



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

(11) PI 1103904-3 B1



* B R P I 1 1 0 3 9 0 4 B 1 *

(22) Data do Depósito: 01/08/2011

(45) Data de Concessão: 18/02/2020

(54) Título: FERRAMENTA DE PERFILAGEM ACÚSTICA PARA DETERMINAR UM PARÂMETRO QUANTIFICANDO ANISOTROPIA DE UMA FORMAÇÃO PENETRADA POR UM POÇO, E MÉTODO PARA DETERMINAR UM PARÂMETRO QUANTIFICANDO ANISOTROPIA DE UMA FORMAÇÃO PENETRADA POR UM POÇO

(51) Int.Cl.: G01V 3/17.

(30) Prioridade Unionista: 02/08/2010 US 12/848,430.

(73) Titular(es): PRECISION ENERGY SERVICES, INC..

(72) Inventor(es): MEDHAT W. MICKAEL.

(57) Resumo: MÉTODO E APARELHO PARA MEDIR A ANISOTROPIA DA FORMAÇÃO DURANTE A PERFURAÇÃO. Um sistema de perfilagem para medir as propriedades anisotrópicas dos materiais penetrados por um furo de broca. Um fundo de poço ou elemento da "ferramenta de perfilagem" do sistema compreende uma seção fonte que compreende uma fonte acústica unipolo edipolo. A seção receptora compreende uma pluralidade de estações receptoras dispostas em espaçamentos axiais diferentes a partir da fonte acústica. Cada estação receptora compreende um ou mais receptores acústicos. O sistema exige que a fonte e a seção receptoras girem de forma sincronizada conforme a ferramenta de perfilagem é transportada ao longo do furo de broca. As respostas receptoras são medidas em uma pluralidade de segmentos de ângulo azimutal e processadas como uma função do ângulo de rotação da ferramenta. O sistema de perfilagem pode ser configurado como um sistema LWD, um sistema MWD, e um sistema com fio que opera de forma sincronizada a fonte e a seção receptoras. Todas as configurações requerem que a fonte acústica opere a uma frequência relativamente alta.

**Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "FER-
RAMENTA DE PERFILAGEM ACÚSTICA PARA DETERMINAR UM
PARÂMETRO QUANTIFICANDO ANISOTROPIA DE UMA FORMA-
ÇÃO PENETRADA POR UM POÇO, E MÉTODO PARA DETERMI-
NAR UM PARÂMETRO QUANTIFICANDO ANISOTROPIA DE UMA
FORMAÇÃO PENETRADA POR UM POÇO".**

Campo da invenção

[0001] Esta invenção refere-se a sistemas para medir uma ou mais propriedades acústicas de material penetrado por um poço. Mais particularmente, a invenção refere-se às medições das propriedades anisotrópicas do material utilizando as fontes acústicas unipolo e dipolo. As medições anisotrópicas são utilizadas em uma variedade de aplicações geofísicas.

ANTECEDENTES

[0002] Os sistemas de perfilagem acústica são rotineiramente utilizados na indústria de gás e óleo para medir as propriedades acústicas de formação da formação de terra penetrada por um poço. Estas propriedades incluem as velocidades de corte da formação e compressivas, que são subsequentemente utilizadas para determinar uma variedade de parâmetros de formação de interesse incluindo, entre outros; porosidade, litologia, densidade e pressão do poro. Adicionalmente, os sistemas de perfilagem acústica são utilizados para produzir imagens acústicas do poço do qual as condições do poço e outras características geológicas podem ser investigadas. Outras aplicações de medições de perfilagem acústica incluem correlação sísmica e determinação mecânica das pedras.

[0003] As medições acústicas mencionadas acima tipicamente precisam ser corrigidas para quaisquer efeitos anisotrópicos da formação antes dos parâmetros de interesse poderem ser determinados a partir dos parâmetros medidos. Além disso, parâmetros de anisotropia

são parâmetros de interesse, e são utilizados em uma variedade de aplicações geofísicas incluindo medições sísmicas de poço cruzado, interpretações sísmicas de convenção e semelhantes. Os próprios manifestos da anisotropia elástica como a dependência direcional da velocidade do som na formação da terra. A anisotropia na formação da terra pode ser devido à microestrutura intrínseca, como o caso em folhelhos, ou pode ser devido à mesoestrutura e, como as fraturas, ou pode ser devido à macroestrutura como a disposição em camadas devido à sedimentação. Não importa a causa para a anisotropia poder ser, boas estimativas de propriedades elásticas do meio anisotrópico são necessárias na resolução de imagens sísmicas precisamente, na interpretação dos registros do poço e na estimativa dos parâmetros mecânicos de perfuração.

[0004] A maioria das formações tem estrutura anisotrópica resultante da disposição em camadas, microfraturas, ou orientação dos depósitos minerais em certa direção. Esta tensão interna faz com que a velocidade de corte varie com a direção de propagação. A isotropia transversal (TI) é geralmente utilizada para modelar a anisotropia da formação. Um exemplo de anisotropia TI é a isotropia transversal vertical (HTI) onde o eixo da simetria anisotrópica é horizontal. Outro exemplo de anisotropia TI é a isotropia transversal vertical, onde o eixo da simetria anisotrópica é vertical. Exemplos específicos destas formações de anisotropia TI são fraturas verticais ao longo do eixo do poço e dos planos de inclinação horizontal em um poço vertical.

[0005] A anisotropia da formação pode ser determinada com sistemas de perfilagem acústica-durante-perfuração (LWD) ou medição-durante-perfuração (MWD). A anisotropia da formação também pode ser determinada com sistemas com cabo acústicos após a operação de perfuração do poço estiver completa. Sistemas de perfilagem acústica MWD, LWD, e com cabo compreendendo fontes acústicas mono-

polo e dipolo foram utilizadas na técnica anterior conforme mostrado, por exemplo, nas Patentes U.S. Nos. 7.623.412 B2, 5.808.963, 6.714.480 B2, 7.310.285 B2, 7.646.674 B2, que são aqui incorporadas por referência. Há fatores operacionais e ambientais que limitam as frequências da fonte prática, especialmente em sistemas MWD e LWD. Este tópico será discutido detalhadamente nas seções subsequentes desta divulgação.

Sumário da invenção

[0006] Esta invenção tem como base a modelagem da formação anisotrópica e a modelagem de resposta da ferramenta do sistema de perfilagem acústica nas formações anisotrópicas. A invenção pode ser configurada como um sistema de perfilagem MWD, LWD ou com cabo. A seguir, todos os sistemas que medem os parâmetros de interesse durante a perfuração serão referidos como sistemas "LWD", embora devesse ser entendida a invenção também pode ser configurada como um sistema MWD. Os sistemas de perfilagem LWD e com cabo compreendendo uma fonte acústica unipolo e alternadamente dipolo são desenvolvidos a partir da modelagem. O instrumento do poço ou a "ferramenta de perfilagem" compreende uma seção de fonte e uma seção receptora. A seção de fonte compreende uma fonte de energia acústica operada a uma frequência de aproximadamente 4 kilohertz (kHz) ou maior para a ferramenta LWD ou MWD e 1 kHz ou maior para a ferramenta com cabo. A seção receptora compreende uma pluralidade de estações receptoras axialmente espaçadas em distâncias diferentes da fonte acústica. Uma seção isoladora isola a fonte e as seções receptoras da transmissão acústica direta. A ferramenta de perfilagem compreende uma seção do instrumento compreendendo energia, processador, memória e elementos de controle, uma seção de telemetria do fundo de poço, e uma seção direcional que produz orientação absoluta da ferramenta de perfilagem. Além da ferramenta de per-

filagem, o sistema de perfilagem compreende um meio transportador, guincho de perfuração, equipamento da superfície compreendendo um elemento de telemetria da superfície, e um registrador do equipamento. Todos os elementos do sistema serão descritos detalhadamente nas seções subsequentes desta divulgação. As seções de fonte e receptoras da ferramenta de perfilagem giram de forma azimutal conforme a ferramenta de perfilagem é transportada ao longo do poço.

[0007] As respostas do sistema de perfilagem acústica são apresentadas para três configurações básicas do sistema em uma variedade de formações anisotrópicas. A primeira modelagem de resposta para uma ferramenta com cabo compreendendo uma fonte acústica monopolo operando a uma frequência de 10 kHz, e adicionalmente compreendendo seis estações receptoras em seis espaçamentos axiais diferentes a partir da fonte, onde cada estação que compreende um receptor acústico monopolo. A segunda modelagem de resposta é para uma ferramenta com cabo compreendendo uma fonte acústica dipolo operando a 2 kHz, e adicionalmente compreendendo oito estações receptoras em oito espaçamentos axiais diferentes a partir da fonte e com cada estação compreendendo dois receptores acústicos direcionais a 180 graus de um para outro. A terceira modelagem de resposta é para uma ferramenta LWD que compreende uma única fonte acústica unipolo lateral operando a 6 e 12 kHz, e adicionalmente compreendendo seis estações receptoras em seis espaçamentos axiais diferentes a partir da fonte com cada estação compreendendo um receptor acústico direcional alinhado com a fonte. Observa-se que a modelagem adicional foi feita para uma ferramenta LWD compreendendo uma fonte dipolo com uma matriz receptora que é configurada da mesma forma que as do terceiro modelo de resposta definido acima. A resposta resulta da ferramenta LWD dipolo operando na mesma frequência que o terceiro modelo de resposta (unipolo), sendo essen-

cialmente a mesma que o terceiro modelo de resposta compreendendo a fonte unipolo. Desta forma, os detalhes dos resultados do modelo dipolo de "alta frequência" da LWD, sendo omitidos desta divulgação para redução, mas são incluídos na análise dos resultados de resposta do sistema.

[0008] Em cada uma das configurações acima, os resultados da resposta do modelo foram obtidas para a fonte acústica e as seções receptoras girando de forma sincronizada sobre o eixo principal do poço em uma formação anisotrópica HTI. Foi suposto que a anisotropia da formação é simétrica de forma azimutal ao redor da parede do poço. Os dados da forma de onda foram gerados nos segmentos do ângulo azimutal contínuo $\Delta\theta_i = 15$ graus na faixa de 0 a 90 graus (ou seja, $i = 1, 2, \dots, 6$). A análise de coerência mais lenta de tempo (STC) foi utilizada para determinar a velocidade de corte em cada segmento do ângulo azimutal $\Delta\theta_i$. Outros métodos, como a probabilidade máxima ou análise de coerência da frequência mais lenta, podem ser utilizados para determinar as velocidades de formação.

[0009] Os procedimentos da operação para o sistema de perfilação acústica, se LWD ou com cabo, são resumidos a seguir. A ferramenta de perfilação, com a seção de fonte e a seção receptora girando de maneira sincronizada, é transportada ao longo do poço. A fonte acústica dentro da seção é dispensada periodicamente conforme a seção de fonte gira. O campo de fonte acústica gerado pelo pulso acústico é recebido pela pluralidade de detectores na seção receptora. Estas formas de onda são condicionadas e digitalizadas utilizando um conversor de analógico para digital tipicamente disposto dentro da seção do instrumento da ferramenta de perfilação. Os dados da forma de onda medida são posicionados em segmentos do ângulo azimutal $\Delta\theta_i$ para cada revolução de 360 graus da seção de fonte e receptora. A velocidade de corte é calculada para cada segmento do ângulo azimu-

tal $\Delta\theta$. Os segmentos de um ângulo cruzado $\Delta\theta_C$, se presente, são determinados de $\Delta\theta$ junto com um ângulo cruzado correspondente θ_C . As etapas acima são repetidas para cada revolução da seção de fonte - seção receptora dentro do poço. Para cada revolução, o ângulo cruzado θ_C é relacionado a um ângulo de referência absoluta θ_{ABS} utilizando a saída da seção direcional da ferramenta de perfilagem. O ângulo de referência absoluta pode ser norte magnético, a lateral alta de um poço desviado, e semelhantes. Os parâmetros da formação anisotrópica e outros parâmetros de interesse (POI) são obtidos dos dados medidos e calculados. A profundidade da ferramenta no poço e as etapas acima são repetidas. Os parâmetros de interesse são registrados como uma função de profundidade da ferramenta de perfilagem dentro do poço, gerando assim, um "registro" dos parâmetros de interesse.

Breve descrição dos desenhos

[00010] A maneira na qual as características e vantagens citadas, brevemente resumidas acima, são obtidas podem ser entendidas detalhadamente por referência nas modalidades ilustradas nos desenhos anexos.

[00011] A figura 1 é um desenho modelado da velocidade de corte da onda como uma função do ângulo azimutal em uma formação anisotrópica;

A figura 2A é uma ilustração conceitual da vista lateral de um sistema de perfilagem acústica em um ambiente do poço;

A figura 2B é uma vista transversal conceptual de uma ferramenta de perfilagem acústica disposta dentro de um poço e levado pela seção de fonte;

A figura 3 mostra, para um dado segmento do ângulo azimutal, um mapa de coerência de tempo mais lento conceitual (STC) de uma ferramenta com cabo compreendendo uma fonte monopolo (10 kHz) em uma formação de argila Bakken;

A figura 4 é uma projeção da imagem do mapa STC para o segmento angular da figura 3;

A figura 5 mostra, para um dado segmento angular azimutal, um mapa STC conceitual da ferramenta com cabo compreendendo uma fonte monopolo (10 kHz) para uma formação Phenolite;

A figura 6 é uma projeção da imagem do mapa STC da figura 5;

A figura 7 ilustra a resposta de uma ferramenta com cabo giratória com uma fonte dipolo de baixa frequência (2 kHz) na formação anisotrópica Phenolite;

A figura 8 ilustra a resposta da ferramenta com cabo giratória com uma fonte dipolo de 2 kHz na formação anisotrópica de argila Bakken;

A figura 9 ilustra a resposta da ferramenta com cabo giratória com uma fonte dipolo de 2 kHz em uma formação anisotrópica de giz;

A figura 10 ilustra a resposta de uma ferramenta LWD giratória com uma fonte unipolo de 6 kHz em uma na formação anisotrópica de argila Bakken;

A figura 11 ilustra a resposta de uma ferramenta LWD giratória com uma fonte unipolo de 12 kHz em uma formação anisotrópica de pedra calcária;

A figura 12 ilustra a resposta de uma ferramenta LWD giratória com uma fonte unipolo de 6 kHz na formação anisotrópica de giz;

A figura 13 é uma vista transversal conceitual de uma ferramenta de perfilagem giratória compreendendo uma fonte acústica unipolo ou dipolo operando na mesma frequência alta relativamente; e

A figura 14 resume as etapas do processo de medição e dados na forma de um fluxograma conceitual.

Descrição detalhada das modalidades preferidas

[00012] Esta invenção é um sistema para medir as propriedades acústicas da formação da terra anisotrópica penetrada por um poço. O sistema pode ser configurado como um sistema LWD no qual a seção de fonte e receptora estão tipicamente dispostas dentro de um comando que normalmente gira ambas as seções de forma sincronizada dentro do poço. É mencionado novamente que o aparelho LWD divulgado e os métodos são igualmente aplicáveis aos sistemas MWD. Os conceitos da invenção também podem ser configurados como um sistema de perfilagem com cabo se a seção de fonte e receptora são giradas de forma sincronizada conforme a ferramenta com cabo é transportada dentro de um poço. Os sistemas de perfilagem são designados para operar, e adicionalmente medir as propriedades anisotrópicas do material utilizando uma fonte acústica unipolo ou dipolo. As medições anisotrópicas são utilizadas em uma variedade de aplicações geofísicas incluindo a correção de outras medições de propriedade acústica utilizadas na avaliação da formação e aplicações sísmicas.

[00013] As respostas dos sistemas unipolo e dipolo LWD e com cabo são ilustradas pela formação e modelagem de resposta da ferramenta.

Modelação das formações anisotrópicas

[00014] Conforme mencionado previamente, a maioria das formações de terra e "pedras" tem uma estrutura isotrópica resultante da disposição em camadas, microfraturas, ou orientação de sedimentos minerais em certa direção. Esta tensão interna faz com que a velocidade de corte varie com a direção de propagação. A isotropia transversal (TI) é geralmente utilizada para modelar a anisotropia da formação. A anisotropia TI tem um eixo de simetria de forma que as propriedades do material e velocidades não variam junto com qualquer direção transversal ao eixo. Exemplos de anisotropia TI são isotropia transversal horizontal (HTI) onde o eixo da simetria é horizontal. Um

exemplo de uma formação HTI é anisotropia (causada por fraturas, por exemplo) em um plano coincidente com o eixo do poço em um poço vertical. Outro exemplo de anisotropia TI é a isotropia transversal vertical (VTI), onde o eixo de simetria é vertical. Um exemplo de uma formação VTI é anisotropia ao longo do eixo do poço em um poço vertical, que é geralmente causado pelos planos de inclinação.

[00015] A formalidade a seguir é utilizada para calcular as respostas da ferramenta acústica idealizadas ou "teóricas" nas formações anisotrópicas. A anisotropia da formação é definida por uma matriz de constantes elásticas, C , referentes à tensão nos vetores de força. A matriz das constantes elásticas tem nove coeficientes independentes conforme mostrado na equação a seguir:

$$(1) \quad C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{pmatrix}$$

[00016] Em uma formação isotrópica;

$$(2) \quad C_{11} = C_{22} = C_{33} = \lambda + 2\mu$$

$$(3) \quad C_{12} = C_{13} = C_{23} = \lambda$$

$$(4) \quad C_{44} = C_{55} = C_{66} = \mu$$

onde λ e μ são volume Lamé e constantes de corte da média. Em uma média isotrópica, as velocidades de corte e compressivas não variam com a direção da propagação e propagam em uma direção normal para a tangente da frente da onda.

[00017] Em uma formação anisotrópica, a velocidade varia com a direção de propagação. Em uma formação isotrópica transversal, que é uma representação comum de uma média anisotrópica, a velocidade quase compressiva, qV_P , é dada por

$$(5) \quad qV_P^2(\theta) = \frac{1}{2\rho} (C_{33} + C_{44} + (C_{11} - C_{33}) \sin^2(\theta) + D) .$$

A quase velocidade de corte, qV_{SV} , é dada por

$$(6) \quad qV_{SV}^2(\theta) = \frac{1}{2\rho} (C_{33} + C_{44} + (C_{11} - C_{33}) \sin^2(\theta) - D),$$

e a velocidade de corte, qV_{SH} , é dada por

$$(7) \quad qV_{SH}^2(\theta) = \frac{1}{\rho} (C_{66} \sin^2(\theta) + C_{44} \cos^2(\theta)),$$

onde

$$(8) \quad D = \sqrt{(C_{33} - C_{44})^2 + 2(C_{13} + C_{44})^2 - (C_{33} - C_{44})(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})} \sin^2(\theta) + \sqrt{(C_{11} + C_{33} - 2C_{44})^2 - 4(C_{13} + C_{44})^2} \sin^4(\theta)$$

ρ = a densidade da formação, e

θ = o ângulo da fase entre a frente da onda normal e o eixo de simetria.

[00018] A figura 1 é um desenho de θ (abscissa) versus qV_{SH} (ordenada) e mostra um exemplo do perfil esperado da velocidade de corte (qV_{SH}) em uma formação anisotrópica. A curva 12 indica a velocidade da pedra isotrópica e da curva isotrópica 14 é a velocidade em uma formação anisotrópica utilizando um modelo de rachadura preenchida por água com uma densidade espacial de 0,05 e índice de aspecto de 0,05.

[00019] A tabela 1 mostra os parâmetros utilizados para simular as formações anisotrópicas com diferentes velocidades utilizando equações (1) por (8). É observado que para a formação de giz, a velocidade de corte é mais lenta do que a velocidade da lama onde nenhum corte refratado é detectado. A argila Bakken é rápida e o corte refratado deveria ser detectado em qualquer velocidade da lama. A velocidade de corte de Phenolite é comparável à velocidade da água e o corte refratado é detectado apenas se a velocidade da lama for maior do que aproximadamente 64 $\mu\text{s/m}$ (210 $\mu\text{s/pés}$). A tabela mostra as velocidades de corte teóricas nestas informações.

Tabela 1

Propriedades de formação utilizadas para anisotropia HTI de modela-

gem

Modelo	Densidade (g/cm ³)	C ₁₁ (GPa)	C ₁₂ =C ₁₃ (GPa)	C ₂₂ =C ₃₃ (GPa)	C ₂₃ (GPa)	C ₄₄ (GPa)	C ₅₅ =C ₆₆ (GPa)
Phenolite	1,32	10,58	5,71	13,61	6,68	3,42	2,97
Argila Bakken	2,23	26,9	8,5	42,9	12,35	15,3	10,5
Giz	2,19	14	12	22	15,8	3,1	2,4

Tabela 2

Velocidades de corte rápida e devagar de formação para a anisotropia HTI modelada

Modelo	Corte lento μs/m (μs/ft)	Corte rápido μs/m (μs/ft)
Phenolite	67,13 (202,27)	57,72 (189,36)
Argila Bakken	42,06 (138,01)	35,46 (116,36)
Giz	88,11 (289,09)	78,17 (256,46)

Modelagem da resposta da ferramenta acústica nas formações anisotrópicas

[00020] As respostas de vários sistemas de perfilagem acústica foram modeladas na formação anisotrópica, em um ambiente do poço, utilizando um modelo de diferença finita. Estes resultados do modelo são utilizados para determinar os parâmetros ótimos para determinar as propriedades anisotrópicas de interesse, e para ilustrar as vantagens dos sistemas giratórios LWD e com cabo utilizando uma fonte acústica unipolo ou dipolo operando em frequências relativamente altas.

[00021] Uma ilustração da vista lateral conceitual de um sistema de perfilagem acústica em um ambiente do poço é mostrada na figura 2A. Um instrumento ou "ferramenta" acústica do poço 20 que compreende uma seção de fonte 23, operando a uma frequência de aproximadamente 4 kHz ou maior, e uma seção receptora 22 é mostrada suspensa em um poço 18 que penetra o material de formação de terra 21. A seção receptora 22 compreende uma pluralidade de estações recepto-

ras axialmente espaçadas $R_1, R_2, \dots R_m$ mostradas em 24. Uma seção isolada 26 é utilizada para reduzir a transmissão direta e energia acústica a partir da seção de fonte 23 para a seção receptora 22. A ferramenta 20 é presa em uma extremidade inferior do meio transportador 32 por um conector 31 adequado. A extremidade superior do meio transportador 32 termina em guincho de perfuração 34, que é eletricamente conectado ao equipamento de superfície 36. A saída do equipamento da superfície 36 coopera com um registrador 38 que produz uma medida, ou "tora", de um ou mais parâmetros de interesse como uma função de profundidade dentro do poço. Se o sistema de perfilagem acústica for um sistema com cabo, a ferramenta acústica 20 é uma ferramenta com cabo, o meio transportador 32 é um cabo de perfilagem, e guincho de perfuração 34 é um cabo que suspende o sistema que é bem conhecido na técnica. O cabo também serve como um canal de dados e controle entre a ferramenta de perfilagem com cabo 20 e o equipamento da superfície 36. Se o sistema de perfilagem acústica é um sistema LWD, a ferramenta acústica 20 é uma ferramenta acústica tipicamente disposta dentro de um comando, o meio transportador 32 é uma coluna de perfuração, e o guincho de perfuração 34 é um anel de perfuração giratório bem conhecido na técnica.

[00022] Ainda com referência à figura 2A, a ferramenta 20 adicionalmente compreende a seção de instrumento 33 que compreende energia, controle, processador e elementos de memória necessários para operar a ferramenta. A ferramenta 20 também compreende uma seção direcional 29 que é utilizada para medir uma posição "absoluta" da ferramenta de perfilagem 20, conforme será discutido nas seções posteriores desta divulgação. Um elemento de telemetria do fundo de poço é mostrado em 28. Este é utilizado para medir a distância dos dados entre a ferramenta 20 e um elemento de telemetria "do furo superior" (não mostrado) preferencialmente disposto no equipamento da

superfície 36. Estes dados podem incluir os dados acústicos medidos e os parâmetros acústicos calculados. Estes dados podem ser opcionalmente armazenados dentro da memória (não mostrado), preferencialmente dispostos dentro da seção do instrumento 33, para remoção posterior e processamento na superfície da terra 40. Os dados de comando para operar a ferramenta 20 também podem ser medidos a partir da superfície através do sistema de telemetria.

[00023] A figura 2B é uma vista transversal da ferramenta 20 tomada através da seção de fonte 23 da ferramenta 20 disposta dentro do poço 18. A seção de fonte 23 (e, desta forma, a ferramenta 20) gira sobre o eixo principal da ferramenta 20 conforme indicado por conceito pela seta 23a. Uma fonte acústica, que assumida ser a fonte unipolo para fins desta ilustração, é mostrada em 23b. O ângulo θ é definido pela frente da onda acústica normal emitida pela fonte 23b e o eixo principal da simetria da ferramenta 20. Um ângulo de referência θ_R é definido como 0 graus por conveniência, e os segmentos do ângulo azimutal $\Delta\theta_1$, $\Delta\theta_2$, $\Delta\theta_n$ são mostrados em 42. Estes segmentos do ângulo azimutal, bem como o ângulo "cruzado" $\Delta\theta_C$, serão discutidos nas seções posteriores desta divulgação.

Resultados do modelo de resposta

[00024] Esta invenção é um sistema de perfilagem LWD ou com cabo para medir as propriedades acústicas nas propriedades anisotrópicas da fonte acústica unipolo ou dipolo.

[00025] Novamente, com referência às figuras 2A e 2B, as respostas dos sistemas de perfilagem acústica na formação anisotrópica foram modeladas para as configurações a seguir:

[00026] Configuração 1: A ferramenta com cabo 20 com:

- (a) uma fonte acústica monopolo operando a 10 kHz e disposta na seção de fonte 23; e
- (b) seis estações receptoras 24 com cada estação compre-

endendo um receptor acústico.

[00027] Configuração 2: A ferramenta com cabo 20 com

(a) uma fonte acústica dipolo operando a 2 kHz e disposta na seção de fonte 23; e

(b) oito estações receptoras 24 com cada estação compreendendo dois receptores acústicos.

[00028] Configuração 3: Uma Ferramenta LWD 20 que tem 17,2 centímetros (6,75 polegadas) em diâmetro e largura.

(a) uma única fonte acústica unipolo lateral operando a 6 e 12 kHz e disposta na seção de fonte 23; e

(b) seis estações receptoras 24 com cada estação compreendendo um receptor acústico.

[00029] Para cada uma das configurações acima, a ferramenta 20 foi centralizada (conforme mostrado na figura 2B) dentro de um poço 18 com um diâmetro de 22,2 centímetros (8,5 polegadas), e o poço foi preenchido com lama em 61,57 $\mu\text{s}/\text{metros}$ (202 $\mu\text{s}/\text{pés}$) que é água fresca.

[00030] Em cada uma das configurações acima, os resultados da resposta do modelo foram obtidos para a ferramenta de perfilagem 20, a ferramenta girando sobre o eixo principal do poço 18 e em uma formação anisotrópica HTI. Foi suposto que a anisotropia é simétrica de forma azimutal. Os dados da forma de onda foram gerados em segmentos contínuos do ângulo azimutal $\Delta\theta_i = 15$ graus na faixa de 0 a 90 graus (ou seja, $i = 1, 2, \dots, 6$) utilizando a nomenclatura previamente definida. Novamente, $\Delta\theta_R = 0$ graus é definido como o ângulo de referência azimutal da ferramenta. A análise de coerência mais lenta em tempo (STC) foi utilizada para determinar a velocidade de corte. As velocidades de corte foram calculadas da projeção da imagem em cada ângulo e comparadas com seus valores teóricos.

Resultados do modelo de resposta – Fontes monopolo

[00031] As fontes acústicas monopolo não são direcionais de forma azimutal. As ferramentas com as fontes monopolo podem identificar a anisotropia do corte de formação apenas se o índice de anisotropia for maior suficiente para as velocidades de corte lenta e rápida para registrar dois picos em uma projeção da imagem do desenho. Para anisotropia fraca de 7 por cento ou menos, os picos de corte podem não ser solucionados e a velocidade de corte medida estará de certa forma entre as velocidades de corte atuais rápida e lenta. Além disso, a direção da tensão máxima pode não ser identificada utilizando uma fonte monopolo.

[00032] As respostas de uma ferramenta da fonte monopolo, operando a 10 kHz, em duas formações modeladas são apresentadas para mostrar as limitações apresentadas acima da fonte monopolo. Mais especificamente, a Configuração 1 da ferramenta monopolo com cabo é utilizada como um exemplo dos dados obtidos a partir de uma fonte monopolo em uma formação anisotrópica. A seção de fonte e receptora da ferramenta com cabo são giradas de forma sincronizada dentro do poço. Os resultados e as conclusões obtidas a partir da ferramenta giratória com cabo podem ser aplicados em uma ferramenta LWD com uma fonte monopolo.

[00033] Os resultados de uma fonte monopolo foram semelhantes para todas as respostas da ferramenta modelada. Desde que os dados monopolo não alterem significativamente enquanto a ferramenta é girada no poço, o modelo em qualquer ângulo rotacional produziu essencialmente os mesmos resultados.

[00034] A figura 3 mostra, para um dado segmento azimutal $\Delta\theta$, um mapa STC conceitual dos dados monopolo da ferramenta com cabo na formação de argila Bakken. O mapa STC foi conceitualizado para redução e compreende um desenho de lentidão (ordenada) como uma função dos tempos de chegada a partir das respostas de campo da

onda registradas pelos receptores 24 mostrados na figura 2A. A lentidão e os tempos de chegada são expressos em unidades de microssegundos por metro (pé) ($\mu\text{s}/\text{pé}$) e microssegundos (μs), respectivamente, para isto e o mapa STC segue. Os contornos 52, 54 e 56 indicam valores de aumento de magnitude, respeitosamente. As duas chegadas vistas no mapa são as velocidades de corte rápida e lenta que são claramente identificadas. O mapa também mostra a chegada compressiva.

[00035] A projeção da imagem do mapa STC para o segmento angular da figura 3 é mostrada na figura 4 onde a imagem na porcentagem (ordenada) é desenhada como uma função de lentidão $\mu\text{s}/\text{m}$ ($\mu\text{s}/\text{pé}$). A projeção mostra dois picos distintos de corte rápido e corte lento 62 e 64, respectivamente, colocando a 35,97 e 44,20 $\mu\text{s}/\text{m}$ (118 e 145 $\mu\text{s}/\text{pé}$), que são bem próximos às velocidades de corte rápida e lenta da formação na Tabela 2. Entretanto, a razão para os dois picos distintos 62 e 64 neste exemplo é relativamente o índice de anisotropia (20%). Se o índice de anisotropia for reduzido, os dois picos podem não ser solucionados conforme ilustrado no exemplo a seguir.

[00036] A figura 5 mostra o mapa STC, para um dado segmento angular $\Delta\theta_i$ dos dados monopolo da ferramenta com cabo para a formação de Phenolite, que tem um índice de anisotropia de 7%. As velocidades de corte rápida e lenta, incluídas na forma oval tracejada 57, não são claramente identificadas. A projeção da imagem do mapa STC da figura 5 não é mostrada na figura 6. Nesta formação, as chegadas de corte e rápidas estão dentro da forma oval tracejada 5 e desta forma não podem ser solucionadas no desenho de projeção. O valor do pico da chegada depende da coerência máxima, que deve ser a chegada rápida de 57,91 $\mu\text{s}/\text{m}$ (190 $\mu\text{s}/\text{pés}$) neste caso. Outros casos podem ser diferentes e o valor do pico ser qualquer um entre as duas velocidades dependendo da coerência.

[00037] Utilizar os dois modelos de uma ferramenta com cabo compreendendo uma fonte monopolo, as conclusões a seguir são aparentes. A fonte monopolo pode ser utilizada para identificar a lentidão da onda de corte rápida e lenta, e, desta forma, a anisotropia de corte, como uma função do segmento angular $\Delta\theta_i$, apenas se o índice de anisotropia for alto suficiente para as velocidades de corte lenta e rápida para registrar dois picos no desenho de imagem. Entretanto, para anisotropia de pico típica de 7% ou menor, os picos da velocidade de corte lenta ou rápida não podem ser solucionados, e a velocidade de corte medida estará de alguma forma entre as duas velocidades. Além disso, a direção de tensão máxima não pode ser identificada das fontes monopolo. É enfatizado novamente que a Configuração 1 da ferramenta monopolo com cabo foi utilizada para obter as respostas acima de uma fonte monopolo em uma formação anisotrópica. Os resultados semelhantes são obtidos modelando uma ferramenta LWD com uma fonte monopolo, ou uma ferramenta LWD com uma fonte unipolo após calcular a média dos dados de várias fotos adquiridas enquanto gira a ferramenta dentro do poço pelo ângulo θ .

Resultados do modelo de resposta – fontes dipolo e unipolo

[00038] As fontes dipolo e unipolo são direcionais de forma azimutal e são, desta forma, conceitualmente adequadas para medir a anisotropia azimutal.

[00039] A ferramenta com cabos compreendendo a fonte acústica dipolo cruzada tem sido utilizada na técnica anterior para medir a anisotropia da formação. Detalhes de um sistema com cabo de anisotropia dipolo cruzada são divulgados nas Patentes U.S. Nos: 5.343.441; 7.310.285 B2; 7.646.674 B2; e 6.098.021, que são incorporadas aqui por referência. Uma ferramenta com cabo tipicamente não gira conforme é transportada ao longo do poço. Meios mecânicos podem, a princípio, ser configurados para girar de forma sincronizada

(pelo menos) a seção de fonte e a seção receptora a fim de obter a sensibilidade da anisotropia desejada da invenção.

[00040] Enquanto as conclusões feitas para a fonte monopolo podem ser aplicadas igualmente para ferramenta com cabo e LWD, os sinais acústicos das fontes dipolo são vastamente diferentes quando utilizadas durante a perfuração. Uma das diferenças principais não é capaz de operar uma fonte dipolo a uma frequência baixa enquanto durante a perfuração devido à interferência do ruído da perfuração. Operar uma fonte dipolo em frequências altas (4-8 kHz) requer correções de dispersão muito maiores do que operar em baixas frequências (1-2 kHz). Segundo, a massa e rigidez do comando afetam as medições dipolo durante a perfuração, que faz a medição feita de uma ferramenta LWD a 4-8 kHz apenas marginalmente melhor do que a obtida de uma única fonte monopolo (unipolo) lateral.

Fonte dipolo com cabo

[00041] As medições de anisotropia de uma fonte dipolo de baixa frequência em uma ferramenta com cabo são tipicamente feitas utilizando as medições dipolo cruzadas conhecidas. Novamente com referência às figuras 2A e 2B, as medições dipolo cruzadas são feitas utilizando dois conjuntos de transmissores dipolo ortogonais dispostos dentro da seção de fonte 23, e cada um com a estação do receptor 24 compreendendo receptores ortogonais. Isto é a Configuração 2 previamente descrita. Os transmissores e receptores ortogonais são alinhados de forma azimutal. Os dados da forma de onda são coletados nos receptores em linha e linha cruzada a partir dos transmissores ortogonais para formar quatro conjuntos dos dados da forma de onda geralmente referidos como XX, YY (em linha) e XY e YX (linha cruzada). Uma rotação matemática, geralmente conhecida como Rotação de Alford, mostrada na Patente U.S. No. 5.343.441, que é incorporada aqui por referência, é então aplicada aos quatro conjuntos de dados

para obter as velocidades lenta e rápida e a direção de tensão máxima.

[00042] Na teoria, as medições de corte de uma ferramenta dipolo mecanicamente giratória com cabo devem rastrear os valores teóricos mostrados na figura 1. A resposta, na Phenolite anisotrópica, de uma ferramenta com cabo giratória com um dipolo de baixa frequência (2 kHz) é mostrada na figura 7. A ilustração é um desenho da lentidão do corte $\mu\text{s/m}$ ($\mu\text{s/pé}$) como uma função de ângulo azimutal de rotação da ferramenta θ (graus). A curva "teórica" 62 representa a resposta calculada utilizando equações (1) - (8) e velocidades de corte da ferramenta "medidas" modelada em 15 graus de segmento azimutal $\Delta\theta_i$ são identificadas como 64. A figura 7 mostra valores medidos de bom acordo 64 e valores teóricos representados pela curva 62. As ilustrações do mapa STC correspondente e projeções correspondentes de imagem foram omitidas para redução.

[00043] A resposta da formação da ferramenta com cabo giratória com uma fonte dipolo 2 kHz na argila Bakken anisotrópica é mostrada na figura 8. Como na figura 7, a figura 8 é um desenho da lentidão do corte como uma função de θ . A curva 63 representa a resposta teórica calculada utilizando equações (1) - (8) e velocidades de corte medidas da ferramenta modeladas em 15 graus de segmento azimutal $\Delta\theta_i$ são identificadas como 65. O mapa STCs (não mostrado) nos segmentos azimutais $\Delta\theta_i = 45$ graus e 60 graus indicam que as chegadas da velocidade de corte não podem ser solucionadas, assim, os valores medidos 65 nestes segmentos azimutais foram omitidos. Toda a maior lentidão medida comparada à lentidão teórica 63 é devido a efeitos de dispersão. Isto é mais notável para o caso da argila Bakken dada à velocidade de corte rápida chegando a uma frequência relativamente alta (3-4 kHz).

[00044] A resposta da formação da ferramenta com cabo giratória

com uma fonte dipolo de 2 kHz na formação de giz anisotrópica é mostrada na figura 9. Novamente, a figura 9 é um desenho da lentidão de corte como uma função de θ . A curva 67 representa a resposta teórica calculada utilizando equações (1) - (8) e velocidades de corte da ferramenta "medidas" modelada em 15 graus de segmentos azimutais $\Delta\theta_i$ são identificadas como 69. Um mapa STC (não mostrado) nos segmentos azimutais $\Delta\theta_i = 60$ graus indica que as chegadas rápidas e da velocidade de corte não podem ser solucionadas, assim, os valores medidos 69 neste segmento azimutal foi omitido. Como no caso da argila Bakken, toda a maior lentidão medida 69 comparada à lentidão teórica 67 é devido aos efeitos de dispersão.

[00045] Dado que os dados dipolo acima com cabo giratório rastreiam o perfil da velocidade teórica ao girar, vários parâmetros de anisotropia podem ser determinados a partir dos dados:

1. As velocidades de corte lenta e rápida podem ser determinadas como velocidades mínima e máxima medidas durante a rotação;

2. O índice de anisotropia pode ser prontamente calculado a partir das velocidades de corte mínima e máxima; e

3. As direções das tensões máxima/mínima também podem ser prontamente calculadas a partir dos ângulos nos quais as velocidades mínima e máxima são medidas.

[00046] Para resumir, as medições dipolo cruzadas de baixa frequência a partir da ferramenta com cabos são bem estabelecidas, mas devido às razões previamente notadas, elas não podem ser aplicadas em um sistema acústico LWD. Desta forma, há uma necessidade para um método de detecção de anisotropia durante a perfuração. Dado que as ferramentas LWD giram a maior parte do tempo, um novo princípio com base na ferramenta unipolo giratória é introduzido na seção a seguir.

O sistema de perfilagem acústica dipolo e unipolo LWD

[00047] A fonte acústica unipolo emite pulsos de energia que são direcionais de forma azimutal. Os resultados a seguir são obtidos utilizando uma fonte dipolo disposta dentro da ferramenta LWD de forma que o pulso emitido seja essencialmente ortogonal para o eixo principal da ferramenta. A ilustração conceitual da disposição da fonte unipolo é ilustrada em 23b na figura 2B. Além disso, os receptores acústicos dispostos dentro das estações receptoras 24 espaçadas axialmente mostradas na figura 2A são preferivelmente alinhados de forma azimutal com a fonte unipolo. Isto é definido previamente na Configuração 3 de LWD.

[00048] Uma ferramenta de perfilagem LWD compreendendo uma fonte dipolo operando na faixa de 6 e 12 kHz pode ser utilizada em um ambiente de perfuração. Os resultados de modelagem mostram nenhuma diferença significativa na resposta da ferramenta empregando uma fonte dipolo de alta frequência e uma fonte unipolo operando na mesma frequência. Embora os resultados na seção a seguir sejam dados para uma fonte acústica unipolo, os mesmos resultados são aplicáveis para uma ferramenta LWD operando na mesma frequência e são indicados nas ilustrações a seguir.

[00049] Nas formações rápidas onde as ondas de corte refratado são detectadas a partir de uma fonte unipolo, o perfil da velocidade obtido de uma ferramenta unipolo giratória acorda com os valores teóricos nas direções rápida e lenta, e altera de forma repentina uma velocidade em outra velocidade a $\theta = 45$ graus. Esta tendência pode ser vista na figura 10. Mais especificamente, a figura 10 ilustra a resposta de uma ferramenta LWD giratória com uma fonte unipolo de 6 kHz na formação anisotrópica da Argila Bakken. Novamente, a figura 10 é um desenho da lentidão de corte como uma função de ângulo θ . Conforme declarado previamente, a modelagem de uma ferramenta giratória com

cabo com uma fonte dipolo operando a 6 kHz produziu essencialmente os mesmos resultados como uma ferramenta LWD giratória com uma fonte dipolo operando a 6 kHz. A frequência mais alta de 6 kHz é operacional praticável em um ambiente de perfuração conforme previamente discutido. A curva 63 representa a resposta calculada utilizando equações (1) - (8) e é essencialmente idêntica aos resultados para a ferramenta dipolo de 2 kHz com cabo mostrada na figura 8. As velocidades de corte medidas modeladas em 15 graus de segmentos azimutais $\Delta\theta_i$ são identificadas como 65 são para a ferramenta dipolo de 2 kHz com cabo e são mostradas para referência. As velocidades de corte modeladas em 15 graus de segmentos azimutais $\Delta\theta_i$ são identificadas como 70 são para a ferramenta LWD unipolo de 6 kHz. Conforme previamente mencionado, os resultados essencialmente idênticos são obtidos para uma ferramenta giratória com cabo com uma fonte de 6 kHz, assim, as medições 70 são mostradas para representar ambas as modalidades. Os valores medidos 70 são relativamente constantes em qualquer lateral de $\Delta\theta_i = 45$ graus como indicado pelas linhas horizontais quebradas. Há uma alteração repentina na lentidão de corte a $\theta = 45$ graus. Este ângulo 72 é definido como o ângulo "cruzado" e é denotado como θ_c . A alteração repentina a $\theta_c = 45$ graus, assim, define a posição azimutal da lateral na velocidade da onda de corte e assim uma direção azimutal relativa para a anisotropia de corte.

[00050] A alteração repentina na chegada do corte mostrado na Argila Bakken foi confirmada pela modelagem semelhante em uma formação calcária com anisotropia HTI de 5 por cento. Estes resultados são mostrados na figura 11. Novamente, A figura 11 é um desenho da lentidão de corte como uma função de θ . Os pontos de dados 64 foram previamente discutidos e a função nesta discussão como medições de referência a partir da ferramenta giratória com cabo com uma fonte dipolo operando a 2 kHz. A curva 74 representa a resposta teórica calculada utilizando

equações (1) - (8). As velocidades de corte medidas modeladas em 15 graus de segmentos azimutais $\Delta\theta$ são identificadas como 78 são para uma ferramenta LWD unipolo de 12 kHz bem como uma ferramenta com cabo dipolo de 12 kHz. Conforme na ilustração anterior, os valores medidos 78 são relativamente constantes em qualquer lado de $\theta = 45$ graus conforme indicado pelas linhas quebradas. Uma alteração repentina ocorre novamente a $\theta_c = 45$ graus, então definindo a posição azimutal da alteração na velocidade da onda de corte e, assim, uma direção azimutal relativa para a anisotropia de corte.

[00051] A figura 12 é um desenho da lentidão de corte como uma função de $\Delta\theta$ em uma formação anisotrópica de giz. Lembre-se que a formação de giz é relativamente lenta (ver Tabela 2). Os pontos de dados 69 são as medições de referência a partir da ferramenta giratória com cabo com uma fonte dipolo operando a 2 kHz e são os mesmos que os mostrados na figura 9. A curva 67 representa a resposta calculada utilizando equações (1) - (8) e é igualmente a mesma que a curva teórica mostrada na figura 9. As velocidades de corte medidas modeladas em 15 graus de segmentos azimutais $\Delta\theta$ são identificadas como 80 são para a ferramenta LWD unipolo de 6 kHz e ainda representativas da resposta para a ferramenta com cabo dipolo de 6 kHz. Embora tenha uma alteração repentina nos valores medidos de LWD 80 em qualquer lateral de $\Delta\theta = 45$ graus, os valores não são relativamente constantes em qualquer lado. Como resultado, nas formações lentas como o giz, o corte refratado (conforme escalado no eixo ordenado direito) não pode ser detectado por uma fonte unipolo. Entretanto, as ondas flexurais (conforme escalado no eixo ordenado esquerdo) de uma fonte unipolo foram encontradas semelhantes a uma fonte dipolo de baixa frequência na formação anisotrópica, mas com correções de dispersão muito maiores.

[00052] A figura 13 é uma vista transversal conceitual de uma fer-

ramenta de perfilagem giratória compreendendo uma fonte acústica monopolo ou dipolo operando na mesma frequência relativamente alta. Supondo que a anisotropia é simetricamente de forma azimutal, o segmento azimutal cruzado medido $\Delta\theta_C$ define a fronteira entre a formação rápida e lenta 21a e 21b, respectivamente a um ângulo $\theta = 45$ graus com relação a um ângulo de referência da ferramenta θ_R . (ver figura 2b). Combinar esta medição com a resposta da seção direcional 29 da ferramenta de perfilagem 20 (ver figura 2A), o ângulo da fronteira rápido-lento para um ângulo de referência absoluta $\Delta\theta_{ABS}$ que pode ser norte magnético, a lateral "alta" de um poço desviado, e semelhante.

[00053] É aparente a partir das ilustrações e discussões acima que as medições unipolo LWD feitas em frequências muito altas (e igualmente as medições dipolo LWD feitas na mesma frequência) podem fornecer as velocidades de formação rápida e lenta com boa precisão nas formações rápidas. A direção de tensão mínima/máxima pode ser determinada a partir destas medições detectando o ângulo em que a velocidade altera de rápida para lenta, que é definido como o ângulo cruzado. A direção de tensão máxima é 45 graus (com relação ao ângulo de referência da ferramenta) a partir do ângulo cruzado em direção à velocidade lenta e a direção da tensão mínima é 45 graus.

Processamento de dados dos sistemas de perfilagem unipolo e dipolo giratório

[00054] A figura 14 resume os métodos de medição e processamento de dados na forma de um fluxograma conceitual. Identificadores específicos das figuras 2A, 2B e 13 também são referenciados.

[00055] Ainda com referência à figura 14, a fonte acústica dentro da seção de fonte 23 é dispensada na etapa 90. O campo de onda gerado pelo pulso acústico é recebido pela pluralidade de detectores na seção receptora 24. Estas formas de onda são digitalizadas por um

conversor adequado de analógico para digital tipicamente disposto dentro da seção do instrumento 33 da ferramenta de perfilagem 20. Estas operações são indicadas na etapa 92. Os dados da forma de onda medidos são divididos na etapa 94 em segmentos do ângulo azimutal $\Delta\theta_i$ conforme a ferramenta gira dentro do poço. Na etapa 96, a velocidade de corte é calculada para cada segmento do ângulo azimutal $\Delta\theta_i$ conforme descrito nas seções anteriores desta divulgação. Um ângulo cruzado θ_C se presente, é determinado na etapa 98. As etapas de 90 a 98 são repetidas para cada revolução da seção de fonte-seção receptora dentro do poço. Para cada revolução, o ângulo cruzado θ_C é relacionado à etapa 100 para um ângulo de referência absoluta θ_{ABS} utilizando a saída de uma seção direcional 29. O ângulo de referência absoluta pode ser norte magnético, a lateral alta de um poço desviado, e semelhantes. Na etapa 102, os parâmetros da formação anisotrópica e outros parâmetros de interesse (POI) utilizando os dados medidos e calculados previamente descritos. Os parâmetros de interesse são registrados na etapa 104 como uma função de profundidade. Estes parâmetros de interesse podem ser registrados na memória disposta dentro da seção do instrumento 33 para recuperação posterior na superfície da superfície da terra 40. Alternadamente, os parâmetros de interesse podem ser medidos para a superfície através do sistema de telemetria 31, recebidos pelo equipamento da superfície 31, registrados em um registrador da superfície 38 que gera um "registro" 39 dos parâmetros de interesse como uma função de profundidade. Na etapa 106, a profundidade é aumentada e as etapas de 90 a 104 são então repetidas gerando o registro 39.

Sumário

[00056] A medida das propriedades acústicas de formação anisotrópicas penetradas por um poço pode ser resumida como segue: do material penetrado por um poço.

1. As medições da anisotropia consistem em três partes:

(a) medição das velocidades de corte rápida e lenta da formação;

(b) medição da direção da tensão mínima/máxima; e

(c) medição do índice de anisotropia por qualquer medição de índice da lentidão de rápido a lento ou suas energias.

2. As medições de corte dipolo cruzado com cabo feitas a 2 kHz ou menor, podem fornecer todas as três medições de anisotropia. As mesmas medições também podem ser fornecidas a partir de uma fonte dipolo de baixa frequência (em vez de dipolo cruzado), ao girar a ferramenta com cabo, medindo as velocidades de corte como uma função de ângulo rotacional.

3. As medições unipolo LWD feitas em frequências muito maiores podem fornecer as velocidades de formação devagar e rápida com boa precisão nas formações rápidas. A direção de tensão mínima/máxima pode ser determinada a partir destas medições detectando o ângulo e, que a velocidade muda de rápida para lenta, que é definido como o ângulo cruzado. A direção da tensão máxima é 45 graus a partir do ângulo cruzado em direção à velocidade baixa e a direção da tensão mínima é 45 graus a partir do ângulo cruzado em direção à velocidade rápida.

4. Os modos flexurais gerados a partir da fonte unipolo podem ser utilizados para medir a anisotropia na formação lenta após aplicar as correções de dispersão.

5. As medições dipolo LWD feitas em frequência alta não oferecem qualquer vantagem sobre as medições unipolo feitas na mesma frequência.

[00057] A divulgação acima deve ser observada como ilustrativa e não restritiva, e a invenção é limitada apenas pelas reivindicações que seguem.

REIVINDICAÇÕES

1. Ferramenta de perfilagem acústica (20) para determinar um parâmetro quantificando anisotropia de uma formação (21) penetrada por um poço (18), o dito parâmetro incluindo tensão máxima/mínima da dita formação a dita ferramenta compreendendo:

uma fonte acústica unipólo (23b); e

uma seção receptora (22) compreendendo uma pluralidade de estações receptoras (24) em diferentes espaçamentos axiais a partir da fonte acústica (23b), caracterizada pelo fato de que a fonte e a seção receptora são configuradas para serem giratórias de forma sincronizada dentro do poço; e

um processador configurado para:

medir respostas das estações receptoras em segmentos angulares azimutais;

processar as respostas para determinar a velocidade de corte da formação como uma função de ângulo azimutal; e

determinar o parâmetro de quantificação de anisotropia da formação usando a velocidade de corte como uma função do ângulo azimutal por detecção de uma mudança abrupta na velocidade de corte.

2. Ferramenta, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que:

o parâmetro é uma direção angular da dita tensão mínima/máxima da formação;

as velocidades de corte como uma função de ângulo azimutal e a dita mudança abrupta na velocidade de corte são utilizadas para determinar um ângulo cruzado (θ_c); e

o processador é ainda configurado para combinar o ângulo cruzado com medidas de uma seção direcional da ferramenta para produzir uma direção angular absoluta da tensão mínima/máxima.

3. Ferramenta, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que as respostas são processadas com os mapas de coerência mais lenta de tempo (STC) e projeções de imagem ou método de probabilidade máxima ou análise de coerência de frequência mais lenta.

4. Ferramenta, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que as respostas são processadas com os mapas de coerência mais lenta de tempo (STC) e projeções de imagem.

5. Ferramenta, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a pluralidade de estações receptoras compreende seis ou mais estações receptoras (24).

6. Ferramenta, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que cada estação receptora (24) compreende dois receptores acústicos.

7. Ferramenta, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a ferramenta é uma ferramenta acústica durante perfuração (LWD) ou medição durante perfuração (MWD).

8. Ferramenta, de acordo com a reivindicação 7, caracterizada pelo fato de que a fonte (23b) é operada a uma frequência de aproximadamente 4 kHz ou maior.

9. Ferramenta, de acordo com a reivindicação 1, caracterizada pelo fato de que a ferramenta é uma ferramenta com cabo.

10. Ferramenta, de acordo com a reivindicação 9, caracterizada pelo fato de que a fonte (23b) é operada a uma frequência de aproximadamente 1 kHz ou maior.

11. Método para determinar um parâmetro quantificando anisotropia de uma formação (21) penetrada por um poço (18), o método caracterizado pelo fato de que compreende:

operar uma fonte acústica unipólo (23b) para emitir um sinal acústico;

proporcionar uma seção receptora (22) que compreende uma pluralidade de estações receptoras (24) em diferentes espaçamentos axiais a partir da fonte acústica; em que

girar a seção de fonte e a seção receptora de forma sincronizada dentro do poço;

medir as respostas das estações receptoras nos segmentos angulares azimutal ($\Delta\theta$) a uma dada profundidade dentro do poço;

processar as respostas para determinar a velocidade de corte da formação como uma função de ângulo azimutal na determinada profundidade;

determinar, a partir da velocidade de corte da formação como uma função do ângulo azimutal na profundidade, uma direção angular relativa de tensão mínima/máxima da formação por detecção de uma mudança abrupta na velocidade de corte; e

combinar a direção angular relativa de tensão mínima/máxima com uma medida de orientação da ferramenta para obter uma direção angular absoluta da tensão mínima/máxima.

12. Método, de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que as respostas são processadas com mapas de coerência mais lenta de tempo STC e projeções de imagem ou método de probabilidade máxima ou análise de coerência de frequência mais lenta.

13. Método, de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que as respostas são processadas com mapas de coerência mais lenta de tempo STC e projeções de imagem.

14. Método, de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que a pluralidade de estações receptoras compreende seis ou mais estações receptoras (24).

15. Método, de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo fato de que cada estação receptora compreende dois recep-

tores acústicos.

16. Método, de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que compreende ainda transportar a fonte e a seção receptora ao longo do poço com uma coluna de perfuração.

17. Método, de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que a fonte é operada a uma frequência de aproximadamente 4 kHz ou maior.

18. Método, de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo fato de que adicionalmente compreende transportar a seção de fonte e a seção receptora ao longo do poço com cabo.

19. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de que a fonte é operada a uma frequência de aproximadamente 1 kHz ou maior.

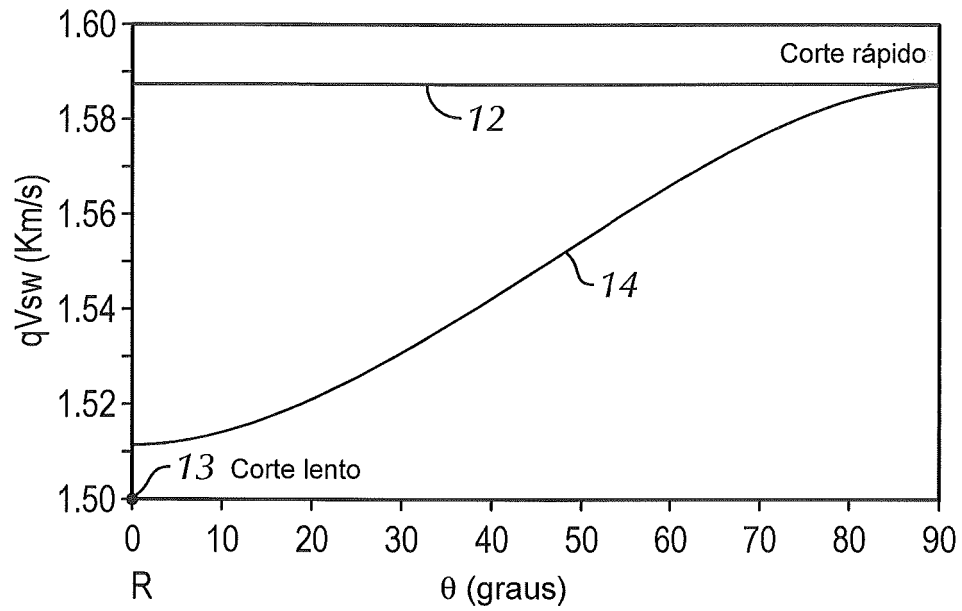


FIG. 1

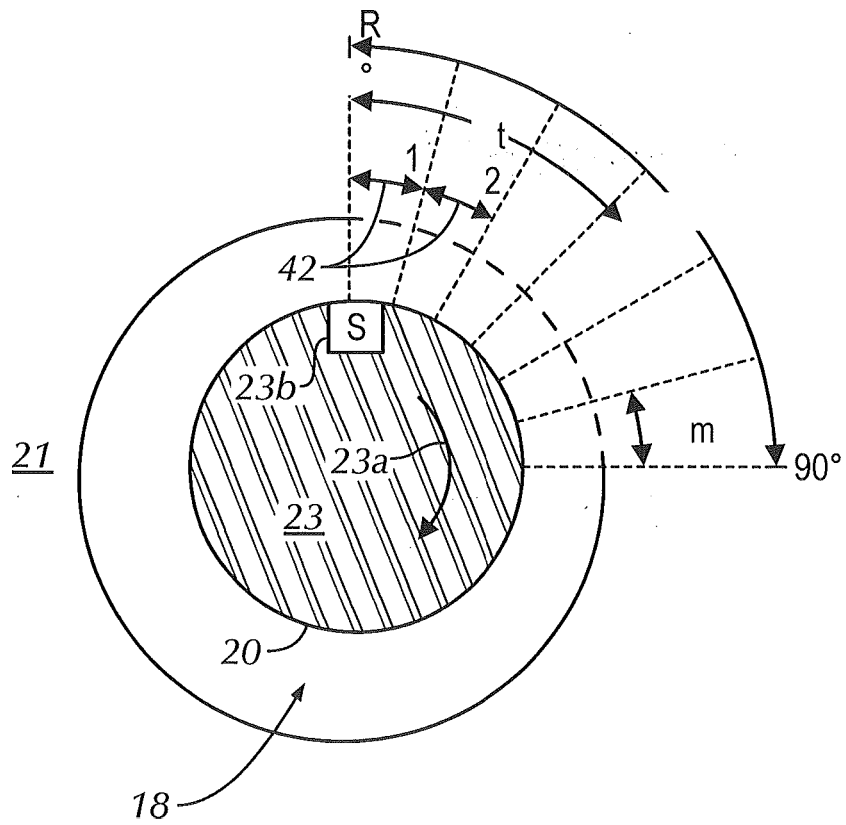
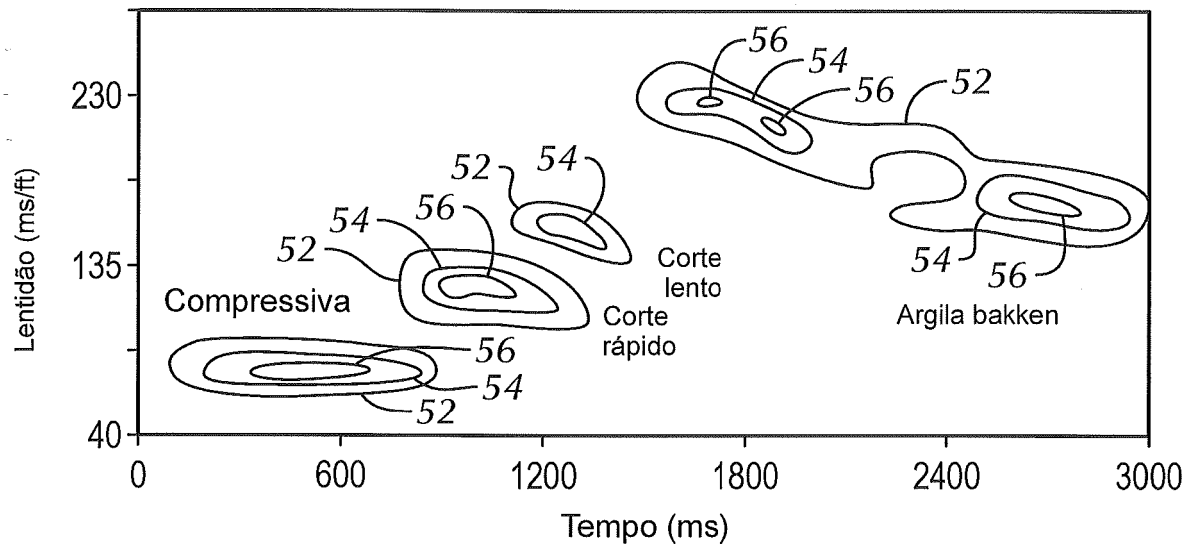
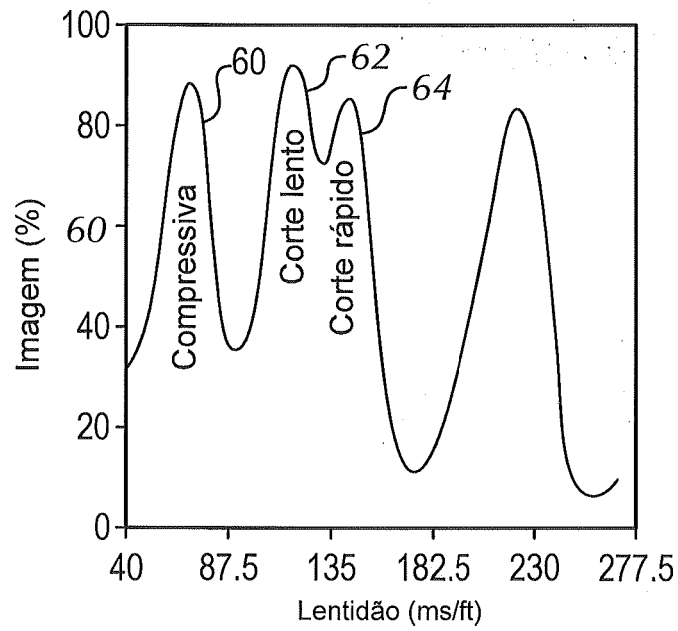


FIG. 2B



**FIG. 3****FIG. 4**

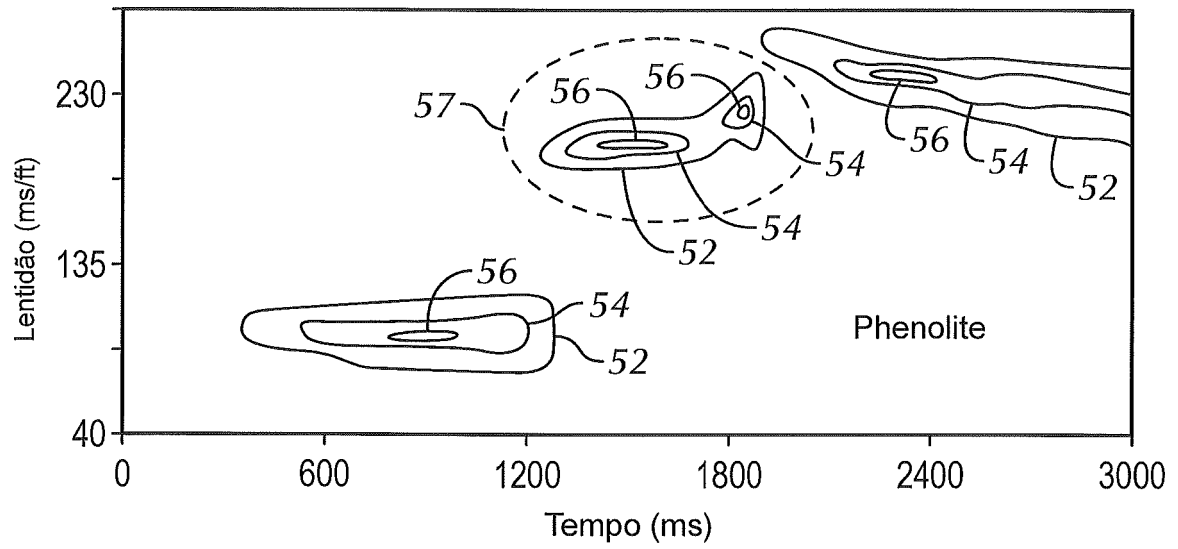


FIG. 5

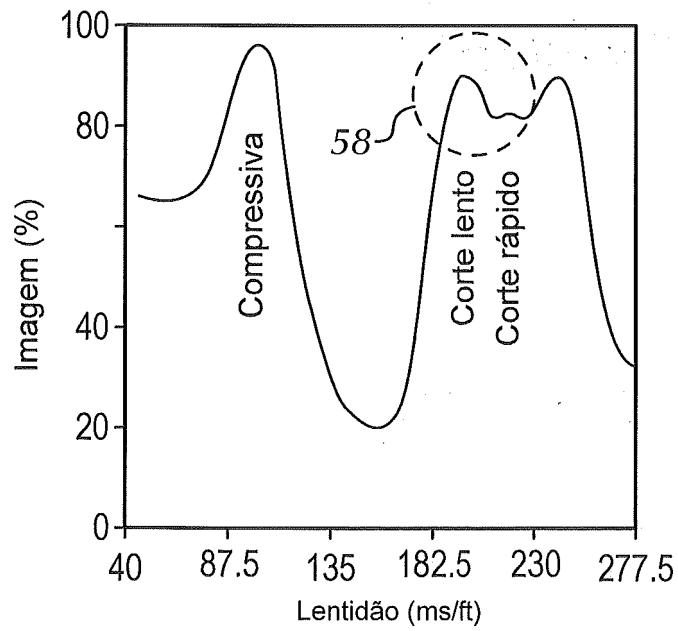


FIG. 6

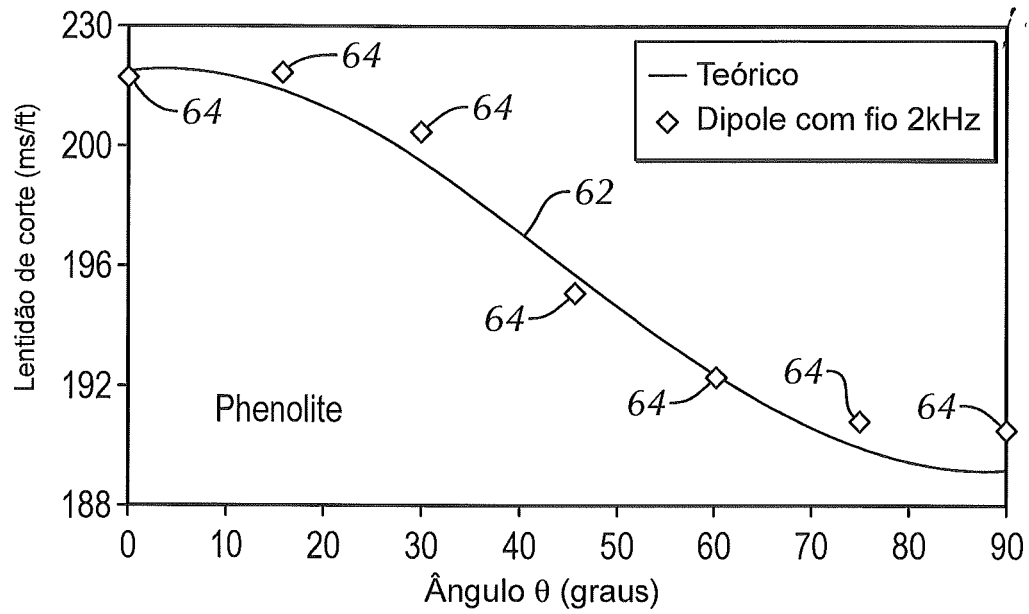


FIG. 7

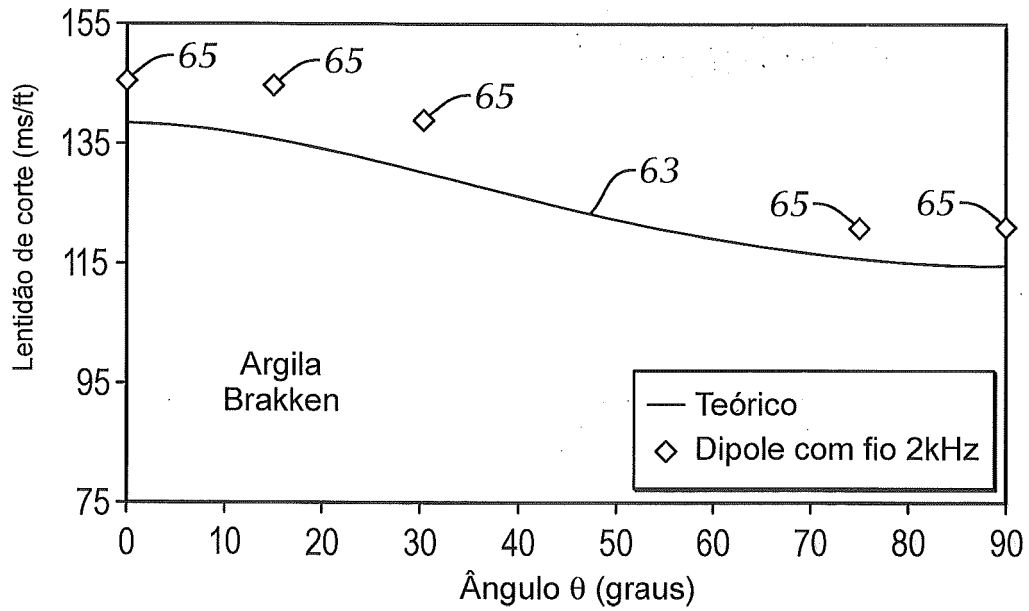


FIG. 8

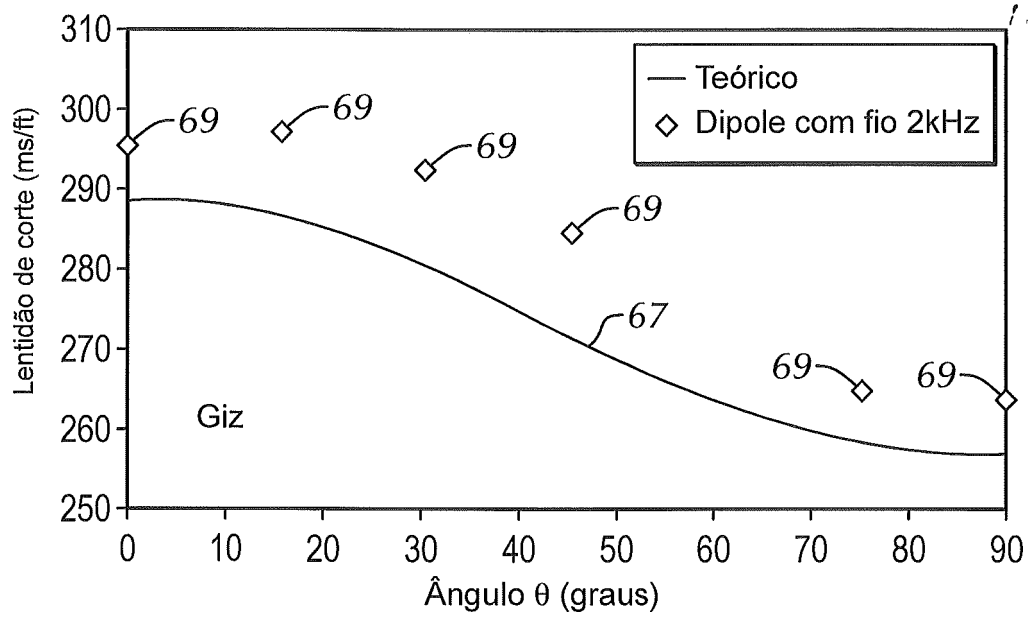


FIG. 9

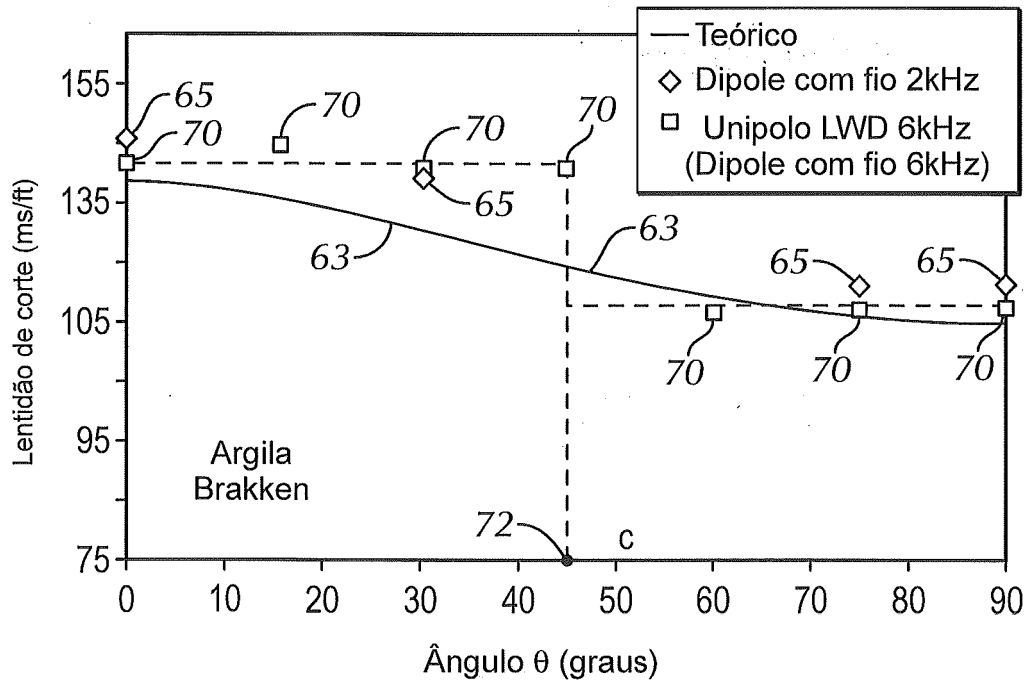


FIG. 10

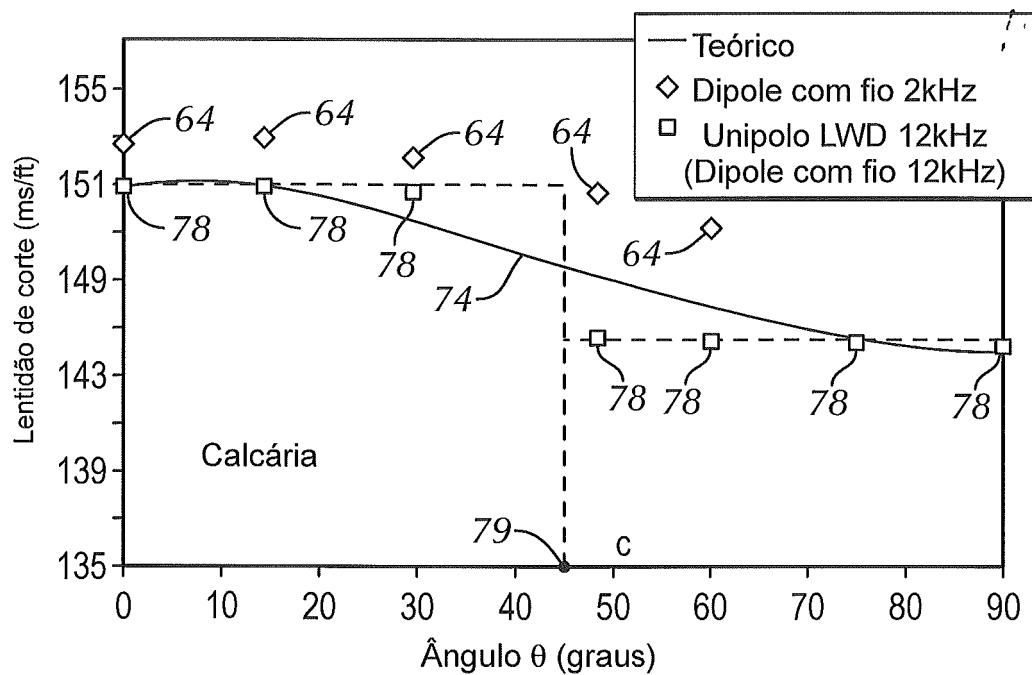


FIG. 11

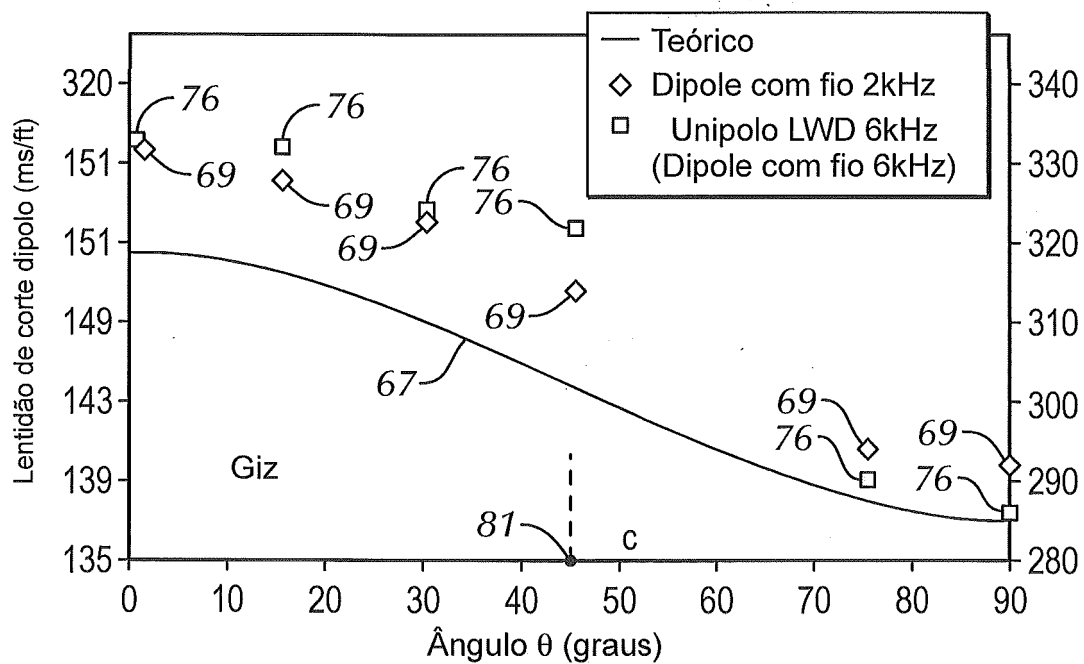
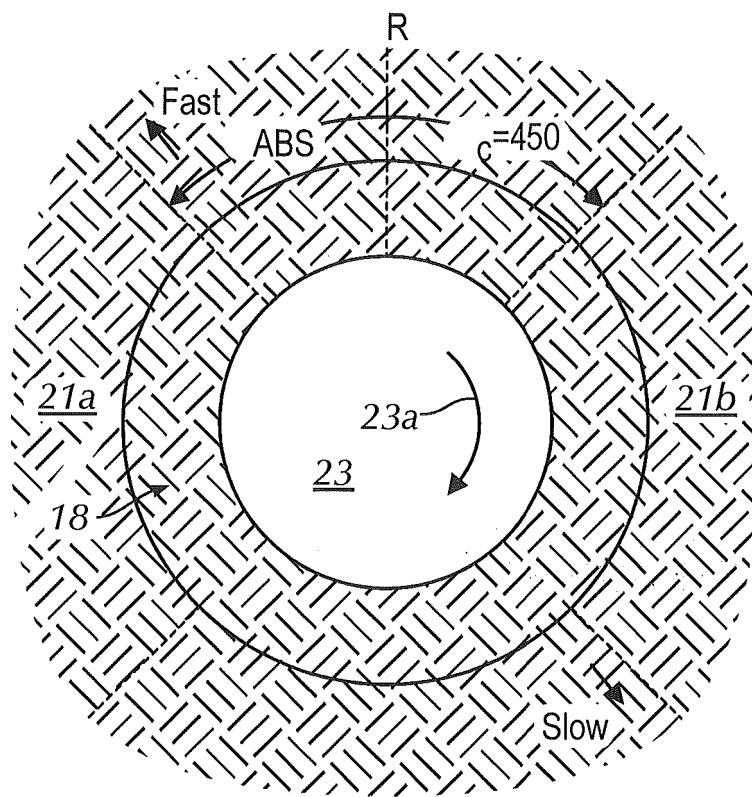
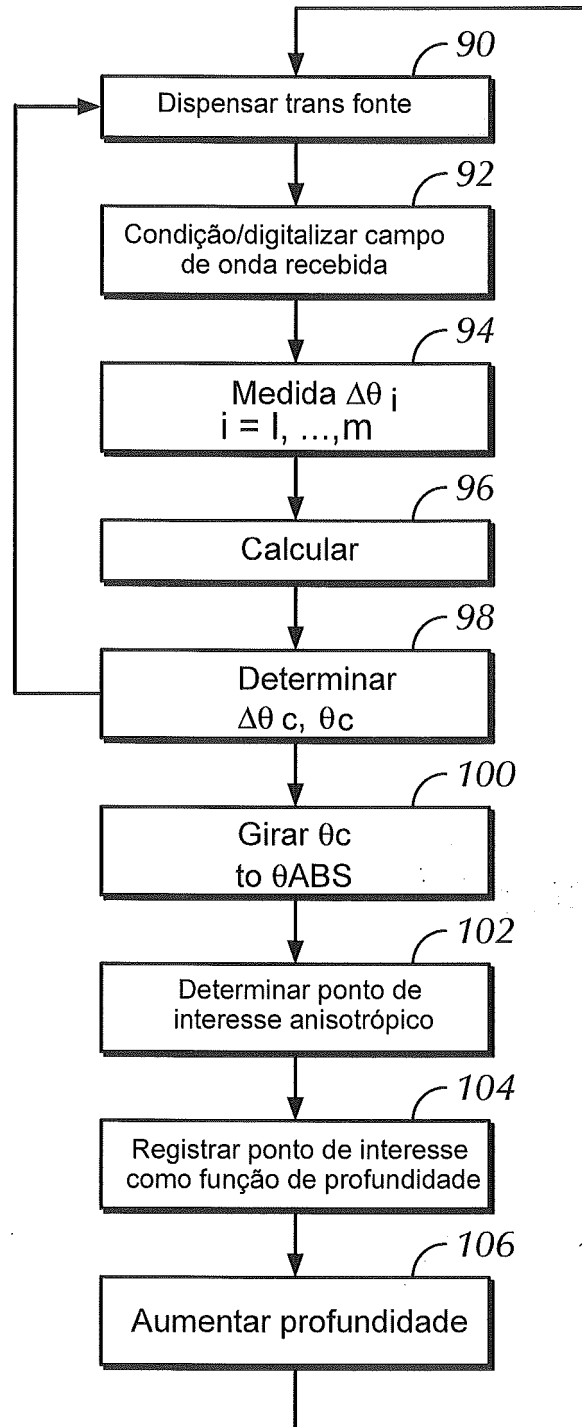


FIG. 12

**FIG. 13**

**FIG. 14**