemente, ondas de Rayleigh podem ser usadas com ou sem um modelo de superfície. A medida de (não) uniformidade pode ser um número apropriado (por exemplo, em uma faixa de 1 a 10) ou qualquer outra medida apropriada.

A medida de uniformidade pode ser, por exemplo, inversamente proporcional aos tempos de deslocamento (relativos), ou seja, ao atraso provocado pela não-uniformidade. Um atraso curto indicará um alto grau de uniformidade (e, por conseguinte, um valor relativamente alto de medida de uniformidade), enquanto um atraso mais longo será indicativo de uma uniformidade menor. Portanto, os atrasos no tempo relativos às ondas de Rayleigh podem ser usados para determinar a medida de uniformidade. Um atraso de tempo de referência representando uma uniformidade "perfeita" pode ser determinado com base em considerações teóricas ou em uma medição real usando uma superfície bastante uniforme.

De acordo com um aspecto adicional da presente invenção,

uma correção de fase pode ser usada para corrigir ondas dispersivas. Isto está ilustrado esquematicamente nas Figs. 4A e 4B, onde a Fig.4A mostra um pulso original 81 (linha grossa) e sua contraparte distorcida 82 (linha fina), enquanto a Fig. 4B, mostra um pulso reconstruído 83.

5 Na Fig. 4A, um pulso 82 está mostrado distorcido devido à dispersão: a relação de fase original do pulso está perdida e o pulso está espalhado no tempo, quando comparado ao pulso original 81. Isto torna a determinação do tempo de chegada do pulso e, por conseguinte, de seu tempo de deslocamento, menos precisa.

10 Esta perda de precisão pode ser evitada aplicando-se uma correção de fase X (opcional). Em um modo de realização exemplificativo, a correção de fase X pode ser expressa como:

$$X = \exp^{-j\omega \left( \frac{x}{v(\omega_c)} - \frac{x}{v(\omega)} \right)}$$

15 onde  $\omega$  é a frequência (angular),  $v(\omega)$  é a velocidade de propagação dos pulsos dependente da frequência, e  $x$  é o comprimento do caminho na ausência de quaisquer rebaixos ou saliências sobre a superfície.

20 Esta correção pode ser aplicada submetendo-se o pulso distorcido 82 a uma transformação de Fourier rápida (FFT), multiplicando o espectro resultante pela correção de fase X, e aplicando, então, uma transformação de Fourier inversa rápida (IFFT) para obter o pulso corrigido 83. Após a correção, a fase e, portanto, a forma do pulso, é restaurada, como ilustrado na Fig. 4B. Esta onda pulsada restaurada 83 permite uma detecção precisa de seu tempo de deslocamento. Alguém experiente na técnica perceberá que outras técnicas de correção de fase podem ser aplicadas, por exemplo, usando um filtro de erro preditivo.

25 Um dispositivo para modelar uma superfície de um objeto está ilustrado na Fig. 5. O dispositivo 1 compreende uma unidade de processamento (PU) 10, uma unidade da memória (11), uma unidade de

transmissão (TU) 12 e uma unidade de exibição (DU) 13. A unidade de processamento 10 compreende, preferivelmente, um microprocessador capaz de executar instruções de um programa de software incorporando o método da presente invenção. A unidade de memória 11 pode armazenar este programa de software, bem como, parâmetros do modelo; incluindo o conjunto de valores de pontos de superfície. A unidade de exibição 13 compreende preferivelmente uma tela de exibição capaz de exibir o modelo, em particular uma reconstrução do tipo ilustrado na Fig. 2. A unidade de transmissão 12 é capaz de produzir, sob controle da unidade de processamento 10, sinais de transmissão de pulsos que são alimentados ao primeiro transdutor(es) 4. Em adição, a unidade de transmissão 12 é capaz de receber sinais da detecção de pulsos produzidos pelo segundo transdutor(es) 5 e alimentar informação de detecção de pulso apropriada à unidade de processamento 10.

A unidade de transmissão 12 pode ser arranjada para comunicação sem fio com os transdutores 4 e 5 usando, por exemplo, uma comunicação de radiofrequência (RF), ou comunicação infravermelha. A unidade de processamento 10 pode ser arranjada adicionalmente para aplicar uma correção de fase como explicado acima. Etapas de programa apropriado para correção de fase podem ser armazenadas na unidade de memória 11.

Um dispositivo para prover uma medida de uniformidade de uma superfície também pode ter uma estrutura como ilustrado na Fig. 5.

Será compreendido que a invenção não está limitada a canos ou tubos, podendo, também, ser aplicada sobre superfícies ou paredes de outros objetos, por exemplo, (partes de) cascos de navios, fuselagens de aviões, corpos de carros, armadura de tanque, ou outras superfícies ou estruturas de parede, por exemplo, tanques de armazenamento, hastes, pontes de aço, e estruturas metálicas em edifícios.

A presente invenção está baseada na percepção que a carga computacional para modelar uma superfície pode ser significativamente

reduzida usando-se um modelo tendo um número limitado de pontos de superfície, e que a precisão do modelo pode ser mantida interpolando-se os pontos de superfície usados no modelo. A presente invenção se beneficia, adicionalmente, da percepção de que as ondas de Rayleigh são bem  
5 apropriadas para recolher informação de superfície.

Note-se que qualquer termo usado neste documento não deve ser interpretado de modo a limitar o escopo da presente invenção. Em particular, as palavras "compreende" e "compreendendo" não significam  
10 excluir quaisquer elementos não mencionados especificamente. Elementos únicos podem ser substituídos por elementos múltiplos ou por seus equivalentes.

Será compreendido por alguém experiente na técnica que a presente invenção não está limitada aos modos de realização ilustrados acima e que muitas modificações e adições podem ser feitas sem fugir do escopo da  
15 invenção como definida nas reivindicações anexas.

## REIVINDICAÇÕES

1. Método de modelar uma superfície (3) de um objeto (2) usando transdutores ultra-sônicos (4, 5) montados sobre a superfície, o método caracterizado pelo fato de compreender as etapas de:

- 5                   - prover um modelo da superfície, o modelo compreendendo um conjunto dos pontos de superfície indicativos da altura da superfície,
- transmitir ondas pulsadas de um primeiro transdutor (4) para um ou mais segundos transdutores (5), o primeiro transdutor e cada segundo transdutor definindo um respectivo caminho ao longo da superfície,
- 10                   - medir tempos de deslocamento das ondas pulsadas ao longo de cada caminho,
- calcular tempos de deslocamento baseado no modelo da superfície,
- ajustar o modelo da superfície em resposta a quaisquer
- 15   discrepâncias entre os tempos de deslocamento medidos e os tempos de deslocamento calculados, e
- repetir as etapas de transmitir, medir, calcular e ajustar até que as discrepâncias sejam menores do que um limiar predeterminado onde, a etapa de calcular os tempos de deslocamento compreende a sub-etapa de
- 20   interpolar o conjunto de pontos de superfície para obter um conjunto expandido de pontos de superfície, os tempos de deslocamento sendo calculados usando o conjunto expandido.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de o conjunto dos pontos de superfície ser constituído por menos de 100

25   pontos, preferivelmente, menos de 50 pontos, enquanto o conjunto expandido de pontos de superfície é constituído por mais de 200 pontos, preferivelmente, mais de 500 pontos.

3. Método de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato das ondas pulsadas serem ondas guiadas.

4. Método de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato das ondas pulsadas serem ondas de Rayleigh.

5 5. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender a etapa de aplicar uma correção de fase aos tempos de deslocamento medidos das ondas pulsadas.

10 6. Método de acordo com qualquer uma das reivindicações precedentes, caracterizado pelo fato das etapas de transmitir ondas pulsadas e medir tempos de deslocamento serem realizadas para pelo menos dois primeiros transdutores (4), sucessivamente.

7. Método de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato do número de primeiros transdutores (4) ser igual ao número de segundos transdutores (5).

15 8. Método de monitorar uma tubulação, o método de monitoramento caracterizado pelo fato de compreender o método de modelagem como definido em qualquer uma das reivindicações precedentes.

20 9. Método de prover uma medida de uniformidade de uma superfície (3) de um objeto (2) usando transdutores ultra-sônicos (4, 5) montados sobre a superfície, o método caracterizado pelo fato de compreender as etapas de:

- um primeiro transdutor (4) e pelo menos um segundo transdutor (5), o primeiro transdutor e cada segundo transdutor definindo um respectivo caminho ao longo da superfície,

25 - transmitir ondas pulsadas ao longo dos respectivos caminhos do primeiro transdutor (4) para o um ou mais dos segundos transdutores (5),

- medir tempos de deslocamento das ondas pulsadas ao longo de cada caminho, e

- calcular a medida de uniformidade baseado nos tempos de deslocamento medidos, onde as ondas pulsadas são ondas de Rayleigh.

10. Produto de programa de computador, caracterizado pelo fato de realizar o método como definido em qualquer uma das reivindicações 1-9.

5 11. Dispositivo (1) para modelar uma superfície de um objeto usando transdutores ultra-sônicos montado sobre a superfície, o dispositivo caracterizado pelo fato de compreender:

- uma unidade da memória (11) para armazenar um modelo da superfície, o modelo compreendendo um conjunto de pontos de superfície indicativos da altura da superfície,

10 - um primeiro transdutor (4) e pelo menos um segundo transdutor (5), o primeiro transdutor e cada segundo transdutor definindo um respectivo caminho ao longo da superfície,

15 - uma unidade de transmissão (12) para transmitir ondas pulsadas ao longo dos respectivos caminhos do primeiro transdutor (4) para o um ou mais segundos transdutores (5), e

- uma unidade de processamento (10) arranjada para:

- medir tempos de deslocamento das ondas pulsadas ao longo de cada caminho,

20 - calcular os tempos de deslocamento baseado no modelo da superfície,

- ajustar o modelo armazenado da superfície em resposta a quaisquer discrepâncias entre os tempos de deslocamento medidos e os tempos de deslocamento calculados, e

25 - repetir as etapas de transmitir, medir, calcular e ajustar até as que as discrepâncias sejam menores do que um limiar predeterminado.

onde a unidade de processamento (10) é arranjada adicionalmente para interpolar o conjunto de pontos de superfície de modo a obter um conjunto expandido de pontos de superfície e para calcular os tempos de deslocamento usando o conjunto expandido.

12. Dispositivo (1) para fornecer uma medida de uniformidade de uma superfície de um objeto usando transdutores ultra-sônicos montados sobre a superfície, o dispositivo caracterizado pelo fato de compreender:

- 5       - um primeiro transdutor (4) e pelo menos um segundo transdutor (5), o primeiro transdutor e cada segundo transdutor definindo um respectivo caminho ao longo da superfície,
- uma unidade de transmissão (12) para transmitir ondas pulsadas ao longo dos respectivos caminhos do primeiro transdutor (4) para o um ou mais segundos transdutores (5), e
- 10       - uma unidade de processamento (10) arranjada para:
  - medir tempos de deslocamento das ondas pulsadas ao longo de cada caminho, e
  - calcular a medida de uniformidade baseado nos tempos de deslocamento medidos, onde as ondas pulsadas são ondas de Rayleigh.

15       13. Dispositivo de acordo com as reivindicações 11 ou 12, caracterizado pelo fato da unidade de processamento (10) e os transdutores (4, 5) serem capazes de comunicação sem fio.

20       14. Sistema para monitorar uma tubulação, caracterizado pelo fato de compreender um dispositivo (1) como definido nas reivindicações 11, 12, ou 13.

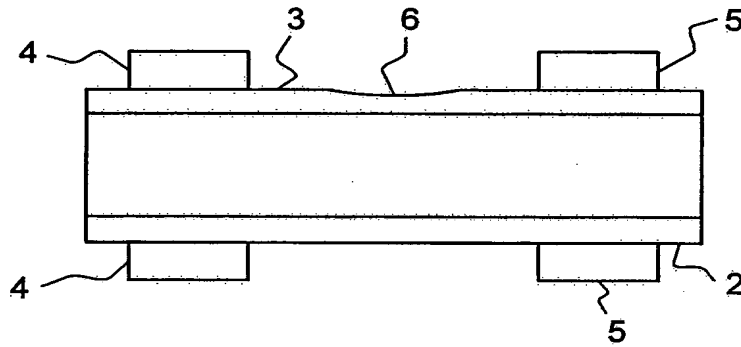


FIG. 1

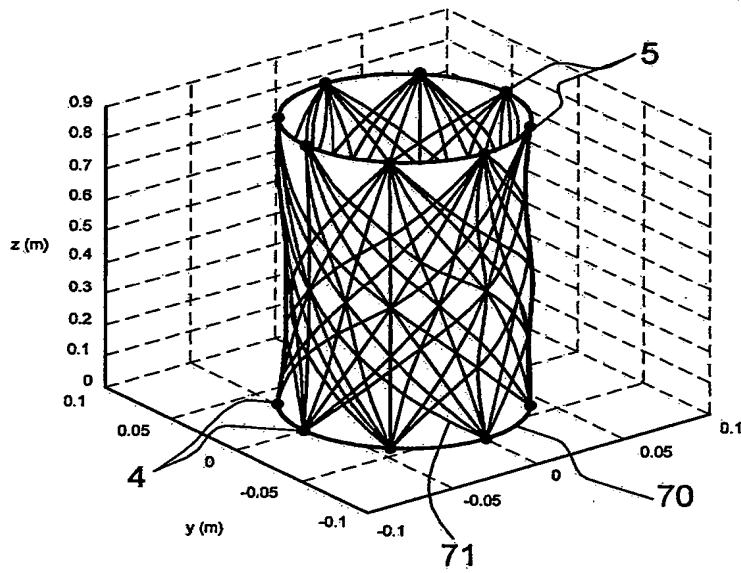


FIG. 2

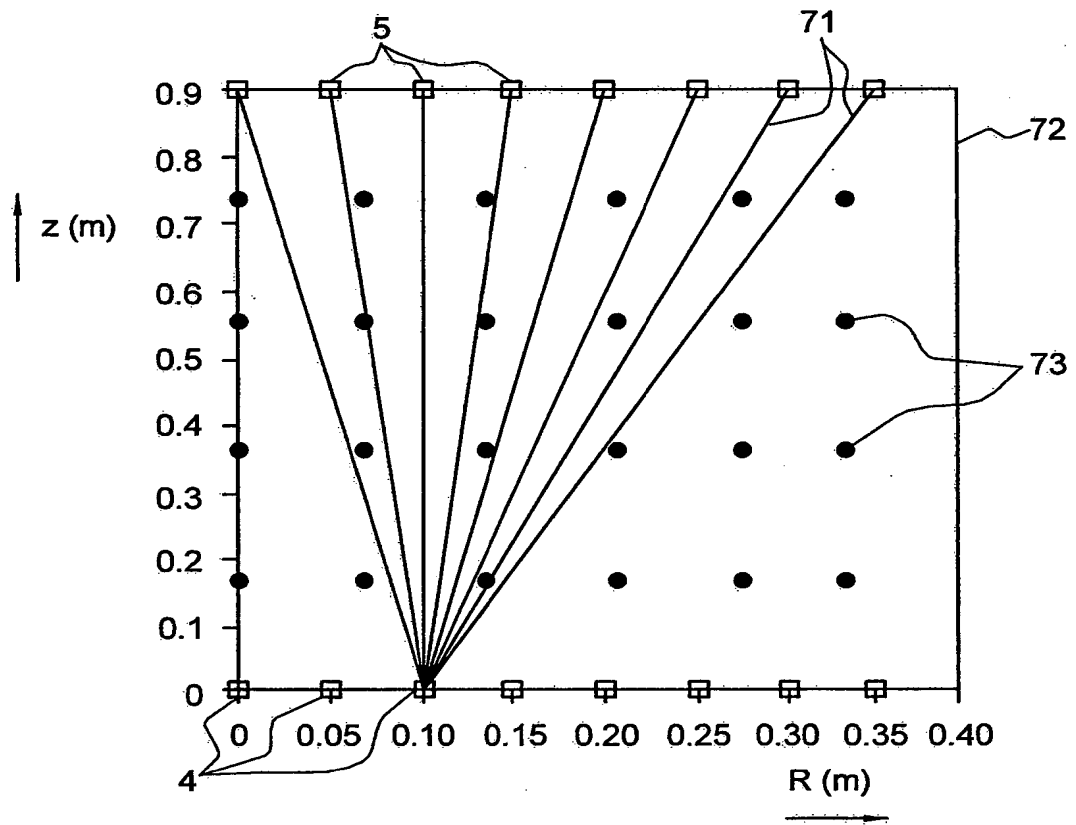


FIG. 3

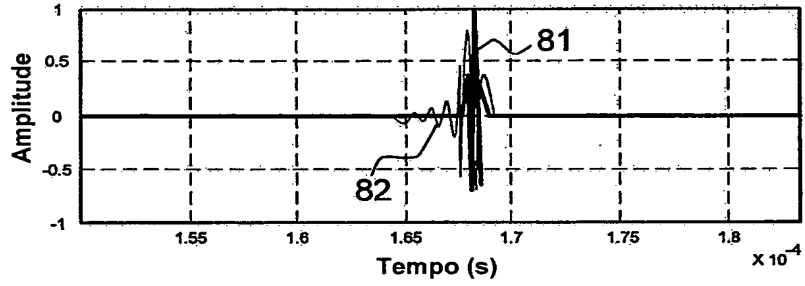


FIG. 4A

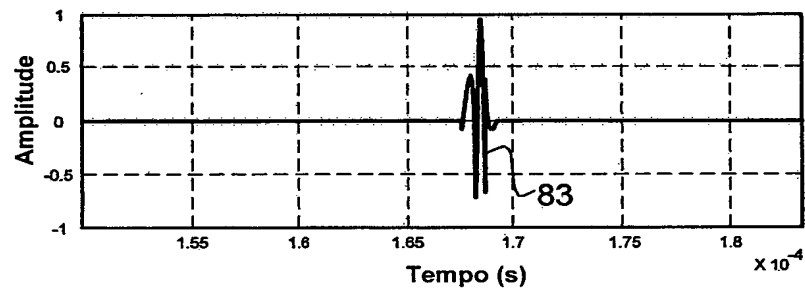


FIG. 4B

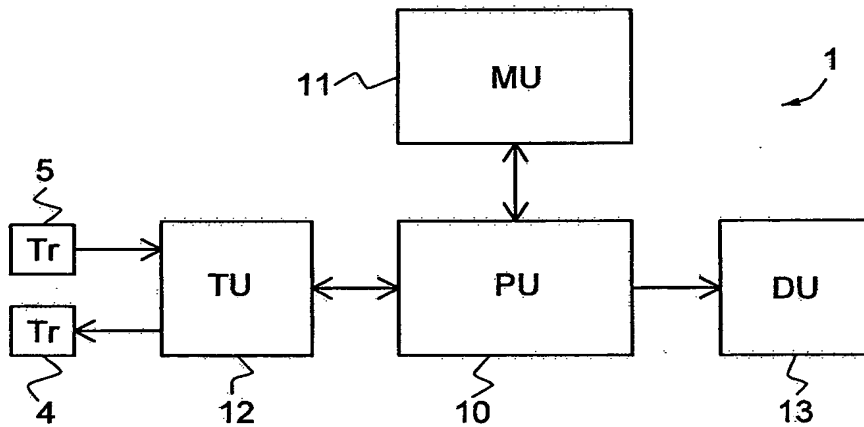


FIG. 5

RESUMO

“MÉTODOS DE MODELAR UMA SUPERFÍCIE DE UM OBJETO, DE MONITORAR UMA TUBULAÇÃO, E DE PROVER UMA MEDIDA DE UNIFORMIDADE DE UMA SUPERFÍCIE DE UM OBJETO, PRODUTO DE PROGRAMA DE COMPUTADOR, DISPOSITIVO, E, SISTEMA PARA MONITORAR UMA TUBULAÇÃO”

Um método de modelar uma superfície (3) de um objeto (2) usando transdutores ultra-sônicos (4, 5) montados sobre a superfície, compreende as etapas de: prover um modelo da superfície, o modelo compreendendo um conjunto primário de pontos de superfície indicativos da altura da superfície, transmitir ondas pulsadas de um primeiro transdutor (4) para um ou mais segundos transdutores (5), o primeiro transdutor e cada segundo transdutor definindo um respectivo caminho ao longo da superfície, medir tempos de deslocamento das ondas pulsadas ao longo de cada caminho, calcular tempos de deslocamento baseado no modelo da superfície, ajustar o modelo da superfície em resposta a quaisquer discrepâncias entre os tempos de deslocamento medidos e os tempos de deslocamento calculados, e repetir as etapas de transmitir, medir, calcular e ajustar até que as discrepâncias sejam menores do que um limiar predeterminado. A etapa de calcular os tempos de deslocamento compreende a sub-etapa de interpolar o conjunto primário de pontos de superfície de modo a obter um conjunto secundário expandido de pontos de superfície, os tempos de deslocamento sendo calculados usando o conjunto expandido. Desse modo, o número de pontos de superfície a ser determinado é substancialmente reduzido.