



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

(11) PI 0310098-7 B1



(22) Data do Depósito: 19/05/2003

(45) Data de Concessão: 23/07/2019

(54) Título: MÉTODO PARA COMPRIMIR DADOS DE PRESSÃO COLETADOS EM UM FURO DE POÇO DE UMA FORMAÇÃO

(51) Int.Cl.: G01V 1/40.

(30) Prioridade Unionista: 17/05/2002 US 60/381,347.

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

(72) Inventor(es): MARK A. PROETT; PRESTON N. WEINTRAUB; CHRISTOPHER A. GOLLA; SVETOZAR D. SIMEONOV.

(86) Pedido PCT: PCT US2003015921 de 19/05/2003

(87) Publicação PCT: WO 2003/098266 de 27/11/2003

(85) Data do Início da Fase Nacional: 17/11/2004

(57) Resumo: "MÉTODO PARA COMPRIMIR DADOS COLETADOS EM UM FURO DE POÇO DE UMA FORMAÇÃO, CONJUNTO DE CONTROLE PARA USO EM UM APARELHO DE TESTE DE FORMAÇÃO DURANTE PERFURAÇÃO, E, APARELHO DE TESTE DE FORMAÇÃO DURANTE PERFURAÇÃO". Um esquema de compressão para reduzir a quantidade de dados que tem que ser transmitida por enlace ascendente a partir de um aparelho de teste de formação TSD durante perfuração (40). Amostras periódicas são tomadas dentro do aparelho de teste de formação (45), e antes de transmitir dados por enlace ascendente (61), as amostras são analisadas para gerar parâmetros de ajuste de curva que definem uma curva que mais proximamente se ajusta aos dados amostrados (46). Um conjunto mínimo de pontos de dados, variáveis de tempo e parâmetros de ajuste de curva é transmitido para a superfície, onde os dados transmitidos são usados para reconstruir a curva de teste de pressão de formação (42). Uma qualidade de valor de ajuste é também transmitida com o conjunto de dados mínimo como uma indicação da qualidade do ajuste entre os dados reconstruídos e os pontos de dados realmente amostrados.

“MÉTODO PARA COMPRIMIR DADOS DE PRESSÃO COLETADOS EM UM FURO DE POÇO DE UMA FORMAÇÃO”

Campo técnico

A presente invenção refere-se, de modo geral a métodos e aparelho para usar um testador de formação para recuperar características de formação em uma formação subterrânea, através de um furo de poço, pela aquisição de dados de resposta de pressão versus tempo, de modo a calcular pressão de formação, permeabilidade, e outras características da formação. Mais particularmente, a porção inferior refere-se a um método de aquisição dos mencionados dados a partir de um testador de formação disposto em uma coluna de perfuração configurado para efetuar teste de formação durante operações de perfuração. Mais particularmente ainda, a presente invenção refere-se a um método de comprimir a quantidade de dados transmitida para a superfície durante teste de formação durante operação de perfuração para diminuir a extensão de tempo necessária para transmitir os dados de características da formação.

Fundamentos da invenção

Na perfuração e produção de poços de hidrocarboneto, otimizar o desempenho dos poços é essencial. A aquisição de dados precisos do poço é crítica para a otimização da completação, produção e/ou retrabalho de poços de hidrocarboneto. Estes dados de poço podem ser usados na determinação da localização e qualidade de reservas de hidrocarboneto, se as reservas podem ser produzidas através do furo de poço, e para operações de controle de poço durante perfuração.

O registro de poços é um meio de coletar dados de formações subsuperficiais, através da suspensão de instrumentos de medição dentro de um furo de poço e elevando e baixando os instrumentos enquanto as medições

são feitas ao longo da extensão do furo de poço. Por exemplo, dados podem ser coletados baixando-se um instrumento de medição no furo de poço usando-se equipamento de registro por linha de cabo, de registro durante perfuração (LWD), ou de medição durante perfuração (MWD). Em operações de registro por linha de cabo, a coluna de perfuração é removida do furo de poço e ferramentas de medição são baixadas no furo de poço pelo uso de um cabo pesado que inclui fiações para prover energia e controle a partir da superfície. Nas operações LWD e MWD, as ferramentas de medição são integradas à coluna de perfuração e são ordinariamente energizadas por baterias e controladas por sistemas de controle embarcados e/ou remotos. Apesar do tipo de equipamento de registro utilizado, as ferramentas de medição, normalmente, adquirem dados de múltiplas profundidades ao longo da extensão do poço. Estes dados são processados para prover um quadro de informação, ou registro, que é, então, usado, entre coisas, para determinar a localização e qualidade de reservas de hidrocarboneto. Uma dessas ferramentas de medição usadas para avaliar formações subterrâneas é um testador de formação.

Para compreender a mecânica de teste de formação, é importante, primeiro, entender como hidrocarbonetos são acumulados em formações subterrâneas. Hidrocarbonetos não são, tipicamente, localizados em grandes lagos subterrâneos, mas, ao contrário, são encontrados dentro de vazios muito pequenos, ou espaços de poros, no interior de certos tipos de rocha. A habilidade de uma formação rochosa permitir que hidrocarbonetos se movam entre os poros e, conseqüentemente, para um furo de poço, é conhecida como permeabilidade. A viscosidade do óleo é também um importante parâmetro, e a permeabilidade dividida pela viscosidade é denominada “mobilidade” (k/μ). Similarmente, os hidrocarbonetos contidos no interior dessas formações estão, normalmente, sob pressão e é importante determinar a magnitude desta pressão para, segura e eficientemente, produzir

o poço.

Durante operações de perfuração, um furo de poço está, tipicamente, carregado com um fluido de perfuração (“lama”), como água, ou lama baseada em água ou óleo. A densidade do fluido de perfuração pode ser aumentada pela adição de sólidos especiais que ficam em suspensão na lama. O aumento da densidade do fluido de perfuração aumenta a pressão hidrostática e ajuda a manter a integridade do furo de poço e impede fluidos de formação indesejáveis de entrar no furo de poço. O fluido de perfuração é continuamente circulado durante operações de perfuração. Com o tempo, uma vez que parte da porção líquida da lama flui para a formação, sólidos na lama são depositados sobre a parede interna do furo de poço, formando uma lama seca.

A lama seca atua como uma membrana entre o furo de poço, que está carregado com fluido de perfuração, e a formação de hidrocarboneto. A lama seca limita também a migração de fluidos de perfuração da área de alta pressão hidrostática no furo de poço para a pressão relativamente baixa da formação. Lama seca varia, tipicamente, de cerca de 0,635cm a 1,27cm de espessura, e lama seca polimérica tem uma espessura, freqüentemente, de 0,254cm. Sobre o lado de formação da lama seca, a pressão diminui gradativamente para equalizar com a pressão da formação circundante.

A estrutura e operação de um testador de formação por linha de cabo genérico estão melhor explicadas pela referência à Fig. 1. Em uma típica operação de teste de formação, um testador de formação 500 é baixado por um cabo de linha de cabo 501 até uma profundidade desejada no interior do furo de poço 502. O furo de poço 502 é carregado com lama 504, e a parede do furo de poço 50-2 é revestida com uma lama seca 506. Devido ao lado interno da ferramenta ser aberto para o poço, a pressão hidrostática no interior e exterior da ferramenta é a mesma. Uma vez que o testador de formação 500 esteja na profundidade desejada, uma sonda 512 é estendida

para encaixar de modo vedado com a parede do furo de poço 502 e a linha de fluxo do testador 519 é isolada do furo de poço 502 pelo fechamento da válvula equalizadora 514.

5 O testador de formação 500 inclui uma linha de fluxo 519 em comunicação fluida com a formação e um sensor de pressão 516 que pode monitorar a pressão do fluido na linha de fluxo 519 em relação ao tempo. A partir destes dados de pressão versus tempo, a pressão e permeabilidade da formação podem ser determinadas. Técnicas para determinar a pressão e permeabilidade da formação a partir de dados de pressão versus tempo estão
10 discutidas na patente US 5.703.286, de Proett et al., e aqui incorporada pela referência para todos os fins.

Embora a descrição acima seja provida no contexto de testador de formação por linha de cabo, os mesmos conceitos se aplicam geralmente a aplicações de teste de formação durante perfuração (FTWD), quando a
15 ferramenta de teste de formação é disposta no interior da coluna de perfuração. Dado o custo de paralisação de perfuração associada à remoção de uma coluna de perfuração e inserção de um testador por linha de cabo em um furo de poço, é claramente vantajoso efetuar testes e adquirir dados sobre características de formação durante breves interrupções na perfuração. Em
20 qualquer caso, com FTWD, a coluna de perfuração não tem que ser removida de um furo de poço, e todos os dados podem ser transmitidos para a superfície enquanto a coluna de perfuração permanece no furo de poço.

Infelizmente, ferramentas FTWD dispostas sobre coluna de perfuração não incluem, geralmente, vias de transmissão para
25 transmitir/receber dados da superfície. Enlaces de comunicação, como cabos para dados, cabos de fibra ótica, ou transceptores de RF não estão, simplesmente, presentes nas colunas de perfuração convencionais. Entretanto, há ainda a necessidade de transmitir os resultados de uma operação RFWD ou LWD de volta para a superfície. Este problema não é novo na técnica. Desde

muito tempo foi reconhecido na indústria de óleo e gás que a comunicação entre o equipamento de superfície e o conjunto de perfuração subsuperficial é tanto necessária como desejável.

Sinalização por enlace ascendente e enlace descendente, ou
5 comunicação entre equipamento superficial e um conjunto de perfuração, é, tipicamente, efetuada para prover instruções em forma de comandos ao conjunto de perfuração e para transmitir dados de registro para a superfície. Por exemplo, em uma operação de perfuração direcional, sinais de enlace descendente podem instruir o aparelho de perfuração a alterar a direção da
10 broca de perfuração por um determinado ângulo ou a mudar a direção da face da ferramenta. Sinalização por enlace ascendente, ou comunicação entre o conjunto de perfuração e o equipamento de superfície. É tipicamente efetuada para verificar as instruções por enlace descendente e comunicar dados medidos no interior do furo, durante perfuração, para prover informação
15 valiosa ao operador da perfuração.

Um método comum de sinalização de enlace descendente é através de telemetria de pulso de lama. Ao se perfurar um poço, fluido é bombeado furo abaixo para que um receptor no interior do furo, dentro do conjunto de perfuração, possa medir a pressão e/ou velocidade de fluxo deste
20 fluido. Telemetria de pulso de lama é um método de enviar sinais pela criação de uma série de mudanças instantâneas de pressão, ou pulsos, no fluido de perfuração, que podem ser detectados por um receptor. Para sinalização de enlace descendente, o padrão de pulsos de pressão, incluindo a duração de pulso, amplitude e tempo entre pulsos, é detectado pelo receptor no interior do
25 furo e, depois, interpretado como uma instrução particular para o conjunto no interior do furo.

O uso de telemetria de pulso de lama como um meio de comunicação é bem conhecido por alguém experiente na técnica. Exemplos representativos de sistemas de telemetria de pulso de lama podem ser

encontrados nas patentes US 3.949.354, 3.958.217, 4.216.536, 4.401.134, 4.515.225 e 5.113.379. Uma limitação infeliz em relação a sistemas de telemetria de pulso de lama é o fato da largura de faixa ser severamente limitada em comparação com sistemas de transmissão de dados por linha de cabo. É geralmente aceito por alguém experiente na técnica que velocidades de transmissão de dados em sistemas de telemetria de pulso de lama sejam da ordem de dois bits por segundo.

Os efeitos desta limitação podem ser entendidos considerando-se a linha pressão x tempo representativa do teste de formação mostrada na Fig. 2, ilustrando um número de amostras de pressão tomadas a intervalos de tempo fixos durante um teste de pressão de formação. Especificamente, o esquema de amostragem mostrado na Fig. 2 produz 50 amostras discretas da curva de pressão, incluindo transições de uma condição hidrostática de teste pré-formação até o ponto em que o obturador é ajustado e a válvula equalizadora ser fechada, que, no caso de uma vedação apropriada, é caracterizada por uma maior pressão. O teste de formação continua baixando-se a pressão no testador de formação pelo uso de um pistão de abaixamento ou algum outro meio equivalente de redução de pressão. Idealmente, o ciclo de abaixamento leva a pressão dentro do testador de formação para baixo da pressão de formação, para permitir que a pressão no interior do testador de formação suba precisamente até a pressão de formação. Seguindo o ciclo de abaixamento, a pressão no interior do testador de formação é permitida subir até a pressão de formação sem qualquer indução por dispositivos externos. Ou seja, a pressão sobe naturalmente a uma velocidade governada pelo gradiente de pressão e pela mobilidade do fluido na formação. Finalmente, uma vez que a pressão no testador de formação convirja para a pressão de formação, uma leitura de pressão final é tomada antes de liberar o obturador e a pressão subir novamente para a pressão hidrostática que existe no interior do ânulo do furo de poço.

Em geral, a captura de informação na curva de pressão mostrada na Fig. 2 exige uma amostragem de pontos de pressão a tempos discretos. Estas amostras de pressão são, depois, subseqüentemente convertidas em representações digitais, caso o sensor de pressão 516 seja um dispositivo analógico. O tamanho das palavras digitais que representam cada amostra individual tem que ser mantido suficientemente pequena e o tempo entre amostras tem que ser mantido suficientemente separado para permitir que os dados sejam transmitidos em tempo real. Em geral, estas limitações contrastam com os requisitos para reconstruir uma curva a partir de amostras 10 digitais. É normalmente desejável incluir amostras com maior resolução de bit que sejam espaçadas suficientemente próximas uma da outra para garantir que todas as características relevantes de pressão sejam transmitidas por enlace ascendente. Infelizmente, telemetria de pulso de lama simplesmente não permite tal luxo. Com a limitação de dois bit/segundo, amostras de pressão de 15 palavra de oito bits não podem ser transmitidas mais rapidamente do que a cada quatro segundos. Na realidade, resoluções de bit têm que ser ainda menores, e velocidades de amostra têm que ser maiores, para levar em conta os cabeçalhos de pacote e outros dados de transmissão. Conseqüentemente, as limitações impostas pela telemetria de pulso de lama impõem restrições 20 significativas à qualidade de dados de pressão de formação coletados durante operações de perfuração.

As generalizações acima foram descritas assumindo-se que bombas de lama estejam ligadas, implicando, desse modo, que os dados sejam transmitidos em tempo real ou próximo a tempo real pelo uso de telemetria de pulso de lama. Entretanto, pode ser desejável efetuar testes de formação com 25 todas as bombas desligadas. Pulsos de bomba podem adicionar ruído às medições de pressão, tornando difícil avaliar-se como a precisão das medições é afetada. Desse modo, a qualidade de amostras de pressão aumenta se vibrações e pulsos externos forem temporariamente interrompidos pelo

desligamento de todas as bombas. Se o teste de formação ocorrer com bombas de lama desligadas, a habilidade de comunicar dados de pressão em tempo real cessa. Conseqüentemente, torna-se imperativo que dados relevantes de pressão sejam transmitidos imediatamente em seguida a um teste de formação, quando as bombas de lama são religadas. Além disso, é crítico que os mencionados dados sejam transmitidos tão rapidamente quanto possível.

Dados os problemas acima associados à transmissão de dados de pressão de formação por enlace ascendente a partir de um furo de poço para a superfície, seria desejável transmitir uma versão comprimida dos dados de pressão que permita a reconstrução das curvas relevantes de pressão. Para que isto seja possível, seria vantajoso prover apenas informação sobre pressão e tempo crítica suficiente para retransmitir características de formação. Em adição, dada a natureza não-confiável da maioria de técnicas de compressão, também seria desejável prover alguma indicação de quanto precisamente a informação comprimida casa com as amostras de dados reais tomadas no interior do furo.

DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS DESENHOS

Para uma descrição detalhada dos modos de realização preferidos da invenção, será feita referência aos desenhos anexos, nos quais:

A Fig. 1 mostra uma representação típica de um testador de formação por linha de cabo;

A Fig. 2 mostra uma típica curva de teste de pressão de formação e eventos relacionados;

A Fig. 3 mostra uma representação esquemática de uma ferramenta de teste de formação durante uma perfuração (FTWD) em uma configuração de interior de furo adaptada para transmitir dados comprimidos de curva de teste de pressão de formação como modo de realização preferido;

As Figs. 4A e 4B mostram curvas representativas de teste de pressão de formação refletindo diferentes características de formação;

A Fig. 5 mostra uma curva de teste de pressão de formação refletindo a dependência de parâmetro de ajuste de tempo e curva para as porções variáveis de tempo da curva; e

5 A Fig. 6 mostra uma curva de teste de pressão de formação refletindo a as variáveis de tempo críticas que são consideradas na geração de dados comprimidos de curva de teste de formação.

NOTAÇÃO E NOMENCLATURA

Certos termos são usados por toda a descrição a seguir e reivindicações, para referência a componentes de sistema particulares. Como
10 alguém experiente na técnica apreciará, é possível referirmos a um componente por diversos nomes. Este documento não tem a intenção de distinguir entre componentes que difiram no nome, mas não na função. Na discussão a seguir e nas reivindicações, os termos “incluindo” e “compreendendo” são usados em um modo aberto, e, assim, devem ser
15 interpretados como significando “incluindo, mas não de modo limitativo”. Referências a para cima ou para baixo serão feitas para fins de descrição como “cima”, “para cima” ou “superior” significando em direção à superfície de um poço e “baixo”, “para baixo”, ou “inferior” significando em direção ao fundo de um poço. Em adição, os termos “acoplam”, “acopla” ou “acoplado”
20 têm a intenção de significar uma conexão direta ou indireta. Desse modo, se um primeiro dispositivo se acopla a um segundo dispositivo, esta conexão pode ser através de uma conexão direta, ou através de uma conexão elétrica ou fluída indireta, via outros dispositivos e conexões.

Este exemplo de revelação é provido com o entendimento de
25 que deve ser considerado como uma exemplificação dos princípios da invenção, e não se destina a limitar a invenção àquele descrito ou ilustrado aqui. Em particular, vários modos de realização da presente invenção provêm um número de diferentes construções e métodos de operação. Deve ser totalmente reconhecido que os diferentes ensinamentos dos modos de

realização abaixo discutidos podem ser empregados separadamente ou em combinação adequada para produzir os resultados desejados.

Descrição detalhada dos modos de realização preferidos

O modo de realização preferido aqui descrito revela, de modo geral, esquema de compressão para gerar um número limitado de pontos de dados, parâmetros de curva, e parâmetros de ajuste de curva que definem totalmente uma curva de pressão de teste de formação. Os pontos de dados e todos os parâmetros podem ser transmitidos de uma unidade de comunicações no interior do furo para um receptor à superfície, onde os pontos de dados e todos os parâmetros podem ser usados para reconstruir uma representação da curva de pressão original de teste de formação. O modo de realização preferido apresenta, desse modo, um meio de reduzir a quantidade de dados que tem que ser transmitida por enlace ascendente usando pulsos de lama ou outra telemetria e provê ainda resultados relevantes de teste de formação. O escopo total do modo de realização preferido está descrito abaixo em conjunto com as Figs. 3-6 correlatas.

O modo de realização preferido é implementado em conjunto com um aparelho de teste de formação durante perfuração (FTWD) 30 do tipo mostrado na Fig. 3. O aparelho FTWD 30 é, de preferência, disposto ao longo de uma coluna de perfuração 32, que pode ser constituída de porções segmentadas ou pode ser concretizada como uma extensão contínua de tubulação bobinada. O aparelho FTWD 30 inclui qualquer componente relevante mecânico, elétrico ou hidráulico que possa ser encontrado em um testador de formação por linha de cabo equivalente. Por clareza, apenas a sonda de pressão de formação 33, linha de fluxo 34, e uma câmara de abaixamento 35 estão mostrados no aparelho FTWD 30 da Fig. 3. Durante aplicações normais, um teste de formação é iniciado pelo encaixe de uma almofada ou almofadas de obturador 38 contra a parede do furo de poço 40. Depois, um pistão de pré-teste ou de abaixamento (não especificamente

mostrado) retrai para extrair fluido de formação da sonda 33 para a linha de fluxo 34, a uma velocidade mais rápida do que a velocidade pela qual o fluido de formação pode escoar da formação. Este processo de abaixamento cria uma queda de pressão inicial dentro da linha de fluxo 34 e câmara 35. Após o ciclo de abaixamento, a pressão na linha de fluxo 34 e câmara 35 aumenta gradativamente até a pressão ficar equalizada com a pressão de formação. A pressão de formação e valores de pressão, que surgem durante o ajuste inicial do obturador, abaixamento, e acúmulo, bem como, antes e depois do teste de formação, são todos medidos com um transdutor de pressão 36 montado na câmara 35, ou em uma posição que permita a detecção de pressões na linha de fluxo 34 ou câmara 35.

O transdutor de pressão 36 é, de preferência, configurado para transmitir valores de pressão em tempo real para um módulo de controle 45 que pode ser incluído no aparelho FTWD 30 ou dentro de um aparelho separado disposto dentro da mesma coluna de perfuração 32. De acordo com o modo de realização preferido, o módulo de controle 45 compreende, de preferência, um processador 46, memória 47, e dispositivos de armazenamento 48, que podem simplesmente ser concretizados como dispositivos de memória estendida. O módulo de controle 45 também faz interface, de preferência, com o dispositivo transmissor 49 e um dispositivo receptor 60 para emitir ou receber comandos, dados, e instruções de acordo com um esquema padrão de comunicações por telemetria de pulso de lama ou algum outro meio de telemetria. Desse modo, o módulo de controle 45 é responsável por iniciar ou responder a todas as comunicações com a superfície. Conseqüentemente, um transmissor compatível 42 e um receptor 61 são, necessariamente, exigidos na superfície também.

Em adição, o módulo de controle 45 também armazena instruções (na memória 47) em forma de uma linguagem de script ou outro código de software que permita o processador 46 efetuar a compressão de

todas as leituras de pressão transmitidas do transdutor 36. O módulo de controle 45 armazena, de preferência, as amostras de dados no armazenamento 48, até que o teste de formação esteja terminado ou até que um número suficiente de amostras tenha sido adquirido, em cujo ponto o processador analisa as amostras de pressão e efetua uma análise de ajuste de curva para as amostras. Em uma configuração alternativa, o módulo de controle 45 pode processar dados de amostras de pressão em tempo pseudo-real, para transmitir valores de dados comprimidos para a superfície à medida que são gerados. Uma descrição mais detalhada da análise de ajuste de curva e parâmetros está apresentada abaixo.

Passando agora para as Figs. 4A e 4B, duas curvas representativas de teste de pressão de formação são mostradas. As curvas se assemelham, mas não casam exatamente com a curva representativa mostrada na Fig. 2. Há duas razões predominantes para a diferença. Primeiro, os testes de formação realizados em cada uma das duas curvas foram conduzidos com diferentes características de fluido de formação. Segundo, as curvas representam a reconstrução de uma curva de pressão de teste de formação usando os pontos de dados comprimidos e parâmetros de ajuste de curva de acordo com o modo de realização preferido. Em qualquer caso, é ainda prontamente discernível pelas curvas na Fig. 4A e 4B que o fluido de formação e características de pressão têm um efeito pronunciado sobre a forma e valores apresentados pelas curvas de teste.

Por exemplo, na Fig. 4A, o teste de formação foi efetuado com uma mobilidade de fluido apresentando grosseiramente duas ordens de magnitude mais baixas do que a mobilidade de fluido na Fig. 4B. Fluidos mais móveis tendem, geralmente, a fluir mais prontamente e, conseqüentemente, pressões tendem a se estabilizar mais rapidamente para um fluido mais móvel. Em outras palavras, fluidos mais móveis reagem a transientes mais prontamente do que fluidos menos móveis. Esta característica

é aparente nas curvas de abaixamento 50, 52, bem como nas curvas de acúmulo 54, 56 nas Figs. 4A e 4B.

Na Fig. 4A, que representa um teste de formação sobre um fluido menos móvel, o ciclo de abaixamento 50 é caracterizado por uma inclinação mais gradual descendente para o ponto no qual a curva de acúmulo começa. Neste abaixamento particular, não é provável que o pistão de abaixamento dentro do aparelho FTWD 30 sempre chegue ao limite inferior, devido à resistência induzida pelo fluido de formação. Compare esta curva 50 com a mostrada na Fig. 4B, curva 52, que representa um teste de formação sobre um fluido mais móvel. Na curva de abaixamento 52, a pressão na câmara atinge um limite definido na faixa de 611.671kg/cm². A porção plana 53 na curva 52 representa uma situação na qual o pistão de abaixamento atinge o limite inferior e a pressão permanece plana até que bastante fluido de formação entre pela linha de fluxo 34 e câmara 35, de modo a causar a pressão aumentar.

As mesmas características transientes também podem ser vistas nas curvas de acúmulo 54, 56 das Figs. 4A e 4B. Na Fig. 4A, a pressão de formação 55 é alcançada após um período muito maior de tempo do que o mostrado na Fig. 4B. Novamente, isto reflete a habilidade do fluido de perfuração reagir ao transiente de pressão criado dentro do aparelho FTWD 30.

Dado que diferentes formas de curva de teste de formação podem ser esperadas com diferentes características de formação, é possível desenvolver parâmetros de ajuste de curva que permitam a reconstrução das curvas de teste de formação e, conseqüentemente, representem características de fluido de formação. Se assumirmos que as curvas de abaixamento e de acúmulo podem ser representadas por funções logarítmicas, então, as curvas podem ser expressas em termos da equação geral

$$P = P_f - \beta.e^{-1/\alpha},$$

Onde P representa a mudança na pressão em relação ao tempo, P_f representa a pressão de formação inicial, β representa uma constante de transiente, expressa nas mesmas unidades que P (kg/cm^2) e α representa uma constante de tempo expressa em segundos. Uma vez que estes parâmetros de ajuste de curva α , β e P_f sejam gerados, a curva simulada gerada por estes parâmetros pode ser comparada com amostras de pressão real para determinar se os parâmetros de ajuste de curva refletem precisamente as medições de pressão real. Estas curvas estão mostradas com índices apropriados na Fig. 5.

Como a Fig. 5 mostra, a curva de abaixamento de pressão P_{dd} é uma função de tempo t e parâmetros α , β e P_f de ajuste de curva. Similarmente, a curva de pressão acumulada P_{bu} é uma função dos mesmos parâmetros α , β e P_f de ajuste de curva, como também de tempo t' , que difere do tempo t pelo valor Δt_{dd} , que representa o tempo decorrido entre o começo t_{dd} e fim t_{fu} do ciclo de abaixamento. A pressão acumulada final P_{stop} aproxima-se da pressão de formação inicial P_f assintoticamente. Os parâmetros de ajuste de curva α , β e P_f são gerados encontrando-se os parâmetros que mais proximamente casam com os valores de pressão amostrados, representados na Fig. 5 como $P_{(i)}$. Os parâmetros α e β podem ser gerados usando-se uma ou ambas as equações P_{dd} ou P_{bu} . Se uma equação for usada, é preferido que a equação P_{bu} seja usada. Se ambas as equações forem usadas, os parâmetros α e β serão substancialmente os mesmos, de modo que qualquer par de valores pode ser usado, ou alguma média ou correlação dos dois pares de valores pode ser usada.

Uma vez que α , β e P_f sejam gerados, as soluções aproximadas para P_{dd} e P_{bu} podem, então, ser comparados às amostras de pressão reais para gerar alguma medida de correlação. No modo de realização preferido, um valor de (X^2) é gerado e transmitido como uma medida de correlação. O cálculo deste valor X^2 está discutido abaixo e provido no Apêndice C. Deve ser notado que esta função de erro particular é escolhida devido ao resultado

ser limitado e provê um valor quantitativo da qualidade do ajuste de curva resultante gerado pelo módulo de controle 45. É inteiramente viável que outras funções de erro conhecidas por alguém experiente na técnica possam ser tão facilmente aplicadas à presente análise de ajuste de curva.

5 Desse modo, é um objetivo primordial do modo de realização preferido estimar a qualidade do teste de pressão de formação tão rapidamente quanto possível para permitir que operadores de perfuração determinem se um teste de pressão é válido e fazer ajustes e tomar decisões de perfuração em tempo real ou tão prontamente quanto possível em seguida a um teste FTWD.

10 No modo de realização preferido, a informação transmitida do módulo de controle 45 para a superfície inclui um número limitado de pontos de dados reais, os parâmetros α , β e P_f de ajuste de curva, e o valor de correlação X^2 . É previsto que pelo menos cinco pontos de dados específicos mostrados nas Figs. 4A e 4B possam ser transmitidos como parte da solução preferida. Estes pontos incluem: P_{hydt} , P_{dd} , P_{fu} , P_{stop} , e P_{hyd2} . P_{hydt} representa a pressão hidrostática amostrada no aparelho FTWD 30 antes da extensão do obturador 38 e fechamento da válvula equalizadora, como a válvula equalizadora 514 encontrada no testador de formação por linha de cabo da Fig. 1. P_{dd} representa uma pressão amostrada em seguida à extensão e ajuste do obturador 38. Em geral, um aumento nominal na pressão detectada entre P_{hydt} e P_{dd} deve ser indicado, uma vez que isto significará que uma vedação bem-sucedida entre o obturador 38 e o furo de poço 40 foi criada. P_{fu} representa a pressão dentro do aparelho FTWD 30 em seguida ao ciclo de abaixamento e antes da pressão começar a aumentar para a pressão de formação. P_{stop} representa a medição de pressão final tomada antes do obturador 38 ser liberado e a válvula equalizadora ser aberta, acoplando, desse modo, a linha de fluxo 34 e câmara de fluido 35 às pressões hidrostática e de ânulo P_{hydt} .

Deve ser notado que enquanto estes cinco pontos de dados são

considerados como sendo os pontos de dados mínimos desejados a serem transmitidos com os parâmetros de ajuste de curva, é certamente viável que qualquer subconjunto destes pontos possa ser transmitido independente de outros pontos. Desse modo, por exemplo, se a pressão de formação resultante

5 P_{stop} for a única pressão de interesse, pode ser possível enviar este ponto de dado juntamente com o valor de correlação de ajuste de curva X^2 como uma indicação de quão próximo P_{stop} está da pressão de formação real P_f . Outras combinações de pontos de dados e parâmetros e ajuste de curva podem ser transmitidas por enlace ascendente conforme desejado. Do mesmo modo,

10 pode ser desejado transmitir mais do que os cinco pontos de dados acima indicados. Estes pontos adicionais estão mostrados como $P(i)$ na Fig. 5.

Em um cenário no qual as bombas de lama estejam ligadas ou se algum sistema de telemetria que não a telemetria de pulso de lama estiver disponível, pode ser desejável transmitir estes pontos adicionais $P(i)$ como

15 uma ajuda na determinação de se a pressão dentro do aparelho FTWD 30 convergiu suficientemente pela pressão de formação. Como as Figs. 4A, 4B e 5 mostram, a pressão na curva de acúmulo P_{bu} idealmente fica plana na pressão de formação. Além disso, como as curvas de pressão nas Figs. 4A e 4B indicam, após um determinado período de tempo, uma amostra de pressão

20 final, P_{stop} , é, de preferência, transmitida como pressão de formação. Entretanto, pode ser possível que o módulo de controle 45 determine se as amostras de pressão convergiram suficientemente sobre a pressão de formação. Por exemplo, se amostras subseqüentes não diferirem por algum limiar predeterminado, digamos, talvez de $0,07\text{kg/cm}^2$ ou algum percentual,

25 então o módulo de controle 45 pode terminar o teste de formação e transmitir todos os pontos de dados relevantes, parâmetros de ajuste de curva, e os pontos de dados levando à amostra de pressão de formação final $P(n)$. Desse modo, um operador de perfuração pode usar as amostras de dados e parâmetros de ajuste de curva para julgar se resultados bem-sucedidos foram

obtidos.

Esta terminação antecipada pode ser executada pelo módulo de controle a despeito de se as bombas estão ligadas durante o teste de formação. Entretanto, o cenário de bombas ligadas provê algumas vantagens adicionais.

- 5 Primeiro, é possível que um número suficiente de amostras de dados tomado durante abaixamento e início dos ciclos de acúmulo possa ser usado pelo módulo de controle 45 para gerar ajuste de curva e qualidade de valores de ajuste antes da pressão de formação ser alcançada. Em um tal caso, e se a qualidade de ajuste de curva satisfizer um critério mínimo, os pontos de dados
- 10 chaves e parâmetros de ajuste de curva podem ser transmitidos para a superfície, onde as curvas são reconstruídas. Este processo pode ser repetido até que o acúmulo esteja terminado até a pressão hidrostática final P_{hyd2} ser registrada e a curva ser completada. Segundo, usando este processo, é possível determinar a qualidade do teste de pressão antes da completação. Isto
- 15 possibilita que o operador da perfuração termine o teste antecipadamente ou estenda o teste com base nos resultados em tempo real. Desse modo, neste modo particular, o aparelho FTWD 30 pode emular de modo muito aproximado um testador de formação por linha de cabo.

- Em adição aos pontos de dados-chave discutidos acima e
- 20 parâmetros de ajuste de curva relevantes, o modo de realização preferido é baseado nas variáveis de tempo para reconstruir totalmente as curvas de pressão na superfície, uma vez que os dados sejam recebidos do módulo de controle 45. Estas variáveis de tempo estão mostradas na Fig. 6 como Δt_{hydr1} , Δt_{hydr2} , Δt_{set} , e Δt_{pd} . Δt_{hydr1} , e t_{hydr2} representam os tempos de espera
 - 25 hidrostáticos inicial e final, respectivamente. Δt_{set} representa o tempo de ajuste de obturador, e Δt_{pd} representa o espaçamento de tempo de dados de pressão. Em geral, cada uma das variáveis de tempo é ajustada a um valor nominal para a superfície e deve corresponder aos ajustes de sequência de tempo dentro do aparelho FTWD 30. Sempre que possível, amostras de dados devem

ser tomadas coincidindo com comandos de controle ou eventos que iniciam as funções do aparelho FTWD 30. Por exemplo, quando ao aparelho FTWD é ativado, a pressão hidrostática pode ser medida após um período de tempo de ajuste. Depois, após a válvula equalizadora ser fechada e o obturador estendido, a ferramenta está pronta para o pré-teste ou para o pistão de abaixamento ser ativado. Imediatamente antes do pistão ser ativado, os valores P_{dd} e t_{dd} devem ser registrados. Além disso, os valores P_{fu} e t_{fu} são, de preferência, medidos quando o pistão de pré-teste pára de mover. Pode ser o caso do pistão de pré-teste não atingir uma posição final de modo a disparar um comutador de limite. Neste caso, P_{fu} e t_{fu} podem, simplesmente, ser amostrados após um período de tempo fixado ou baseado na inclinação da curva de abaixamento. Alguém experiente na técnica reconhecerá, com certeza, uma variedade de soluções para determinar a terminação apropriada do abaixamento e de início de ciclos de acúmulo.

A Tabela 1 resume os eventos aludidos acima e indica tempos adequados quando pontos de dados críticos e variáveis de tempo devem ser selecionados. Conforme indicado acima, o módulo de controle 45 recebe, de preferência, amostras de dados, em base regular, do transdutor 36. O módulo de controle armazena estes pontos de dados em um local separado na memória. Cópias redundantes destes dados podem ser feitas, de modo que elas possam ser usadas no cálculo dos parâmetros de ajuste de curva, bem como, transmitidas para a superfície uma vez que os testes de formação estejam terminados.

Tabela 1 – Eventos de ferramenta de seleção de ponto de dados

Dados	Evento de aparelho FTWD	Descrição
P _{dd}	Início de um abaixamento	Pressão de ajuste de abaixamento (kg/cm ²)
P _{hyd1}	Início de seqüência de testes	Pressão hidrostática inicial (kg/cm ²)
P _{lu d}	Pelo menos 10 s após t _{dd} ou no fechamento de comutador de abaixamento	Pressão de carregamento (kg/cm ²)
P _{stop}	Tempo, convergência, válvula de equalização fechada	Pressão de parada (kg/cm ²)
P _{hyd2}	Fim de seqüência de testes	Pressão hidrostática final (kg/cm ²)
T _{dd}	Início de abaixamento	Tempo de abaixamento (s)
T _{fu}	Fim de abaixamento	Tempo de carregamento (s)
T _{stop}	Fim de acúmulo	Válvula equalizadora aberta (s)

Em adição aos pontos de dados críticos e variáveis de tempo mostrados na Tabela 1, o modo de realização preferido também gera parâmetros de ajuste de curva que permitem a reconstrução da curva de pressão de formação do ponto de ajuste mínimo de ponto de dado e variáveis de tempo mínimas. Estes parâmetros de ajuste de curva α , β e P_f são gerados de acordo com o conjunto de equação provido no Apêndice A. As propriedades da formação também podem ser determinadas pelo uso de α e β . O parâmetro β pode ser usado para determinar a mobilidade k_f/μ . A permeabilidade da formação k_f pode se estimada pelo uso de uma viscosidade μ estimada de filtrado. A compressibilidade de fluido c_f também pode ser calculada. O conjunto de equação mostrado no Apêndice A oferece uma solução preferida baseada na simplificação dói conjunto de equação de solução exata provido no Apêndice B. Se a solução exata mostrada no Apêndice B for usada, então parâmetros de regressão adicionais β , c_d , S_d e t_d são gerados, sendo relacionados às propriedades da formação e permitindo um melhor ajuste de curva. O parâmetro β pode ser suado para determinar mobilidade esférica k_f/μ . O parâmetro t_d pode, então, ser usado para determinar compressibilidade-porosidade acopladas $c\phi$. O parâmetro c_d pode, então, ser usado para determinar compressibilidade C de fluido na linha de fluxo. Dano de casca S_d também pode ser determinado da solução exata, que é uma indicação de quanto o filtrado de lama mudou a permeabilidade próxima

ao furo de poço. Adicionalmente, se duas ou mais sondas forem usadas pela ferramenta de teste, a anisotropia de formação pode ser determinada, que é a relação das permeabilidades vertical e horizontal. A solução aproximada encontrada no Apêndice A é adequada para um teste de abaixamento curto típico de registro de furo aberto e na determinação da pressão de formação P_f , mobilidade/permeabilidade e compressibilidade de fluido de linha de fluxo. Além disso, o parâmetro de qualidade de ajuste de curva X^2 é calculado pelo uso do conjunto de equação mostrado no Apêndice C.

Deve ser reconhecido que a forma das equações usadas no modo de realização preferido provê apenas uma solução para o problema descrito acima. Os ensinamentos providos aqui devem ser interpretados como abrangendo outras variações que incluem a geração de um conjunto de dados mínimo que pode ser transmitido de um aparelho FTWD 30 para a superfície, de modo que as curvas de teste de formação possam ser regeneradas a partir do mencionado conjunto de dados e analisadas quanto à qualidade do conjunto de dados.

Dados do aparelho FTWD no interior do furo e o módulo de controle 45 são, de preferência, transmitidos em pacotes com os tipos de dados mostrados na Tabela 2. Alguém experiente na técnica de comunicações reconhecerá que um pacote de dados tem que conter uma quantidade mínima de informação no cabeçalho do pacote identificando os dados incluídos no mesmo. A estrutura exata do pacote e escolha do protocolo de transmissão dependem do sistema de telemetria usado, e referem-se, apenas, ao modo de realização preferido, considerando que os dados devem ser propriamente identificados e reconhecidos como dados de teste de formação.

Tabela 2 – Especificações de transmissão de dados

Dados	Tipo	Resolução (kg/cm ²)	Faixa	Tamanho de palavra
P _{hydr1}	Inteiro	0,42kg/cm ²	0 – 1,75x10 ³ kg/cm ²	12
P _{dd}	Inteiro	0,42kg/cm ²	0 – 1,75x10 ³ kg/cm ²	12
P _{fu}	Inteiro	0,42kg/cm ²	0 – 1,75x10 ³ kg/cm ²	12
P _{stop}	Inteiro	0,07 kg/cm ²	0 – 1,75x10 ³ kg/cm ²	16
P _{hydr2}	Inteiro	0,42 kg/cm ²	0 – 1,75x10 ³ kg/cm ²	12
Δt _{dd}	Inteiro	1s	0 – 16 segundos	4
Δt _{bu}	Inteiro	1s	0 – 255 segundos	8
α	Inteiro	0,5s	0 – 127 segundos	8
β	Inteiro	0,07 kg/cm ²	0 – 376,49kg/cm ²	8
P _f	Inteiro	0,07 kg/cm ²	0 – 1,75x10 ³ kg/cm ²	16
X ²	Inteiro	1/16	0 -16	8
P(i)	Inteiro	0,42kg/cm ²	0 – 1,75x10 ³ kg/cm ²	12

De acordo com o modo de realização preferido, o conjunto de dados mínimo de cinco pontos, as duas variáveis de tempo e quatro parâmetros de ajuste de curva, com a resolução de bit e faixas mostradas na

5 Tabela 2 são combinados para formar um conjunto de dados de 116 bit. Obviamente, o tamanho do pacote no qual estes dados são transmitidos será nominalmente maior, mas a velocidade de transmissão de dois bit/segundo, o conjunto de dados mínimo pode ser transmitido por enlace ascendente apenas em cerca de 58 segundos. Este conjunto de dados mínimo não inclui nenhum

10 ponto de dado adicional P(i). Para ilustrar o tempo extra exigido para transmitir os pontos de dados extras, cinco pontos extras, por exemplo, exigem que 60 bits extras sejam transmitidos por enlace ascendente. Usando o mesmo padrão de dois bit/segundo, os pontos de dados adicionais exigem pelo menos 30 segundos extras para teletransmissão. Sem a técnica de ajuste

15 de curva aqui descrita, muitos pontos de dados adicionais P(i) seriam necessários para descrever adequadamente a faixa de curvas típicas de teste de formação. Desse modo, é aparente que a economia de tempo e de largura de faixa, permitida pelo modo de realização preferido, é substancial, dado que uma típica curva de teste de formação pode ter centenas de amostras de

20 pressão que têm que ser transmitidas se, de outro modo, não forem comprimidas, conforme aqui descrito. O tempo de transmissão pode ser ainda

mais reduzido se, em vez de enviar P_{dd} , P_{fu} , P_{hydr2} , P_f e $P(i)$ apenas, diferenças ΔP_{dd} , ΔP_{fu} , ΔP_{hydr2} , ΔP_f e $\Delta P(i)$ forem enviados, onde $\Delta P_{dd} = P_{dd} - P_{hydr1}$, $\Delta P_{fu} = P_{hydr1} - P_{fu}$, $\Delta P_{hydr2} = P_{hydr1} - P_{hydr2}$, $\Delta P_f = P_{stop} - P_f$ e $\Delta P(i) = P(i) - P_{fu}$. Os novos tipos de dados e bits economizados estão mostrados na Tabela 3.

5 Tabela 3 – Especificações de transmissão de dados modificados

Dados	Tipo	Resolução	Faixa	Tamanho de palavra	Bits economizados
ΔP_{dd}	Inteiro	0,56kg/cm ²	0 – 143,42kg/cm ²	8	4
ΔP_{fu}	Inteiro	0,56kg/cm ²	0 – 575,39 kg/cm ²	10	2
ΔP_{hydr2}	Inteiro	0,56kg/cm ²	0 – 143,42kg/cm ²	8	4
ΔP_f	Inteiro	0,07kg/cm ²	0 – 17,92 kg/cm ²	8	8
$\Delta P(i)$	Inteiro	0,42kg/cm ²	0 – 143,42kg/cm ²	8	4

Com referência novamente à Fig. 6, uma vez que o conjunto de dados mínimo seja transmitido para a superfície, a curva de teste de pressão de formação pode ser reconstruída pela plotagem de uma linha horizontal de pressão hidrostática representando P_{hydr1} para o tempo de espera hidrostático inicial Δt_{hydr1} . Ao final de Δt_{hydr1} , uma linha vertical é plotada de P_{hydr1} até P_{dd} . Mais uma vez, uma linha horizontal é plotada para a duração de Δt_{set} e terminando com o ponto de pressão P_{dd} em t_{dd} . A plotagem de variação de tempo para $P_{dd}(t)$ e $P_{bu}(t)$ são então desenhadas de acordo com as equações mostradas no Apêndice A. $P_{dd}(t)$ é plotado com t começando em 0 (começando em t_{dd}) e terminando em t_{fu} (Δt_{dd} total). Similarmente, $P_{bu}(t)$ é plotado com t' começando em 0 (começando em t_{fu}) e terminando em t_{stop} (Δt_{bu} total). Em seguida, uma linha vertical é plotada em t_{stop} de P_{stop} para P_{hydr2} . Finalmente, uma linha horizontal é plotada para a duração de Δt_{hydr2} .

Conseqüentemente, os modos de realização acima descritos revelam um esquema de compressão que reduz a quantidade de dados que tem que ser transmitida por enlace ascendente do aparelho FTWD. O modo de realização preferido permite a reconstrução de curvas de teste de formação usando uma quantidade mínima de dados, variáveis de tempo e parâmetros de ajuste de curva. A discussão acima tem a intenção de ser ilustrativa dos

princípios e vários modos de realização da presente invenção. Numerosas variações e modificações se tornarão aparentes para alguém experiente na técnica, uma vez que a revelação acima seja totalmente apreciada. Por exemplo, embora os parâmetros de ajuste de curva preferidos sejam baseados em funções de decomposição logarítmicas, outras funções de variação com o tempo também podem ser usadas. Por exemplo, funções de decomposição baseadas em logaritmos naturais ou outras bases podem ser implementadas. Além disso, embora ao valor de qualidade de ajuste de curva seja provido como uma função de X^2 , outras funções de erro que provejam um valor quantitativo limitado representando a qualidade do ajuste de curva também poderiam ser usadas. Embora um modo de realização preferido da invenção tenha sido mostrado e descrito, modificações no mesmo podem ser feitas por alguém experiente na técnica sem se afastar do espírito da invenção. Pretende-se que as reivindicações a seguir sejam interpretadas como abrangendo todas essas variações e modificações.

APÊNDICE A

EQUAÇÕES DE PARÂMETROS DE AJUSTE DE CURVA

Fórmula de pressão de rebaixamento:

$$\Delta P_{dd}(t) = P_f - P_{dd}(t) = 14,696 \frac{\mu}{k_f} \frac{Q_r}{2\pi} \frac{\tau_p}{r_p} \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha}} \right) \dots\dots\dots (A-1)$$

Constante de tempo exponencial:

$$\alpha = 14,696 \frac{\mu}{k_f} \frac{c_f V_y}{4\pi} \left(\frac{\tau_p}{r_p} \right) \dots\dots\dots (A-2)$$

Para o acúmulo, superposição é usada para determinar esta equação de transiente:

$$\Delta P_{bu}(t) = \Delta P_{dd}(t) - \Delta P_{dd}(t - \Delta t) \dots\dots\dots (A-3)$$

Onde Δt é o tempo de abaixamento. Simplificando, a equação resulta:

$$\Delta P_{bu}(t) = P_f - P_{bu}(t) = 14,696 \frac{\mu}{k_f} \frac{Q_o}{2\pi} \frac{\tau_p}{r_p} \left(e^{\frac{\Delta t}{\alpha}} - 1 \right) e^{-\frac{t}{\alpha}} \quad \text{.....(A-4)}$$

É mais conveniente usar uma escala de tempo onde $t' = t - \Delta t$. Neste caso, a Eq.A-4 pode ser expressa como:

$$\Delta P_{bu}(t) = P_f - P_{bu}(t) = 14,696 \frac{\mu}{k_f} \frac{Q_o}{2\pi} \frac{\tau_p}{r_p} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\alpha}} \right) e^{-\frac{t'}{\alpha}} \quad \text{.....(A-5)}$$

Agora a função pode ser simplificada e expressa em termos de três valores desconhecidos α , β e P_f :

$$\Delta P_{bu}(t) = P_f - P_{bu}(t) = \beta e^{-\frac{t'}{\alpha}} \quad \text{.....(A-6)}$$

5

Onde uma nova constante é introduzida:

$$\beta = 14,696 \frac{\mu}{k_f} \frac{Q_o}{2\pi} \frac{\tau_p}{r_p} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\alpha}} \right) \quad \text{.....(A-7)}$$

A função de abaixamento (Eq.A-1) também pode ser expressa em termos de dois parâmetros que caracterizam os dados de pressão de transiente:

$$\Delta P_{dd}(t) = P_f - P_{dd}(t) = \left(\frac{\beta}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\alpha}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{t'}{\alpha}} \right) \quad \text{.....(A-8)}$$

Devido ao transiente de abaixamento ser realmente proveniente da pressão de ajuste P_{dd} , o transiente é melhor simulado com a seguinte função modificada:

10

$$\Delta P_{dd}(t) = P_{dd} - P_{dd}(t) = \left(\frac{\beta + P_{dd} - P_f}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{\alpha}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{t'}{\alpha}} \right) \quad \text{.....(A-9)}$$

Estas funções são uma versão mais simples da solução exata mostrada no Apêndice B (Ref.SPE 64650). Esta função mais simples é adequada para a sonda de fonte de um teste curto de pressão de rebaixamento típico de registro de furo aberto

15

Os parâmetros de entrada para Eqs. 7 e 9 são:

Q_0velocidade de fluxo de abaixamento (cm^3/s)

V_svolume de armazenamento de ferramenta (cm^3)

τ_pcoeficiente de fluxo (1,37 nominal)

5 I_praio da sonda (cm)

Δttempo de produção ($t_{dd}-t_{\text{carregamento}}$, s)

Ttempo de teste (s)

ttempo de abaixamento ($t_{dd}-T$, s)

t'tempo de produção ($t_{fu}-T$, s)

10 Os parâmetros de regressão são:

P_fpressão de formação (kg/cm^2)

αconstante de tempo (s)

βconstante de pressão (kg/cm^2)

Os parâmetros a seguir podem ser derivados dos parâmetros de

15 regressão e de entrada:

Mobilidade de formação (md/cp)

$$\frac{k_f}{\mu} = 14,696 \frac{1}{\beta} \frac{Q_0}{2\pi} \frac{\tau_p}{r_p} \left(1 - e^{\frac{-\Delta t}{\alpha}} \right) \dots\dots\dots (\text{A-10})$$

Compressibilidade de fluido ($1/\text{kg}/\text{cm}^2$)

$$c_f = \frac{\alpha}{14,696} \frac{k_f}{\mu} \frac{4\pi}{V_s} \left(\frac{r_p}{\tau_p} \right) \dots\dots\dots (\text{A-11})$$

APÊNDICE B

EQUAÇÕES DE SOLUÇÃO EXATA

20 Solução exata para fluxo esférico com casca, armazenamento e anisotropia:

Este apêndice contém a solução mais geral para testador de formação do tipo sonda. O desenvolvimento total desta solução está contido em SPE 64650, trabalho apresentado na SPE International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, realizado em Beijing, China, em 7-10 de

25

novembro de 2000. Foi demonstrado que a solução exponencial mais simples é um subconjunto desta solução exata na SPE 39768, trabalho apresentado na SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, realizada em Midland, Texas, em 25-27 de março de 1998.

5 O transiente de pressão de sonda de fonte é determinado por:

$$\Delta P_p(r_p, t) = \beta \bar{p}_d(c_d, S_d, t_d) \dots\dots\dots (B-1)$$

onde:

$$\beta = 14,696 \frac{\mu}{k_f} \frac{Q_u}{4\pi} \frac{r_s}{r_p} \dots\dots\dots (B-2)$$

$$\bar{p}_d(c_d, S_d, t_d) = \frac{1+S_d}{S_d c_d} \sum_{n=1}^3 \left\{ \frac{1}{y_n} \left(1 - \left(1 + \frac{S_d}{1+S_d} \right) e^{x_n^2} \operatorname{erfc} \left(-x_n \sqrt{t_d} \right) \right) \right\} \dots\dots\dots (B-3)$$

A solução mais geral está apresentada na equação a seguir, onde r_d é um parâmetro adimensional que representa uma localização na formação distanciada de uma sonda de prova com o raio r_p .

$$p_d(r_d, t_d) = \frac{1}{S_d r_d c_d} \sum_{n=1}^3 \left\{ \frac{1}{y_n} \left(\operatorname{erfc} \left(\frac{1-r_d}{2\sqrt{t_d}} \right) - e^{-(1-r_d)x_n + x_n^2 t_d} \operatorname{erfc} \left(\frac{1-r_d}{2\sqrt{t_d}} - x_n \sqrt{t_d} \right) \right) \right\} \dots\dots\dots (B-4)$$

$$y_1 = x_1(x_1 - x_2)(x_1 - x_3) \dots\dots\dots (B-5)$$

$$y_2 = x_2(x_2 - x_1)(x_2 - x_3) \dots\dots\dots (B-6)$$

$$y_3 = x_3(x_3 - x_1)(x_3 - x_2) \dots\dots\dots (B-7)$$

10 E as constantes x_1 , x_2 e x_3 são as raízes da equação cúbica

$$x^3 + \left(\frac{1+S_d}{S_d} \right) x^2 + \frac{x}{S_d c_d} + \frac{1}{S_d c_d} = 0 \dots\dots\dots (B-8)$$

As raízes da equação cúbica (ou seja, x_n) podem ter dois termos conjugados complexos. Devido a serem conjugados complexos o “princípio de reflexão” prova que Eqs. B-2 e B-3 sempre avaliam para uma pressão real.

15 Constantes adimensionais:

$$r_d = \frac{r}{r_s} = \frac{\sqrt{k_f}}{r_s} \sqrt{\frac{x^2}{k_r} + \frac{y^2}{k_r} + \frac{z^2}{k_z}} \dots\dots\dots (B-9)$$

A constante adimensional r_d é usada para determinar como o pulso de pressão da fonte se propaga na formação. Se uma segunda sonda for

usada para detectar o pulso de pressão, então parâmetros de formação adicionais podem ser determinados, como permeabilidade anisotropia (k_z/k_r). Para a sonda de fonte, r_d é unidade. Para uma segunda sonda localizada vertical em relação à fonte e localizada ao longo do eixo z, onde $x=0$, $y=0$ e r_d 5 adimensional pode ser determinado usando Rq. B-8:

$$r_s = \frac{1}{2} \frac{r_p}{r_p} \dots\dots\dots (B-10)$$

$$r_d = \frac{r}{r_s} = \frac{z}{r_s} \sqrt{\frac{k_f}{k_z}} = \frac{z}{r_s} \left(\frac{k_r}{k_z} \right)^{\frac{1}{3}} \dots\dots\dots (B-11)$$

$$t_d = \frac{t}{\phi c r_s^2} \frac{k_f}{\mu} \dots\dots\dots (B-12)$$

$$p_d = \left(\frac{4\pi r_s k_f}{Q_o \mu} \right) (p(r,t) - p_o) \dots\dots\dots (B-13)$$

$$c_d = \frac{1}{4\pi \phi r_d^3 c} VC \dots\dots\dots (B-14)$$

$$S_d = \frac{S}{\zeta} \dots\dots\dots (B-15)$$

$$\lambda = \frac{k_z}{k_r} \dots\dots\dots (B-16)$$

Para $\lambda < 1$

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt[3]{\lambda}} \left(\frac{1}{2} + \frac{\lambda}{4\sqrt{1-\lambda}} \ln \left(\frac{1+\sqrt{1-\lambda}}{1-\sqrt{1-\lambda}} \right) \right) \dots\dots\dots (B-17)$$

Para $\lambda > 1$

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt[3]{\lambda}} \left(\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{\lambda} \arcsin(\sqrt{1-1/\lambda})}{2\sqrt{1-1/\lambda}} \right) \dots\dots\dots (B-18)$$

APÊNDICE C

TÉCNICA DE REGRESSÃO DE QUALIDADE (X^2)

10 Uma regressão pode ser realizada a intervalos de tempo dentro da capacidade do processador no interior do furo. Por exemplo, uma regressão pode ser efetuada a cada 30 segundos.

Parâmetros de teste:

$X^2_{\min} = X^2$ mínimo

15 $\Delta P_{\min} =$ queda de pressão mínima

1. Confere coleta de dados e ajusta anomalias para valores lógicos.

Se $P_{\text{stop}} > P_{\text{hyd1}}$, então $P_{\text{stop}} = P_{\text{hyd1}}$

Se $P_{\text{fit}} > P_{\text{stop}}$, então $P_{\text{fit}} = P_{\text{stop}} - \Delta P_{\text{min}}$

5 Se $P_{\text{dd}} < P_{\text{stop}}$, então $P_{\text{dd}} = P_{\text{stop}}$.

Inicializa variáveis usando as seguintes suposições:

$P_f = P_{\text{stop}}$,

$\beta = P_f - P_{\text{fit}}$

Enquanto $\beta * 0,9 > \Delta P_{\text{bu}} = P_f - P_{\text{data}}(i) > 0,1 * \beta$

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{-t'(i)}{\ln \left(\frac{P_{\text{stop}} - P_{\text{data}}(i)}{\beta} \right)}$$

10 Cálculo de X^2 usando Eq.A-6:

$$X^2\{P_{\text{bu}}\} = \frac{1}{n-1} \sum_i \frac{(P_{\text{data}}(i) - P_{\text{bu}}(i))^2}{(P_{\text{bu}}(i))^2}$$

Onde:

$$P_{\text{bu}}(i) = P_f - \beta e^{\frac{-t'(i)}{\alpha}}$$

Se $X^2\{P_{\text{bu}}\} > X^2_{\text{min}}$, então continua para variar α , β e P_f até $X^2\{P_{\text{bu}}\} \leq X^2_{\text{min}}$.

Fim da regressão

15 Quando o casamento do histórico de regressão da sequência de dados mais recentemente registrada demonstrar que P_{stop} medido está dentro de $0,07 \text{ kg/cm}^2$ da função de acúmulo P_{bu} (Eq. A-6 do Apêndice A), o teste pode ser terminado.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para comprimir dados de pressão coletados em um furo de poço (40) de uma formação, caracterizado pelo fato de que compreende:

(a) adquirir uma pluralidade de valores de pressão;

(b) gerar uma curva de pressão abaixada (50, 52) e uma curva de pressão acumulada (54, 56) a partir dos valores de pressão;

(c) expressar a curva de pressão abaixada (50, 52) em termos da seguinte equação matemática:

$$P_{dd}(t) = P_{dd} - \left(\frac{\beta + P_{dd} - P_f}{1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha}} \right)$$

onde t é tempo e α , β e P_f são parâmetros de ajuste de curva e P_{dd} é a pressão medida no início do abaixamento;

(d) expressar a curva de pressão acumulada (54, 56) em termos da seguinte equação matemática:

$$P_{bu}(t) = P_f - \beta e^{-t'/\alpha},$$

onde t' é um segundo valor de tempo;

(e) determinar o valor de pelo menos um conjunto de parâmetros de ajuste de curva α , β e P_f pela comparação das equações $P_{dd}(t)$ e $P_{bu}(t)$ com a pluralidade de valores de pressão;

(f) aproximar a solução da pelo menos uma das equações $P_{dd}(t)$ e $P_{bu}(t)$ usando o conjunto de parâmetros de ajuste de curva;

(g) determinar pelo menos uma função de erro por comparação da solução aproximada com a pluralidade de valores de pressão;

(h) transmitir o conjunto de parâmetros de ajuste de curva, a função de erro e um número predeterminado de valores de pressão para a superfície do furo de poço (40), em que o número predeterminado de valores de pressão é menor que a pluralidade de valores de pressão; e

(i) reconstruir as curvas de pressão abaixada e acumulada (50,

52, 54, 56) na superfície do furo de poço (40) com base no conjunto de parâmetros de ajuste de curva, função de erro e número predeterminado de valores de pressão transmitidos.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a pluralidade de valores de pressão compreende P_{hydr1} , P_{dd} , P_{fu} , P_{stop} , P_{hyd2} , P_f e $P_{(i)}$, onde $P_{(i)}$ compreende uma pluralidade de medições de pressão onde i aumenta com o tempo começando em $i = 1$ a T_{fu} .

3. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o número predeterminado de valores de pressão inclui P_{hydr1} , P_{dd} , P_{fu} , P_{stop} e P_{hyd2} .

4. Método de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que compreende ainda:

calcular pelo menos um valor diferencial com base na pluralidade de valores de pressão; e

em que o número predeterminado de valores de pressão inclui o pelo menos um valor diferencial.

5. Método de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que o pelo menos um valor diferencial é selecionado do grupo consistindo de ΔP_{dd} , ΔP_{fu} , ΔP_{hydr2} , ΔP_f e $\Delta P_{(i)}$.

6. Método de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que a etapa (a) compreende ainda:

comparar o último valor de pressão adquirido $P_{(i)}$ com o valor de pressão P_f e terminar a etapa (a) se $P_{(i)}$ e P_f diferem de uma pequena quantidade.

7. Método de acordo com a reivindicação 6, caracterizado pelo fato de que a pequena quantidade compreende 6,9 kPa ou menos.

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

calcular pelo menos uma propriedade da formação usando pelo

menos um dos parâmetros de ajuste de curva α e β .

9. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que a pelo menos uma propriedade da formação é selecionada do grupo que consiste de permeabilidade da formação (k_f), mobilidade (k_f/μ) e compressibilidade do fluido c_f .

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

fornecer pelo menos uma equação de solução exata e determinar os valores de um conjunto de parâmetros de regressão.

11. Método de acordo com a reivindicação 10 caracterizado pelo fato de que o conjunto de parâmetros de regressão compreende β , c_d , S_d e t_d .

12. Método de acordo com a reivindicação 11, caracterizado pelo fato de que compreende ainda:

calcular pelo menos uma propriedade da formação usando pelo menos um dos parâmetros de regressão.

13. Método de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo fato de que a pelo menos uma propriedade da formação é selecionada do grupo que consiste de mobilidade esférica (k_f/μ), porosidade em compressibilidade acoplada ($c\phi$), compressibilidade de fluido na linha de fluxo (C), anisotropia (k_v/k_h) e dano à pele S_d .

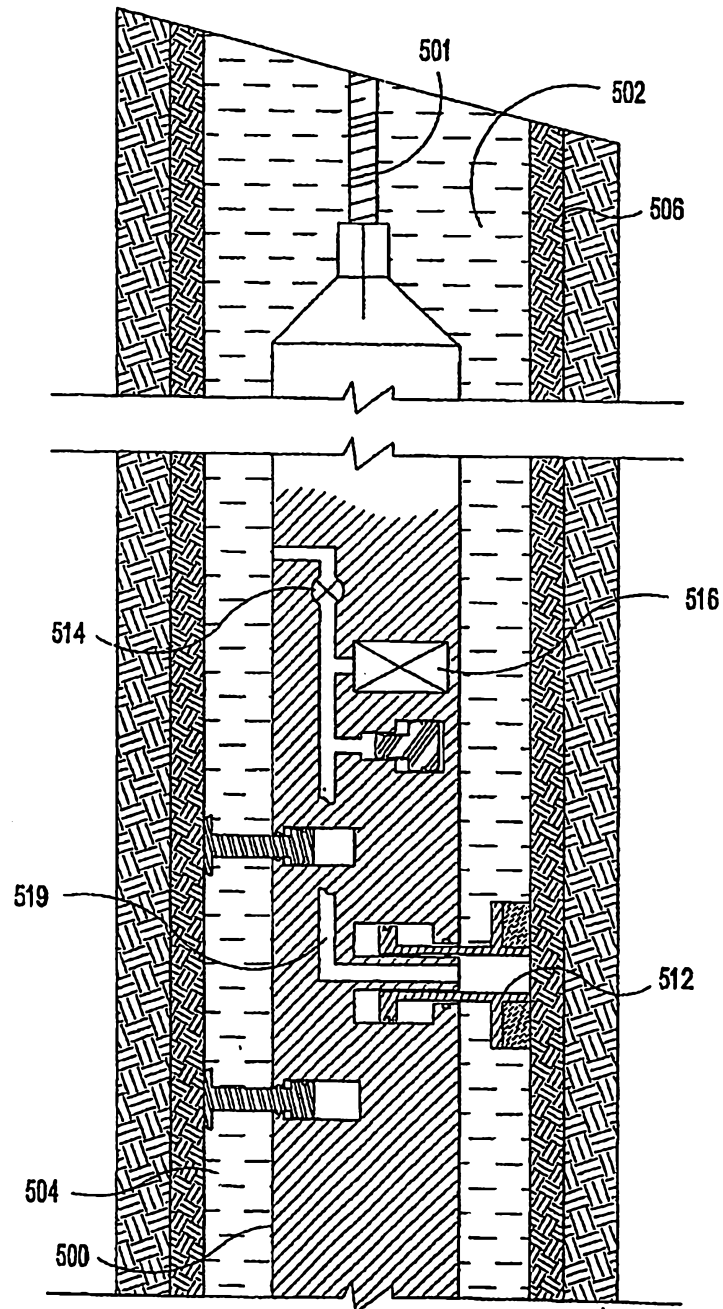


FIG 1

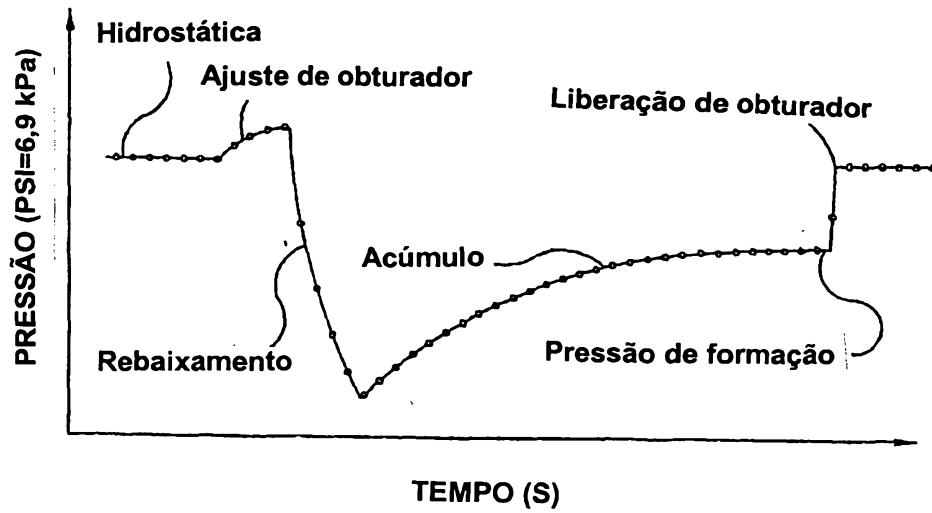


FIG 2

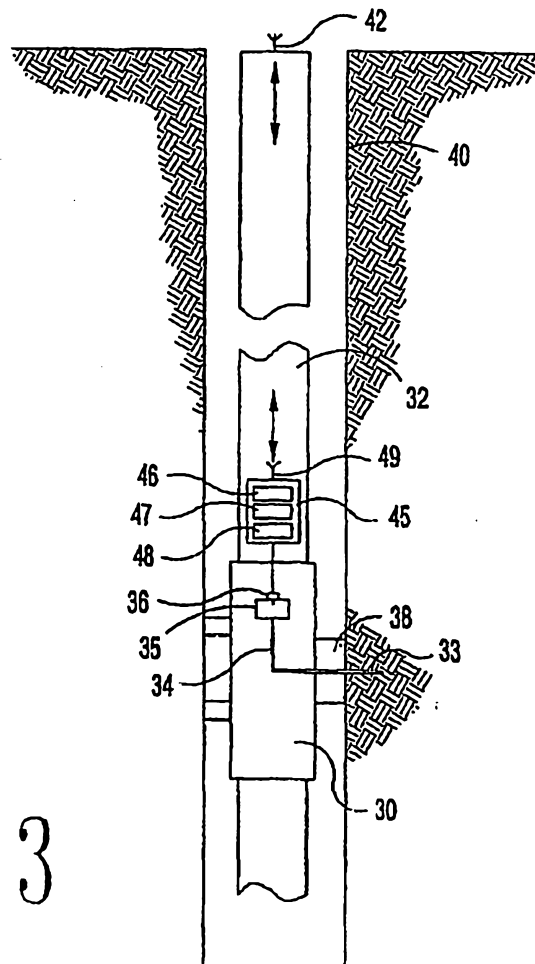


FIG 3

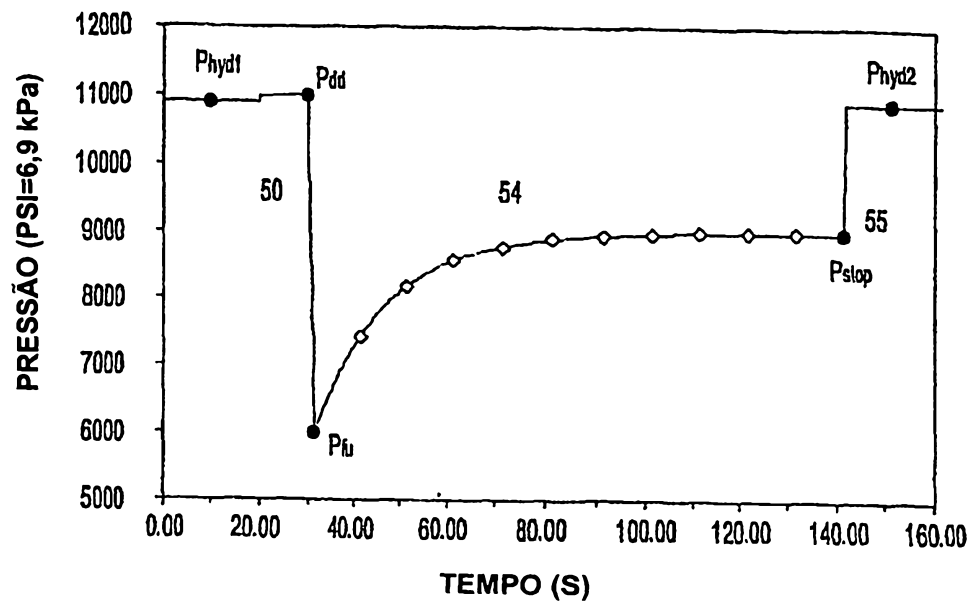


FIG 4A

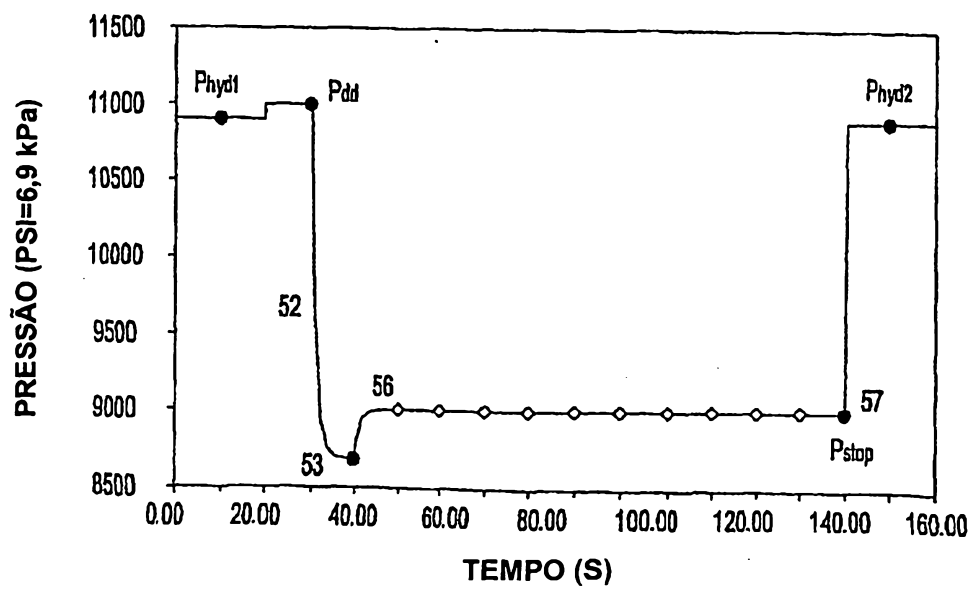


FIG 4B

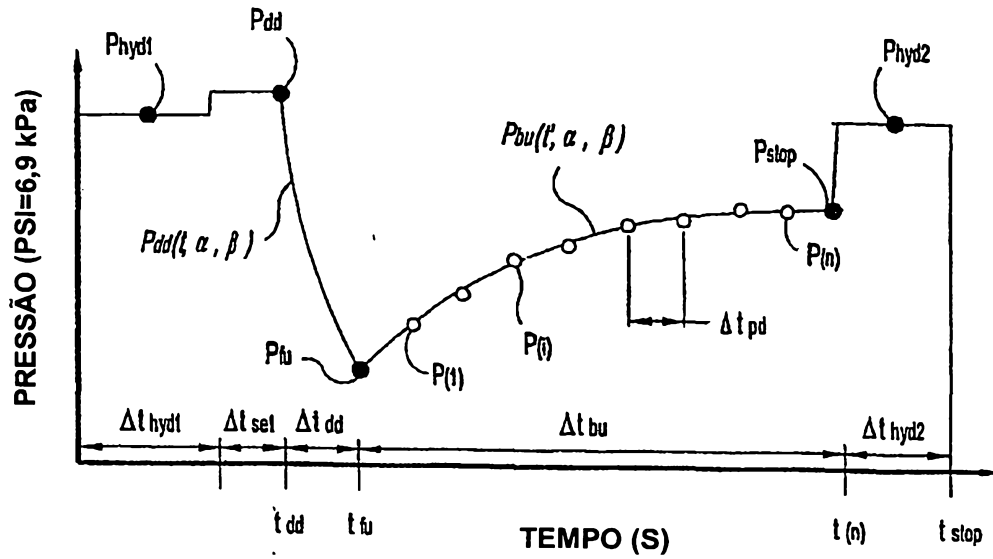


FIG 5

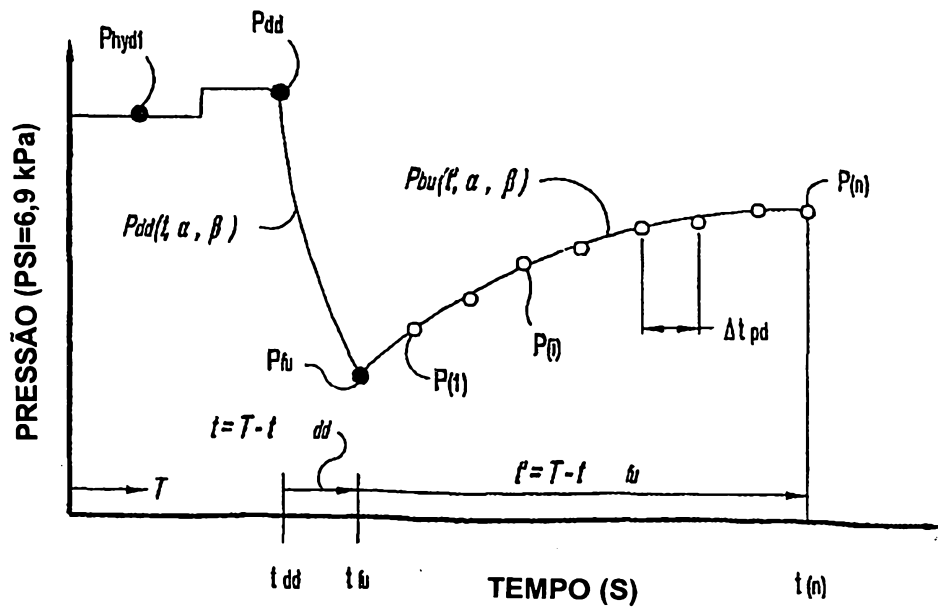


FIG 6