



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

(11) PI 1016101-5 B1



(22) Data do Depósito: 16/04/2010

(45) Data de Concessão: 11/02/2020

(54) Título: MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE UMA TUBULAÇÃO USADA NA PRODUÇÃO DE HIDROCARBONETOS

(51) Int.Cl.: G01V 13/00; G01M 99/00; G01V 1/40; G01V 3/18.

(30) Prioridade Unionista: 17/04/2009 US 12/426,087.

(73) Titular(es): BAKER HUGHES INCORPORATED.

(72) Inventor(es): ALEXEI BOLSHAKOV; EDWARD J. DOMANGUE; DOUGLAS J. PATTERSON; JOSEPH GREGORY BAROLAK.

(86) Pedido PCT: PCT US2010031429 de 16/04/2010

(87) Publicação PCT: WO 2010/121158 de 21/10/2010

(85) Data do Início da Fase Nacional: 17/10/2011

(57) Resumo: MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE UMA TUBULAÇÃO USADA NA PRODUÇÃO DE HIDROCARBONETOS A presente invenção refere-se à avaliação de espessura do revestimento induzindo modos SH0 e SH1 de uma onda de cisalhamento no revestimento. A velocidade de grupo SH0 e velocidade de grupo do modo SH1 (V_g) são medidas e a velocidade de grupo do modo SH0 é atribuída como a velocidade de cisalhamento do material da tubulação (V_s). Um comprimento de onda de cisalhamento λ é estimado a partir da razão de frequência (f_0) de modo SH0 e da velocidade medida de grupo SH0. A espessura da tubulação (d) é estimada a partir do comprimento de onda de cisalhamento λ estimado. O transmissor pode ser calibrado para operar em uma frequência ótima.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE UMA TUBULAÇÃO USADA NA PRODUÇÃO DE HIDROCARBONETOS**".

ANTECEDENTES DA DESCRIÇÃO

Campo da Descrição

[001] A presente invenção refere-se a um dispositivo e um método para avaliar uma ligação de cimento. Mais especificamente, a presente revelação se refere a um dispositivo e método para avaliar a espessura, qualidade, e presença de uma ligação de cimento. Ainda mais especificamente, a presente revelação diz respeito a um dispositivo e método para avaliar uma ligação de cimento entre cimento e formação.

Descrição da Técnica Relacionada

[002] Furos de poços de produção de hidrocarbonetos tipicamente compreendem revestimento cimentado dentro de um furo de poço. O cimento liga o revestimento ao furo de poço e é adicionado dentro do anel entre o diâmetro externo do revestimento e o diâmetro interno do furo de poço. O cimento também isola zonas adjacentes uma da outra dentro de uma formação. Isolar zonas adjacentes pode ser importante quando uma das zonas contém petróleo ou gás e a outra zona inclui um fluido não de hidrocarboneto tal como água. Se o cimento que envolve o revestimento é defeituoso e falha no isolamento das zonas adjacentes, água ou outro fluido indesejável pode mirar para dentro da zona de produção de hidrocarbonetos deste modo diluindo ou contaminando os hidrocarbonetos dentro da zona de produção.

[003] O revestimento é sujeito a ciclos de carga mecânica de diferenciais de pressão aplicada e carga térmica que criam tensões internas e externas. Substâncias corrosivas tais como água salgada e compostos contendo enxofre, para enumerar apenas alguns, podem erodir a estrutura do revestimento e reduzir seu limite elástico. Ferramentas de perfilagem de fundo de poço e brocas de perfuração podem

danificar ou mesmo erodir o revestimento. Revestimento de produção pode enfraquecer devido à erosão, danos à superfície, seus ciclos de carga, ou combinações dos mesmos. Identificar defeitos de revestimento por erosão ou outros danos pode revelar uma falha potencial. Dano de revestimento é identificável através de várias medidas, tal como através da avaliação de espessura do revestimento. Exemplos de dispositivos de análise de revestimento incluem ferramentas de medição acústicas, aparelhos de vazamento de fluxo magnético; dispositivos de corrente parasita; e calibradores mecânicos.

SUMÁRIO DA DESCRIÇÃO

[004] Neste documento é descrito um método de avaliação de uma tubulação usada na produção de hidrocarbonetos. O método envolve inserir uma ferramenta dentro da tubulação, em que a ferramenta tem um transdutor acústico eletromagnético (EMAT). Opcionalmente, o EMAT pode ter até cinco conjuntos de linhas de indutores de onda magnética, energizando o EMAT para induzir uma onda de cisalhamento dentro da tubulação, em que a onda de cisalhamento compreende um modo SH0 e um modo SH1, medir a velocidade do grupo do modo SH0, medir a velocidade do grupo do modo SH1 (V_g), atribuindo a velocidade do grupo do modo SH0 medida como a velocidade de cisalhamento da tubulação (V_s), estimar um comprimento de onda de cisalhamento λ da relação de frequência de modo SH0 (f_0) e a velocidade do grupo SH0 medida, e estimar a espessura da tubulação (d) a partir do comprimento de onda de cisalhamento λ estimado. A espessura tubular (d) pode ser estimada usando o relacionamento: $d = 0.5\lambda / ((V_s / V_g)^2 - 1)^{1/2}$. O método pode compreender adicionalmente uma etapa de calibração de induzir ondas de cisalhamento adicionais dentro da tubulação sobre uma amplitude de frequências, monitorar a propagação das ondas de cisalhamento adicionais dentro da tubulação, avaliar a relação sinal ruído das ondas monitoradas nas frequências selecionadas, e ajustar a ferramenta para induzir ondas de

cisalhamento na frequência selecionada tendo a maior relação sinal ruído. Usando informação da etapa de calibração, o método pode compreender adicionalmente induzir uma onda de cisalhamento na frequência selecionada tendo a maior relação sinal ruído, medir a velocidade do grupo do modo SH0, e reestimar um comprimento de onda de cisalhamento λ baseado na velocidade do grupo do modo SH0 medida. A tubulação pode incluir revestimento que forra um furo de poço ou tubulação de produção disposta em um furo de poço.

BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

[005] A figura 1 ilustra esquematicamente uma modalidade de um transdutor acústico eletromagnético.

[006] A figura 2 é um esquemático de uma EMAT induzindo uma onda em um corpo condutivo.

[007] A figura 3 é uma vista de corte transversal de uma ferramenta de fundo de poço que tem transdutores acústicos, a ferramenta disposta no revestimento.

[008] As figuras 4a a 4c representam modelos de teste.

[009] A figura 5 ilustra graficamente modos SH0 e SH1 de um sinal acústico gravado.

[0010] As figuras 6 e 7 representam graficamente velocidade de cisalhamento de revestimento estimada para os modelos de teste das figuras 4a a 4c.

[0011] A figura 8 é um gráfico do modo SH0 para os modelos de teste das figuras 4a a 4c.

[0012] A figura 9 é uma varredura de frequência de um teste do modelo da figura 4c.

[0013] As figuras 10 a 12 incluem gráficos que representam respectivamente velocidade de grupo SH1, frequência SH1, e comprimento de onda efetivo do sinal para os modelos das figuras 4a a 4c.

[0014] As figuras 13 a 17 incluem gráficos de estimativas de espessura do revestimento dos modelos das figuras 4a a 4c.

[0015] A figura 18 é uma vista de corte parcial de uma modalidade de um sistema de perfilagem.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA REVELAÇÃO

[0016] Um EMAT usa transdução eletromagnética sem contato para transmitir tensão física a um meio condutivo. Com referência agora a figura 1, é fornecido um exemplo esquemático de um EMAT. Uma corrente I fluindo em um fio 10 posicionado entre um ímã 11 e uma superfície condutora 12 induz uma corrente parasita I_c igual e oposta na superfície condutora 12. Uma força Lorentz F_L pode ser criada na superfície condutora 12 combinando um campo magnético B com uma corrente parasita I_c , onde $F_L = I_c \times B$. A força Lorentz F_L gera deslocamento de partícula na superfície condutora 12 criando ondas elásticas tais como horizontal de cisalhamento (SH), ondas de cisalhamento polarizadas transversalmente, e ondas Lamb tanto do tipo simétrico como assimétrico.

[0017] Na figura 2 é fornecido um exemplo esquemático de um EMAT 14 que inclui uma matriz magnética 16 que compreende ímãs 18 dispostos em colunas 20 e linhas 22 similares a um tabuleiro de xadrez. Uma bobina de meandro 24 se estende sobre cada coluna 20 mudando a direção com cada coluna adjacente 20. Embora os ímãs 18 em cada linha 22 sejam de polaridade alternada, alternar a direção da bobina 24 produz uma força Lorentz F_L adicional em uma única direção. Além disso, como ilustrado na figura 2, alternar a polaridade do ímã 18 ao longo de cada coluna 20 cria forças Lorentz F_L orientadas opostamente em linhas adjacentes 22. Como observado acima, as forças Lorentz F_L deslocam partículas na superfície condutora 26 para induzir uma onda 28 em um corpo 30 sendo analisado. Em um exemplo, o corpo 30 compreende uma seção de uma tubulação de fundo de poço, tal como um revestimento ligado em um furo de poço ou tubagem de produção.

[0018] A figura 3 representa uma vista esquemática seccional de

um exemplo de uma ferramenta de perfilagem 32. A ferramenta de perfilagem 32 compreende um corpo cilíndrico 34 que tem transdutores dispostos ao longo do corpo 34. Neste exemplo, os transdutores incluem um transmissor 36 e um par de receptores 38, 40 onde os receptores 38, 40 são dispostos na circunferência externa do corpo 34 cada um a aproximadamente 120° do transmissor 36. Os transdutores (36, 38, 40) podem ser um EMAT, um transdutor piezoelétrico, ou um transdutor tipo cunha. Como mostrado, um sinal acústico gerado no transmissor 36, se desloca do receptor 38 como ilustrado pela linha L1 (sentido horário) e para o receptor 40 como ilustrado pela linha L2 (sentido anti-horário). O conteúdo de frequência do sinal e velocidades de grupo podem ser analisados para estimar propriedades locais (tal como velocidade de cisalhamento) e espessura de um revestimento ou outra tubulação de fundo de poço.

[0019] Equações de modelagem de propagação de onda bidimensional SH na mídia em camadas incluem:

$$f_n = f_s \times \sqrt{1 + (0.5\lambda n / d)^2} / \lambda; \quad (1)$$

$$V_p^n = V_s \times \sqrt{1 + (0.5\lambda n / d)^2}; \quad (2)$$

$$V_g^n = V_s / \sqrt{1 + (0.5\lambda n / d)^2}; \quad (3).$$

[0020] n é a ordem do modo SH ($n > 0$), d é a espessura da placa, λ é o comprimento de onda de cisalhamento, V_s é a velocidade de cisalhamento de material, e f_n , V_p^n , e V_g^n representam respectivamente a n ésima frequência, fase e velocidade de grupo do modo SH. B. A. Auld, 1990, Campos e Ondas Acústicos em Sólidos, Robert E. Krieger Publishing Company, Inc, Malabar, Florida, pags. 74 a 76.

[0021] Baseado nas equações (1) a (3) o grupo de modo e velocidades de fase SH0 igualam a velocidade de cisalhamento de material. Também, a frequência de modo 0ésima é igual à relação da velocidade

de cisalhamento de material e comprimento de onda:

$$f_0 = V_s / \lambda, \quad V_p^0 = V_s^0 = V_s. \quad (4)$$

[0022] Portanto, medir o grupo de modo ou velocidade de fase SH0 produz a velocidade de cisalhamento de material V_s .

[0023] Aplicando os relacionamentos acima a avaliação de tubulação de furo de poço, tal como perfilar acusticamente um revestimento, valores para velocidade de grupo, velocidade de fase e frequência são obteníveis. Por exemplo, uma ferramenta que tem um transdutor acústico, tal como um EMAT, pode ser disposto dentro de uma tubulação de fundo de poço, ativado para induzir um ou mais modos SH dentro da tubulação, e as formas de onda resultantes monitoradas. Baseado nos resultados medidos, algumas ou todas as velocidades de grupo, velocidade de fase e frequência são obteníveis para cada um dos modos de onda monitorados. Deve ser observado que nem a frequência SH0 nem a velocidade do grupo SH0 dependem da espessura tubular. Deste modo, resultados medidos para o modo SH0 podem ser usados para calibrar medições de espessura feitas para o $n^{\text{ésimo}}$ modo ($n > 0$). Além disso, a espessura da tubulação pode ser estimada monitorando apenas o modo SH0 e um modo adicional. A tabela 1 abaixo inclui expressões para estimar espessura tubular baseadas em frequência de onda medida, velocidade de grupo, e velocidade de fase.

Quantidades Medidas	f_n	V_g^n	V_p^n
f_0	$\frac{0.5\lambda n}{\sqrt{(f_n/f_0)^2 - 1}}$	$\frac{0.5\lambda n}{\sqrt{(f_0\lambda/V_g^n)^2 - 1}}$	$\frac{0.5\lambda n}{\sqrt{(V_p^n/(f_0\lambda))^2 - 1}}$
$V_g = V_g^o = V_p^o$	$\frac{0.5\lambda n}{\sqrt{(f_n\lambda/V_g)^2 - 1}}$	$\frac{0.5\lambda n}{\sqrt{(V_g/V_g^n)^2 - 1}}$	$\frac{0.5\lambda n}{\sqrt{(V_p^n/V_g)^2 - 1}}$
f_n	NA	$\frac{0.5\lambda n}{\sqrt{\lambda f_n/V_g^n - 1}}$	NA
V_g^n	$\frac{0.5\lambda n}{\sqrt{\lambda f_n/V_g^n - 1}}$	NA	$\frac{0.5\lambda n}{\sqrt{V_p^n/V_g^n - 1}}$
V_p^n	NA	$\frac{0.5\lambda n}{\sqrt{V_p^n/V_g^n - 1}}$	NA

Tabela 1

[0024] Baseado nas expressões na tabela 1 foi determinado que a espessura do revestimento (ou tubulação) é mensurável baseada nos resultados de um único $n^{\text{ésimo}}$ modo. Isto é possível medindo ou a velocidade de grupo e frequência, ou grupo e velocidades de fase do $n^{\text{ésimo}}$ modo ($n > 0$). Foi adicionalmente concluído que cálculos de espessura real requerem um comprimento de onda de transdutor preciso. Deste modo, um sinal de banda larga deve ser usado se o transdutor não tem um comprimento de onda bem definido. Opcionalmente, são possíveis cálculos de espessura medindo valores de dois modos SH diferentes. Por exemplo, o uso de frequências, fase ou velocidades de grupo de modos SH m e n ($m \neq n$, $m > 0$, $n > 0$) leva a seguinte fórmula:

$$d = 0.5\lambda \sqrt{\frac{(nV_g^n)^2 - (mV_g^m)^2}{(V_g^n)^2 - (V_g^m)^2}} = 0.5\lambda \sqrt{\frac{(nV_p^n)^2 - (mV_p^m)^2}{(V_p^n)^2 - (V_p^m)^2}} = 0.5\lambda \sqrt{\frac{(nf_m)^2 - (mf_n)^2}{f_n^2 - f_m^2}} \quad (5)$$

[0025] Ondas de modo SH maiores tipicamente exibem uma rela-

ção sinal ruído menor e atenuam mais dentro do cimento do que ondas de modo SH menores. Portanto, as expressões da tabela 1 focalizam nos modos de onda SH menores de SH0 e SH1. Foi determinado que a grande proximidade de transmissor para receptor é insuficiente para separação de modo de onda maior e modos em que a maior velocidade de fase excede a velocidade de cisalhamento. Consequentemente, as expressões na tabela 1 que têm velocidade de fase não foram mais consideradas deixando as fórmulas que contém velocidades de grupo e frequências. Os relacionamentos restantes são:

$$d_1 = \frac{0.5\lambda n}{\sqrt{(f_n/f_0)^2 - 1}}, \quad (6)$$

$$d_2 = \frac{0.5\lambda n}{\sqrt{(f_n\lambda/V_s^n)^2 - 1}}, \quad (7)$$

$$d_3 = \frac{0.5\lambda n}{\sqrt{(f_n\lambda/V_s)^2 - 1}}, \quad (8)$$

$$d_4 = \frac{0.5\lambda n}{\sqrt{(V_s/V_s^n)^2 - 1}}, \quad (9)$$

$$d_5 = \frac{0.5\lambda n}{\sqrt{\lambda f_n/V_s^n - 1}}, \quad (10)$$

[0026] onde d_i ($i = 1, \dots, 5$) são cinco estimativas de espessura diferentes.

[0027] Uma ferramenta de fundo de poço utilizável em um furo de poço revestido tem dimensões e configuração determinadas pelo tamanho e forma do furo de poço. Estas restrições dimensionais de ferramenta de fundo de poço consequentemente restringem a concepção do EMAT tendo até aproximadamente cinco linhas de ímãs. Modalidades de EMAT para uso com o presente método empregam dois, três ou quatro linhas de ímãs. A curvatura da tubulação também requer

matrizes de ímãs para o fundo de poço

[0028] Os EMATs são dispostos em curvatura igual ou similar. Durante o desenvolvimento do método descrito neste documento, foi descoberto que os EMATs que tem cinco ou menos linhas de ímãs em uma matriz geraram ondas de cisalhamento nas tubulações com comprimento de ondas inferior a duas vezes a largura da linha magnética. Isto é um afastamento da prática e teoria de EMAT tradicional onde era amplamente aceito que ondas geradas por EMAT tinham um comprimento de onda de duas vezes a linha magnética. Deste modo, foi determinado adicionalmente que não pode ser assumido que o comprimento de onda de transdutor λ seja constante e independente da espessura do revestimento. Foi descoberto que é baseado na fórmula (4) como a relação da velocidade de grupo e frequência do 0^{ésimo} modo:

$$\lambda = V_s / f_0 = V_g^0 / f_0. \quad (11)$$

[0029] O comprimento de onda λ da equação (11) é referenciado neste documento como o comprimento de onda "eficaz" e substituído nas fórmulas (6) até (10) pela estimativa da espessura do revestimento.

Exemplo

[0030] Uma sonda SH configurada similar a ferramenta 32 da figura 3 foi testada em quatro configurações de revestimento diferentes usando três modelos diferentes. Os EMATs foram incluídos no transmissor e dois receptores da sonda. Cada EMAT compreendido de uma matriz de ímãs dispostos estrategicamente de modo que cada ímã fosse limitado por um ímã polarizado opostamente. A matriz de ímãs tinha três linhas e cinco colunas, onde as linhas tinham 0,64 cm (0,25 polegadas) de largura. Os três tipos de modelos físicos de tubo cimentado usados nos experimentos são representados esquematicamente nas figuras 4a a 4c. Detalhes que especificam o tipo de cimento, dimensões de revestimento, e atenuação medida de onda de cisalhamento

são fornecidas na tabela 2 abaixo. A figura 4a ilustra um suporte de teste 46a usado para o Modelo 1 que simula um tubo livre não cimentado 48 que se estende parcialmente para dentro da água 50. O suporte de teste 46b que foi usado para os Modelos 2 e 3 é representado esquematicamente na figura 4b. Aqui uma parte inferior de tubo 52 é ancorada no cimento 54 e se estende para cima através da água 50. Um imitador de formação 56 envolve a seção inferior de cimento 54. O suporte de teste 46c representa esquematicamente o Modelo 4, onde um revestimento cimentado 52a com espessura variável foi analisado. Também são representados com o suporte de teste 46c um macaco hidráulico 58 que circunscreve a extremidade superior do tubo 52a e uma tampa soldada 60 fixada na extremidade inferior do tubo 52a.

[0031] Usando os modelos, o presente método foi investigado em tubo livre e cimentado juntamente com sua resposta a variação de espessura de tubo (no caso do Modelo 4). Deve ser assinalado que os Modelos 2, 3, e 4 tinham cada um uma seção de tubo livre no topo. O teste tipicamente iniciou a sonda em cada fundo de tubo então, ao mesmo tempo em que ativava o transmissor 36, a sonda foi puxada para a extremidade superior do tubo. Foram obtidos dados durante a sonda era puxada para cima. Os diferentes modelos permitiram a análise do revestimento com e sem cimento.

Modelo	Tipo de cimento	Espessura e ID do revestimento	Atenuação da seção cimentada SH0 e SH1
Modelo 1 (figura 4a)	Sem cimento (tubo livre)	espessura nominal 7,75 mm (0,305"), ID 124,21 mm (4,89")	NA
Modelo 2 (figura 4b)	Lama estendida (14 ppg)	espessura nominal 7,75 mm (0,305"), ID 124,21 mm (4,89")	23 dB/0.3048 m(1 pé) e 45 dB/ 0.3048 m (1 pé)

Modelo	Tipo de cimento	Espessura e ID do revestimento	Atenuação da seção cimentada SH0 e SH1
Modelo 3 (figura 4b)	Espuma de cimento (10 ppg)	espessura nominal 10,29 mm (0,405") , ID 119,13 mm (4,69")	8 dB/0.3048 m (1 pé) e 15 dB/ 0.3048 m (1 pé)
Modelo 4 (figura 4c)	Lama estendida (14 ppg)	vide tabela 2 (para espessura), ID 119,13 mm (4,69")	23 dB/0.3048 m (1 pé) e 45 dB/ 0.3048 m (1 pé)

Tabela 2

[0032] Como mostrado na tabela 2, a espessura do tubo para os Modelos 1, 2, e 3 não foi executada independentemente. O valor da espessura medido para o Modelo 4 é mostrado na tabela 3. As medidas foram feitas em 3 distâncias diferentes do fundo do tubo por 3 pontos diferentes em volta da circunferência (120 graus de afastamento).

Distância do fundo	3 valores de espessura medidos (120 graus de afastamento)	Espessura média
7,6 cm (3")	7,41 mm (0,292"), 7,70 mm (0,303"), 8,03 mm (0,316")	7,72 mm (0,304")
60,9 cm (24")	8,20 mm (0,323"), 8,59 mm (0,338"), 9,09 mm (0,358")	8,64 mm (0,340")
11,7 cm (44")	8,03 mm (0,316"), 9,09 mm (0,358"), 10,16 mm (0,40")	9,09 mm (0,358")

Tabela 3.

[0033] Como discutido acima, a geometria da sonda tradicionalmente ditou o comprimento de onda de cisalhamento, ou seja, $\lambda = 2 \times$ largura da linha de imã (neste documento referenciado como comprimento geométrico de onda). Deste modo foi assumido que o sinal inicial de cada modelo induziu uma onda de cisalhamento na frequência que corresponde ao comprimento geométrico de onda; que baseado em cada EMAT do modelo foi de 1,27 cm (0.5"). A frequência de SH0

frequência a $\lambda = 1,27$ cm é 252 kHz, para uma velocidade de cisalhamento típica de aço de 3200 m/seg baseado na fórmula (11). Uma vez que um sinal continha apenas um ciclo senoidal (devido às restrições do sistema de teste), a entrada de energia acústica real para o tubo foi de grande amplitude e resultou tanto na excitação de modos SH0 como SH1 como pode ser visto na figura 5.

[0034] Os cálculos de velocidade do grupo do modo SH0 foram executados em cada um dos Modelos 1 a 4 usando uma distância constante entre receptores calculado a partir do diâmetro interno conhecido do tubo. Os cálculos também incluíram tempo de voo baseado no máximo da função de correlação cruzada entre os sinais que se deslocaram 1/3 e 2/3 da circunferência para receptores diferentes. Para melhorar a relação sinal ruído os dados foram filtrados e foi tomada a média corrente de 8 sinais através da varredura completa. A figura 6 demonstra a velocidade de cisalhamento de revestimento que resulta destes cálculos.

[0035] As varreduras feitas nos modelos são separadas em três partes. Na primeira parte a sonda repousa no fundo do modelo enquanto o sistema de disparo estabelece o ganho, a segunda parte consiste na sonda correndo através do comprimento do modelo enquanto a terceira parte foi feita em condições de sonda estacionária na seção livre de tubo. Embora seja possível alguma variação da velocidade de cisalhamento por todo o comprimento do revestimento devido a tensões intrínsecas presentes no tubo, foi esperado que o seu valor estivesse na amplitude de 3000 to 3200 m/seg. Esta amplitude é vista na seção livre de tubo para todos os modelos.

[0036] Os dados obtidos no modelo 1 (tubo livre) demonstram menos variação quando comparados aos dados em outros modelos. O resultado dos modelos cimentados inclui a descoberta de que a velocidade de cisalhamento pode ser superestimada devido a salto de ciclos na presença de atenuação muito grande. A velocidade de cisa-

lhamento pode ser subestimada devido a interações do modo SH1. A subestimação ocorre primariamente no revestimento mais grosso porque a frequência SH1 diminui conforme a espessura aumenta. A figura 6 demonstra que o modo SH0 foi identificado corretamente nos dados (domínio de tempo). Também é demonstrado que a frequência que corresponde à parte central do sinal pode ser utilizada para otimizar a sequência de disparo usada para os modos SH0 e SH1.

[0037] Foi descoberto que o cálculo de velocidade de grupo baseada em correlação cruzada dos sinais que percorreram $1/3$ e $2/3$ da circunferência do tubo é difícil e não confiável nas seções cimentadas dos modelos. Entende-se que isto se deve em parte a atenuação excessiva de sinal. Adicionalmente, nas fórmulas (6) até (10), a estimativa correta da espessura do tubo requer que as variações tanto de frequência como de velocidade em volta da circunferência sejam medidas ao longo do mesmo intervalo. Devido a estas questões as estimativas de velocidade de grupo apresentadas adicionalmente são baseadas no cálculo de tempo de voo entre o transmissor e o receptor mais próximo. Uma vez que o momento exato de t_0 , o início de excitação da velocidade de grupo no transmissor, não era conhecido, o mesmo foi calibrado baseado em estimativas de velocidades de grupo em seções livres de tubo de cada modelo para os modos SH0 e SH1 separadamente.

[0038] Os resultados dos cálculos das velocidades de grupo do modo SH0 são apresentados na figura 7. Como pode ser visto desta figura os Modelos 1 até 4 mostram o valor de estimativa constante da velocidade de cisalhamento através de todo o comprimento do tubo. Deve ser observado que as curvas apresentadas aqui variam menos do que as curvas na figura 6. Também a presença de cimento (pulsos 1 até 180) afeta apenas ligeiramente as estimativas de velocidade no caso do Modelo 2. Nos outros modelos, não foi encontrado cimento para afetar esta medida. Como demonstrado pelos dados obtidos nos

Modelos 2 e 4, foi verificado que a interface cimento-fluido provoca uma queda súbita na velocidade aparente do modo SH0 próxima ao pulso 200.

[0039] Como mostrado na figura 8, a presença da interface cimento-fluido usando o gráfico de frequência de modo SH0 somente foi detectado para o Modelo 4. As frequências do modo SH0 obtidas dos Modelos 1 até 3 variaram apenas levemente através da varredura enquanto a frequência de modo SH0 do Modelo 4 teve um grande pico quando entrando na seção de tubo livre. Este pico também foi demonstrado na figura 9, que mostra tipo VDL da apresentação a frequência do modo SH0 no Modelo 4.

[0040] A figura 10 mostra as estimativas da velocidade SH1 em diferentes modelos. De acordo com a fórmula (3), a velocidade de grupo SH1 do Modelo 3 (espessura nominal do revestimento de 10.27 mm) é maior do que o Modelo 1 (espessura nominal do revestimento de 7.75 mm). A velocidade de grupo SH1 nestes modelos varia apenas levemente através do comprimento da varredura. Isto é provavelmente devido à espessura do revestimento e a condição de tubo livre do Modelo 1 e atenuação muito baixa através da seção cimentada do Modelo 3. A velocidade de grupo SH1 no Modelo 4 mostra uma tendência geral para cima de acordo com a fórmula (3). No início da varredura a velocidade de grupo SH1 do Modelo 4 se aproxima dos valores do Modelo 1 e se aproxima dos valores do Modelo 3 no fim da varredura. Nota-se, em sua parte de fundo a espessura do revestimento do Modelo 4 é similar a espessura do revestimento do Modelo 1, e em seu topo, a espessura do revestimento do Modelo 4 é similar a espessura do revestimento do Modelo 3. A varredura do Modelo 4 terminou próxima ao macaco hidráulico (vide figura 4c). Acredita-se que a massa adicional presa ao revestimento impulsiona a velocidade de grupo para cima no fim da varredura. Os valores obtidos no Modelo 2 são similares aos valores obtidos no Modelo 1 uma vez que o revestimento

em ambos os modelos tem espessura similar.

[0041] A figura 11 exibe graficamente a frequência do modo SH1 para modelos diferentes. Como previsto pela fórmula (1) (frequência SH1 é maior para revestimento mais fino), uma correlação entre a espessura do revestimento e frequência pode ser observada na figura 11. Uma leitura baixa de frequência no início da varredura (antes de a sonda ser colocada em movimento) no Modelo 4 pode ser explicada pela presença de uma placa muito grossa no fundo deste modelo. A varredura no Modelo 4 terminou próxima ao macaco hidráulico, aqui a frequência era menor do que no início da varredura. Uma queda súbita de frequência nos dados do Modelo 2 correspondem à sonda cruzando a fronteira cimento água.

[0042] Com referência agora a figura 12, a calibragem da sonda resulta para os modelos que são graficamente exibidos. Como discutido acima, os sinais de calibragem foram disparados sobre uma amplitude de frequência para dentro do modelo e monitorados. A frequência do sinal monitorado que tem a relação sinal ruído mais alta foi identificada. A partir dos resultados de calibragem e fórmula (11) foi determinado que o comprimento eficaz de onda da sonda é de 16 mm, que é aproximadamente 26% maior do que o comprimento geométrico de onda de 12.7 mm (0,5 polegada).

[0043] As figuras 13 até 17 são gráficos que ilustram uma espessura calculada do revestimento versus número de pulso do sinal. Os valores de espessura apresentados nos gráficos das figuras 13 até 17 foram calculados a partir das fórmulas (6) até (10) respectivamente. As figuras indicam a tendência de espessura de cada modelo que foi predita por estas fórmulas. A razão relativa entre os valores absolutos de espessuras também foi corretamente estimado pelas fórmulas. A Fórmula (9), que usa as velocidades de grupo dos modos SH0 e SH1 (figura 16) foi julgada o estimador mais preciso de espessura em termos de valores absolutos. Esta conclusão é baseada na comparação das

estimativas de espessura nas figuras 13 até 17 com os dados de espessura apresentados das Tabelas 2 e 3. Consequentemente, calcular espessura de tubulação baseado em um comprimento efetivo de onda em vez de em um comprimento geométrico de onda fornece um valor de espessura substancialmente mais preciso.

[0044] Um exemplo de um sistema de perfilagem que emprega uma modalidade do método descrito neste documento é ilustrado em uma vista de corte lateral parcial na figura 18. O sistema ilustrado é um sistema de perfilagem de fundo de poço 58 que compreende uma ferramenta de fundo de poço 60 ou sonda presa a um cabo de aço 62 e disposta em um furo de poço 64. A ferramenta 60 é mostrada coletando informação do revestimento 66 que forra o furo de poço 64. Braços de sensor 68 presos de forma articulada as placas 70 incluídas no invólucro da ferramenta 60 presas as extremidades dos braços 68. Cada placa 70 inclui um transdutor 72 na mesma, o transdutor 72 pode ser um transmissor, receptor, acústico ou ambos transmissor e receptor. Exemplos de transdutores 72 incluem um EMAT, piezoelétrico, cunha e laser.

[0045] Articulando os braços 68 estende as placas 70 para fora do invólucro da ferramenta 60 e em direção ao revestimento 66. Dispondo uma placa 70 para fora coloca o seu transdutor 72 correspondente próximo ao revestimento 66, facilitando assim a interação entre o transdutor 72 e revestimento 66. Na modalidade da figura 18, três placas 70 com transdutores 72 são ilustradas, entretanto existem outras modalidades que incluem dois, quatro, cinco, ou mais placas, cada placa com um ou mais transdutores. Em cada placa um ou mais transdutores 72 é um transmissor configurado para transmitir um sinal que se propaga através do revestimento 66, tal como um sinal acústico, e pelo menos um transdutor 72 é um receptor configurado para receber o sinal transmitido através do revestimento 66. Através do revestimento inclui um sinal que se propaga ao redor da circunferência do reves-

timento 66, ao longo do comprimento do revestimento 66, ou diretamente através da parede do revestimento 66. Além disso, o sistema de perfilagem 58 não é restrito a perfilagem de revestimento, mas também pode monitorar e analisar outras tubulações. Sinais recebidos pelos receptores podem ser analisados usando o método descrito acima para determinar a espessura do revestimento 66.

[0046] Um controlador 74 pode opcionalmente ser incluído com o sistema 58, onde o controlador 74 se comunica através do cabo de aço 62 com a ferramenta 60 ou diretamente com a ferramenta 60 independente do cabo de aço 62. O controlador 74 pode ser disposto na superfície ou combinado com a ferramenta 60 e dentro do invólucro. O controlador 74 pode ser um microprocessador ou outro sistema de manuseio de informação. O controlador 74 pode ser usado para fornecer comandos para a ferramenta 60 e seus componentes, e / ou receber dados da ferramenta 60, tais como dados recebidos por seus transdutores receptores 72. O controlador 74 também pode ser configurado para determinar espessura de revestimento 66 usando o método descrito acima ou algum outro método.

[0047] A presente invenção descrita neste documento, portanto, é bem adaptada para executar os objetivos e alcançar os fins e vantagens mencionados, bem como outros inerentes a ela. Embora uma modalidade atualmente preferencial da invenção tenha sido apresentada para fins de descrição, existem várias mudanças em detalhes de procedimentos para alcançar os resultados desejados. Por exemplo, o inverso do tempo para um sinal se deslocar entre dois transdutores, que estão afastados a uma distância conhecida, pode ser usado como uma maneira alternativa de medir a velocidade do sinal. Estas e outras modificações similares irão sugerir elas próprias prontamente para os indivíduos versados na técnica, e são entendidas como abrangidas dentro do espírito da presente invenção revelada neste documento e no escopo das reivindicações em anexo.

REIVINDICAÇÕES

1. Método de avaliação de uma tubulação usada na produção de hidrocarbonetos, o método **caracterizado por** compreender:

induzir uma onda de cisalhamento de modo SH0 e uma onda de cisalhamento de modo SH1 dentro da tubulação;

medir a velocidade do grupo do modo SH0;

medir a velocidade do grupo do modo SH1 (V_g);

atribuir a velocidade medida do grupo do modo SH0 como a velocidade de cisalhamento do material da tubulação (V_s);

estimar um comprimento de onda de cisalhamento λ a partir da razão da frequência de modo SH0 (f_0) e a velocidade medida do grupo SH0; e

estimar a espessura da tubulação (d) a partir do comprimento de onda de cisalhamento λ estimado.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente estimar a espessura da tubulação (d) usando o relacionamento:

$$d = 0.5\lambda / ((V_s / V_g)^2 - 1)^{1/2}.$$

3. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente induzir ondas de cisalhamento adicionais dentro da tubulação sobre uma amplitude de frequências, monitorar a propagação das ondas de cisalhamento dentro da tubulação, avaliar a relação sinal ruído das ondas monitoradas nas frequências selecionadas, ajustar a ferramenta para induzir ondas de cisalhamento na frequência selecionada tendo a maior relação sinal ruído.

4. Método, de acordo com a reivindicação 3, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente induzir uma onda de cisalhamento na frequência selecionada tendo a maior relação sinal ruído, medir a velocidade do grupo do modo SH0, e re-estimar um com-

primento de onda de cisalhamento λ baseado na velocidade medida do grupo do modo SH0.

5. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que a tubulação compreende um membro anelar selecionado a partir de uma lista que consiste em revestimento que forra um furo de poço e tubulação de produção disposta em um furo de poço.

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente inserir na tubulação uma ferramenta que tem um transdutor acústico eletromagnético (EMAT) que inclui uma matriz de ímãs que tem pelo menos três linhas de ímãs.

7. Método, de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado** pelo fato de que as linhas magnéticas são alinhadas substancialmente paralelas com o eixo geométrico da tubulação.

8. Método, de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado** pelo fato de que o EMAT repousa em um plano substancialmente perpendicular ao eixo geométrico da tubulação, e em que a onda de cisalhamento é monitorada dentro do plano a aproximadamente 120° ao longo da circunferência da tubulação para longe do EMAT.

9. Método, de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado** pelo fato de que o EMAT repousa em um plano substancialmente perpendicular ao eixo geométrico da tubulação, e em que a onda de cisalhamento é monitorada dentro do plano a aproximadamente 240° ao longo da circunferência da tubulação para longe do EMAT.

10. Método, de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado** pelo fato de que a matriz de ímãs compreende até cinco linhas de ímãs.

Fig. 1

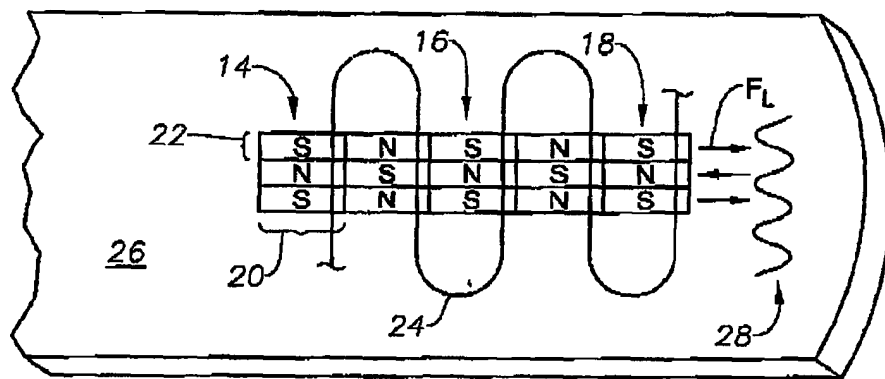
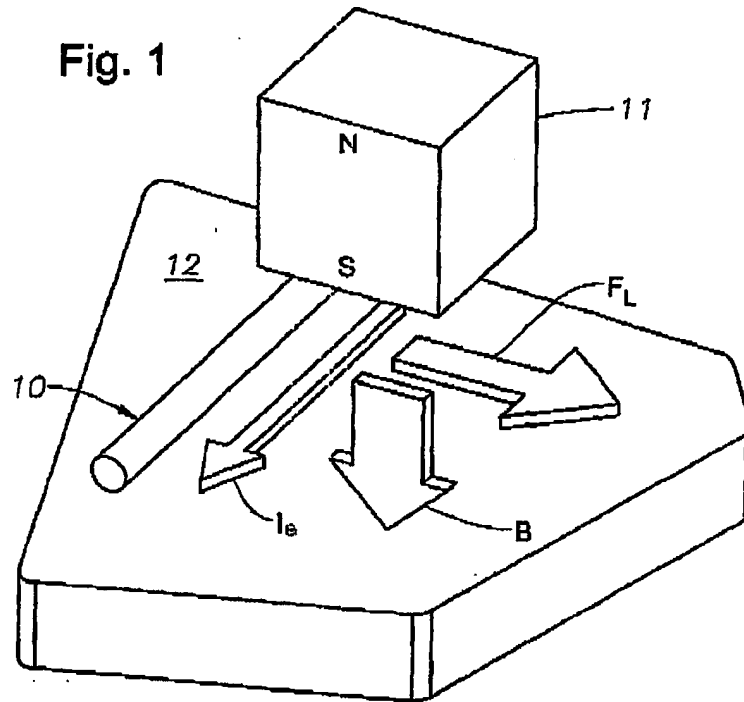


Fig. 2

Fig. 3

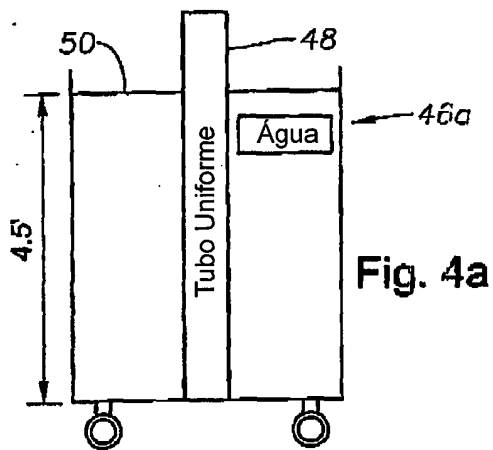
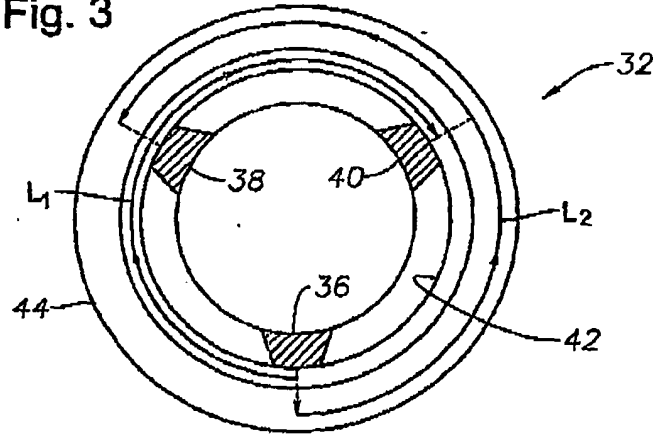


Fig. 4a

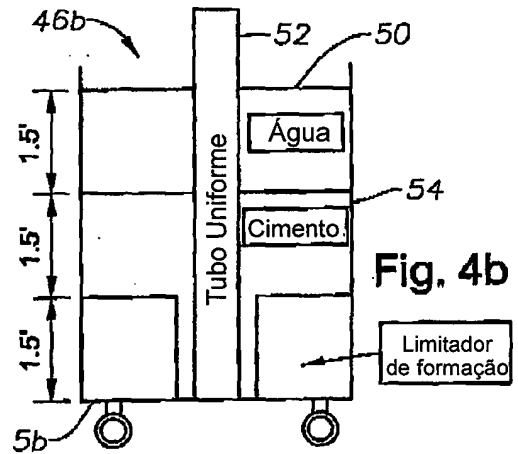


Fig. 4b

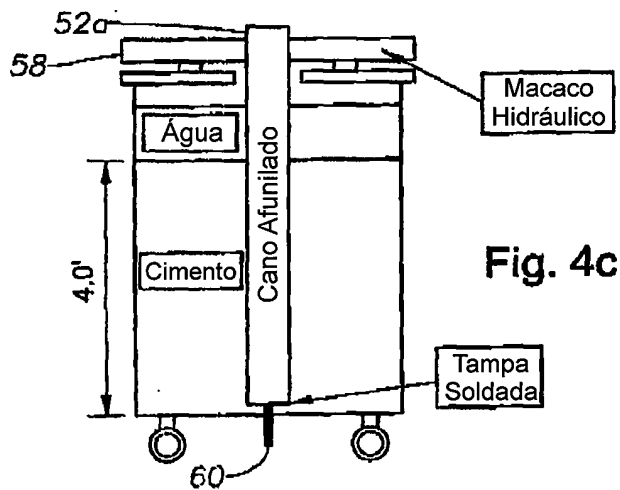


Fig. 4c

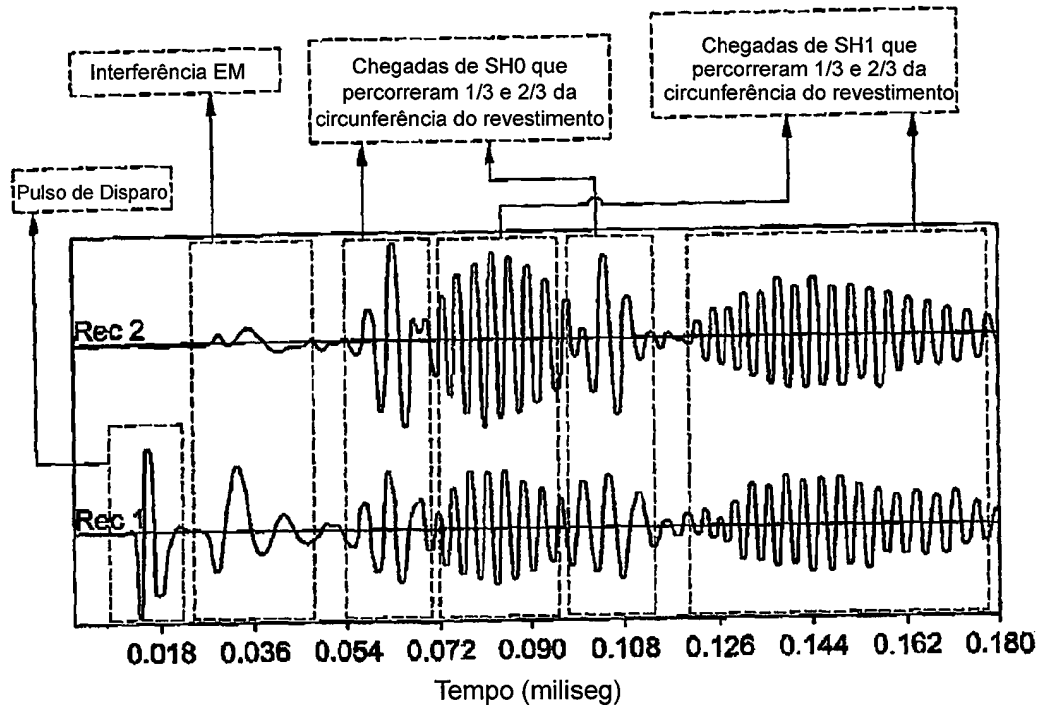


Fig. 5

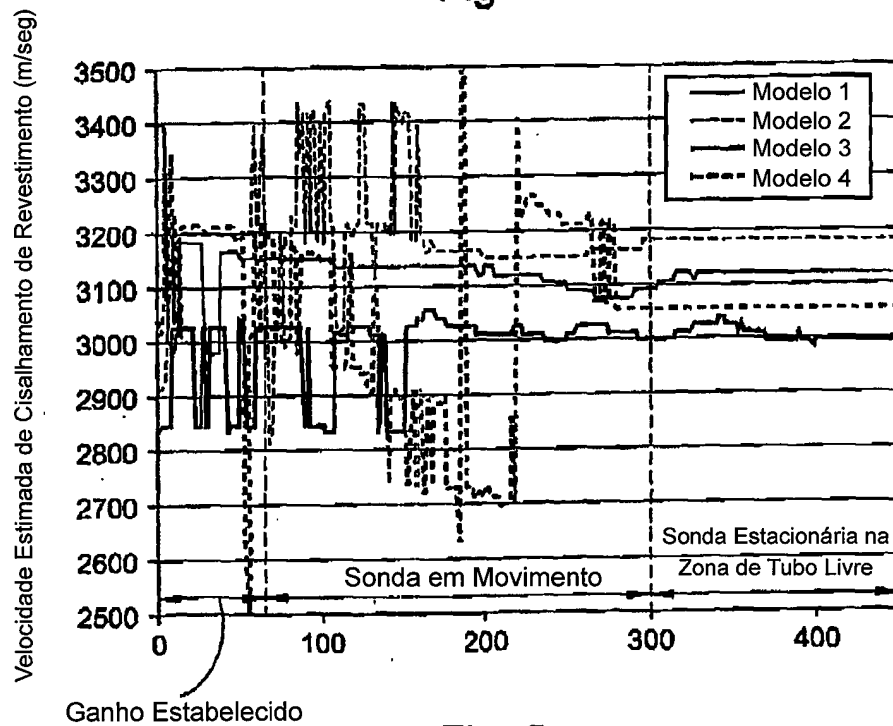


Fig. 6

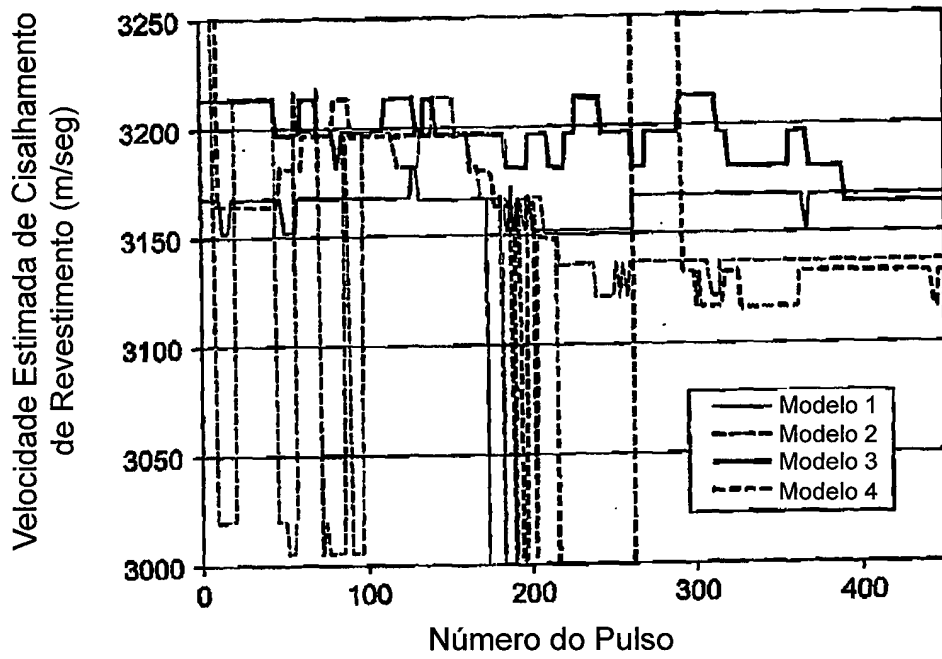


Fig. 7

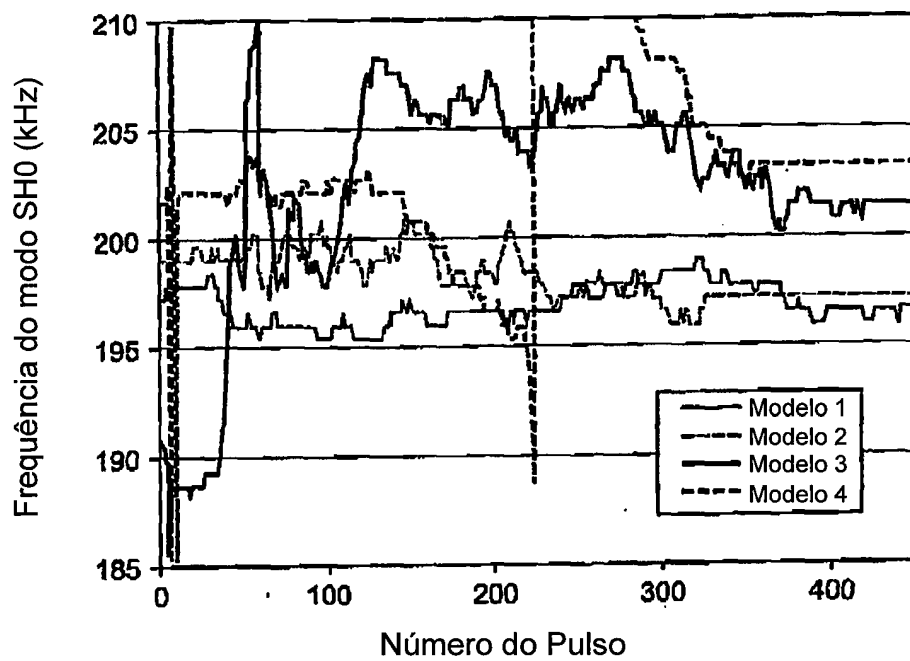


Fig. 8

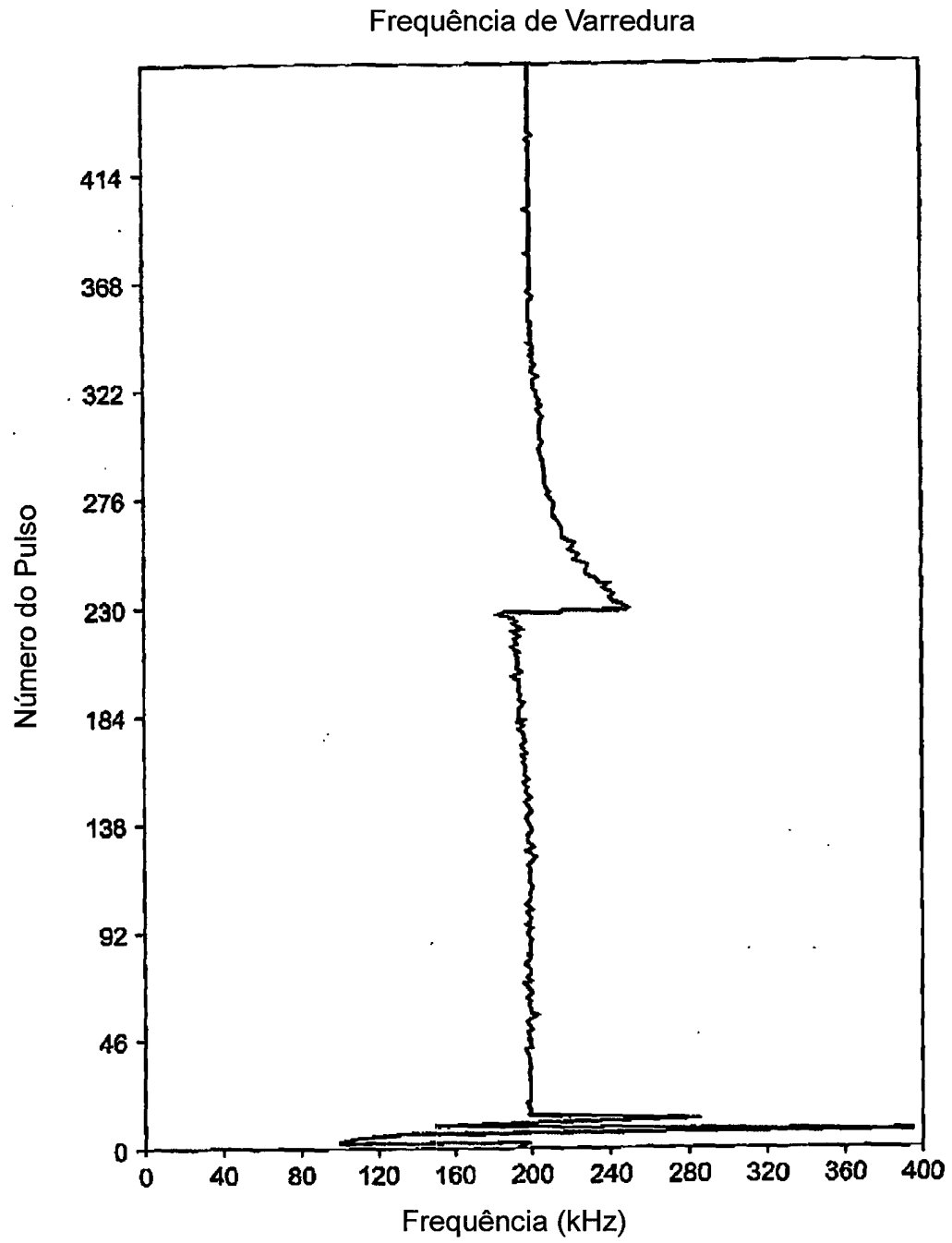


Fig. 9

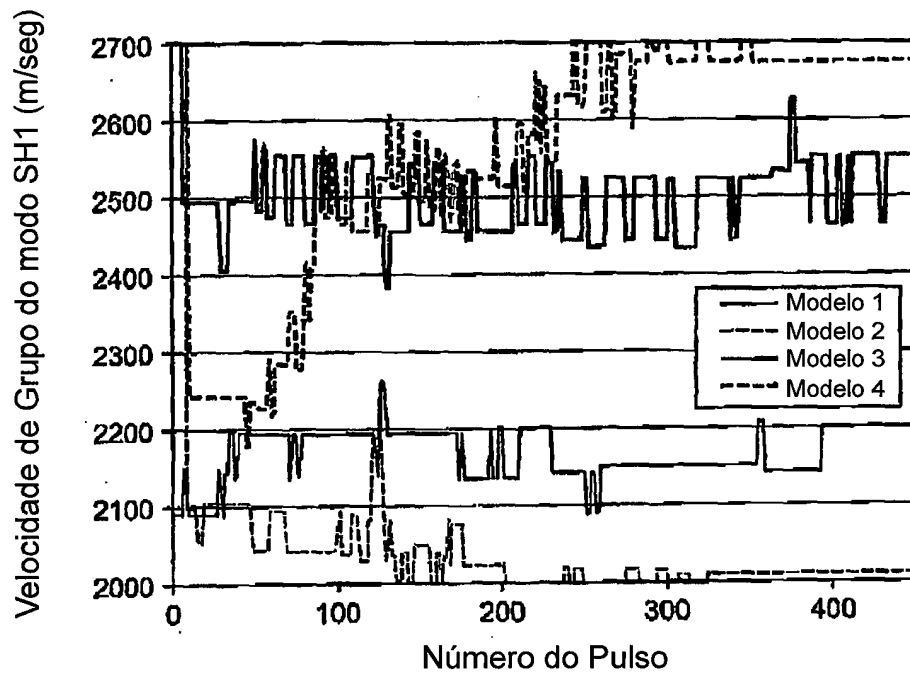


Fig. 10

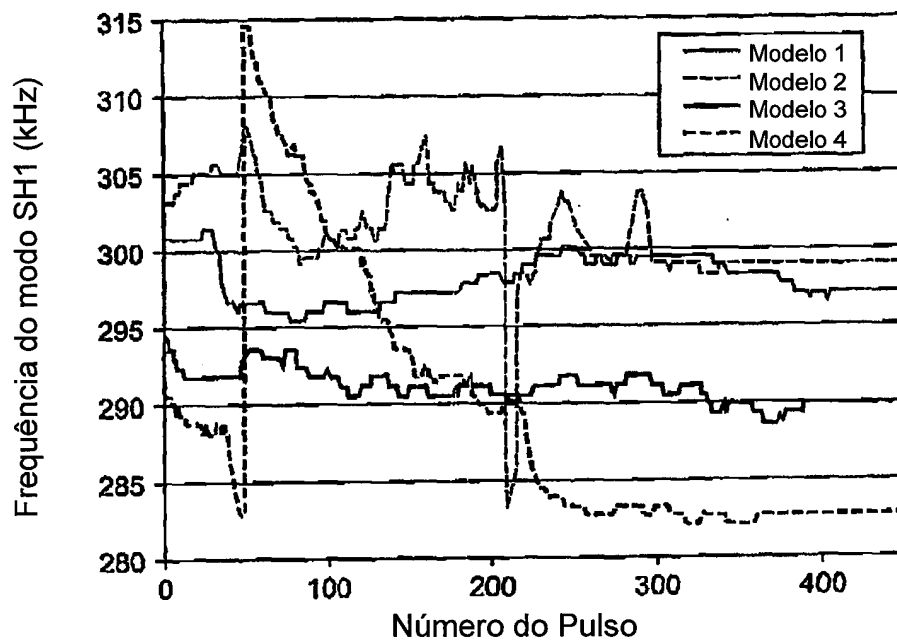


Fig. 11

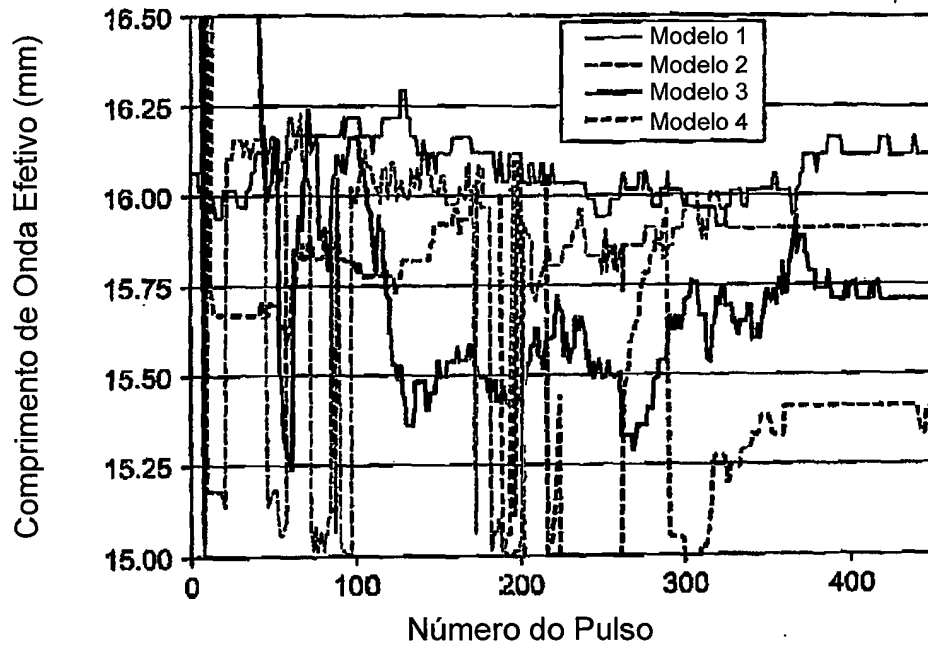


Fig. 12

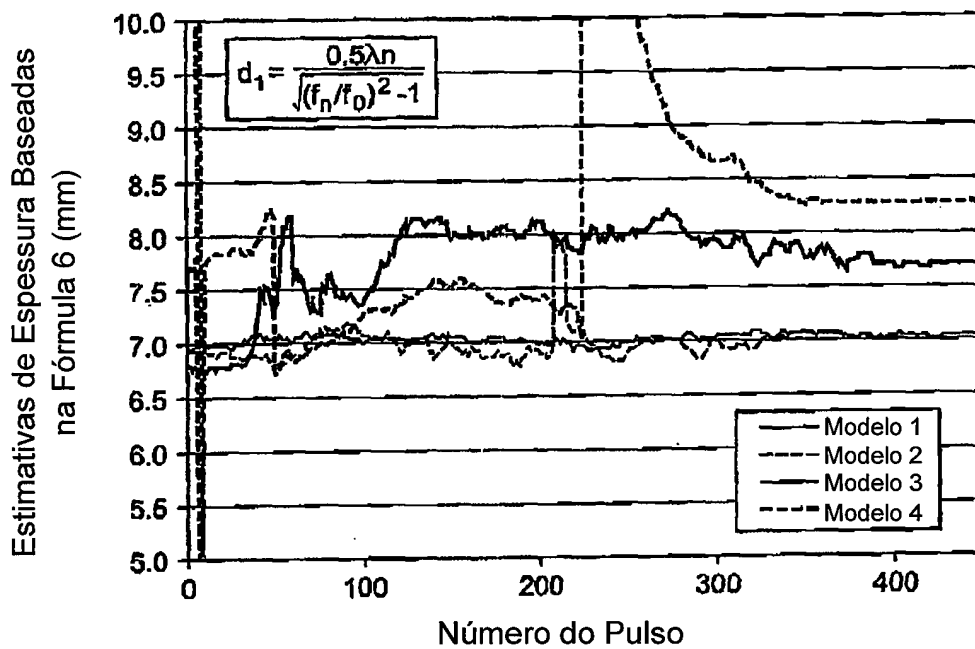


Fig. 13

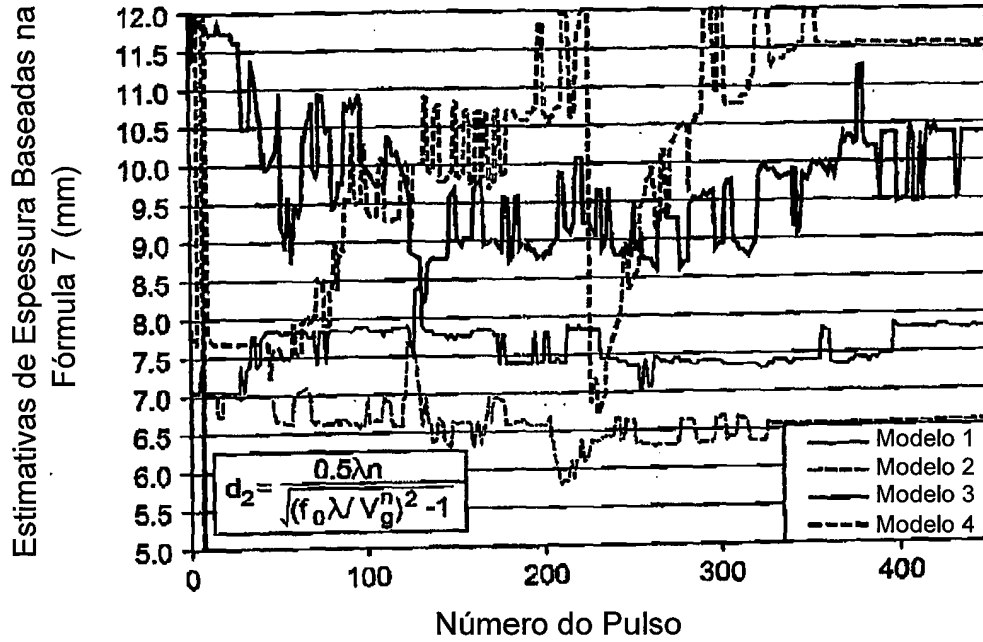


Fig. 14

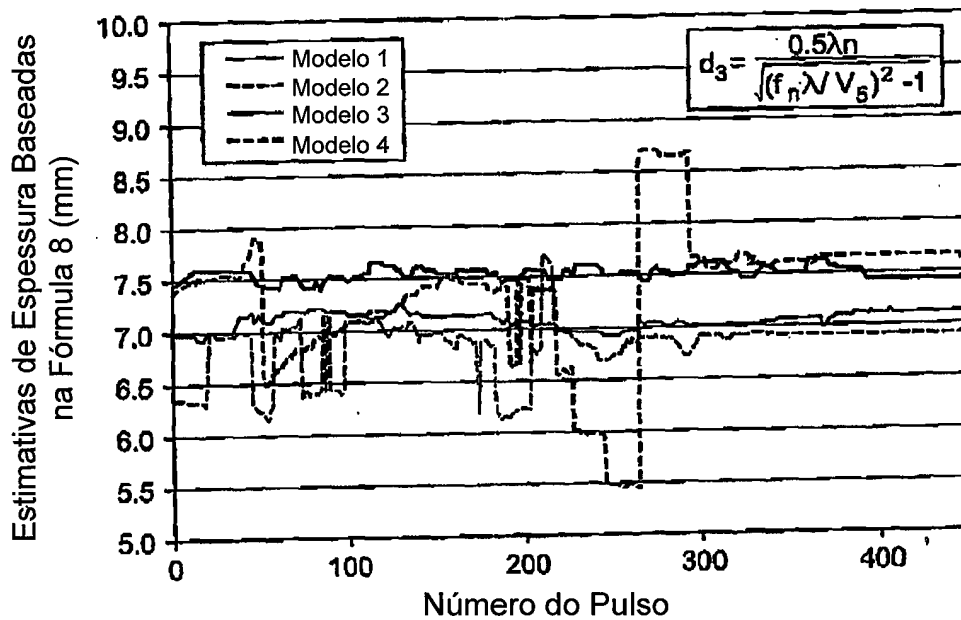


Fig. 15

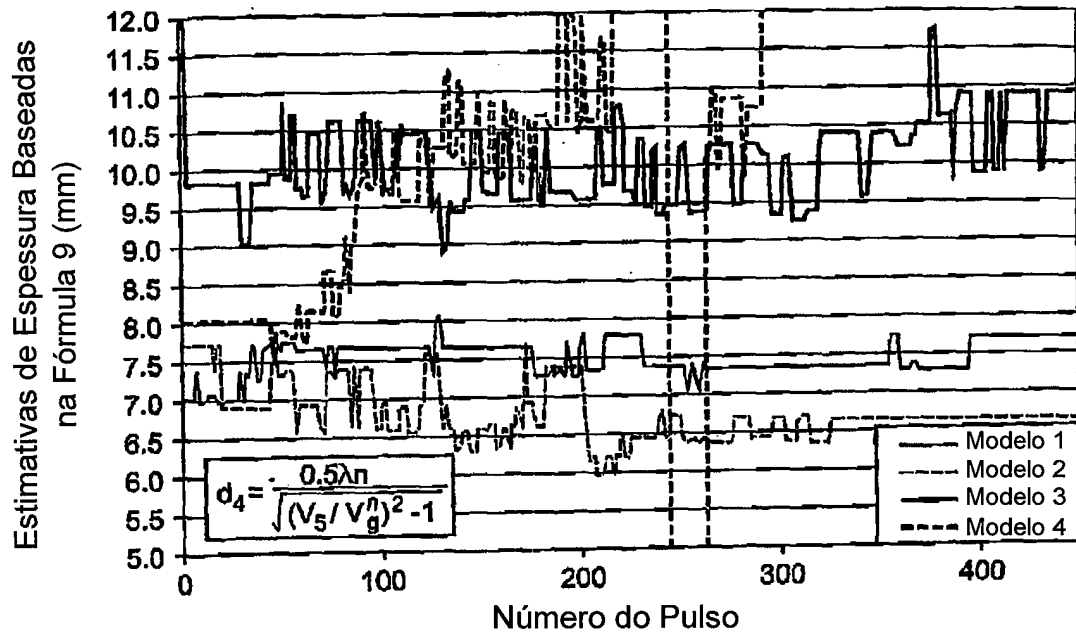


Fig. 16

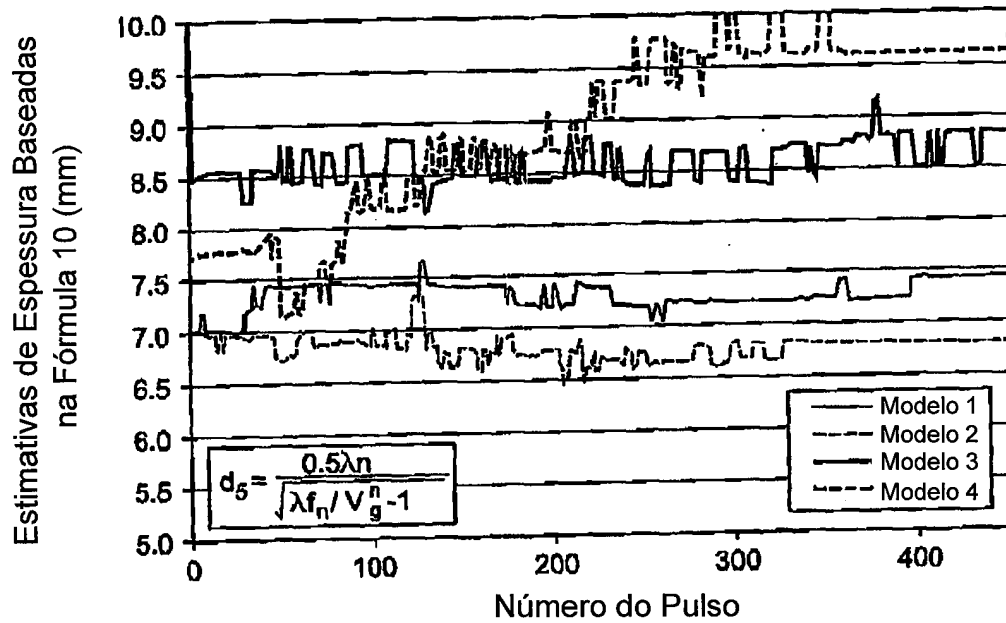


Fig. 17

