



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

(11) PI 0810794-7 B1



(22) Data do Depósito: 01/05/2008

(45) Data de Concessão: 08/01/2019

(54) Título: MÉTODO PARA DETERMINAR A VISCOSIDADE DE UM FLUIDO NO FUNDO DE POÇO E MEIO LEGÍVEL POR MÁQUINA

(51) Int.Cl.: G01R 33/44; G01V 3/32.

(30) Prioridade Unionista: 01/05/2007 US 11/742,768.

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

(72) Inventor(es): PEDRO ROMERO; BENITO E. SAAVEDRA; HYUNG T. KWAK; GABOR HURSAN.

(86) Pedido PCT: PCT US2008062171 de 01/05/2008

(87) Publicação PCT: WO 2008/134769 de 06/11/2008

(85) Data do Início da Fase Nacional: 29/10/2009

(57) Resumo: "MÉTODO PARA DETERMINAR A VISCOSIDADE DE UM FLUIDO NO FUNDO DE POÇO E MEIO LEGÍVEL POR MÁQUINA". A presente invenção refere-se a um método para determinar a viscosidade, η , de um fluido no fundo de poço que exige a execução de uma inspeção de ressonância magnética nuclear (RMN) do fluido; a determinação de um tempo de relaxamento longitudinal, T_1 e um tempo de relaxamento transversal aparente, T_{2app} , para o fluido; a formação de uma razão R de T_1 / T_{2app} para o fluido e a determinação da viscosidade, η , de acordo com a razão, R . Um produto de programa de computador para implementar o método é fornecido.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA DETERMINAR A VISCOSIDADE DE UM FLUIDO NO FUNDO DE POÇO E MEIO LEGÍVEL POR MÁQUINA"**.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

5 1. Campo da Invenção

Essa invenção refere-se a avaliações de fluidos do furo de poço e em particular a determinação de viscosidade pelo uso de ressonância magnética nuclear.

2. Descrição da Técnica Relacionada

10 Técnicas de caracterização no fundo de poço são de valor considerável para a exploração geofísica. Por exemplo, a caracterização de parâmetros associados aos fluidos no fundo de poço proporciona o discernimento da qualidade do fluido. Mais especificamente, o conhecimento da viscosidade, η , pode proporcionar o discernimento da qualidade dos hidrocar-

15 bonetos em uma formação. Uma série de tecnologias é aplicada no fundo de poço para várias tarefas. Essas tecnologias incluem geração de imagem por ressonância magnética nuclear (RMN). Infelizmente, na técnica anterior, o uso confiável da RMN para determinar a viscosidade, η , não foi concretizado.

20 Portanto, o que é necessário é uma técnica para a estimativa da viscosidade, η , de fluidos no fundo de poço pelo uso das tecnologias de RMN.

BREVE SUMÁRIO DA INVENÇÃO

25 Um método para determinar a viscosidade, η , de um fluido no fundo de poço, o método exige a execução de uma inspeção de ressonância magnética nuclear (RMN) do fluido; determinação de um tempo de relaxamento longitudinal, T_1 , e um tempo de relaxamento transversal aparente, T_{2app} , para o fluido; formação de uma razão R de T_1/T_{2app} para o fluido e determinação da viscosidade, η , de acordo com a razão, R .

30 Um produto de programa de computador armazenado em meios legíveis por máquina e incluindo instruções legíveis por máquina para determinar a viscosidade, η , de um fluido no fundo de poço, as instruções in-

- cluindo instruções para: executar uma inspeção de ressonância magnética nuclear (RMN) do fluido; determinar um tempo de relaxamento longitudinal, T_1 , e um tempo de relaxamento transversal aparente, T_{2app} , para o fluido; formar uma razão R de T_1/T_{2app} para o fluido e determinar a viscosidade, η , de acordo com a razão, R .

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Com referência agora aos desenhos nos quais elementos semelhantes são numerados iguais nas várias figuras:

- a figura 1 representa aspectos de registro de dados de poço com um aparelho de ressonância magnética nuclear (RMN),
- a figura 2 representa aspectos das determinações do tempo de relaxamento longitudinal, T_1 , por uma série de medições do tempo de relaxamento transversal, T_2 , medições durante o ciclo de polarização,
- a figura 3 representa os tempos de relaxamento T_1 e T_2 para padrões de medição para alcanos, óleos crus e viscosidade,
- a figura 4 representa as funções de potência relacionando os tempos de relaxamento T_1 e T_2 e uma razão R com a viscosidade,
- a figura 5 é um gráfico de barras mostrando a variação em uma média logarítmica para o tempo de relaxamento longitudinal $T_{1,LM}$ e o tempo de relaxamento transversal $T_{2,LM}$ e a razão R para várias amostras de fluido,
- a figura 6 representa os resultados das medições de laboratório para T_1 e T_2 usando retardos (t) de reciclagem diferentes para a amostra 5 da figura 5 e
- a figura 7 representa gráficos da razão R para várias séries de eco.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

- Os ensinamentos aqui contidos tiram vantagem de várias propriedades únicas da ressonância magnética nuclear (RMN) dos materiais para proporcionar a determinação da viscosidade do fluido no fundo de poço.
- Primeiro, é feita referência à figura 1 para considerar aspectos das caracterizações da RMN no fundo de poço, usando uma modalidade não-limitadora de um dispositivo de registro de dados ligado por fiação. Um

versado na técnica reconhecerá que as técnicas descritas aqui podem ser aplicadas com outras modalidades, tais como operações de registro de dados enquanto perfurando (LWD) ou medições enquanto perfurando (MWD).

5 A figura 1 mostra um aparelho de registro de dados do poço disposto em um furo de poço 22 penetrando formações de terra 23, 24, 26, 28 para fazer medições das propriedades das formações de terra 23, 24, 26, 28 no fundo de poço. O furo de poço 22 na figura 1 fica tipicamente cheio com um fluido 34 conhecido na técnica como "lama de perfuração". Um "volume sensível", mostrado geralmente em 58 e tendo uma forma geralmente cilíndrica, é disposto em uma das formações de terra, mostradas em 26. O volume sensível 58 é uma porção predeterminada das formações de terra 26 nas quais as medições da ressonância magnética nuclear (RMN) são feitas, como também será explicado ou se tornará evidente.

15 Nas modalidades típicas, o volume sensível 58 inclui materiais tais como seriam encontrados no fundo de poço (abaixo da superfície e dentro ou ao redor do furo de poço 22) incluindo uma mistura de líquidos incluindo gás, água, fluido de perfuração, fluidos de óleo e de formação que são inerentes às formações 23, 24, 26, 28.

20 Uma fileira de ferramentas de registro de dados 32, que pode incluir um aparelho de RMN, é tipicamente abaixada no furo de poço 22, por exemplo, por um cabo elétrico armado 30. O cabo 30 pode ser enrolado e desenrolado do carretel de um guincho ou cilindro 48. A fileira de ferramentas 32 pode ser eletricamente conectada no equipamento de superfície 54 por um condutor elétrico isolado (não mostrado separadamente na figura 1) que forma parte do cabo 30. O equipamento de superfície 54 pode incluir uma parte de um sistema de telemetria 38 para comunicar os sinais de controle e os dados para a fileira de ferramentas 32 e o computador 40. O computador pode também incluir um gravador de dados 52 para gravar as medições feitas pelo aparelho e transmitidas para o equipamento de superfície 54. Tipicamente, o computador inclui uma variedade de dispositivos de entrada/saída e outros dispositivos de suporte para otimizar a operação do aparelho e as estimativas executadas pelo seu uso. Uma sonda de RMN 42

pode ser incluída na fileira de ferramentas 32.

O conjunto de circuitos para operar a sonda de RMN 42 pode ficar localizado dentro de um cartucho eletrônico da RMN 44. O conjunto de circuitos pode ser conectado na sonda da RMN 42 através de um conector 50. A sonda da RMN 42 fica tipicamente localizada dentro de um alojamento protetor 43 que é projetado para excluir a lama de perfuração 34 do interior da sonda 42. A função da sonda 42 será também explicada.

Outros aspectos da modalidade exemplar da sonda da RMN 42 são proporcionados na Patente U.S. No. 5.712.566, intitulada "Nuclear Magnetic Resonance Apparatus and Method", emitida em 27 de janeiro de 1998 para *Taicher* e outros e incorporada aqui por referência na íntegra. Outro exemplo não-limitador é descrito na Patente U.S. No. 4.710.713, também emitida para *Taicher* e outros e também incorporada por referência aqui na íntegra. Deve ser reconhecido que essas modalidades das ferramentas de RMN são exemplares somente e não-limitadoras dos ensinamentos aqui contidos. Uma modalidade comercialmente disponível e exemplar de um instrumento de RMN é o MREX[®], disponível de Baker Hughes, Incorporated de Houston, Texas. Outro instrumento exemplar é o instrumento MAG-TRAK[®], também de Baker Hughes, Incorporated, que pode ser usado para o registro de dados enquanto perfurando.

Um versado na técnica reconhecerá que embora os ensinamentos aqui contidos possam ser executados no fundo de poço, eles são também aplicáveis a avaliações conduzidas na superfície, tal como em um laboratório. Além do que, e como discutido em outro local neste relatório, pelo menos uma porção de uma avaliação ou determinação pode ser executada em um local ou outro. Por exemplo, uma propriedade de um constituinte pode ser determinada em um laboratório, enquanto outras medições e determinações são executadas no fundo de poço.

Como uma questão de convenção, a pessoa deve observar que as variáveis usadas aqui aparecem por toda a descrição. Dessa maneira, variáveis previamente definidas geralmente não são novamente introduzidas. Por conveniência de referência, algumas das representações seguintes

são explicadas aqui ou relacionadas com os ensinamentos aqui contidos: B_0 representa a intensidade do campo estático; B_1 representa a intensidade do campo de radiofrequência (RF); D representa difusividade; f representa uma função de distribuição de porosidade bidimensional; G representa a intensidade do gradiente de campo de RF; R representa a razão do tempo de relaxamento longitudinal, T_1 , para o tempo de relaxamento transversal, T_2 (ou T_{2app} , conforme o caso possa ser); k representa um número de constituintes (isto é, tipos moleculares) dentro da mistura e pode ser usado como um subscrito; M representa a amplitude da magnetização do eco, onde $M_z(t)$ representa uma magnetização longitudinal, que envolve uma constante de tempo T_1 , onde T_1 é o tempo requerido para o vetor de magnetização ser restaurado para 63% da sua amplitude original (citada como "tempo de relaxamento longitudinal"); $M_{x,y}$ representa uma magnetização transversal, que envolve uma constante de tempo T_2 , onde T_2 é o tempo requerido para o vetor de magnetização cair para 37% da sua amplitude original (citada como o "tempo de relaxamento transversal"); $T_{1,2}$ representa um tempo de relaxamento combinado; T_{2B} representa um tempo de relaxamento transversal do fluido de volume; $T_{2cutoff}$ representa um tempo de divisão; T_{2diff} representa o tempo de decaimento característico devido à difusão molecular em um ambiente de gradiente de campo magnético; T_{2app} representa um tempo de relaxamento transversal aparente; $T_{1,2bulk}$, que representa uma adição de $T_{1,2inter}$ e $T_{1,2intra}$ onde $T_{1,2inter}$ representa o tempo de relaxamento transversal e longitudinal devido às interações intermoleculares e $T_{1,2intra}$ representa o tempo de relaxamento transversal e longitudinal devido às interações intramoleculares; T_{2surf} representa um tempo de relaxamento de superfície; $T_{1,LM}$ representa o tempo de relaxamento longitudinal médio logarítmico; $T_{2,LM}$ representa o tempo de relaxamento transversal médio logarítmico; T_E representa um tempo entre ecos; T_W representa um tempo de espera; t_k representa o tempo na formação do k^o eco; ν representa uma frequência e η representa a viscosidade.

O tempo de relaxamento transversal, T_2 , é igual a, ou mais curto do que o tempo de relaxamento longitudinal, T_1 . Isso é principalmente devido

à difusão molecular dentro de um campo magnético de gradiente porque o tempo de relaxamento transversal, T_2 , proporciona outro mecanismo de relaxamento. Esse mecanismo age em paralelo com o relaxamento de volume e superfície no plano transversal. É importante observar que o relaxamento devido à difusão D se aplica somente ao tempo de relaxamento transversal, T_2 , e não ao tempo de relaxamento longitudinal, T_1 , enquanto os relaxamentos de volume e superfície são efetivos para ambos T_1 e T_2 . Como a medição direta da magnetização longitudinal não é possível, a determinação exige a inclinação das rotações sobre o plano transversal, como mostrado na figura 2. A figura 2 representa a determinação de T_1 por uma série de medições de T_2 durante um ciclo de polarização. O relaxamento no plano transversal é geralmente um processo mais complexo quando comparado com o relaxamento T_1 .

O instrumento usando a sonda de RMN 42 é capaz de adquirir múltiplas séries de eco de tempo de espera diverso T_w . O decaimento da magnetização das múltiplas séries de eco, $M(t, T_w)$, pode ser representado pela equação 1:

$$M(t, T_w) = \iint f(T_{2app}, T_1) (1 - e^{-T_w/T_1}) e^{-t/T_{2app}} dT_1 dT_{2app} \quad (1)$$

onde M representa a amplitude de magnetização do eco e f representa uma função de distribuição de porosidade bidimensional. O termo bidimensional (2D) aqui representa as duas dimensões no domínio de parâmetro, T_1 e T_{2app} . Um fator de polarização, $1 - e^{-T_w/T_1}$, é importante para analisar os dados porque tipos diferentes de fluido têm T_1 diferente. O fator de decaimento do eco, $e^{-t/T_{2app}}$, onde T_{2app} representa o tempo de relaxamento transversal aparente e t representa uma duração da série de eco, não é somente determinado pelas propriedades do fluido, mas também é controlável pelos parâmetros de aquisição g e T_E , como fornecido na equação (2).

$$\frac{1}{T_{2app}} = \frac{1}{T_{2j}} + \frac{(\gamma^* g^* T_E)^* D}{12} \quad (2).$$

Em geral, a equação (1) pode ser invertida para obter ambas as distribuições do tempo de relaxamento para T_1 e T_{2app} . Alternativamente, a equação (1) pode ser reformulada substituindo as equações (3) para produzir a equação (4):

$$T_1 = R * T_{2app} \quad (3)$$

$$E(t, T_w) = \iint g(T_{2app}, R) (1 - e^{-T_1/R * T_{2app}}) e^{-t/T_{2app}} dR dT_{2app} \quad (4);$$

onde R representa uma razão de T_1/T_{2app} . Isso proporciona a resolução para uma função de distribuição de parâmetro bidimensional $g(T_{2app}, R)$. Por fazer essa substituição, as diferenças relacionadas à razão R podem ser observadas em um mapa 2D.

5 A experimentação mostrou que, para pelo menos algumas condições, uma correlação entre a razão, R , e a viscosidade, η , existe. Por exemplo, à medida que a viscosidade do óleo aumenta acima de aproximadamente 100 cp, para uma frequência de campo magnético de aproximadamente dois (2) MHz, a razão R pode diferir de um (1).

10 Um versado na técnica reconhecerá que uma variedade de aspectos e parâmetros usados em uma inspeção de RMN pode ser modificada para uso de certos algoritmos. O precedente é meramente um exemplo não-limitador de ajuste de limites ou faixas para obter os dados desejados.

Pela determinação da razão de T_1 sobre $T_{2app}(R)$ de um algoritmo de inversão tal como o proporcionado acima (com referência às equações 1-4), é possível identificar aspectos da viscosidade, η . Por exemplo, óleo pesado pode ser identificado. Uma razão de T_1/T_{2app} que está próxima de um (1), corresponde frequentemente a óleo leve com pequena razão de gás para óleo (GOR), enquanto um resultado mais alto tipicamente corresponderá a óleo pesado. Em resumo, a razão R tipicamente aumenta com viscosidade crescente, η . Em outras modalidades, óleos leves com uma GOR significativa podem exibir uma elevada razão, R , em contraste com o comportamento de óleos pesados tendo uma viscosidade menor, η e razão mais alta, R . Em geral, uma marcação da razão, R , contra viscosidade, η ,
20 tem uma forma em formato de V, com inclinação variada entre óleo leve e óleo pesado.

Em outras modalidades, a determinação da razão do tempo de relaxamento, R , é útil para determinar a viscosidade, η , do óleo espumoso. Por exemplo, o óleo pesado espumoso exibe tipicamente uma razão R de
30 T_1/T_{2app} mais alta do que o óleo pesado não-espumoso. Isso é geralmente

uma consequência do gás em solução com o óleo. O óleo espumoso pode ser mais afetado pelo gradiente de campo do que o óleo não-espumoso, assim reduzindo o T_{2app} associado.

Como um versado na técnica esperaria, em casos de óleo leve com uma razão GOR significativa, o T_1/T_{2app} aumenta. Relações exemplares da razão R e viscosidade, η , são representadas nas figuras 3 e 4. A figura 3 representa os tempos de relaxamento para certos padrões, sendo que as medições foram concluídas usando uma frequência Larmor entre aproximadamente 2 MHz e 80 MHz. Em outras modalidades, a frequência fica entre aproximadamente 0,5 MHz e aproximadamente 100 MHz. A figura 4 representa ajustes de potência aos conjuntos de dados dos tempos de relaxamento T_1 e T_2 , bem como a razão R . Em outras modalidades, ajustes diferentes das funções de potência podem ser aplicáveis. Por exemplo, uma função exponencial pode ser relevante. Em algumas modalidades, uma função exponencial é desenvolvida como uma série de funções de potência usando uma abordagem da série Taylor.

Deve ser observado que tipicamente o óleo pesado exibe uma distribuição para o tempo de relaxamento transversal T_2 que fica em uma faixa abaixo de aproximadamente 33 milissegundos (ms) para aproximadamente 1 ms, e pode ser até mesmo mais curta (como no caso de óleo extra-pesado). A distribuição para o tempo de relaxamento longitudinal, T_1 , entretanto, pode mostrar valores até uma ordem de magnitude mais alta do que o tempo de relaxamento transversal T_2 . A integração dos dados geoquímicos e os resultados da RMN indicam uma forte correlação entre $T_{1,LM}$ (uma média logarítmica do T_1) e a viscosidade, η . É reconhecido que as técnicas descritas aqui realmente encontram certas limitações. Entretanto, em geral, con-

tanto que um óleo possa ser medido com o uso da RMN, a razão R pode ser relacionada com a viscosidade, η .

Na figura 5, relações entre a razão, R , e a média logarítmica (LM) para T_1 e T_2 são representadas para várias amostras. Essas amostras foram tiradas, cada uma, da Bacia de São Jorge na Argentina. Aspectos adicionais das amostras apresentadas na figura 5 são mostrados na figura 6. A

partir das várias amostras, a amostra No. 5 foi selecionada para calcular a razão, R , usando a técnica descrita acima com referência às equações (1-4). A distribuição para T_1 e as distribuições diferentes para T_2 são mostradas na figura 5. As várias distribuições de T_2 são os tempos de espera mostrados, T_w , de 5 milissegundos (ms), 7 ms, 10 ms, 20 ms, 50 ms, 70 ms, 100 ms, 200 ms e 500 ms. A figura 7 mostra os resultados da inversão para R , bem como as distribuições calculadas para T_1 e T_2 de acordo com o tempo de espera, T_w . Esses resultados se correlacionam muito bem com a medição mostrada na figura 6 e o conjunto de séries de eco usado para a inversão.

É observado que o termo "retardo de reciclagem (RD)" é equivalente ao tempo de espera T_w e que a terminologia selecionada para uso geralmente depende do software de modelagem (tais como o software Maran e o software MRLAB). Em outras modalidades, o tempo de espera, T_w , fica entre aproximadamente 5 ms e 10.000 ms.

O procedimento precedente é também válido quando a difusividade, D , é muito baixa ou o gradiente do campo magnético, G , é baixo ou zero, de modo que T_{2app} fica perto ou igual a $T_{2intrinsic}$ (da natureza intra e intermolecular). Em algumas modalidades, o procedimento exige a substituição de valores de pico por um tempo de relaxamento combinado médio logarítmico, $T_{1,2}$, quando uma distribuição de tempo de relaxamento combinada exibe uma de uma aparência nítida e uma forma Gaussiana.

Para confirmação dos ensinamentos aqui contidos, vários componentes de análise podem ser usados, incluindo sistemas digitais e/ou analógicos. O sistema pode ter componentes, tais como um processador, meios de armazenamento, memória, entrada, saída, elo de comunicações (ligado por fiação, sem-fio, lama pulsada, ótico ou outro), interfaces do usuário, programas de software, processadores de sinal (digital ou analógico) e outros tais componentes (tais como resistores, capacitores, indutores e outros) para proporcionar a operação e análises do aparelho e métodos descritos aqui em qualquer uma de várias maneiras bem apreciadas na técnica. É considerado que esses ensinamentos podem ser, mas não precisam ser, implementados em união com um conjunto de instruções executáveis por computador

armazenadas em um meio legível por computador, incluindo memória (ROMs, RAMs), ótico (CD-ROMs) ou magnético (discos, unidades rígidas) ou qualquer outro tipo que quando executado induz um computador a implementar o método da presente invenção. Essas instruções podem proporcionar a operação do equipamento, controle, coleta e análise de dados e outras funções julgadas relevantes por um projetista do sistema, dono, usuário ou outro tal pessoal, além das funções descritas nessa descrição.

Além do que, vários outros componentes podem ser incluídos e evocados para proporcionar aspectos dos ensinamentos aqui contidos. Por exemplo, uma linha de amostra, armazenamento de amostra, câmara de amostra, exaustão de amostra, bomba, pistão, suprimento de energia (por exemplo, pelo menos um entre um gerador, um suprimento remoto e uma bateria), suprimento de vácuo, suprimento de pressão, unidade ou suprimento de refrigeração (isto é, resfriamento), componente de aquecimento, força motriz (tais como uma força translacional, força de propulsão ou uma força rotacional), ímã, eletroímã, sensor, eletrodo, transmissor, receptor, transceptor, antena, controlador, unidade ótica, unidade elétrica ou unidade eletromecânica podem ser incluídos na confirmação dos vários aspectos discutidos aqui ou na confirmação de outras funções além dessa descrição.

O versado na técnica reconhecerá que os vários componentes ou tecnologias podem proporcionar certa funcionalidade ou aspectos necessários ou benéficos. Dessa maneira, essas funções e aspectos conforme possam ser necessários no suporte das reivindicações anexas e suas variações são reconhecidos como sendo inerentemente incluídos como uma parte dos ensinamentos aqui contidos e uma parte da invenção descrita.

Embora a invenção tenha sido descrita com referência às modalidades exemplares, será entendido por aqueles versados na técnica que várias mudanças podem ser feitas e equivalentes podem ser substituídos pelos seus elementos sem se afastar do escopo da invenção. Além disso, muitas modificações serão verificadas por aqueles versados na técnica para adaptar um instrumento particular, situação ou material aos ensinamentos da invenção sem se afastar do seu escopo essencial. Portanto, é planejado que

a invenção não seja limitada à modalidade particular descrita como o melhor modo considerado para execução dessa invenção, mas que a invenção inclua todas as modalidades que se situam dentro do escopo das reivindicações anexas.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para determinar a viscosidade, η , de um fluido no fundo de poço, o método **caracterizado pelo fato de** compreender:

5 (a) executar uma inspeção de ressonância magnética nuclear (RMN) do fluido;

(b) determinar um tempo de relaxamento longitudinal, T_1 , e um tempo de relaxamento transversal aparente, T_{2app} , para o fluido em que no a obtenção de um decaimento da magnetização de múltiplas séries de eco de RMN proporciona a determinação de T_1 e T_{2app} ;

10 (c) formar uma razão R de T_1/T_{2app} para o fluido;

(d) determinar a viscosidade, η , de acordo com a razão, R ; e

(e) fornecer a viscosidade para um usuário como um resultado.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que T_{2app} é aproximadamente igual a um tempo de relaxamento transversal intrínseco, $T_{2intrinsic}$, quando a intensidade do gradiente de campo de radiofrequência, G , é aproximadamente igual a zero.

3. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que a determinação de T_1 e T_{2app} compreende a resolução da relação:

$$M(t, T_w) = \iint f(T_{2app}, T_1) (1 - e^{-T_w/T_1}) e^{-t/T_{2app}} dT_1 dT_{2app}$$

20 onde

(a) T_w representa um tempo de espera;

(b) t representa uma duração de uma série de eco e

(c) f representa uma função de distribuição de porosidade bidimensional.

25 4. Método, de acordo com a reivindicação 3, **caracterizado pelo fato de** que a relação seguinte é substituída pelo tempo de relaxamento longitudinal, T_1 :

$$T_1 = R * T_{2app}.$$

5. Método, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pelo fato de** que a substituição produz a relação:

$$E(t, T_w) = \iint g(T_{app}, R) \left(1 - e^{T_w/R * T_{app}}\right) e^{-t/T_{app}} dR dT_{app}$$

onde

g representa um parâmetro de aquisição.

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que a inspeção é executada usando uma frequência de campo magnético de aproximadamente 0,5 MHz a aproximadamente 100 MHz.

7. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que o tempo de espera, T_w , fica entre aproximadamente 5 milissegundos (ms) e aproximadamente 10.000 ms.

8. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que a formação de uma razão R compreende determinar uma média logarítmica para pelo menos um entre o tempo de relaxamento transversal, T_2 , e o tempo de relaxamento longitudinal, T_1 .

9. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que também compreende substituir valores de pico por um tempo de relaxamento combinado médio logarítmico, $T_{1,2}$, quando a distribuição de tempo de relaxamento combinado exibe uma dentre uma aparência nítida e uma forma Gaussiana.

10. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que a viscosidade, η , está relacionada com pelo menos um dentre o tempo de relaxamento transversal, T_2 , o tempo de relaxamento longitudinal, T_1 , e a razão, R , por uma dentre uma função de potência, uma função exponencial e uma série de Taylor.

11. Meio legível por máquina **caracterizado por** executar o método para determinar a viscosidade de um fluido no fundo de poço como descrito nas reivindicações 1 a 10, compreendendo instruções legíveis por máquina armazenadas no meio legível por máquina para determinar a viscosidade, η , de um fluido no fundo de poço, as instruções compreendendo instruções para:

(a) executar uma inspeção de ressonância magnética nuclear (RMN) do fluido;

(b) determinar um tempo de relaxamento longitudinal, T_1 , e um

tempo de relaxamento transversal aparente, T_{2app} , para o fluido;

(c) formar uma razão R de T_1/T_{2app} para o fluido e

(d) determinar a viscosidade, η , de acordo com a razão, R ;

em que o tempo de espera, T_w , fica entre aproximadamente 5

5 milissegundos (ms) e aproximadamente 10.000 ms.

12. Meio legível por máquina, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo fato de** que a obtenção de um decaimento da magnetização de múltiplas séries de eco de RMN proporciona a determinação de T_1 e T_{2app} .

10 13. Meio legível por máquina,, de acordo com a reivindicação 12, **caracterizado pelo fato de** que a determinação de T_1 e T_{2app} compreende a resolução da relação:

$$M(t, T_w) = \iint f(T_{2app}, T_1) (1 - e^{-T_w/T_1}) e^{-t/T_{2app}} dT_1 dT_{2app}$$

onde

(a) T_w representa um tempo de espera;

15 (b) t representa uma duração de uma série de eco e

(c) f representa uma função de distribuição de porosidade bidimensional.

14. Meio legível por máquina,, de acordo com a reivindicação 13, **caracterizado pelo fato de** que a relação seguinte é substituída pelo tempo de relaxamento longitudinal, T_1 :

$$T_1 = R * T_{2app}.$$

15. Meio legível por máquina,, de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de** que a substituição produz a relação:

$$E(t, T_w) = \iint g(T_{2app}, R) (1 - e^{-T_w/R * T_{2app}}) e^{-t/T_{2app}} dR dT_{2app}$$

onde

g representa um parâmetro de aquisição.

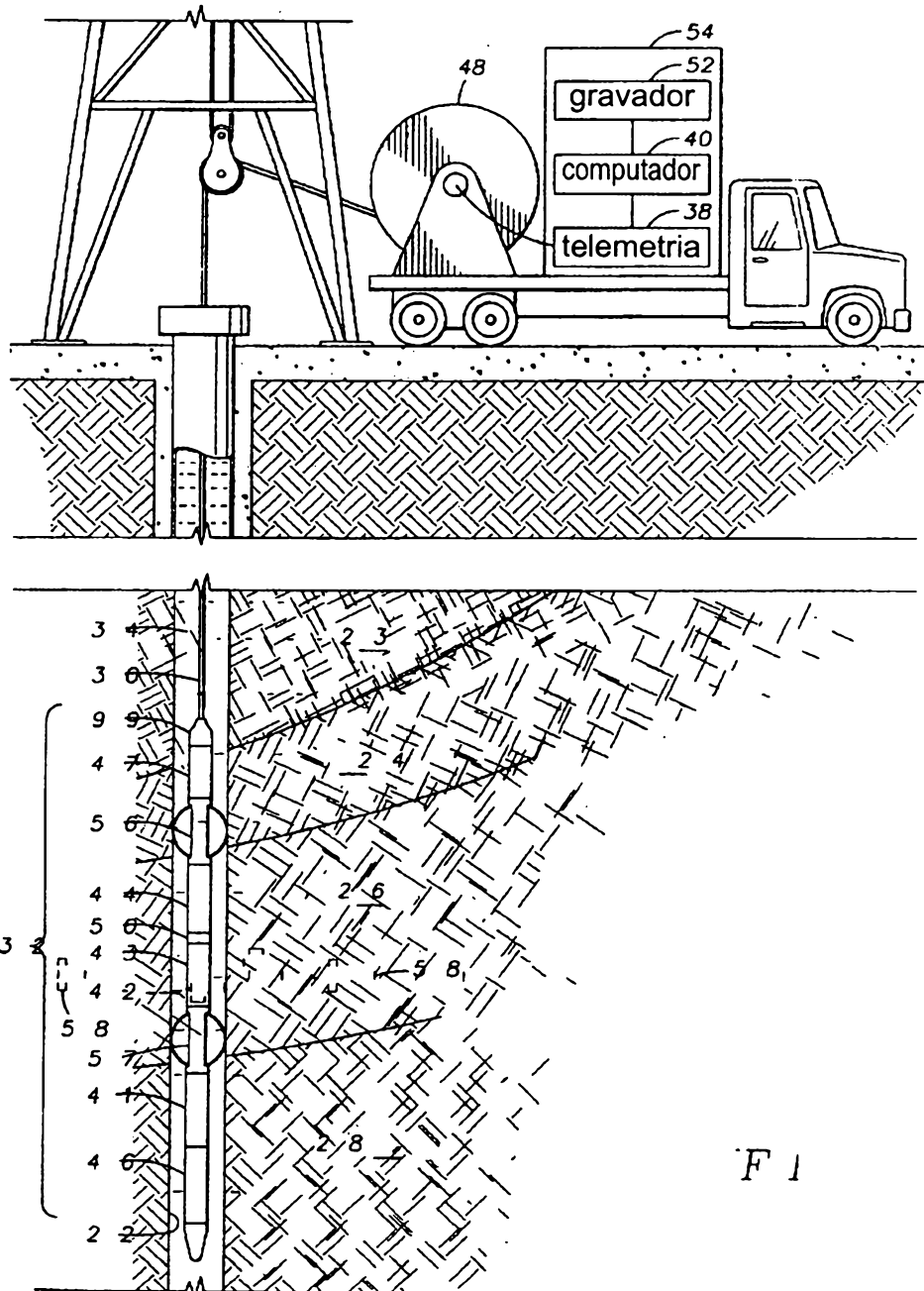
25 16. Meio legível por máquina,, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo fato de** que a inspeção é executada usando uma frequência de campo magnético de aproximadamente 0,5 MHz a aproximadamente 100 MHz.

17. Meio legível por máquina,, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo fato de** que a formação de uma razão R compreende determinar uma média logarítmica para pelo menos um entre o tempo de relaxamento transversal, T_2 , e o tempo de relaxamento longitudinal, T_1 .

5

18. Meio legível por máquina,, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado pelo fato de** que a viscosidade, η , está relacionada com pelo menos um entre o tempo de relaxamento transversal, T_2 , o tempo de relaxamento longitudinal, T_1 , e a razão, R , por uma entre uma função de potência, uma função exponencial e uma série de Taylor.

Fig. 1



F 1

Fig. 2

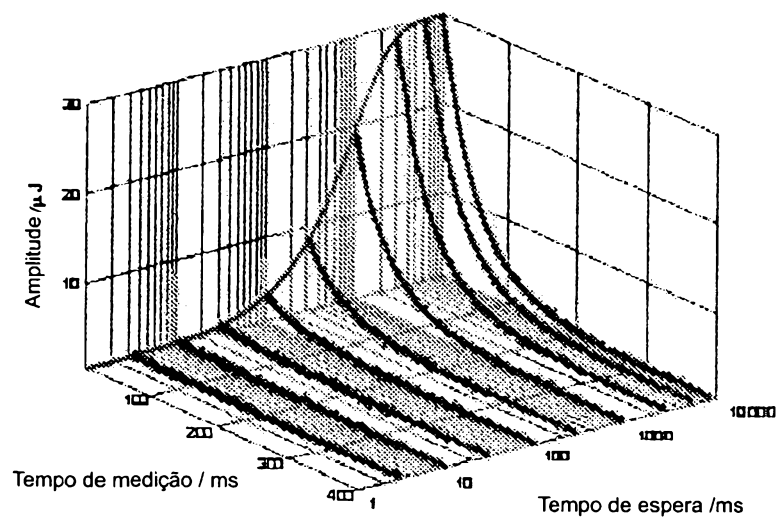


Fig. 3

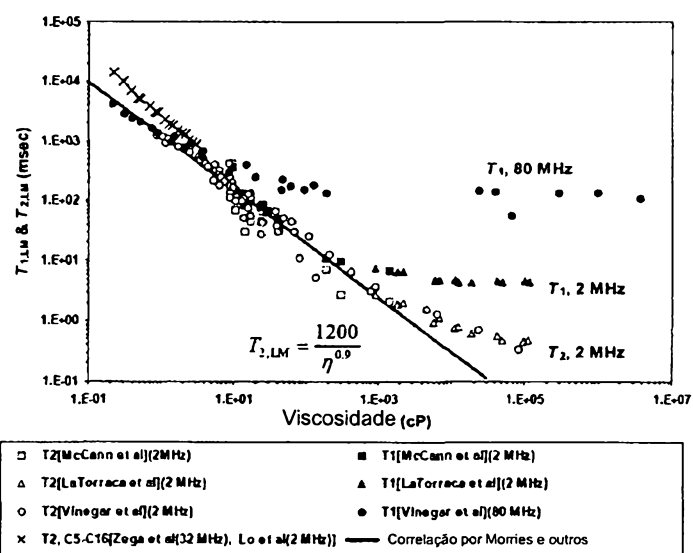


Fig. 4

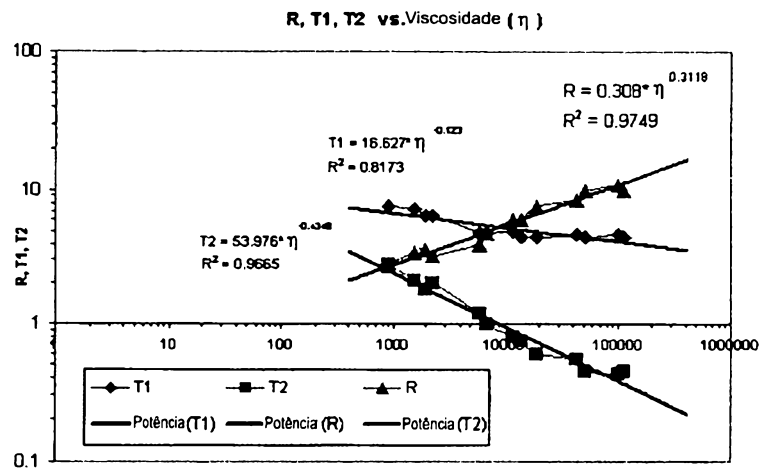


Fig. 5

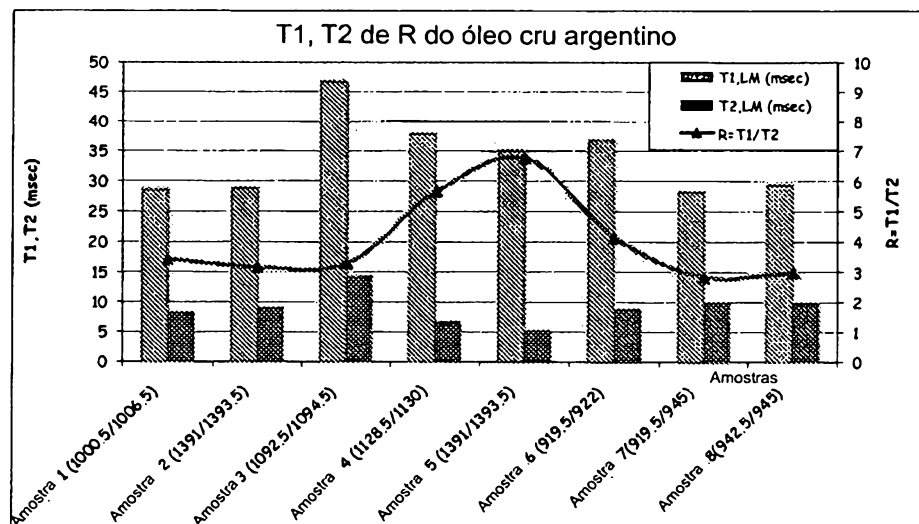


Fig. 6

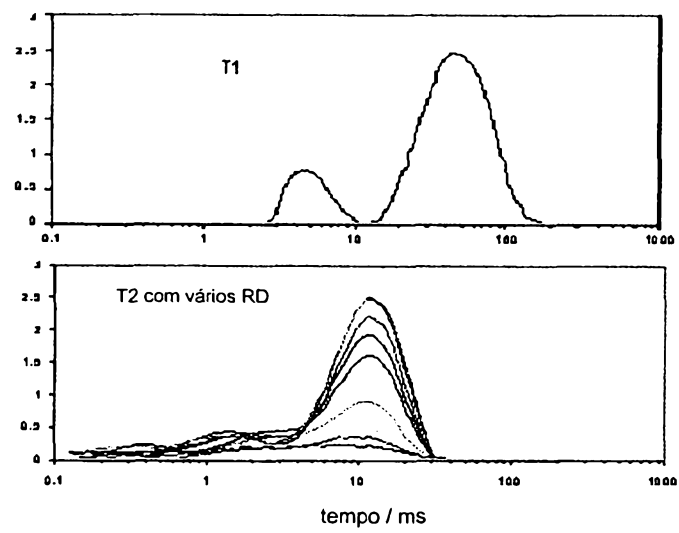


Fig. 7

