



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

(11) PI 1004965-7 B1



(22) Data do Depósito: 21/12/2010

(45) Data de Concessão: 15/10/2019

(54) Título: MÉTODO PARA EXPLORAÇÃO SÍSMICA DE FORMAÇÕES DE ROCHA DE SUBSUPERFÍCIES

(51) Int.Cl.: G01H 3/00; G01V 1/36.

(30) Prioridade Unionista: 21/12/2009 US 12/653,907.

(73) Titular(es): PGS GEOPHYSICAL AS.

(72) Inventor(es): NILS LUNDE; ANTONI MARJAN ZIOLKOWSKI; GREGORY ERNEST PARKES.

(57) Resumo: FONTES SÍSMICAS IMPULSIVAS E NÃO-IMPULSIVAS COMBINADAS. A presente invenção refere-se a um método para exploração sísmica de formações de rocha de subsuperfície que inclui o acionamento de uma fonte de energia sísmica impulsiva próxima às formações de rocha. E acionada uma fonte de energia sísmica não-impulsiva. E detectada uma forma de onda de campo próximo de cada fonte de energia sísmica impulsiva e não-impulsiva. É determinada uma forma de onda de campo distante da saída combinada das fontes de energia sísmica impulsiva e não-impulsiva das formas de onda de campo próximo. É determinada uma resposta de impulso das formações de rocha de subsuperfície pela deconvolução da forma de onda de campo distante com os sinais sísmicos detectados.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA EXPLORAÇÃO SÍSMICA DE FORMAÇÕES DE ROCHA DE SUB-SUPERFÍCIES"**.

Antecedentes da Invenção

5 Campo da Invenção

A presente invenção refere-se em geral ao campo da inspeção sísmica marítima. Especificamente, esta invenção se refere às fontes de energia sísmicas para inspeção marítima tendo uma saída de energia de baixa frequência.

10 Antecedentes da Técnica

A pesquisa sísmica marítima inclui desdobrar uma fonte de energia sísmica em um corpo d'água, acionar a fonte e detectar energia sísmica refletida dos limites da impedância acústica nas formações de rocha abaixo do fundo da água. Uma fonte de energia sísmica típica é usada na pesquisa sísmica marítima em um arranjo de pistola de ar. Os arranjos de pistolas de ar incluem uma pluralidade de pistolas de ar individuais, cada uma das quais é conectada a uma fonte de ar ou gás comprimido. Cada pistola de ar inclui uma câmara para armazenar o ar ou gás comprimido, em uma pressão selecionada, e uma válvula operável remotamente para liberar o ar ou gás comprimido em períodos determinados. A frequência da energia sísmica gerada na água pela liberação do ar ou gás comprimido é relacionada, dentre outros parâmetros, ao volume da câmara. Uma pistola de ar exemplificativa está descrita na Patente Número U.S. 4,472,794 expedida para Chelminski.

É conhecido na técnica que a frequência mais baixa do arranjo de pistolas de ar é recíproca do período de oscilação de bolha da maior pistola de ar. A fórmula Rayleigh-Willis modificada prognostica com precisão o período de oscilação de bolha para uma pistola de ar única como se segue.

$$T = K \frac{P^{1/3} V^{1/3}}{(P_0 + \rho g D)^{5/6}} \quad (1)$$

Onde T é o período de bolha, P é a pressão de ar ou gás na pistola de ar. V é o volume da câmara de pistola de ar, P₀ é a pressão atmosférica, ρ é a densidade da água, g é a aceleração gravitacional da Terra, D é a

profundidade da pistola de ar na água, e K é a constante que depende das unidades de medição de todos os parâmetros antecedentes.

Para uma profundidade específica D e uma pressão de câmara de pistola de ar específica P, a largura de banda de um arranjo de pistolas de ar pode ser estendida em uma extremidade de baixa frequência pelo aumento do volume da câmara da maior pistola de ar. Da equação (1) é claro que o período de bolha é proporcional à raiz cúbica do volume da câmara da maior pistola de ar. Como uma questão prática, os arranjos de pistola de ar na técnica não produzem energia sísmica substancial abaixo de 8 Hz. Embora seja possível produzir arranjos de pistola de ar que iriam produzir energia sísmica substancial abaixo de 8 Hz, o volume da câmara das pistolas de ar capazes de produzir tal esse de baixa frequência seria grande o suficiente para requerer aumento substancial no tamanho da fonte de ar ou gás comprimido, dentre outras limitações práticas. A equação do período de bolha ilustra que é igualmente possível aumentar o período de bolha usando o mesmo volume de câmara pelo aumento da pressão de carga. O problema com essa possibilidade é que as pistolas de ar se tornem muito menos confiáveis em pressões de operação de carga mais alta. Portanto, são necessárias fontes de energia sísmicas marítimas que emitam mais energia em frequências abaixo de 8 Hz que não requeiram aumentos nos volumes ou de pressões de ar ou ar comprimido.

Sumário da Invenção

Um método para exploração sísmica de formações de rocha de subsuperfície de acordo com um aspecto da presente invenção inclui acionar uma fonte de energia sísmica impulsiva próxima às formações de rocha. Após um tempo de retardo selecionado, é acionada uma fonte de energia sísmica não-impulsiva. É detectada uma forma de onda de campo próximo de cada fonte de energia sísmica impulsiva e não-impulsiva. É determinada uma forma de onda de campo distante da saída combinada das fontes de energia sísmica impulsiva e não-impulsiva das formas de onda de campo próximo. É determinada uma resposta de impulso das formações de rocha de subsuperfície pelo desenvolvimento da forma de onda de campo distante

com os sinais sísmicos detectados.

Outros aspectos e vantagens da invenção serão claros a partir da descrição que se segue e das reivindicações em anexo.

Breve Descrição dos Desenhos

5 A figura 1 ilustra um sistema de aquisição de dados sísmicos incluindo um arranjo de pistolas de ar um vibrador sísmico marítimo.

A figura 2 é um fluxograma de um exemplo de método de acordo com a invenção.

Descrição Detalhada

10 Em termos mais gerais, um método de acordo com a invenção inclui o uso de uma fonte de energia sísmica impulsiva (uma fonte que confere substancialmente toda sua energia para a subsuperfície em uma ocorrência de duração curta, única) em combinação com uma fonte de energia sísmica não-impulsiva (em que a energia de cada acionamento é propagada
15 em um intervalo de tempo relativamente longo em vez de uma ocorrência de duração curta, única). As fontes impulsiva e não-impulsiva combinadas são usadas em combinação de maneira que a energia sísmica de amplitude relativamente baixa em baixas frequências, por exemplo, abaixo de em torno de 8 Hz, emitidas pela fonte impulsiva seja suplementada pela energia sísmica
20 de baixa frequência de uma fonte não-impulsiva.

A figura 1 ilustra um sistema de aquisição sísmica incluindo uma fonte de energia sísmica impulsiva, que no presente exemplo é um arranjo de pistola de ar 14, em uma fonte de energia sísmica não-impulsiva, que no presente exemplo é o vibrador sísmico marítimo 26. O sistema é desdobrado
25 em um corpo d'água 11 como, por exemplo, um lago ou oceano. A embarcação de pesquisa sísmica 10 pode ser configurada para rebocar parte dos ou todos os componentes do sistema na água 11. Em outros exemplos as embarcações separadas (não ilustradas) podem rebocar parte dos componentes do sistema. A embarcação de pesquisa 10 tipicamente inclui equipamento,
30 to, ilustrado em 12 e referido por conveniência como um "sistema de registro", que é dotado de componentes (não ilustrados separadamente por clareza de ilustração) para realizar as seguintes funções: determinar a posição

geodésica da embarcação de pesquisa 10 e dos vários componentes do sistema rebocado; acionar o arranjo de pistolas de ar 14 e o vibrador 26 em períodos selecionados; e registrar os sinais detectados por cada de uma pluralidade de sensores sísmicos 28 (explicados adicionalmente abaixo) em resposta à energia sísmica emitida pelo arranjo de pistolas de ar 14 e o vibrador 26. A energia sísmica determinada é refletida dos limites da impedância acústica 32, 34 nas formações de rocha abaixo do fundo da água 30.

O arranjo de pistolas de ar 14 pode inclui um dispositivo de flutuação 16 para proporcionar flutuabilidade para o arranjo 14 para levar o arranjo 14 a se mover em uma profundidade selecionada na água 11. O dispositivo de flutuação 16 pode ser acoplado a uma estrutura 18. A estrutura 18 pode ter o formato de U conforme ilustrado na figura 1. Uma pluralidade de pistolas de ar individuais 20 pode ser suspensa da ou fixadas na parte inferior da estrutura 18. As pistolas de ar 20, conforme conhecidas na técnica, podem ter câmaras de carga de tamanhos diferentes, de maneira que a energia sísmica irradiada pelo arranjo 14, quando as pistolas de ar individuais 20 são acionadas, tenha uma variação de frequência relativamente ampla. Um arranjo de pistolas de ar sísmicas típico configurado em uma estrutura em formato de U conforme ilustrado na figura 1 está descrito na Patente Nº 7,457,193 expedida para Pramik e adquirida em comum com a presente invenção.

Cada pistola de ar 20 tem um sensor de campo próximo 22 associado à mesma. Cada sensor de campo próximo 22 pode ser um sensor responsivo gradiente de pressão ou de período de pressão como, por exemplo, um hidrofone, e pode ser afixado na estrutura 18 ou disposto em outra posição adequada, geralmente dentro de um medidor da respectiva pistola de ar 20. Os sinais gerados por cada sensor de campo próximo 22 é comunicado para o sistema de registro 12 para processamento, conforme será explicado adicionalmente abaixo. Em alguns exemplos, cada sensor de campo próximo 22 pode medir a pressão da água 11, ou pode ser disposto um sensor de pressão separado (não ilustrado) próximo a cada sensor de campo próximo 22 ou de cada pistola de ar 20 de maneira que a profundida-

de na água de cada pistola de ar 20 possa ser determinada a qualquer momento.

Pode ser afixado no dispositivo de flutuação 16 um receptor de sinal de posição geodésica 24 como, por exemplo, um receptor de satélite de sistema de posicionamento global (GPS). A posição geodésica do dispositivo de flutuação 16, e, portanto, correspondentemente, a posição geodésica de cada sensor de campo próximo 22 e de cada pistola de ar 20 pode ser determinada a qualquer momento porque suas posições relativas com respeito ao dispositivo de flutuação são conhecidas. Os sinais do receptor 34 podem ser comunicados como, por exemplo, por link de rádio para o sistema de registro 12.

A embarcação de pesquisa 10 pode também rebocar um ou mais galhardetes 27, apenas um dos quais está ilustrado na figura 1 para clareza da ilustração. O galhardete de sensor sísmico 27 é um cabo ou linha que inclui uma pluralidade de sensores sísmicos espaçados afastados longitudinalmente 28. Os sensores sísmicos 28 podem ser dispositivos responsivos ao gradiente de tempo de pressão ou de pressão como, por exemplo, hidrofones, ou dispositivos responsivos ao movimento de partícula como, por exemplo, geofones ou acelerômetros. Os sensores sísmicos 28 podem ser também substancialmente sensores de pressão colocados / gradiente de pressão e responsivos ao movimento de partícula. Um exemplo do último tipo de galhardete de sensor, com sensores de pressão colocados e responsivos ao movimento de partícula está descrito na Patente Nº U.S. 7,239,577, expedida para *Tenghamn et. al.* e de propriedade comum com a presente invenção. Os sensores sísmicos 28 podem gerar sinais elétricos e/ou óticos em resposta à energia sísmica detectada. Os sinais dos sensores 28 são comunicados para o sistema de registro 12 para um registro de tempo indexado do mesmo. Tipicamente, o índice de tempo é o tempo de acionamento do arranjo de pistolas de ar 14.

O vibrador marítimo 26 pode ser qualquer tipo conhecido na técnica, e pode ser configurado para gerar energia sísmica particularmente em uma variação de frequência em torno de 1 a 8 Hz. Um vibrador marítimo

desse tipo está descrito na Patente Nº U.S. 7,551,518, expedida para Ten-
ghamn *et. al.* e de propriedade comum com a presente invenção. Se for u-
sado o tipo de vibrador anteriormente descrito, o vibrador é preferivelmente
configurado e maneira que as frequências de ressonância sejam na variação
5 de 1 a 8 Hz. Outro dispositivo possível para irradiar energia sísmica de baixa
frequência na variação de frequência de 1 a 8 Hz é conhecido como um
transdutor super-heteródino. Um transdutor super-heteródino usa dois trans-
dutores acústicos, como, por exemplo, os transdutores piezelétricos, cada
um acionado em uma frequência ou variação diferente de frequências, de
10 maneira que no campo distante a propagação da energia acústica na água
11 e nas formações de rocha abaixo do fundo da água 30 tenha uma fre-
quência que seja diferente entre as frequências de operação dos dois trans-
dutores. Um exemplo de transdutor sísmico super-heteródino está descrito
na Publicação de Pedido de Patente Nº U.S. 2009/0086574, depositado por
15 Scott *et. al.* Outro transdutor possível de ser usado em alguns exemplo é um
transdutor de disco flexional, conforme descrito na Patente Nº U.S.
4,709,361, expedida para Dahlstrom *et. al.* Para aumentar a saída do vibra-
dor, pode ser desejável incluir mais de um vibrador, transdutor ou transdutor
super-heteródino em um alojamento comum ou módulo como, por exemplo,
20 ilustrado na figura 1.

O vibrador marítimo 36 tem um sensor de campo próximo 29 as-
sociado ao mesmo e montado em uma posição geralmente dentro de um
medidor do vibrador 26, como, por exemplo, um hidrofone. No exemplo ilus-
trado na figura 1, o vibrador marítimo 26 pode ser rebocado em uma profun-
25 didade tipicamente maior, diferente, na água 11 do que o arranjo de pistolas
de ar 14. O vibrador 26 pode ter um dispositivo de determinação de posição
25 associado ao mesmo como, por exemplo, um detector de variação acús-
tica. O dispositivo de determinação de posição 25 pode, por exemplo, detec-
tar sinais acústicos transmitidos de vários locais diferentes (por exemplo, ao
30 longo do galhardete 27, ao logo do arranjo de pistolas de ar 14 e da embar-
cação de pesquisa 10) de maneira que a qualquer momento seja determina-
da a posição geodésica do vibrador marítimo 26. Um sistema de detecção

de variação acústica para determinar a posição de vários componentes de um sistema de aquisição sísmica, que pode incluir um vibrador rebocado conforme ilustrado na figura 1 e explicado acima, está descrito na Patente Nº U.S. 7,276,045, expedida para Falkenberg *et. al.* e de propriedade comum com a presente invenção.

Tendo descrito um sistema para gerar tanto sinais sísmicos impulsivos quanto não-impulsivos em combinação, segue uma explicação de um método de acordo com a invenção com relação ao fluxograma na figura 2. Cada fonte sísmica (isto é, cada pistola de ar e vibrador marítimo) em um arranjo de uma série, N fontes sísmicas individuais dispostas na água opera no campo de pressão gerado por cada outra fonte sísmica. Todavia, cada fonte sísmica é pequena comparada com um comprimento de onda da energia sísmica gerada por cada fonte, e a onda de pressão de saída gerada por cada fonte sísmica pode ser presumida como esfericamente simétrica. Em qualquer ponto dentro do campo de pressão da combinação das fontes sísmicas, a pressão pode ser considerada como uma sobreposição das ondas de pressão esféricas que emanam de cada fonte sísmica individual. Em Ziolkowski *et. al.* (1982) foi proposto o conceito precedente e denominado conceito de "fonte nocional". A publicação precedente explica que o campo de pressão de um arranjo de fonte sísmica de N elementos pode ser completamente determinada com N medições de pressão espaçadas afastadas, independentes.

Na descrição que se segue, pode ser usado um sistema de coordenada Cartesiana em que o plano x – y é a superfície da água e o extremo z é perpendicular à superfície da água. Podem ser determinadas as coordenadas do centro geométrico do vibrador marítimo e do centro do orifício de descarga de cada pistola de ar (usando os dispositivos explicados com referência à figura 1) e podem ser expressas como se segue:

$$(xv_i, yv_i, zv_i), i = 1, 2, \dots, N.$$

Cada N dos elementos de fonte sísmica, conforme descrito em Ziolkowski *et al.* (1982), tem uma fonte virtual na superfície da água, cuja superfície é presumida como plana (mas não necessariamente lisa). As co-

ordenadas de cada fonte virtual podem ser expressas como se segue:

$$(xv_i, yv_i, -zv_i), i = 1, 2, \dots, N.$$

As coordenadas do centro geométrico de cada N dos sensores de campo próximo podem ser determinadas com o uso do equipamento explicado com referência à figura 2 e podem ser expressas como se segue:

$$(xh_j, yh_j, zh_j), j = 1, 2, \dots, N.$$

- 5 A distância do elemento de fonte i th para o sensor de campo próximo j th pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$r_{ij} = \left[(xv_i - xh_j)^2 + (yv_i - yh_j)^2 + (zv_i - zh_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

e a distância do elemento de fonte virtual i th (na superfície da água) para o sensor de campo próximo j th pode ser determinada pela expressão:

$$rg_{ij} = \left[(xv_i - xh_j)^2 + (yv_i - yh_j)^2 + (zv_i + zh_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

- 10 A pressão no sensor de campo próximo j th pode ser representada como a sobreposição dos campos de pressão de fonte nocional mais os reflexos da superfície da água que tem um coeficiente de reflexo representado por R:

$$p_j(t) - p_H = \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_{ij}} s_i(t - \frac{r_{ij}}{c}) + R \sum_{i=1}^N \frac{1}{rg_{ij}} s_i(t - \frac{rg_{ij}}{c}), \quad (4)$$

- em que $s_i(t)$ representa as assinaturas de fonte nocional. Se
 15 houver N sensores de campo próximo independentes, então há N equações independentes na forma da equação (4) que podem ser resolvidas para N assinaturas de fonte nocional desconhecidas. O antecedente está descrito em Parkes *et. al.* (1984). Se houver mais de N hidrofones independentes, os hidrofones adicionais podem ser usados para verificar a qualidade da inver-
 20 são e avaliar qualquer erro (vide, por exemplo, Ziolkowski e Johnson, 1997). Se qualquer fonte for detonada após um retardo de tempo selecionado, sua assinatura de fonte nocional será zero antes do término do tempo de retardo. O retardo precedente pode ser usado como uma restrição na solução das equações. Tal solução tendo a restrição precedente foi realizada. Vide, por
 25 exemplo, Ziolkowski, (1987).

Os sensores de campo próximo (20, 29 na figura 1) são preferivelmente calibrados. Se os sensores de campo próximo (20, 29 na figura 1) não forem calibrados, suas percepções relativas deveriam ser pelo menos determinadas, com erros de saída que dependem da geometria determinada pelas experiências separadas, conforme ilustrado por Parkes *et. al.* (1984), e Ziolkowski e Johnson, (1997). Em um arranjo de pistolas de ar, as bolhas emitidas do mesmo se movem com relação aos sensores de campo próximo (20, na figura 1) porque o sistema de aquisição é rebocado na água, e tal movimento precisa ser incluído nos cálculos. Ver, por exemplo, Parkes *et. al.* (1984) e Ziolkowski e Johnson, (1997). A energia emitida pelo vibrador (26 na figura 1), contudo, não se move com relação aos sensores de campo próximo 20, 29.

A forma de onda do sensor de campo próximo (ou "assinatura") pode ser computada pela suposição das formas de onda da fonte nocional e seus reflexos da superfície da água pela escolha de um ponto distal P do arranjo de pistolas de ar e do vibrador tendo coordenadas conhecidas (x_p, y_p, z_p). Então a distância da fonte i th para P pode ser expressa como:

$$r_{iP} = \left[(x_{v_i} - x_p)^2 + (y_{v_i} - y_p)^2 + (z_{v_i} - z_p)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

E a distância da fonte virtual i th para P pode ser expressa como:

$$r_{g_{iP}} = \left[(x_{v_i} - x_p)^2 + (y_{v_i} - y_p)^2 + (z_{v_i} + z_p)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

A pressão da forma de onda em P pode ser determinada pela expressão:

$$s(t) = p_p(t) - p_H = \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_{iP}} s_i(t - \frac{r_{iP}}{c}) + R \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_{g_{iP}}} s_i(t - \frac{r_{g_{iP}}}{c}). \quad (7)$$

Na equação (7) há uma mistura das formas de onda da fonte nocional: formas de onda de longa duração do vibrador acima descrito, transdutores super-heteródinos ou outros tipos de transdutores não impulsivos; e formas de onda de curta duração das fontes impulsivas como, por exemplo, as pistolas de ar descritas acima. É possível que a forma de onda de campo distante varie entre os acionamentos sucessivos da fonte impulsiva.

va e da fonte não-impulsiva devido às variações na profundidade do arranjo de pistolas de ar e sua inclinação na água, e as variações correspondentes na geometria do vibrador. É desejável, portanto, fornecer dispositivos de medição adequados no arranjo de pistolas de ar e no vibrador para determinar sua geometria com relação à superfície da água de maneira que sejam inseridas coordenadas corretas nas equações acima para cada acionamento das fontes.

Na equação (4), que se refere a um sensor de campo próximo único, a amplitude da contribuição de um elemento de fonte específico é inversamente proporcional à distância do centro da fonte para o sensor de campo próximo. Essa distância é na ordem de metros, e pode ser tão pequena quanto 1 metro. Para solucionar as equações simultâneas N , é necessário que sejam conhecidas as distâncias entre cada elemento de fonte e cada sensor de campo próximo. A qualidade da solução depende até certo ponto da precisão das medições antecedentes. A avaliação da forma de onda da energia sísmica do campo distante dentro de uma precisão de 1% requer que a geometria seja conhecida com precisão com precisão de um centímetro, e as calibrações do sensor de campo próximo deveriam ser no máximo 0,1%.

Em um exemplo de aquisição de sinais sísmicos usando as fontes precedentes, para cada "registro e disparo" (isto é, um registro de tempo indexado da resposta de cada sensor sísmico (28 na figura 1) para um acionamento tanto do arranjo de pistolas de ar quanto do vibrador marítimo) o arranjo de pistolas de ar (14 na figura 1) pode ser acionado de acordo com as técnicas conhecidas na técnica. Após um tempo de retardo selecionado em alguns exemplos, o vibrador marítimo (26 na figura 1) pode então ser acionado. Tal acionamento está ilustrado em 40 na figura 2. No presente exemplo, o tempo de retardo pode ser selecionado de maneira que a energia sísmica do arranjo de pistolas de ar (14 na figura 1) se propagando para baixo parou substancialmente. Em 42, a forma de onda do campo próximo de cada fonte de energia sísmica pode ser determinada usando as medições do sensor de campo próximo conforme explicado acima.

As formas de onda de pressão do arranjo de pistolas de ar podem ter uma duração na ordem de 200 milissegundos. Admitindo que a forma de onda de campo afastado das fontes impulsivas combinadas seja representada por $s_1(t)$, onde t representa tempo. A forma de onda de fonte não-impulsiva (vibrador), contudo, pode ter uma duração de vários segundos. Admitindo que a assinatura de campo distante das assinaturas de fonte não-impulsiva combinadas seja representada por $s_2(t)$. Se houver retardo de tempo suficiente entre o início da assinatura de fonte impulsiva e o início da assinatura de fonte não-impulsiva usando um retardo de tempo adequado conforme explicado acima, então $s_2(t) = 0$ para os tempos t menor do que o tempo de retardo.

A forma de onda de campo distante das saídas combinadas de todas as fontes (arranjo de pistolas de ar e vibrador) pode então ser representada pela expressão:

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) \quad (8)$$

que pode ser determinada, ilustrada em 44 na figura 2, das medições do sensor de campo próximo, conforme descrito acima

A resposta da medição em cada sensor sísmico (28 na figura 1) pode ser representada pela expressão:

$$x(t) = s(t) * g(t) + n(t) \quad (9)$$

na qual $g(t)$ é a resposta de impulso sísmico das formações de rocha de subsuperfície, o asterisco $*$ indica convolução, e $n(t)$ representa ruído. Uma maneira para se obter uma avaliação de $g(t)$ é determinar um filtro $f(t)$ que englobe $s(t)$ para uma ondulação de curta duração, representada por $d(t)$:

$$d(t) = f(t) * s(t) \quad (10)$$

Isto é, o filtro $f(t)$ convoluído com a forma de onda de campo distante de fonte combinada $s(t)$ se iguala a $d(t)$. A aplicação do filtro antecedente $f(t)$ para as medições de sensor sísmico $x(t)$ produz o seguinte:

$$\begin{aligned} f(t) * x(t) &= f(t) * s(t) * g(t) + f(t) * n(t) \\ &= d(t) * g(t) + f(t) * n(t) \end{aligned} \quad (11)$$

O resultado é substituir a forma de onda de fonte distante impulsiva e não-impulsiva cominadas de longa duração $s(t)$ por uma forma de onda de curta duração $d(t)$. A determinação de um filtro conforme descrito acima pode ser realizada, por exemplo, como explicado em Ziolkowski (1987).

5 A figura 13 para a publicação antecedente ilustra, especificamente, que uma forma de onda de fonte de longa duração pode ser comprimida para uma forma de onda de curta duração. A forma de onda de curta duração pode então ser deconvolvida, ilustrado em 46 na figura 2, com os sinais sísmicos medidos $x(t)$ para obter uma avaliação da resposta de impulso das forma-
10 ções de rocha na subsuperfície, conforme ilustrado na figura 1 abaixo do fundo da água 30.

A presente invenção pode fornecer melhores imagens das formações de rocha de subsuperfície pelo aumento da quantidade da energia de baixa frequência, (por exemplo, na variação de frequência de 1 a 8 Hz)
15 sem que seja necessário proporcionar fontes impulsivas de baixa frequência. A presente invenção pode, portanto, ser mais prática do que o aumento da largura de banda das fontes de energia sísmica impulsivas convencionais pelo aumento o tamanho da pistola de ar mais larga em um arranjo de pisto-
las de ar, ou pelo aumento da pressão da carga de gás ou ar para um valor
20 que pode diminuir substancialmente a confiabilidade da pistola de ar.

As referências citadas na descrição precedente da invenção incluem o que se segue:

Ziolkowski, A.M., Hatton, L., Parkes, G.E., e Haugland, T.-A, 1984, Método de Determinação das Assinaturas dos Arranjos das Fontes
25 Sísmicas Marítimas: Patente U.S. № 4,476,553.

Ziolkowski, A.M., Parkes, G.E., Hatton, L., & Haugland, T., 1982. Assinatura de um arranjo de pistolas de ar: Computação das Medições de Campo Próximo Incluindo Interações, Geofísica, Vol. 47, № 10, 1413-1421.

Parkes, G.E., Ziolkowski, A.M., Hatton, L., & Haugland, T., 1984.
30 Assinatura de um arranjo de pistolas de ar: Computação das Medições de Campo Próximo Incluindo Interações – Considerações Práticas, Vol. 49, № 2, 105-111.

Ziolkowski, A.M., 1987, Determinação da Assinatura de Campo Distante de uma Interação de Arranjo de Fontes Sísmicas Marítimas - resultados das Experiências de Pistola de Ar Delft, "First Break", Volume 5, Nº 1, 15 a 29.

- 5 Ziolkowski, A.M. e Johnston, R.G.K., 1997, Fontes Sísmicas Marítimas: QC da Computação do Campo de Onda das Medições de Pressão de Campo Próximo: Prospecções Geofísicas, 45, 611 a 639.

10 Ao mesmo tempo em que a invenção foi descrita com relação a um número limitado de modalidades, aqueles versados na técnica, com o benefício desta descrição, irão observar que podem ser concebidas outras modalidades que não se afastem do escopo da invenção conforme aqui descrita. Portanto, o escopo da invenção deveria ser limitado apenas pelas reivindicações em anexo.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para exploração sísmica de formações de rocha de subsuperfície caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de:

5 acionar (40) uma fonte de energia sísmica impulsiva próxima às formações de rocha;

após um retardo de tempo selecionado, acionar uma fonte de energia sísmica não-impulsiva;

detectar (42) uma forma de onda de campo próximo das fonte de energia sísmica impulsiva e não-impulsiva;

10 determinar (44) uma forma de onda de campo distante da saída combinada das fontes de energia sísmica impulsiva e não-impulsiva usando as formas de onda de campo próximo detectadas;

detectar sinais sísmicos em resposta a saída combinada da fonte de fonte de energia sísmica impulsiva e da fonte de energia sísmica não-impulsiva; e

15

determinar (46) uma resposta de impulso das formações de rocha de subsuperfície pela deconvolução dos sinais sísmicos detectados com a forma de onda de campo distante das fontes impulsiva e não-impulsiva combinadas.

20 2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a fonte de energia sísmica impulsiva compreende um arranjo de pistolas de ar (14).

3. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a fonte de energia sísmica não-impulsiva compreende um vibrador marítimo (26).

25

4. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a fonte de energia sísmica não-impulsiva compreende um transdutor super-heteródino.

5. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o retardo de tempo é selecionado de modo que a energia que se propaga para baixo a partir da fonte de energia sísmica impulsiva seja substancialmente parada.

30

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a forma de onda do campo distante é determinada pela determinação de uma fonte nocional correspondente a cada fonte de energia sísmica impulsiva e não-impulsiva.

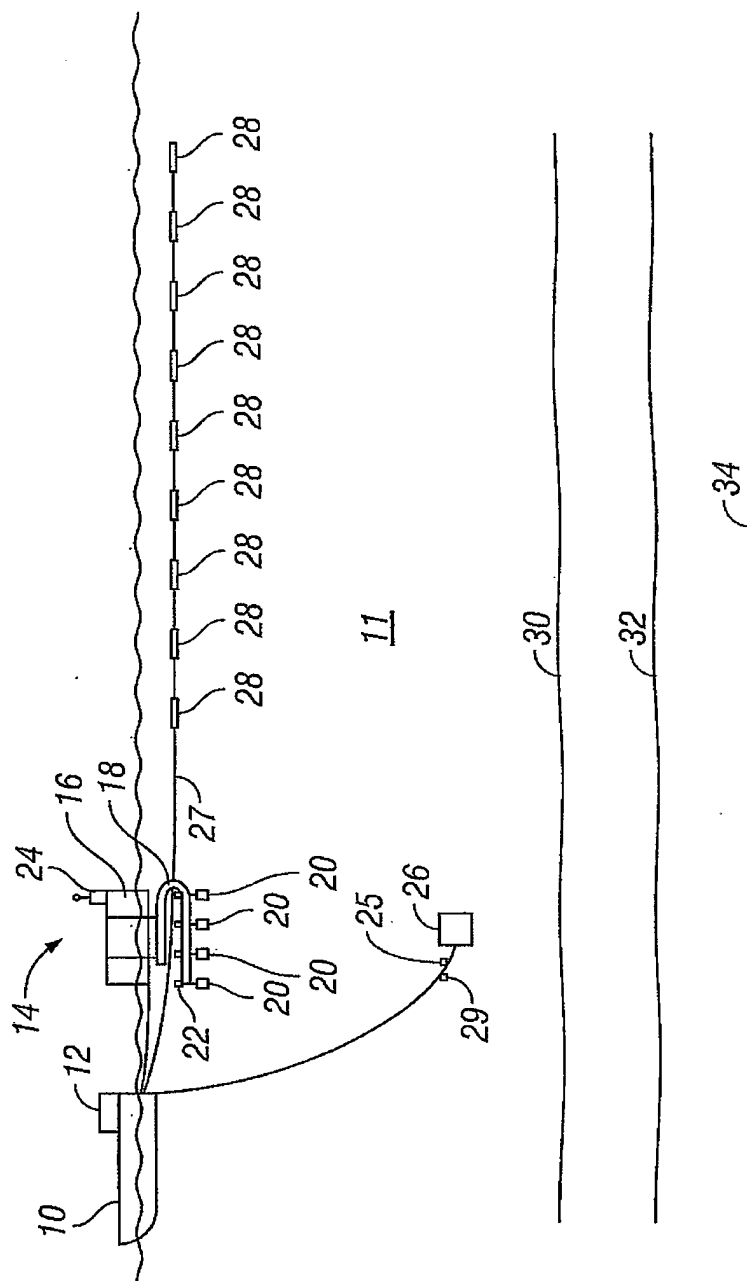
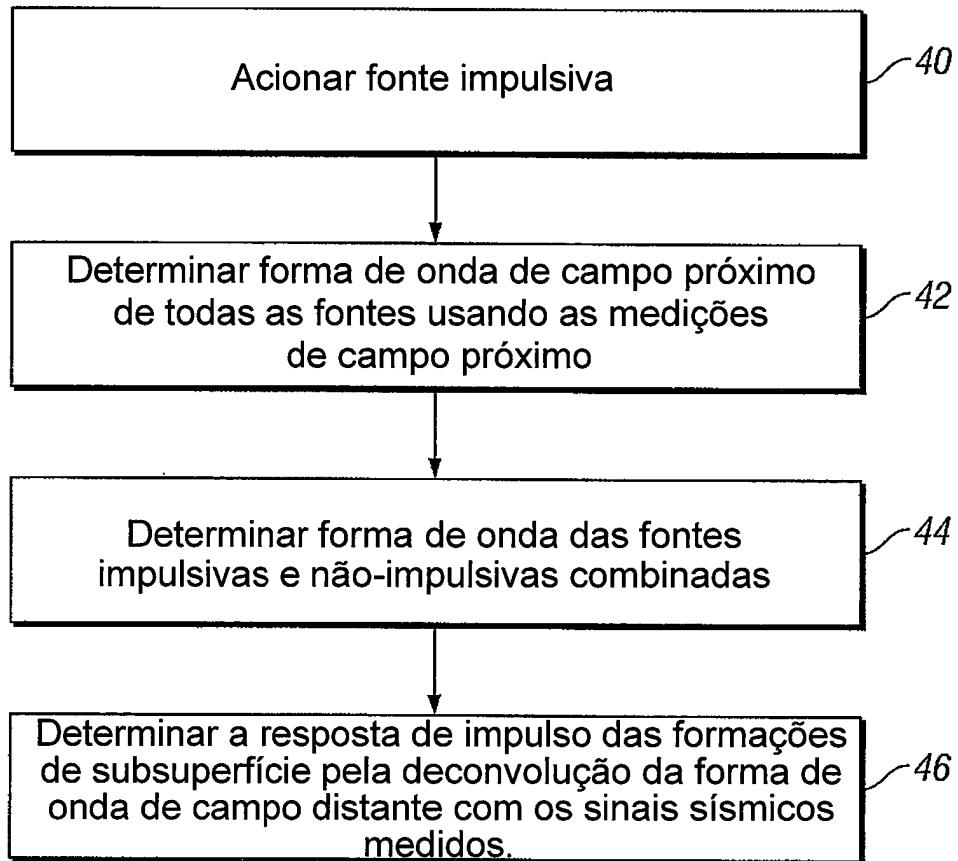


FIG. 1

**FIG. 2**