



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

(11) PI 0711071-5 B1

(22) Data do Depósito: 26/04/2007

(45) Data de Concessão: 06/02/2018



(54) Título: MÉTODO E APARELHO PARA AVALIAÇÃO DE FORMAÇÃO DE TERRENO E MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR PARA USO COM ESTE APARELHO

(51) Int.Cl.: E21B 47/00

(30) Prioridade Unionista: 26/04/2006 US 60/794,988

(73) Titular(es): BAKER HUGHES INCORPORATED

(72) Inventor(es): TSILI WANG; ALEXANDRE N. BESPALOV; BILL H. CORLEY; DANIEL T. GEORGI; MICHAEL B. RABINOVICH

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**MÉTODO E APARELHO PARA AVALIAÇÃO DE FORMAÇÃO DE TERRENO E MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR PARA USO COM ESTE APARELHO**".

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

5 1. Campo da Invenção

A presente invenção refere-se ao uso de medições de resistividade para avaliação de formações de terreno tendo uma estratificação no qual a inclinação varia afastando-se de um furo de poço.

2. Antecedentes da Técnica

10 Ferramentas de perfilagem de indução eletromagnética e propagação de onda são comumente usadas para a determinação de propriedades elétricas de formações circundando um furo de poço. Estas ferramentas de perfilagem proporcionam medições de resistividade aparente (ou condutividade) da formação que, quando interpretadas, são diagnósticos das propriedades petrofísicas da formação e dos fluidos ali.

15 Os princípios físicos de perfilagem de poço por indução eletromagnética são descritos, por exemplo, em H. G. Doll, Introduction to Induction Logging and Application to Logging of Wells Drilled with Oil Based Mud, Journal of Petroleum Technology, vol. 1, p. 148, Society of Petroleum Engineers, Richardson Tex. (1949). Muitos melhoramentos e modificações em instrumentos de resistividade de indução eletromagnética foram divisados desde a publicação da referência de Doll, supra. Os exemplos dessas modificações e desses melhoramentos podem ser encontrados, por exemplo, na Patente U.S. Nº 4.837.517 de Barber et al., na Patente U.S. Nº 5.157.605 emitida para Chandler et al, e na Patente U.S. Nº 5.452.761 emitida para Beard et al.

25 Nos últimos anos, um uso crescente tem sido feito de medições de resistividade de componente múltiplo, que respondem a resistividades verticais e horizontais (ou, de forma equivalente, condutividades) de formações anisotrópicas. Os termos "horizontal" e "vertical" conforme comumente usados e conforme usados neste documento se referem a direções que são paralelas e perpendiculares à estratificação, e as resistividades nestas di-

30

reções são comumente a mínima e a máxima em uma formação anisotrópica.

A Patente U.S. Nº 5.999.883 emitida para *Gupta et al*, cujo conteúdo é plenamente incorporado aqui como referência, mostra um método para a determinação da condutividade horizontal e vertical de formações de terreno anisotrópicas. Os sinais de indução eletromagnética induzidos por transmissores de indução orientados ao longo de três eixos geométricos mutuamente ortogonais são medidos. Um dos eixos geométricos mutuamente ortogonais é substancialmente paralelo a um eixo geométrico de instrumento de perfilagem. Os sinais de indução eletromagnética são medidos usando-se primeiros receptores, cada um tendo um momento magnético paralelo a um dos eixos geométricos ortogonais e usando-se segundos receptores, cada um tendo um momento magnético perpendicular a um dos eixos geométricos ortogonais, o qual também é perpendicular ao eixo geométrico de instrumento. Um ângulo relativo de rotação daquele perpendicular dos eixos ortogonais é calculado a partir dos sinais do receptor perpendicular ao eixo geométrico do instrumento. Um tensor de medição intermediário é calculado pela rotação das magnitudes dos sinais de receptor através de um negativo do ângulo de rotação. Um ângulo relativo de inclinação de um dos eixos geométricos ortogonais, o qual é paralelo ao eixo geométrico do instrumento é calculado, a partir das magnitudes rodadas, com respeito a uma direção da condutividade vertical. As magnitudes rodadas são rodadas através de um negativo do ângulo de inclinação. A condutividade horizontal é calculada a partir das magnitudes dos sinais de receptor após a segunda etapa de rotação. Um parâmetro de anisotropia é calculado a partir das magnitudes de sinal de receptor, após a segunda etapa de rotação. A condutividade vertical é calculada a partir da condutividade horizontal e do parâmetro de anisotropia.

A Patente U.S. Nº 6.466.872 de *Kriegshauser et al*. que tem a mesma cessionária que o presente pedido e cujo conteúdo é plenamente incorporado aqui como referência mostra o uso de uma ferramenta de perfilagem de componente múltiplo (a ferramenta 3DEX® de Baker Hughes In-

corporated) para a determinação dos parâmetros de resistividade anisotrópica de um reservatório laminado. Conforme seria conhecido por aqueles versados na técnica, um reservatório laminado como esse, que tem camadas de resistividades diferentes, exibe isotropia transversal, mesmo se as camadas em si forem isotrópicas. Uma ferramenta de perfilagem de componente múltiplo como essa tem sensibilidade azimutal. *Kriegshauser* mostra um método de análise de dados a partir de uma ferramenta de perfilagem de componente múltiplo para determinar saturações de água das frações de areia e folhelho do reservatório. O modelo usado em *Kriegshauser* assume que o eixo geométrico de anisotropia é normal ao plano de estratificação. Modelos similares foram assumidos, por exemplo, na Patente U.S. Nº 6.618.676 de *Kriegshauser et al.*, e na Patente U.S. Nº 6.643.589 de *Zhang et al.*

A ferramenta 3DEX® tem uma profundidade de investigação na formação que tipicamente é de vários metros e corresponde a uma inclinação e azimute de escala grande. Em contraste, as inclinações e azimutes a partir dos dispositivos de formação de imagem são derivados a partir das fronteiras de propriedade (por exemplo, resistividade) de leitos de formação ou laminações. Quando os leitos ou as laminações estão na resolução dos dispositivos de formação de imagem, as inclinações e azimutes são determinados de forma confiável. Em contraste, as medições da 3DEX® são sensíveis à orientação do tensor de condutividade da formação. As medições nos permitem determinar de forma acurada as inclinações e azimutes na ausência de fronteiras de leito, desde que exista uma anisotropia de formação mensurável. Daí, em muitos casos, as inclinações e azimutes derivados de formação de imagem podem ser bastante diferentes daqueles derivados pela 3DEX®. Um exemplo típico seria em uma camada de folhelho anisotrópica espessa em que as ferramentas de formação de imagem não podem prover inclinações e azimutes confiáveis, mas a ferramenta 3DEX® o fará.

Mais ainda, profundidades de investigação diferentes (DOI) e uma resolução vertical diferente da medição com 3DEX® e dos perfis de formação de imagem de furo de poço convencionais em algumas circunstân-

cias resultarão em inclinações e azimutes diferentes. As ferramentas de formação de imagem de furo de poço usualmente têm DOIs menores do que uns poucos centímetros, ao passo que a medição com 3DEX® lê metros na formação. Portanto, as duas medições lerão os mesmos ângulos se os ângulos não mudarem significativamente a partir do furo de poço. Quando os

5 ângulos de formação mudam lateralmente, deve ser entendido como o "cálculo da média" das medições afeta os dados de ângulo derivados a partir das medições da ferramenta 3DEX®.

A finalidade da presente invenção é identificar e usar medições

10 de componente múltiplo para a caracterização de formações geológicas afastadas a partir do furo de poço e/ou para comparação dos resultados desta caracterização com perfis de formação de imagem de furo de poço.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

Uma modalidade descrita aqui é um método de avaliação de

15 uma formação de terreno. O método inclui a feitura de medições com uma ferramenta de perfilagem que tem uma primeira profundidade de investigação em um furo de poço na formação de terreno. Uma primeira inclinação da formação é estimada usando-se as medições de componente múltiplo. A inclinação estimada é comparada com uma medição de segunda inclinação

20 no furo de poço. Os resultados da comparação são armazenados em um meio tangível. Uma ferramenta de perfilagem de componente múltiplo pode ser usada. A medição de segunda inclinação pode ser uma medição de inclinação local no furo de poço, que pode ser feita por uma ferramenta de formação de imagem de resistividade de furo de poço, uma ferramenta de

25 formação de imagem de densidade e/ou uma ferramenta de formação de imagem de raios gama. A segunda medição de inclinação pode ser uma medição feita com uma ferramenta de perfilagem de componente múltiplo tendo uma segunda profundidade de investigação diferente da primeira profundidade de investigação. Uma relação de uma altura de uma ondulação na

30 formação de terreno para um comprimento de onda da ondulação pode ser determinada. O método ainda pode incluir uma estimativa de um ângulo de inclinação de uma não conformidade na formação. Medições feitas com a

ferramenta de perfilagem de componente múltiplo ainda podem ser usadas para a estimativa de uma resistividade horizontal da formação, uma resistividade vertical da formação e/ou um ângulo de inclinação da formação. A resistividade horizontal estimada e a resistividade vertical ainda podem ser usadas para a estimativa de uma porosidade de formação, um volume de folhelho fracionário, uma resistividade de folhelho, uma fração de granulometria grosseira de uma seqüência laminada e/ou uma fração de granulometria fina de uma seqüência laminada. O ângulo de inclinação estimado da não conformidade pode ser usado para a perfuração de um poço com desvio. O método ainda pode incluir o transporte da ferramenta de perfilagem de componente múltiplo para o furo de poço usando-se um cabo de aço, um elemento tubular de perfuração ou um cabo liso.

Uma outra modalidade mostrada aqui é um aparelho para avaliação de uma formação de terreno. O aparelho inclui uma ferramenta de perfilagem que é configurada para ser transportada em um furo de poço na formação de terreno. O aparelho também inclui um processador configurado para estimar um primeiro ângulo de inclinação da formação usando as medições feitas pela ferramenta de perfilagem, comparar a inclinação estimada com uma medição de segunda inclinação no furo de poço, e armazenar os resultados da comparação em um meio tangível. O aparelho ainda pode incluir uma ferramenta de formação de imagem configurada para fazer a medição de segunda inclinação. A ferramenta de formação de imagem pode ser uma ferramenta de formação de imagem por resistividade, uma ferramenta de formação de imagem de raios gama e/ou uma ferramenta de formação de imagem de densidade. A ferramenta de perfilagem de componente múltiplo pode ser configurada para ter uma segunda profundidade de investigação e prover a medição de segunda inclinação. O processador ainda pode ser configurado para determinar a relação de uma altura de uma ondulação na formação de terreno para um comprimento de onda da ondulação. O processador ainda pode ser configurado para estimar um ângulo de inclinação de uma não conformidade na formação. O processador ainda pode ser configurado para usar as medições feitas com a ferramenta de perfilagem de com-

ponente múltiplo para a estimativa de uma resistividade horizontal da formação, uma resistividade vertical da formação e/ou um ângulo de inclinação da formação. O processador ainda pode ser configurado para usar a resistividade horizontal e a resistividade vertical estimadas da formação, estimar
 5 uma porosidade de formação, um folhelho fracionário em junho, uma resistividade de folhelho, uma fração de granulometria grosseira de uma seqüência laminada e/ou uma fração de granulometria fina de uma seqüência laminada. O processador ainda pode ser configurado para usar o ângulo de inclinação estimado da não conformidade para a perfuração de um poço com
 10 desvio. O aparelho ainda pode incluir um dispositivo de transporte configurado para transportar a ferramenta de perfilagem de componente múltiplo para dentro do furo de poço. O dispositivo de transporte pode ser um cabo de aço, um elemento tubular de perfuração ou um cabo liso.

Uma outra modalidade mostrada aqui é um meio que pode ser
 15 lido em computador para uso com um aparelho para avaliação de uma formação de terreno. O aparelho inclui uma ferramenta de perfilagem de componente múltiplo configurada para ser transportada em um furo de poço na formação de terreno e um dispositivo de formação de imagem configurado para produzir uma imagem da formação de terreno. O meio inclui instruções
 20 que permitem que o processador compare a inclinação estimada com uma segunda inclinação estimada a partir da imagem, e armazene os resultados em um meio tangível. O meio pode incluir uma ROM, uma EPROM, uma EEPROM, uma memória flash e/ou um disco ótico.

BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

25 A presente invenção é mais bem entendida com referência às figuras a seguir, nas quais números iguais se referem a componentes iguais e nas quais:

a Figura 1 ilustra um instrumento de indução disposto em um furo de poço que penetra em formações de terreno;

30 a Figura 2 (técnica anterior) ilustra o arranjo de bobinas transmissoras e receptoras em uma ferramenta de perfilagem de componente múltiplo por indução comercializada sob o nome 3DEX®;

- a Figura 3 é um modelo de um furo de poço com rugosidades;
- a Figura 4 ilustra a insensibilidade relativa de medições com 3DEX® à rugosidade de furo de poço;
- a Figura 5 é um modelo que mostra um aumento gradual na
5 inclinação com a profundidade do furo de poço;
- a Figura 6 mostra medições com a 3DEX® e parâmetros de formação estimados para o modelo usado na Figura 5;
- a Figura 7 é um modelo de ondulação que representa uma formação geológica;
- 10 a Figura 8 mostra inclinações de formação calculadas a partir de perfis de 3DEX® para um modelo de leito de ondulação da Figura 7;
- a Figura 9 ilustra uma estratificação transversal na fronteira de uma areia de canal em uma camada de folhelho;
- a Figura 10 mostra as respostas de componente principal e
15 transversal e as resistividades horizontal e vertical derivadas, a inclinação e o azimute para o Caso I de uma areia de canal;
- a Figura 11 mostra as respostas de componente principal e transversal e as resistividades horizontal e vertical derivadas, a inclinação e o azimute para o Caso II de uma areia de canal;
- 20 a Figura 12 mostra as respostas de componente principal e transversal e as resistividades horizontal e vertical derivadas, a inclinação e o azimute para o Caso III de uma areia de canal;
- a Figura 13 mostra as respostas de componente principal e transversal e as resistividades horizontal e vertical derivadas, a inclinação e
25 o azimute para o Caso IV de uma areia de canal; e
- a Figura 14 mostra variações das medições de componente principal para o modelo da Figura 7.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

- 30 Com referência, agora, à Figura 1, um instrumento de perfilagem de poço por indução eletromagnética 10 é mostrado disposto em um furo de poço 2 perfurado através de formações de terreno. As formações de terreno são mostradas geralmente em 4. O instrumento 10 pode ser baixado para e

retirado do furo de poço 2 pelo uso de um cabo elétrico armado 6 ou um transporte similar conhecido na técnica. O instrumento 10 pode ser montado a partir de três subseções: uma unidade de eletrônica auxiliar 14 disposta em uma extremidade do instrumento 10; uma unidade de mandril de bobina 8 afixada à unidade de eletrônica auxiliar 14; e uma unidade de eletrônica de receptor / processamento de sinal / telemetria 12 afixada à outra extremidade da unidade de mandril de bobina 8, esta unidade 12 tipicamente sendo afixada ao cabo 6.

A unidade de mandril de bobina 8 inclui bobinas transmissoras e receptoras por indução, conforme será explicado adicionalmente, para a indução de campos eletromagnéticos nas formações de terreno 4 e para recebimento de sinais de voltagem induzidos por correntes fluindo nas formações de terreno 4, como resultado dos campos eletromagnéticos induzidos ali.

A unidade de eletrônica auxiliar 14 pode incluir um gerador de sinal e amplificadores de potência (não mostrados) para fazerem com que correntes alternadas de frequências selecionadas fluam através de bobinas transmissoras na unidade de mandril de bobina 8. Um processador o qual controla a operação da ferramenta e o processamento de dados adquiridos pode fazer parte da unidade de eletrônica. Alternativamente, parte ou todo o processamento e controle pode ser feito por um processador de superfície.

A unidade de eletrônica de receptor / processamento de sinal / telemetria 12 pode incluir circuitos de receptor (não mostrados) para a detecção de voltagens induzidas em bobinas receptoras na unidade de mandril de bobina 8, e circuitos para processamento destas voltagens recebidas (não mostrados) para sinais representativos das condutividades de várias camadas, mostradas como 4A a 4F das formações de terreno 4. Por uma questão de conveniência, a unidade de eletrônica de receptor / processamento de sinal / telemetria 12 pode incluir uma telemetria de sinal para transmissão dos sinais relacionados à condutividade para a superfície do terreno ao longo do cabo 6 para processamento adicional ou, alternativamente, pode armazenar os sinais relacionados à condutividade em um dispositivo de gravação apropriado (não mostrado) para processamento após o

instrumento 10 ser retirado do furo de poço 2.

Com referência à Figura 2, a configuração de bobinas transmissoras e receptoras no instrumento de perfilagem por indução eletromagnética 3DEX® de Baker Hughes é mostrada. Três transmissores ortogonais 101, 103 e 105 que são referidos como os transmissores T_x , T_z , e T_y são mostrados (o eixo z é o eixo geométrico longitudinal da ferramenta). Correspondentes aos transmissores 101, 103 e 105 são associados os receptores 107, 109 e 111, referidos como os receptores R_x , R_z , e R_y , para a medição dos campos magnéticos correspondentes. Em um modo de operação da ferramenta, as componentes H_{xx} , H_{yy} , H_{zz} , H_{xy} , e H_{xz} são medidas, embora outras componentes também possam ser usadas. Deve ser notado, ainda, que as medições feitas com outras inclinações de bobina também podem ser usadas para o método da presente invenção usando-se os princípios bem conhecidos de rotação de coordenada.

Demonstrou-se, primeiramente, a insensibilidade relativa de medições feitas com a ferramenta 3DEX™ para rugosidade de furo de poço. Um modelo de um furo de poço com rugosidade com ranhuras periódicas é mostrado na Figura 3. Cada ranhura tem 5,1 cm (2") de altura e é 5,1 cm (2") mais larga do que o tamanho de furo normal. A resistividade da lama é tomada como de 0,1 Ω -m para uma lama condutiva. Também é mostrado na Figura 3 o sistema de coordenadas usado neste documento. As respostas 3DEX® e a inclinação de formação, o azimute e a anisotropia de resistividade calculados são mostrados na Figura 4. As resistividades horizontal e vertical processadas são indicadas por 201 e 203 respectivamente enquanto a inclinação e o azimute interpretados são indicados por 205 e 207, respectivamente. É claro que a inclinação, o azimute e a anisotropia de resistividade calculados não são significativamente afetados pela rugosidade do furo de poço. Resultados similares (não mostrados) foram notados para uma lama resistiva com uma resistividade de 1000 Ω -m.

Muitas formações geológicas, tais como canais, são caracterizados por uma mudança gradual na inclinação. Para simulação de uma mudança gradual de inclinação, nós usamos um modelo mostrado na Figura 5,

no qual a inclinação aumenta em $6,6^\circ$ por 10 m (20° por 100 pés). A formação é anisotrópica com R_h e R_v iguais a 1 Ω -m e 4 Ω -m, respectivamente. O tensor de condutividade é inclinado de acordo com o ângulo de inclinação local. Diferentemente de uma formação anisotrópica com planos de estratificação paralelos, uma mudança gradual na inclinação causa planos de estratificação não paralelos. Daí, R_h e R_v medidos por um volume maior serão diferentes daqueles a partir de por um volume menor. Em outras palavras, a anisotropia de resistividade será dependente de escala. Por outro lado, a anisotropia de resistividade para uma formação com planos de estratificação paralelos será independente de escala.

São mostradas na Figura 6 as exibições das medições de componente transversal (trilha 303), as medições de componente principal (trilha 305), as resistividades processadas (trilha 301), a inclinação de formação processada (trilha 307) e o azimute de formação processado (trilha 309). As medições zx e xz 315 na trilha 303 são muito similares, enquanto a medição zz 317 na trilha 305 é claramente separada das medições xx e yy 319 na trilha 305. R_h e R_v são mostradas por 311 e 313 respectivamente na trilha 301. Os ângulos de inclinação e de azimute derivados da resposta de 3DEX[®] de componente principal e transversal são mostrados por 321 e 323, respectivamente. Conforme pode ser visto, os ângulos de inclinação 321 e de azimute 323 são estimados de forma acurada. O ângulo de inclinação aumenta linearmente a partir de 0° no topo até 20° no fundo, como no modelo de entrada. A anisotropia de resistividade local também é calculada de forma acurada. Na Figura 6, as componentes transversais 315 aumentam (de magnitude) de forma permanente, conforme o ângulo de inclinação aumenta. Conforme será discutido adicionalmente abaixo, a resposta yy não muda ao longo da faixa de profundidade inteira, porque a inclinação não muda na direção y (para fora do papel). A condutividade aparente zz diminui ligeiramente, conforme a inclinação aumenta, ao passo que a resposta xx aumenta ligeiramente. Estas variações são facilmente entendidas a partir da dependência de xx e zz das condutividades efetivas em uma formação anisotrópica com inclinação. Isto é discutido adicionalmente abaixo.

Voltando-se, agora, para a Figura 7, um furo de poço 401 é mostrado em uma formação geológica que tem variações espaciais na direção de estratificação afastando-se do furo de poço, mas com pouca mudança na espessura de leito. Essas formações geológicas são comumente observadas em depósitos de turbidito. Estes são depósitos sedimentares formados por correntes de turbidez em águas profundas na base do talude continental e no plano abissal. Neste documento, nós aproximamos uma formação geológica como essa por uma onda senoidal. A altura de pico a vale é dada por h e o comprimento de onda é L . Nós examinamos um caso em que a formação é anisotrópica com as R_h e R_v locais sendo de $1 \Omega\text{-m}$ e $4 \Omega\text{-m}$, respectivamente. Para este tipo de formações, os ângulos de inclinação derivados do perfil de 3DEX[®] podem ou não estar de acordo com aqueles a partir de perfis de imagem, dependendo do comprimento de onda da onda senoidal. O ângulo derivado de formação de imagem reflete o ângulo da formação ao longo da trajetória do poço. O ângulo derivado pela 3DEX[®], por outro lado, representa um ângulo médio por um volume maior caracterizado pela DOI da ferramenta. É claro que, quando o comprimento de onda é significativamente menor do que a DOI da ferramenta, o ângulo de inclinação da 3DEX[®] deve medir uma inclinação de formação média e ter pouca dependência da localização da trajetória do poço. Se o comprimento de onda estiver bem além da DOI da ferramenta, a inclinação calculada refletirá a média calculada localmente da inclinação centralizada no furo de poço. Neste caso, a inclinação calculada dependerá da localização do percurso de poço de uma maneira similar àquela dos dados de ângulo derivados de perfil de imagem. Entre os dois casos extremos, o ângulo de inclinação da 3DEX[®] será alguma média da inclinação média e das inclinações locais. Assim, pela comparação das medições de inclinação local, tais como aquelas feitas por um dispositivo de formação de imagem, com estimativas de inclinação a partir de medições de 3DEX[®], é possível inferir a variação espacial de inclinações da formação afastando-se do furo de poço.

Na Figura 7, assumiu-se que a inclinação média é de 0° . O poço é vertical e está localizado na parte de inclinação máxima da formação. A

inclinação máxima é dado por:

$$\theta_{\max} = \tan^{-1} \left(\frac{\pi h}{L} \right) \quad (1).$$

Considerou-se três comprimentos de onda diferentes: 2 m, 10 m e 20 m. Em todos os três casos, nós mantemos o ângulo de inclinação máximo o mesmo em 25°. Para fazê-lo, nós fazemos com que a altura de ondulação h seja de 0,3 m, 0,75 m e 1,5 m, respectivamente. As inclinações calculadas são mostrados na Figura 8 por 421. A abscissa é o comprimento de onda e a ordenada é a inclinação estimada. Conforme esperado, a inclinação calculada para $L = 2$ m se aproxima da inclinação média (0°) da formação, porque o comprimento de onda de ondulação é substancialmente menor do que a DOI da ferramenta. Quando $L = 20$ m, a inclinação calculada é de aproximadamente 23°, próximo da inclinação local de 25° na trajetória de furo de poço. As R_h s calculadas em todos os casos são as mesmas que os valores verdadeiros. As R_v s variam em menos de 12%. Este exemplo demonstra que, quando a altura de ondulação é relativamente pequena, se comparada com o comprimento de onda, as R_h e R_v verdadeiras podem ser determinadas a partir dos perfis de 3DEX®.

Quando a altura de ondulação é grande, o modelo será mais similar a uma depressão (slump) em um ambiente de águas profundas. Nós prevemos que ondulações de amplitude mais alta reduzirão a anisotropia efetiva da formação. Para demonstração, façamos $L = h = 2$ m e $L = h = 0,3$ m. Em ambos os casos, a relação R_v/R_h é reduzida para aproximadamente 2, se comparada com a relação verdadeira de 4. De forma mais importante, a anisotropia efetiva agora inclina a 90°. De fato, as resistividades equivalentes de um leito com ondulação nas direções horizontal (x) e vertical (z) podem ser estimadas a partir da periodicidade do leito. As condutividades locais em qualquer ponto no meio são dadas por:

$$\sigma_x = \sigma_h \cos^2 \theta + \sigma_v \sin^2 \theta \quad (2),$$

e

$$\sigma_z = \sigma_h \sin^2 \theta + \sigma_v \cos^2 \theta \quad (3),$$

onde θ é a inclinação local da onda senoidal

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\pi h}{L} \cos \frac{2\pi x}{L} \right) \quad (4),$$

e x varia entre 0 e 1. A resistividade equivalente na direção x é aproximada por:

$$R_x^{eq} = \frac{1}{D} \int_0^D \frac{1}{\sigma_x} dx \quad (5),$$

- 5 com D sendo a DOI da ferramenta 3DEX®. A resistividade equivalente na direção z é dada por:

$$R_z^{eq} = \left(\frac{1}{D} \int_0^D \sigma_z dx \right)^{-1} \quad (6).$$

Quando L é significativamente menor do que a DOI de ferramenta, a quantidade D nas Equações (5) e (6) pode ser substituída por L . Usan-
 10 do-se as Equações (3) e (4), nós calculamos, para $L = h = 2$ m, $R_x^{eq} = 2,4 \Omega\text{-m}$, e $R_z^{eq} = 1,3 \Omega\text{-m}$. Estes valores são muito próximos daqueles invertidos a partir das respostas de 3DEX® (2,3 e 1,2 $\Omega\text{-m}$, respectivamente). Também
 pode ser visto a partir das Equações (5) e (6) que quando $h \gg L/2$, a anisotropia de um leito com ondulação colapsará, isto é, as resistividades horizon-
 15 tal e vertical equivalentes serão aproximadamente as mesmas. Isto é verdadeiro, independentemente dos valores de R_h e R_v . Assim, pela feitura de medições com as ferramentas 3DEX™ com profundidades de investigação diferentes, é possível estimar uma relação da altura de ondulações para o comprimento de onda das ondulações.

20 As formações geológicas podem incluir areias de canal que comumente cortam e passam através de sedimentos existentes, causando um desvio litológico e, tipicamente, de ângulo de estratificação. A fronteira de canal entre as areias de canal e os sedimentos preexistentes geralmente não é paralela e, portanto, a interpretação de inclinação a partir da 3DEX® é
 25 muito mais difícil do que para um conjunto de leitos planos em camadas. Na Figura 9, a areia de canal 451 e a formação subjacente 461 podem ser anisotrópicas e ter ângulos de inclinação diferentes. A base da areia define uma superfície de não conformidade. No exemplo mostrado, a areia de canal tem uma inclinação em 20° para a direita. A formação subjacente é assumida

como sendo horizontal. A fronteira entre a areia e a formação subjacente inclina em 30° para a direita. Quatro casos diferentes serão considerados, conforme listado na Tabela 1.

- Para facilitar a análise, nós definimos uma quantidade, S , denominada a distância de influência de camadas adjacentes (shoulder). S é a distância medida ao longo do furo de poço a partir de uma fronteira de leito na qual o leito remoto (camadas adjacentes) terá um efeito desprezível (menor do que 10%) sobre os parâmetros de formação interpretados. Nós pre-
- 5 fazemos com que S_{Rh} , S_{Rv} , S_i e S_j sejam as distâncias de influência de camadas adjacentes para a R_h , R_v , inclinação e azimuth, respectivamente.
- 10

Tabela I: Quatro exemplos diferentes de um canal de areia

	$R_{h,sd} = 10 \Omega\text{-m}$ $R_{v,sd} = 10 \Omega\text{-m}$	$R_{h,sd} = 5 \Omega\text{-m}$ $R_{v,sd} = 10 \Omega\text{-m}$
$R_{h,sh} = 1 \Omega\text{-m}$ $R_{v,sh} = 2 \Omega\text{-m}$	Caso I	Caso II
$R_{h,sh} = 1 \Omega\text{-m}$ $R_{v,sh} = 4 \Omega\text{-m}$	Caso III	Caso IV

- No Caso I, a areia é isotrópica; daí, sua inclinação não é definida. A formação subjacente mergulha em 0° . Conforme mostra a Figura
- 15 10, os dados começam a refletir a influência da formação subjacente tão longe quanto a 11,6 m (38 pés) a partir da fronteira de areia 401, quando a ferramenta se aproxima da fronteira a partir de acima da fronteira de areia. Em outras palavras, S_{Rh} e S_{Rv} são ambos aproximadamente de 11,6 m (38
- 20 pés). Contudo, mudanças significativas nas resistividades calculadas ocorrem apenas quando a ferramenta chega em 6,1 m (20 pés) a partir da fronteira de areia. Após penetrar na fronteira, a ferramenta lê as R_h e R_v verdadeiras da formação subjacente, desde que a ferramenta esteja a aproximadamente 3,7 m (12 pés) e 4,9 m (16 pés) a partir da fronteira, respectivamente. A fronteira de canal faz com que as resistividades
- 25 calculadas sejam subestimadas imediatamente direto acima da fronteira e superestimadas abaixo da fronteira. A localização de fronteira é indicada pelas mudanças abruptas nas R_h e R_v calculadas 404. Na realidade, ruídos de medição ou um perfil de resistividade transição podem borrar as

de transição podem borrar as mudanças de resistividade abruptas, tornando a identificação da fronteira de canal menos direta.

Os ângulos de inclinação são calculados de forma acurada para a formação subjacente quando a ferramenta estiver além de uma distância de influência de camadas adjacentes de $S = 4,57 \text{ m}$ (15 pés). É para ser notado que a inclinação da fronteira de canal também parece bem resolvido. O ângulo de inclinação calculado 407 é de aproximadamente 27° , próximo da inclinação verdadeira de 30° . Este exemplo mostra que, desde que haja um contraste de resistividade suficiente através da fronteira de canal, a inclinação da fronteira (não conformidade) pode ser obtida a partir de perfis de 3DEX®, mesmo na presença de leitos não conforme acima e/ou abaixo da fronteira.

O Caso II é similar ao Caso I, exceto pelo fato de a areia agora ser anisotrópica. Próximo da fronteira de areia, há três inclinações diferentes envolvidos – a inclinação da areia, a inclinação da formação subjacente e a inclinação da fronteira de canal. Os resultados de simulação mostrados na Figura 11 indicam que as inclinações da areia e da formação subjacente são derivados de forma acurada quando a ferramenta está além das respectivas distâncias de influência de camadas adjacentes de $S_\theta = 7,62 \text{ m}$ (25 pés) e $5,49 \text{ m}$ (18 pés). A inclinação calculada (23°) da fronteira de canal é uma estimativa razoável da inclinação verdadeira. As distâncias de influência de camadas adjacentes para as R_h e R_v de areia são $S_{Rh} = 5,79 \text{ m}$ (19 pés) e $S_{Rv} = 8,84 \text{ m}$ (29 pés) respectivamente. Para a formação subjacente, $S_{Rh} = 4,88 \text{ m}$ (16 pés) e $S_{Rv} = 8,84 \text{ m}$ (29 pés).

O Caso III é similar ao Caso I, exceto pelo fato da R_v da formação subjacente ser aumentada de $2 \Omega\text{-m}$ para $4 \Omega\text{-m}$. A relação de anisotropia também é aumentada para 4. Conforme a Figura 12 mostra, o efeito de camadas adjacentes do corpo de areia sobre a resposta de formação subjacente se torna mais forte, devido à resistividade reduzida geral da formação subjacente. Para a formação subjacente, $S_{Rh} = 4,57 \text{ m}$ (15 pés), $S_{Rv} = 11,58 \text{ m}$ (38 pés), respectivamente. Este exemplo mostra que a R_h e a R_v de uma formação anisotrópica podem ser resolvidas diferentemente. Devido ao fato

da R_v ser sempre maior do que a R_h , a R_h usualmente é mais bem resolvida por uma ferramenta de indução. O ângulo de inclinação parece ser menos afetado pelo efeito de leito adjacente (shoulder). A inclinação calculada para a formação subjacente se aproxima do ângulo de inclinação verdadeiro (0°), quando as medições estão em 5,49 m (18 pés) ou menos da fronteira. O ângulo de inclinação para a fronteira de areia é de aproximadamente 20° , substancialmente menor do que a inclinação verdadeira de 30° .

Para o Caso IV, ambas a areia e a formação subjacente são anisotrópicas. As relações de anisotropia são 2 e 4, respectivamente. Espera-se que o contraste de resistividade geral reduzido através da fronteira de canal apresente uma dificuldade adicional para a determinação da inclinação da fronteira. Todos estes são confirmados na Figura 13. A inclinação calculada mostra uma transição suave de 20° na areia para 0° na formação subjacente. A inclinação na fronteira de canal é de aproximadamente 17° , bem abaixo da inclinação verdadeira de 30° .

A Tabela 2 resume as distâncias de influência de camadas adjacentes para todos os quatro casos. Concluiu-se que a R_h geralmente é menos influenciada por uma fronteira de canal do que a R_v . A inclinação de cada formação (areia ou leito subjacente) pode ser calculada de forma acurada quando a R_h está bem resolvida.

Tabela 2: Influências de camadas adjacentes para o exemplo de canal.

Caso	Ferramenta na areia (mais resistiva)			Ferramenta na formação subjacente (mais condutiva)		
	S_{Rh} m (ft)	S_{Rv} m (ft)	S_θ m (ft)	S_{Rh} m (ft)	S_{Rv} m (ft)	S_θ m (ft)
I	11,6 (38)	11,6 (38)	N/A	3,7 (12)	4,9 (16)	4,57 (15)
II	5,79 (19)	8,84 (29)	7,62 (25)	4,88 (16)	8,84 (29)	5,49 (18)
III	11,58 (38)	11,58 (38)	N/A	4,57 (15)	11,58 (38)	5,49 (18)
IV	5,49 (18)	9,14 (30)	5,18 (17)	4,57 (15)	10,67 (35)	4,9 (16)

A Aproximação de Anisotropia Fraca

Nesta seção, nós explicamos o comportamento de resposta de componente principal na Figura 7 usando uma teoria de aproximação de anisotropia fraca mostrada no Pedido de Patente U.S. Nº de Série 11/321.497 de Wang et al, que tem a mesma cessionária que a presente invenção e cujo conteúdo é plenamente incorporado aqui como referência. A componente zz responde largamente à condutividade efetiva em um plano normal ao eixo geométrico de ferramenta (z) e a componente xx à condutividade efetiva em um plano normal ao eixo x. As condutividades efetivas no sistema de coordenadas de ferramenta podem ser derivadas primeiramente pela rotação do tensor de condutividade a partir do sistema de coordenadas da formação para o sistema de coordenadas da ferramenta e, então, usando-se a conjectura de Worthington (1981).

Assumindo o ângulo de inclinação local θ com a direção x, pode-se rodar o tensor de condutividade a partir do sistema de coordenadas da formação para o sistema de coordenadas da ferramenta como:

$$\sigma^* = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^* & 0 & \sigma_{13}^* \\ 0 & \sigma_{22}^* & 0 \\ \sigma_{31}^* & 0 & \sigma_{33}^* \end{bmatrix} \quad (7),$$

onde:

$$\begin{aligned} \sigma_{11}^* &= \sigma_h \cos^2 \theta + \sigma_v \sin^2 \theta \\ \sigma_{22}^* &= \sigma_h \\ \sigma_{33}^* &= \sigma_h \sin^2 \theta + \sigma_v \cos^2 \theta \\ \sigma_{13}^* &= \sigma_{31}^* = (\sigma_h - \sigma_v) \sin \theta \cos \theta \end{aligned} \quad (8).$$

Nas equações acima, σ_h e σ_v são as condutividades paralela e normal aos planos de estratificação locais, respectivamente. Os subscritos 1, 2 e 3 representam as direções x, y e z, respectivamente, no sistema de coordenadas da ferramenta.

Foi substituído o tensor de condutividade rodado por um sistema de anisotropia biaxial segundo a aproximação de anisotropia fraca como:

$$\sigma^* \approx \begin{bmatrix} \sigma_{11}^* & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22}^* & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33}^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

Para a Equação (9) ser válida,

$$\left| \frac{\sigma_{13}^*}{\sigma_h} \right| = \left(1 - \frac{\sigma_v}{\sigma_h} \right) |\sin \theta \cos \theta| < \varepsilon \quad (10),$$

onde ε é um número positivo pequeno.

5

Para a estimativa da resposta de indução de componente múltiplo a uma formação anisotrópica biaxialmente, nós ainda substituímos a Equação (9) por um meio isotrópico transversalmente equivalente (TI). Conforme mostrado por Wang, o tensor TI equivalente será diferente para as diferentes componentes de campo, mas todas elas são derivadas a partir da conjectura de Worthington (1981). Para a componente zz, o tensor TI efetivo é:

10

$$\sigma_{TI}^{zz} = \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma_{11}^* \sigma_{22}^*} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{\sigma_{11}^* \sigma_{22}^*} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33}^* \end{bmatrix} \quad (11).$$

Os tensores TI equivalentes para as componentes xx e yy são:

$$\sigma_{TI}^{xx} = \begin{bmatrix} \sigma_{22}^* & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{22}^* & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33}^* \end{bmatrix} \quad (12),$$

15 e

$$\sigma_{TI}^{yy} = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^* & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{11}^* & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{33}^* \end{bmatrix} \quad (13).$$

A partir das Equações (11) a (13), nós calculamos as respostas zz, xx, e yy focalizadas de frequência múltipla para o meio de TI efetivo usando as equações dadas por Rabinovich e Tabarovsky (2001):

20

$$\sigma_{zz}^{MFF} = \sqrt{\sigma_{11}^* \sigma_{22}^*} \quad (14),$$

$$\sigma_{xx}^{MFF} \approx \left[\frac{3}{4} \left(1 + \frac{\sigma_{33}^*}{\sigma_{22}^*} \right) \right]^{2/3} \sigma_{22}^* \quad (15),$$

e

$$\sigma_{yy}^{MFF} \approx \left[\frac{3}{4} \left(1 + \frac{\sigma_{33}^*}{\sigma_{11}^*} \right) \right]^{2/3} \sigma_{11}^* \quad (16).$$

De fato, a condutividade horizontal equivalente para a resposta ZZ na Equação (11) dada pela conjectura de Worthington (1981) é estritamente verdadeira, independentemente do ângulo de inclinação e da anisotropia (Moran e Gianzero (1979)). Como uma aproximação de primeira ordem, nós usamos as Equações (14) a (16) para a predição das respostas zz, xx, e yy em uma formação anisotrópica com uma mudança de inclinação gradual. Especificamente, uma focalização de frequência múltipla é usada para se proporcionarem as condutividades xx, yy e zz. As Equações (14) a (16) podem ser resolvidas, então, para proporcionarem σ_{11}^* , σ_{22}^* and σ_{33}^* . A Equação (8) pode ser resolvida, então, para proporcionar σ_h , σ_v e θ . Se o θ determinado for diferente de um ângulo de inclinação local medido no furo de poço, será uma indicação que o ângulo de inclinação está variando a partir do furo de poço ou que a hipótese de anisotropia fraca não é válida. A invalidade da hipótese de anisotropia fraca é prontamente checada usando-se a Equação (10).

A Figura 14 compara as condutividades aparentes preditas com aquelas a partir da Figura 6 ao assumir que os planos de estratificação sejam localmente paralelos. 501 proporciona a componente zz como uma função da profundidade. 503 e 505 mostram as componentes xx a partir da modelagem 3-D e a partir da Equação (15). 507, 509 são indistinguíveis e proporcionam a componente yy a partir da modelagem 3-D e da Equação (16), respectivamente. Claramente, as Equações (15) e (16) predizem de forma acurada as respostas de condutividade aparente xx e yy processadas por MFF. A componente zz não é comparada, porque a Equação (14) é estritamente verdadeira. As Equações (15) e (16) podem ser usadas para proporcionarem resultados de predição razoáveis, quando a relação de anisotropia é menor do que em torno de 5 e o ângulo de inclinação relativo é menor do

que em torno de 30° . Uma aplicação mais útil da aproximação de anisotropia fraca é para um meio em camadas no qual as camadas são anisotrópicas e podem ter ângulos de inclinação diferentes como em uma formação acamada transversal. Neste caso, cada camada anisotrópica é aproximada com um meio de TI equivalente com uma inclinação relativa de 0° com as fronteiras de camada. A formação resultante pode ser prontamente modelada como um meio de TI 1-D.

Uma vez que os parâmetros de resistividade de estratificação transversal tenham sido determinados, um processamento adicional pode ser feito para se determinar parâmetros petrofísicos caracterizando a estratificação transversal, usando-se métodos conhecidos. A determinação de saturação de água e de volumes fracionários de componentes de areia e de folhelho é discutida, por exemplo, nas Patentes U.S. Nº 6711502, 6493632 e 6470274 de *Mollison* et al, que têm a mesma cessionária que a presente invenção.

A '274 de *Mollison* ensina a determinação da porosidade total de uma formação, um volume fracionário do folhelho, saturação de água e uma resistividade do folhelho em um reservatório laminado incluindo areias que podem ter folhelhos dispersos ali. Um modelo petrofísico de tensor determina o volume de folhelho laminar e a condutividade de areia laminar a partir de condutividades vertical e horizontal derivadas de dados de perfil por indução de componente múltiplo. Os dados de RMN são usados para a obtenção de medições da água contida em argila na formação e da água contida em argila em folhelhos na formação. A '502 de *Mollison* ensina a determinação da porosidade total de uma formação, um volume fracionário do folhelho e uma resistividade do folhelho em um reservatório laminado incluindo areias que podem ter folhelhos dispersos ali. Um modelo petrofísico de tensor determina o volume de folhelho laminar e a condutividade de areia laminar a partir de condutividades vertical e horizontal derivadas de dados de perfil por indução de componente múltiplo. O volume de folhelho disperso e as porosidades total e efetiva da fração de areia laminar são determinados usando-se uma abordagem de Thomas-Stieber-Juhasz approach. A remoção de efeitos

de condutividade de folhelho laminar e de porosidade reduz o problema de areia xistosa laminada para um modelo de areia xistosa dispersa única ao qual a equação de Waxman-Smits pode ser aplicada.

Em uma modalidade da invenção, é feito uso do método ensina-
do na Patente U.S. Nº 6686736 de *Schoen* et al., que tem a mesma cessio-
nária que a presente invenção e cujo conteúdo é incorporado aqui como re-
ferência. É ensinado ali um método para a determinação de frações de gra-
nulometria grosseira e fina de uma seqüência laminada e uma estimativa de
permeabilidades das componentes de granulometria grosseira e fina.

Deve ser notado, ainda, que a não conformidade angular pode
ser usada para a perfuração de poços de desenvolvimento adicionais. Um
ângulo de não conformidade grande é indicativo de estar a uma distância
grande do centro de um canal profundo. Isto seria um diagnóstico de um re-
servatório maior do que aquele em que a não conformidade angular é me-
nor. Além disso, um poço avançado poderia ser perfurado em um desvio
maior.

A invenção foi descrita acima com referência a um dispositivo
que é transportado em um cabo de aço para o furo de poço. O método da
invenção também pode ser usado com um dispositivo de perfilagem por in-
dução de componente múltiplo em um furo de poço em um elemento tubular,
tal como uma coluna de perfuração. O processamento dos dados pode ser
feito poço abaixo se usando um processador de poço abaixo em uma locali-
zação adequada. Também é possível armazenar pelo menos uma parte dos
dados poço abaixo em um dispositivo de memória adequado, em uma forma
comprimida, se necessário. Mediante uma recuperação subsequente do dis-
positivo de memória durante uma manobra da coluna de perfuração, os da-
dos então podem ser recuperados do dispositivo de memória e processados
poço acima.

Deve ser notado que, embora a invenção possa ter sido descrita
acima com referência a uma ferramenta de perfilagem 3DEX®, isto não é
para ser interpretado como uma limitação. Por exemplo, o pedido de Patente
U.S. número de série 11/489875 de *Wang* et al. mostra um arranjo no qual

medições de resistividade de formação são obtidas usando-se um arranjo com apenas dois transmissores orientados axialmente e dois receptores transversais. Pretende-se que o termo "componente múltiplo" inclua todos os arranjos nos quais as bobinas transmissoras e receptoras estão orientadas em direções diferentes.

É implícito no controle e no processamento dos dados o uso de um programa de computador em um meio que pode ser lido em máquina adequado que permita que o processador realize o controle e o processamento. O meio que pode ser lido em máquina pode incluir ROMs, EPROMs, EEPROMs, memórias flash e discos óticos.

Embora a descrição precedente seja dirigida às modalidades preferidas da invenção, várias modificações serão evidentes para aqueles versados na técnica. Pretende-se que todas as variações no escopo e no espírito das reivindicações em apenso sejam englobadas pela descrição precedente.

REIVINDICAÇÕES

1. Método de avaliação de uma formação de terreno (4), **caracterizado pelo fato de que** compreende:

5 a feitura de medições com uma ferramenta de perfilagem (10) que tem uma primeira profundidade de investigação em um furo de poço (401) na formação de terreno (4);

a estimativa de um primeiro ângulo de inclinação da formação usando as medições;

10 a comparação do ângulo de inclinação estimado com uma segunda medição de ângulo de inclinação no furo de poço (401); e

o armazenamento dos resultados da comparação em um meio tangível.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a feitura das medições com a ferramenta de perfilagem (10) compreende ainda a feitura de medições com uma ferramenta de perfilagem de componente múltiplo.

3. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende:

20 a estimativa de um primeiro azimuth da formação, usando-se as medições feitas pela ferramenta de perfilagem (10), e

a comparação do primeiro azimuth com uma segunda medição de azimuth feita no furo de poço (401).

4. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** a segunda medição de inclinação compreende uma medição de inclinação local no furo de poço (401).

5. Método de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende a feitura da segunda medição de inclinação usando-se pelo menos uma dentre: (i) uma ferramenta de formação de imagem de resistividade de furo de poço, (ii) uma ferramenta de formação de imagem de densidade, e (iii) uma ferramenta de formação de imagem por raios gama.

6. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo**

fato de que a segunda medição de inclinação compreende uma medição feita com uma ferramenta de perfilagem de componente múltiplo que tem uma segunda profundidade de investigação diferente da primeira profundidade de investigação.

5 7. Método de acordo com a reivindicação 3, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende uma estimativa de uma relação de uma altura (h) de uma ondulação na formação de terreno para um comprimento de onda (L) da ondulação.

10 8. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende a estimativa de pelo menos um dentre (i) um ângulo de inclinação de uma não conformidade na formação e (ii) um ângulo de azimute de uma não conformidade na formação.

15 9. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende o uso das medições feitas com a ferramenta de perfilagem de componente múltiplo para a estimativa de pelo menos um dentre: (i) uma resistividade horizontal da formação; (ii) uma resistividade vertical da formação, (iii) um ângulo de inclinação da formação, e (iv) um ângulo de azimute da formação.

20 10. Método de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende o uso de uma resistividade horizontal e de uma resistividade vertical estimadas da formação para a estimativa de pelo menos um dentre: (i) uma porosidade de uma formação, (ii) um volume de folhelho fracionário, (iii) uma resistividade de folhelho, (iv) uma fração de granulometria grosseira de uma seqüência laminada, e (v) uma fração de
25 granulometria fina de uma seqüência laminada.

11. Método de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende o uso do ângulo de inclinação estimado da não conformidade para a perfuração de um poço com desvio.

30 12. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende o transporte da ferramenta de perfilagem de componente múltiplo para o furo de poço usando-se um dentre: (i) um cabo de aço, (ii) um elemento tubular de perfuração, e (iii) um

cabo liso.

13. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende a feitura de medições com a ferramenta de perfilagem durante uma rotação da ferramenta de perfilagem.

5 14. Aparelho para a avaliação de uma formação de terreno (4), **caracterizado pelo fato de que** compreende:

uma ferramenta de perfilagem (10) que tem uma primeira profundidade de investigação configurada para ser transportada em um furo de poço (401) em uma formação de terreno (4) e para a feitura de medições de uma propriedade da formação; e

10 um processador configurado para:

(A) estimar um primeiro ângulo de inclinação da formação usando as medições;

(B) comparar a inclinação estimada com uma segunda medição de inclinação no furo de poço; e

(C) armazenar os resultados da comparação em um meio tangível.

15 15. Aparelho de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** a ferramenta de perfilagem (10) compreende uma ferramenta de perfilagem de componente múltiplo.

16. Aparelho de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** o processador é configurado, adicionalmente, para:

(i) a estimativa de um primeiro azimute da formação, usando-se as medições feitas pela ferramenta de perfilagem (10), e

25 (ii) a comparação do primeiro azimute com uma segunda medição de azimute feita no furo de poço.

17. Aparelho de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende uma ferramenta de formação de imagem configurada para a feitura da segunda medição de inclinação.

30 18. Aparelho de acordo com a reivindicação 17, **caracterizado pelo fato de que** a ferramenta de formação de imagem é selecionada a partir do grupo que consiste em: (i) uma ferramenta de formação de imagem

de resistividade de furo de poço, (ii) uma ferramenta de formação de imagem de densidade, e (iii) uma ferramenta de formação de imagem por raios gama.

5 19. Aparelho de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** a ferramenta de perfilagem de componente múltiplo é configurada para ter uma segunda profundidade de investigação, e em que a segunda medição de inclinação compreende uma medição feita com a ferramenta de perfilagem de componente múltiplo na segunda profundidade de investigação diferente da primeira profundidade de investigação.

10 20. Aparelho de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** o processador é adicionalmente configurado para a determinação de uma relação de uma altura (h) de uma ondulação na formação de terreno para um comprimento de onda (L) da ondulação.

15 21. Aparelho de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** o processador é configurado adicionalmente para a estimativa de pelo menos um dentre: (i) um ângulo de inclinação de uma não conformidade na formação e (ii) um ângulo de azimute de uma não conformidade na formação.

20 22. Aparelho de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** o processador é configurado adicionalmente para o uso das medições feitas com a ferramenta de perfilagem de componente múltiplo para a estimativa de pelo menos um dentre: (i) uma resistividade horizontal da formação; (ii) uma resistividade vertical da formação, (iii) um ângulo de inclinação da formação, e (iv) um ângulo de azimute da formação.

25 23. Aparelho de acordo com a reivindicação 22, **caracterizado pelo fato de que** o processador é configurado adicionalmente para uso de uma resistividade horizontal e uma resistividade vertical estimadas da formação para a estimativa de pelo menos um dentre: (i) uma porosidade de formação, (ii) um volume de folhelho fracionário, (iii) uma resistividade de folhelho, (iv) uma fração de granulometria grosseira de uma seqüência laminada, e (v) uma fração de granulometria fina de uma seqüência laminada.

30

24. Aparelho de acordo com a reivindicação 21, **caracterizado pelo fato de que** o processador ainda é configurado para uso do ângulo de inclinação estimado da não conformidade para a perfuração de um poço com desvio.

5 25. Aparelho de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende um dispositivo de transporte configurado para o transporte da ferramenta de perfilagem de componente múltiplo para dentro do furo de poço, o dispositivo de transporte selecionado a partir do grupo que consiste em: (i) um cabo de aço, (ii) um elemento
10 tubular de perfuração, e (iii) um cabo liso.

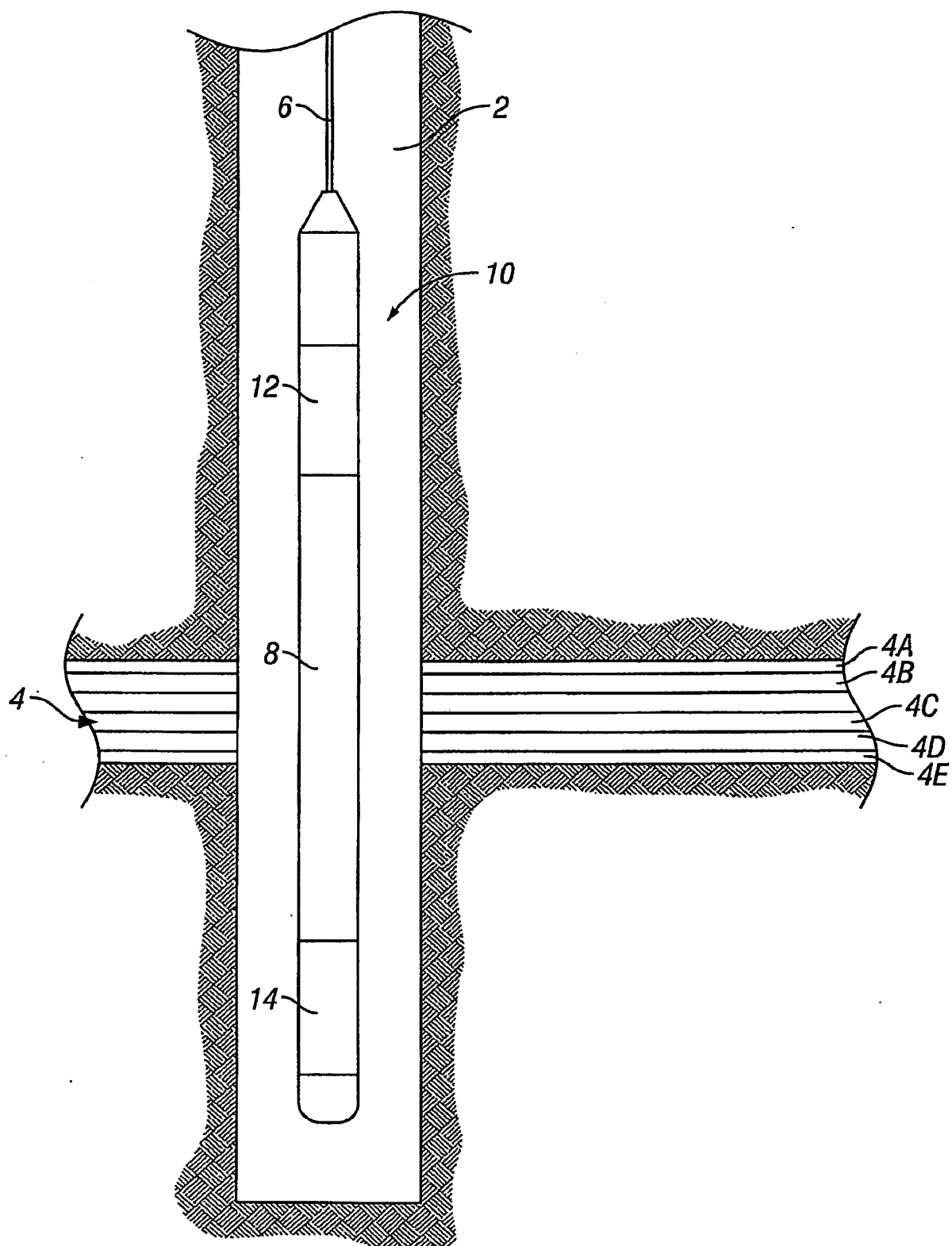
26. Meio legível por computador, acessível a um processador, **caracterizado pelo fato de que** inclui dados obtidos que permitem ao processador:

 estimar uma primeira inclinação de uma formação de terreno (4)
15 usando medições a partir de uma ferramenta de perfilagem (10) transportada em um furo de poço na formação de terreno (4);

 comparar a inclinação estimada com uma segunda inclinação estimada a partir de uma imagem da formação de terreno (4); e

 armazenar os resultados da comparação em um meio tangível.

20 27. Meio de acordo com a reivindicação 26, **caracterizado pelo fato de que** ainda compreende pelo menos um dentre: (i) uma ROM, (ii) uma EPROM, (iii) uma EEPROM, (iv) uma memória flash, e (v) um disco ótico.

**FIG. 1**

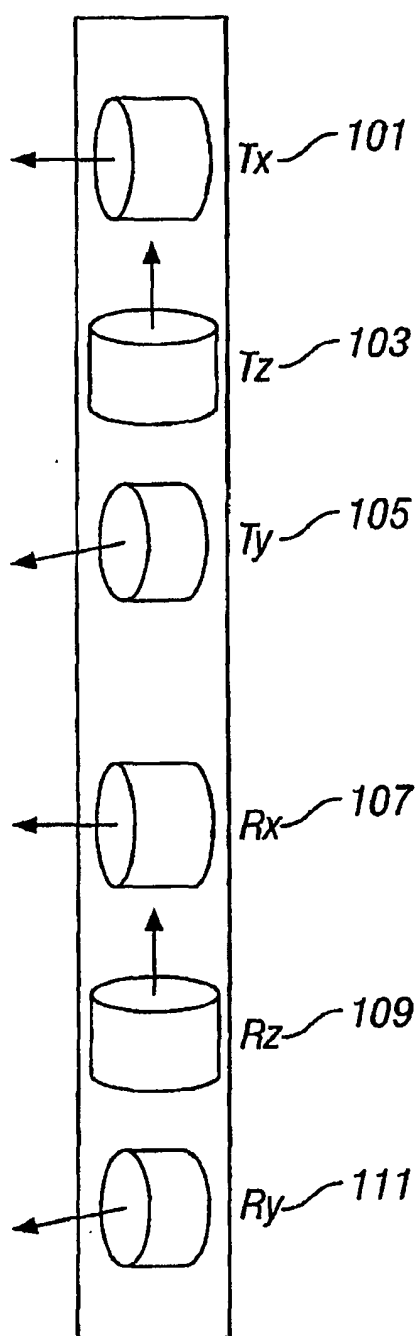
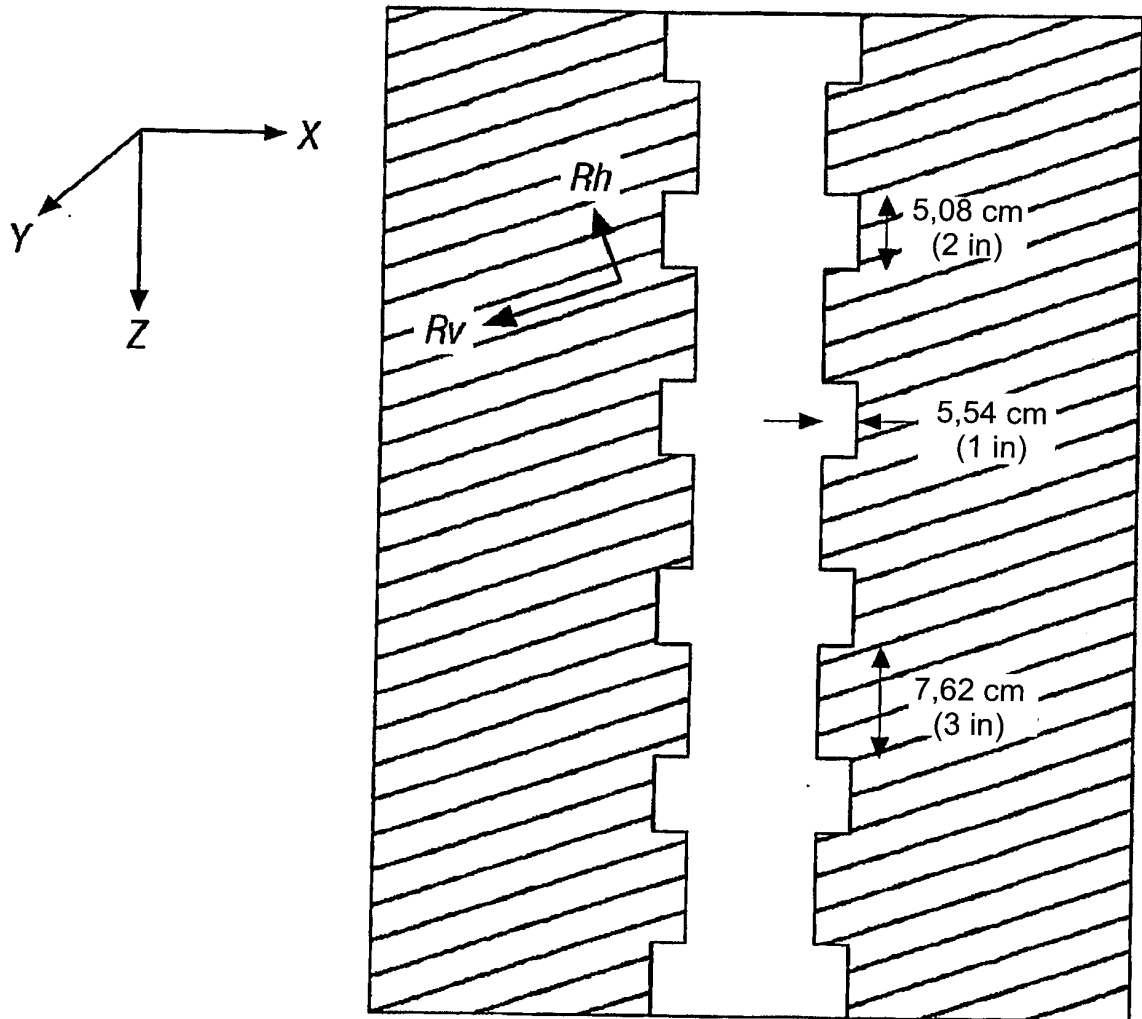


FIG. 2
(Técnica Anterior)

**FIG. 3**

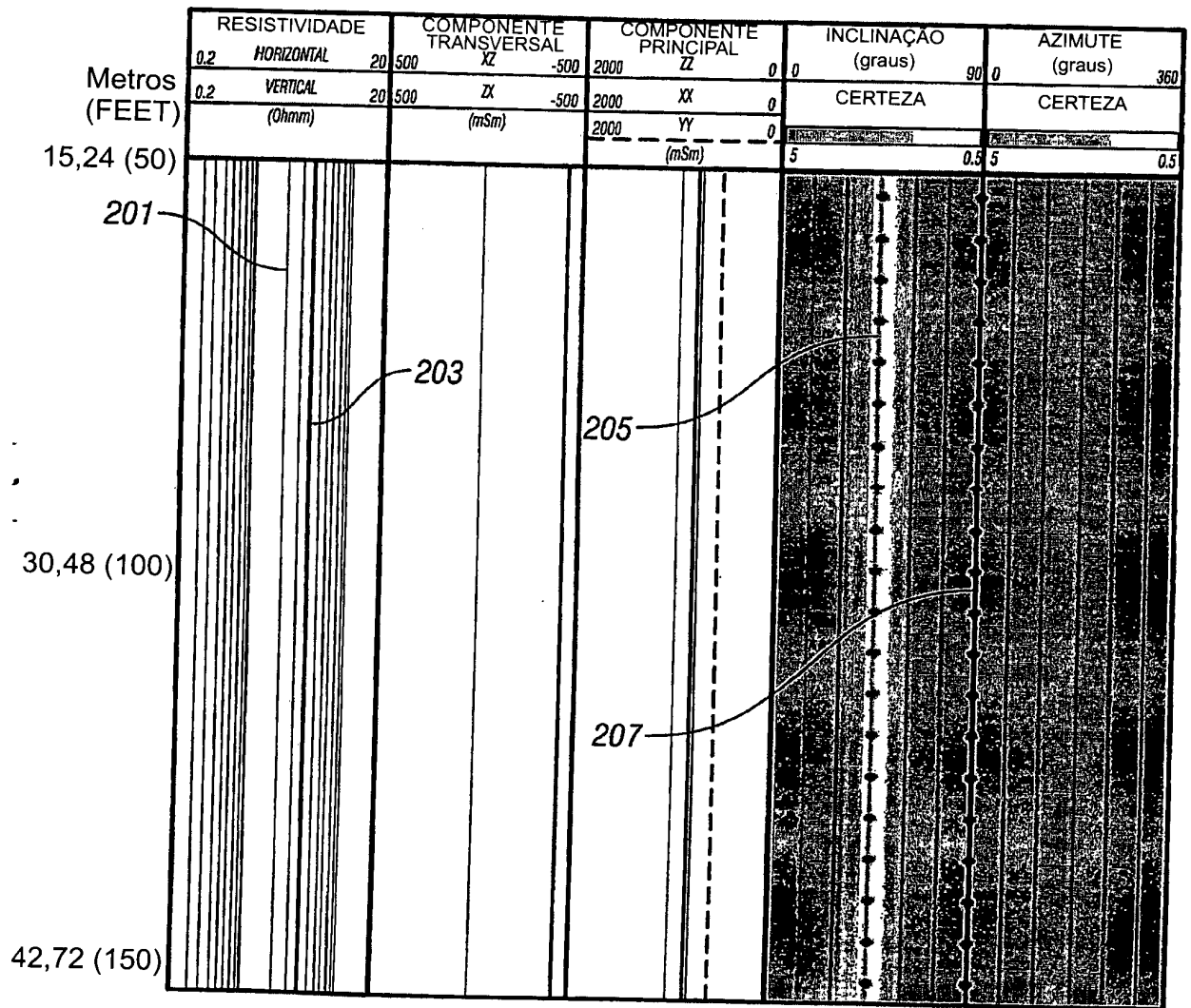
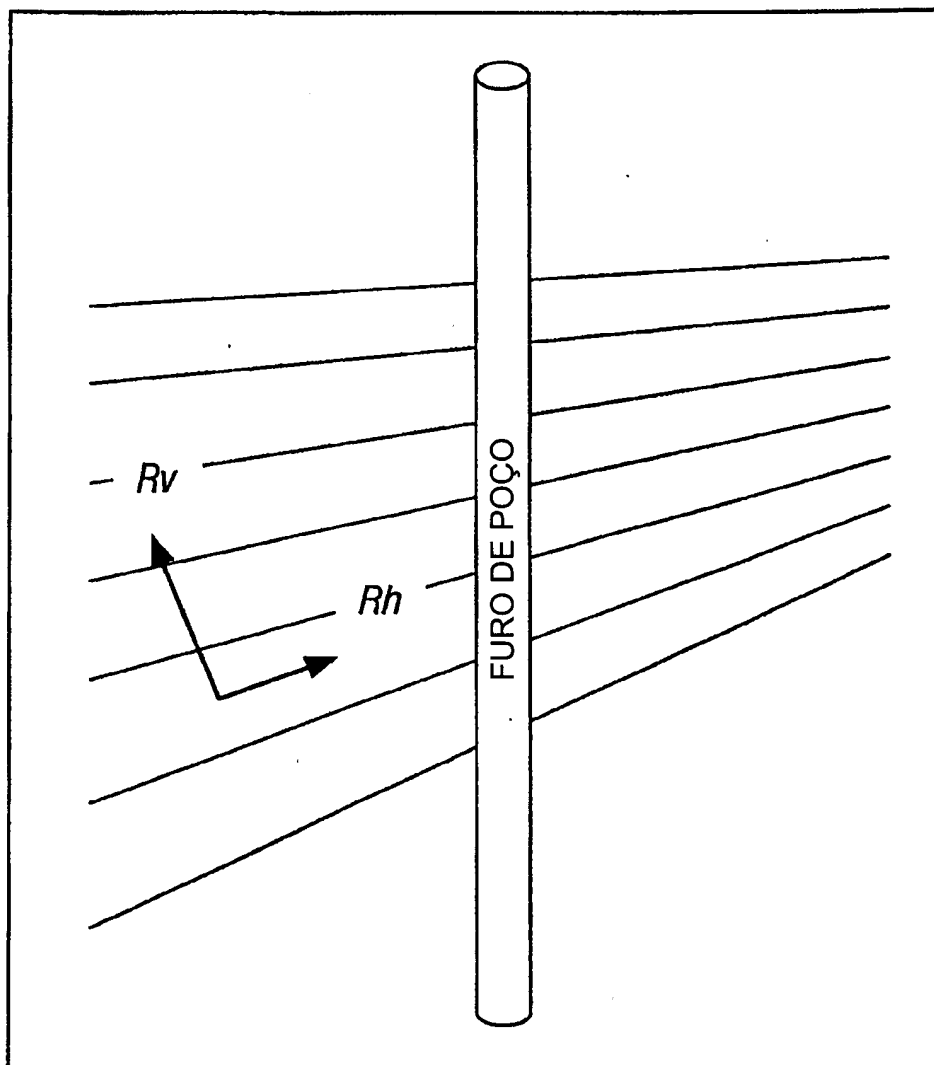


FIG. 4

**FIG. 5**

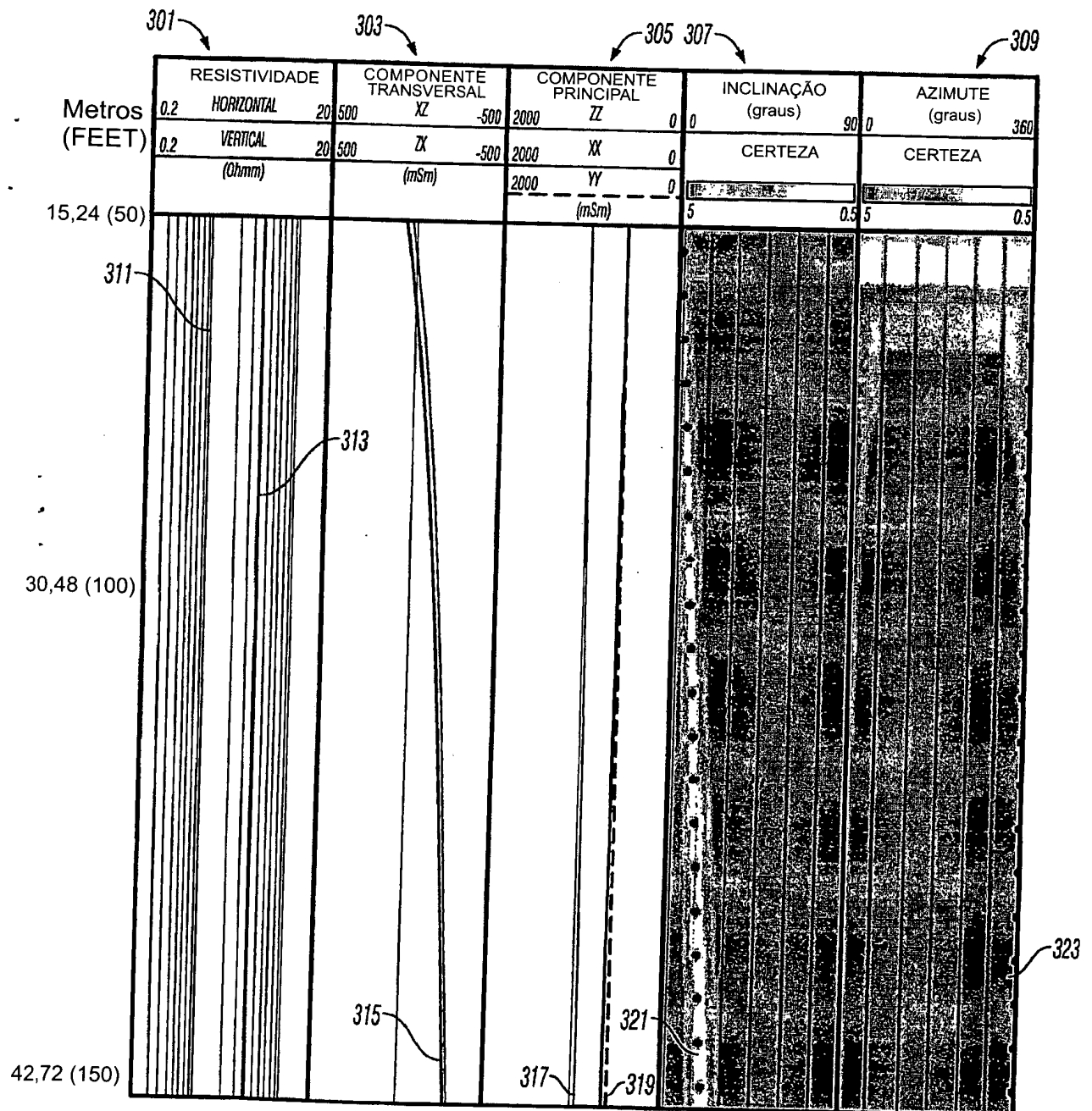


FIG. 6

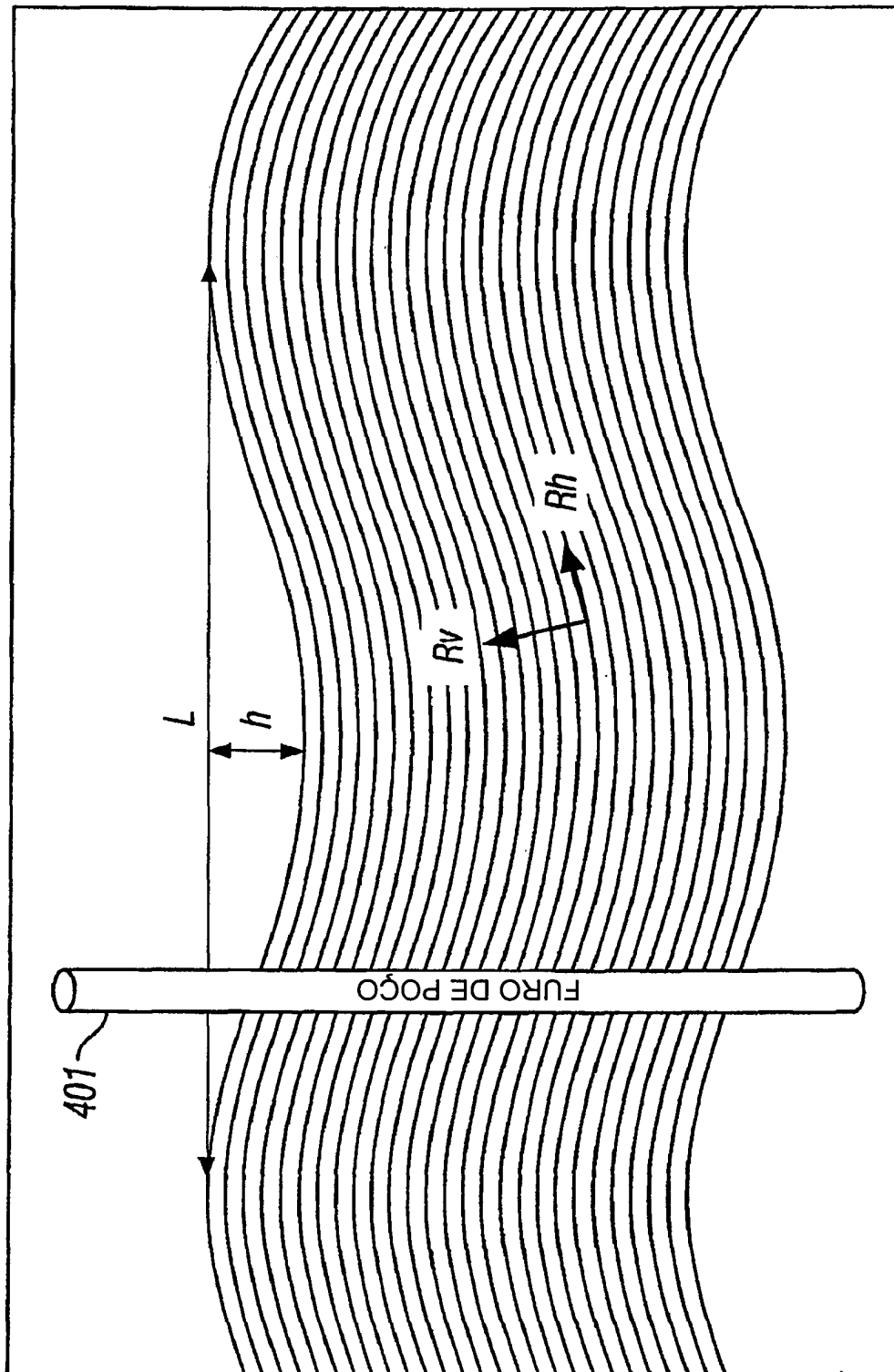


FIG. 7

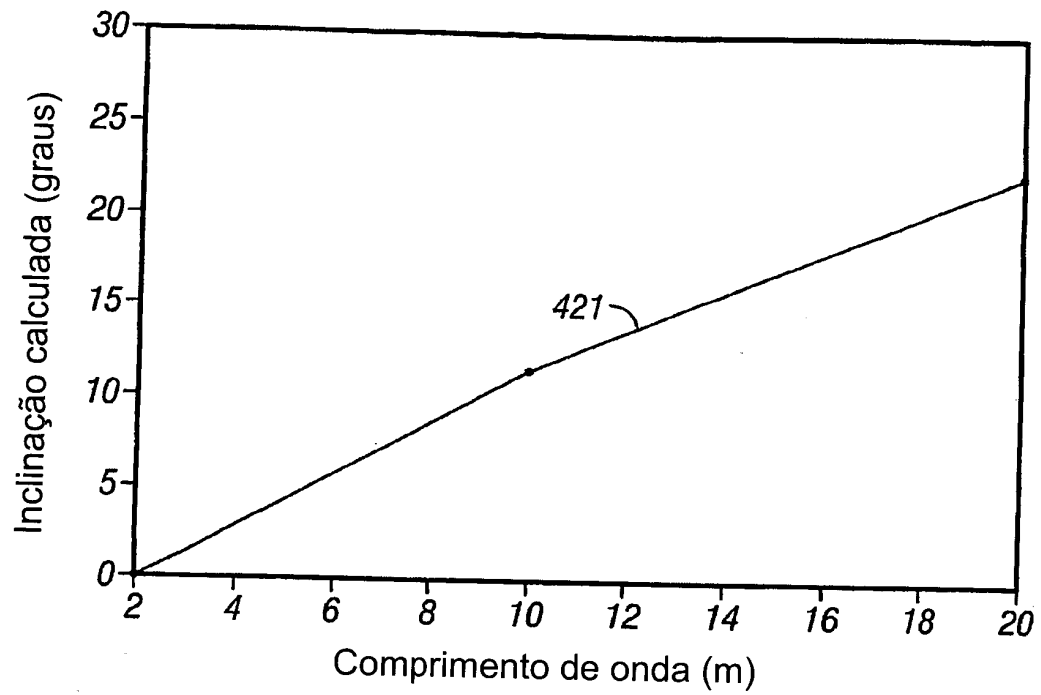


FIG. 8

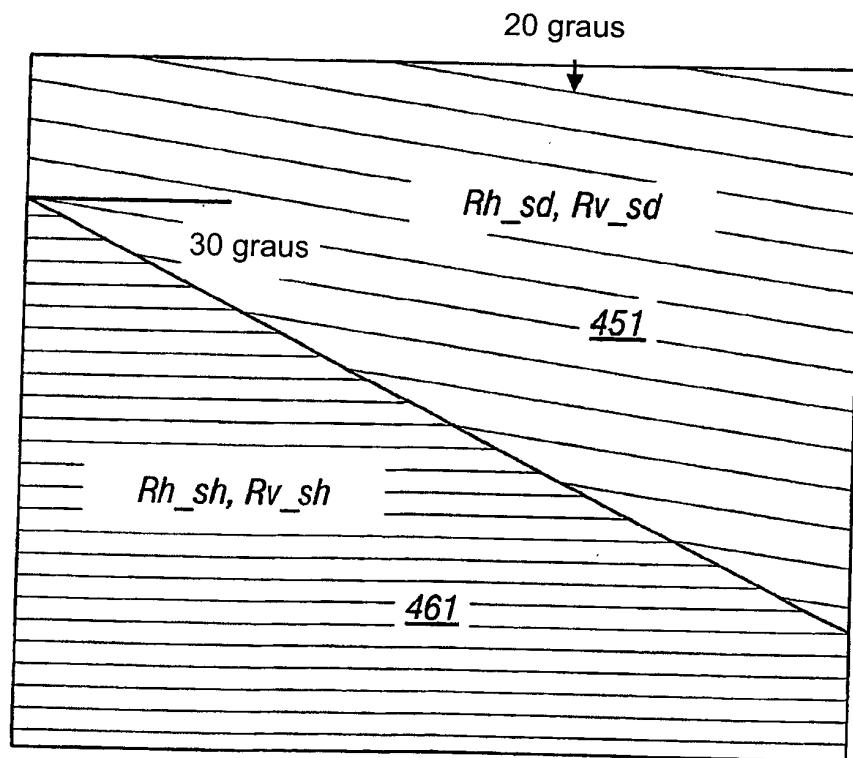


FIG. 9

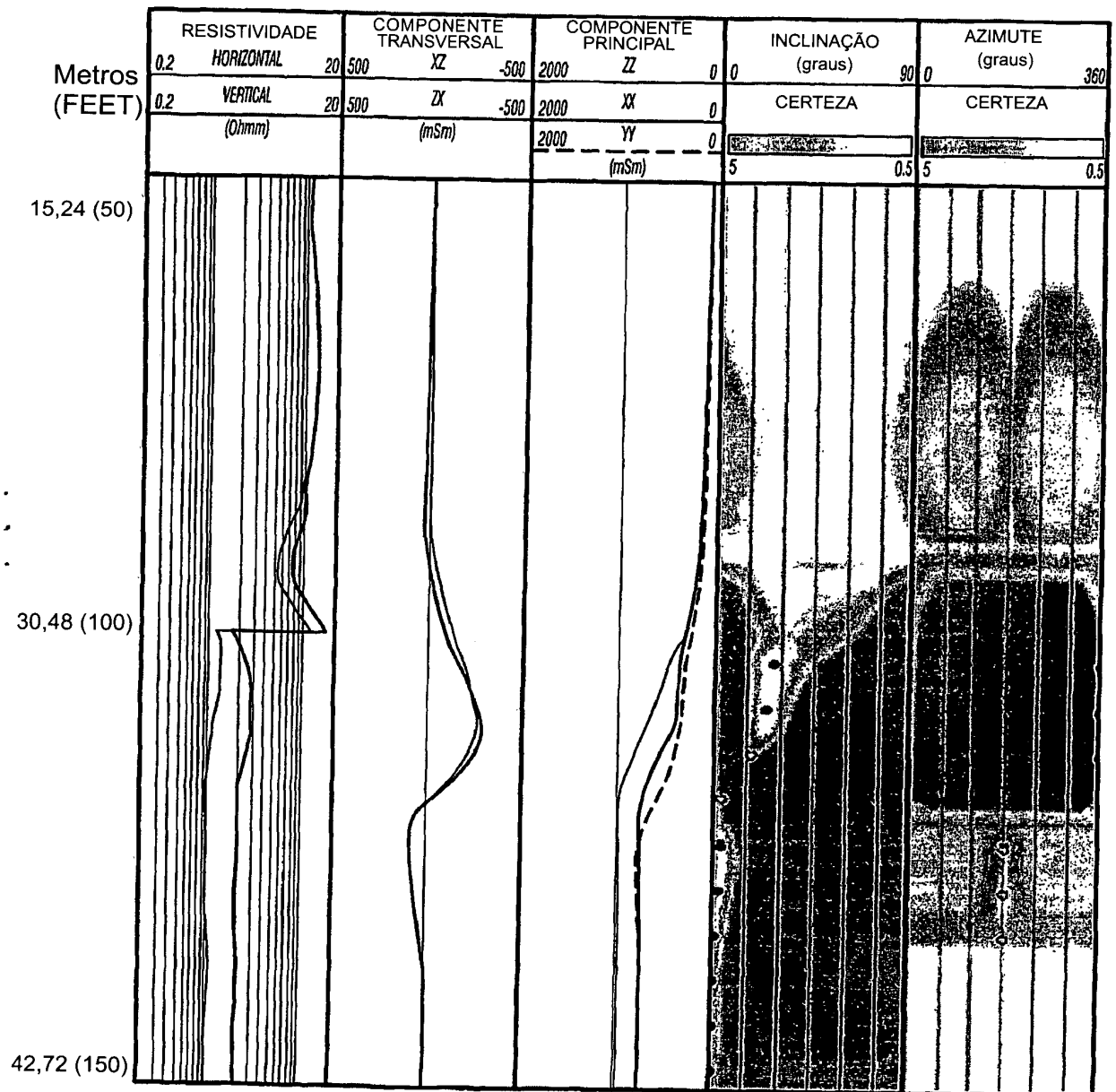


FIG. 10

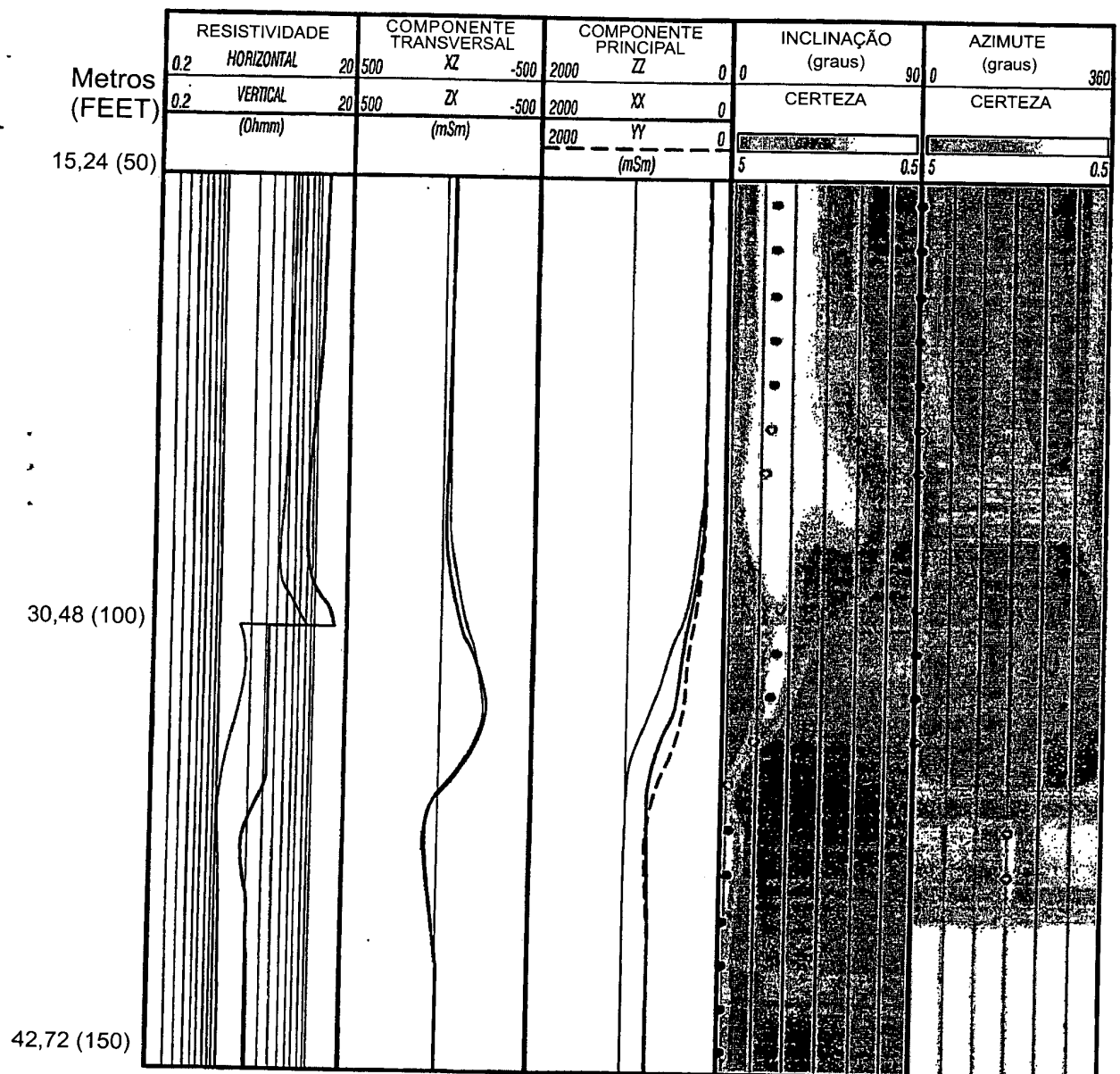


FIG. 11

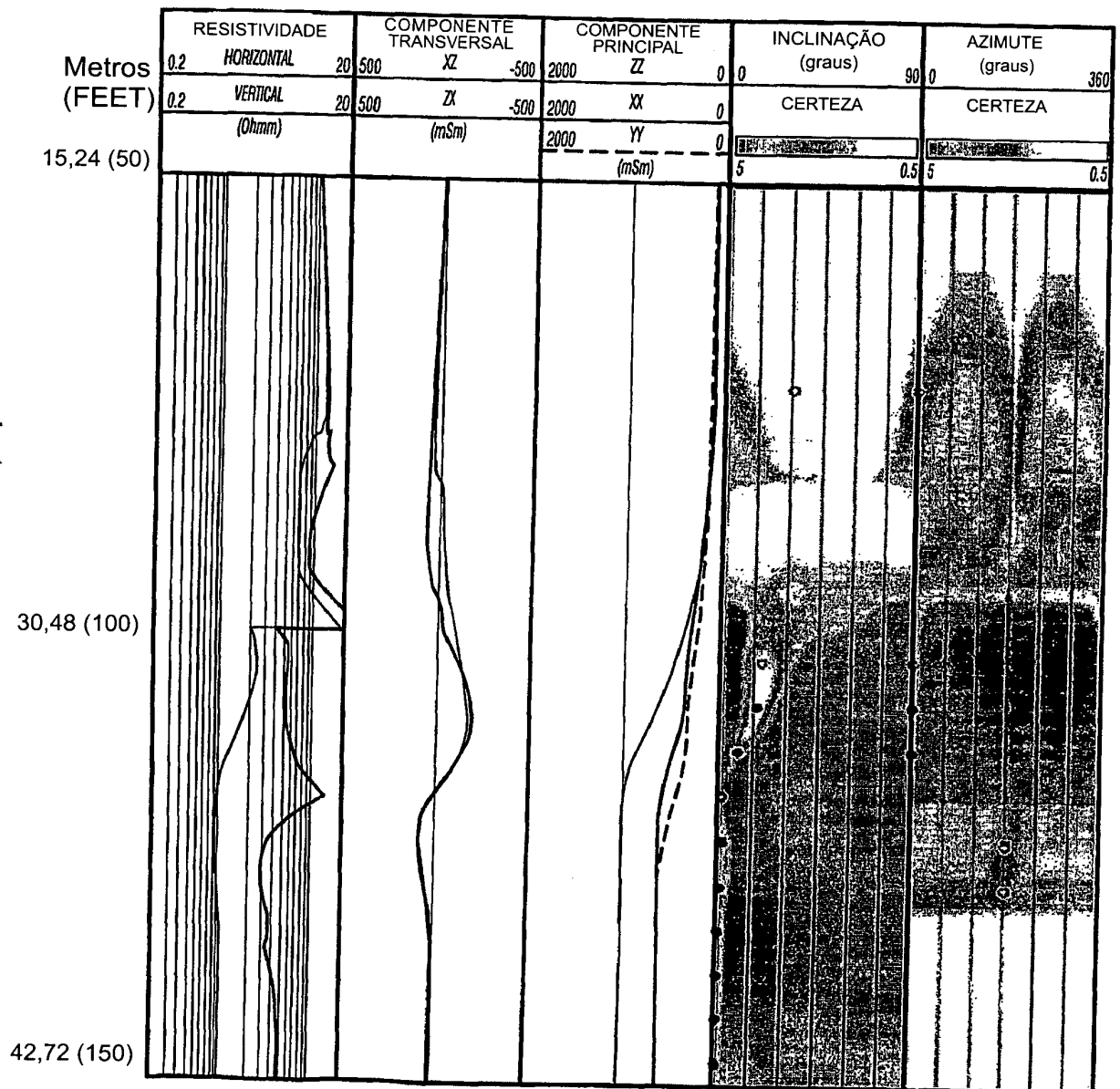


FIG. 12

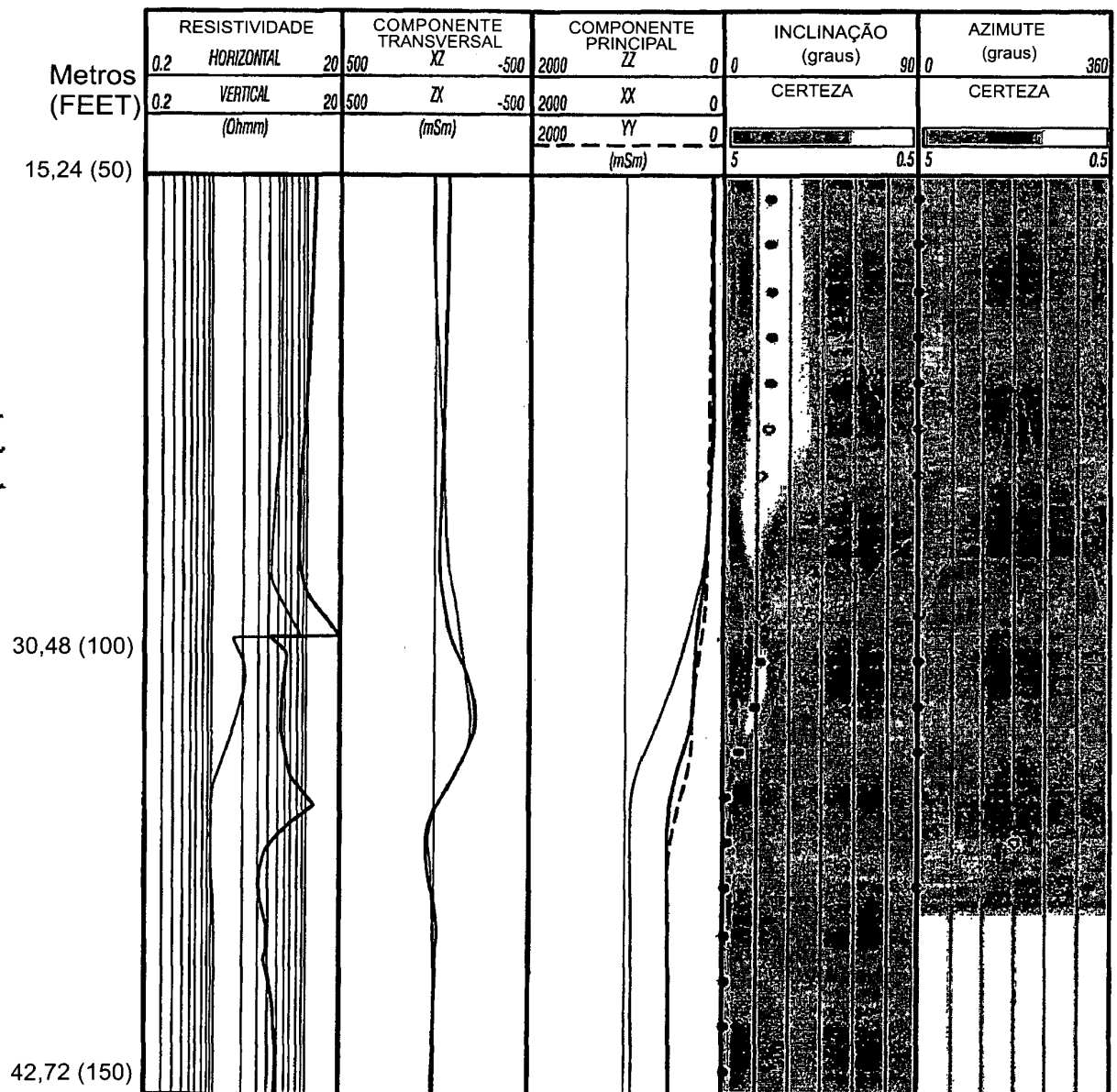
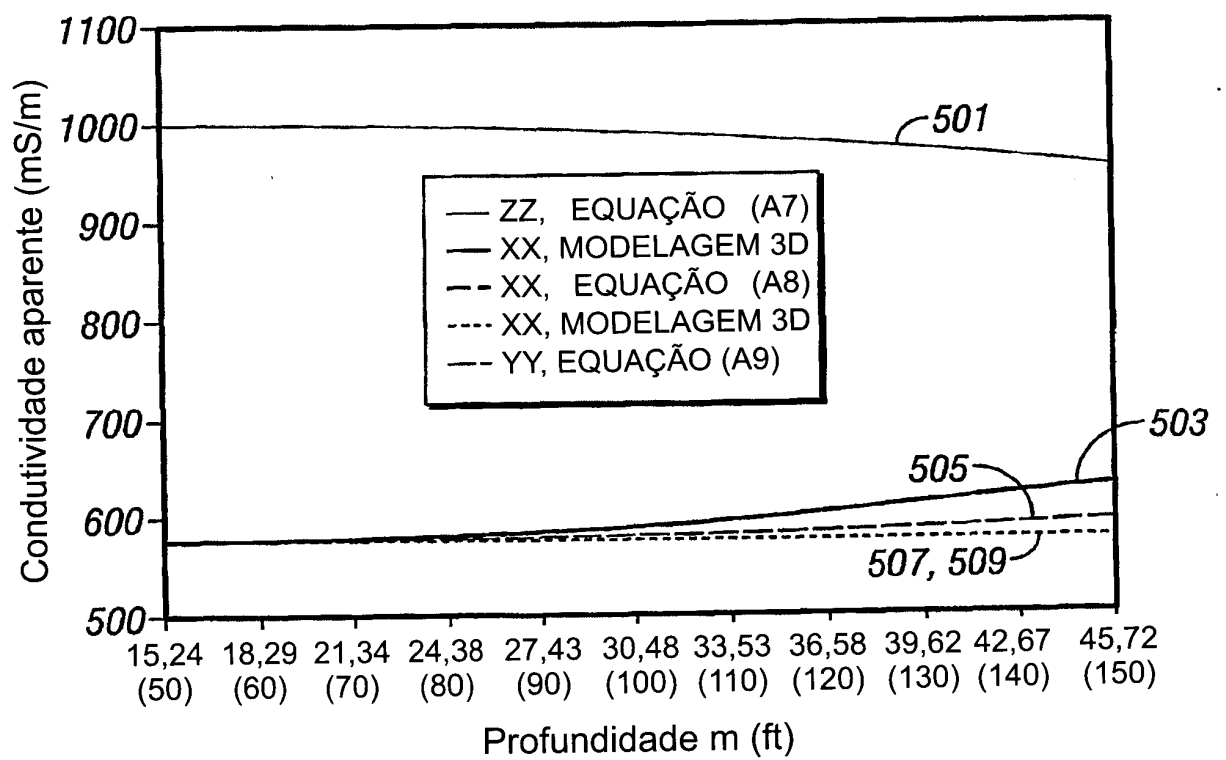


FIG. 13

**FIG. 14**