



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

(11) BR 112016017696-0 B1



(22) Data do Depósito: 23/01/2015

(45) Data de Concessão: 10/05/2022

(54) Título: MÉTODO PARA CARACTERIZAR UMA BARREIRA FÍSICA, MÉTODO PARA MONITORAR ALTERAÇÕES EM UMA BARREIRA FÍSICA E MÉTODO PARA MONITORAR A FORÇA DE UMA BARREIRA FÍSICA

(51) Int.Cl.: E21B 47/00; E21B 33/13; G01V 1/40; G01V 1/50.

(30) Prioridade Unionista: 31/01/2014 US 14/170,427.

(73) Titular(es): SCHLUMBERGER TECHNOLOGY B.V..

(72) Inventor(es): SMAINE ZEROUG; BIKASH K. SINHA; SANDIP BOSE; JIAQI YANG; TING LEI; RAM SUNDER KALYANARAMAN.

(86) Pedido PCT: PCT US2015012610 de 23/01/2015

(87) Publicação PCT: WO 2015/116488 de 06/08/2015

(85) Data do Início da Fase Nacional: 29/07/2016

(57) Resumo: MÉTODO PARA A CARACTERIZAÇÃO DE UMA BARREIRA INSTALADA EM UM FURO DE SONDAÇÃO QUE ATRAVESSA A FORMAÇÃO, MÉTODO PARA A CARACTERIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS BARREIRAS EM MÚLTIPLAS COLUNAS DE REVESTIMENTO INSTALADAS EM UM FURO DE SONDAÇÃO QUE ATRAVESSA A FORMAÇÃO, MÉTODO PARA A MONITORAÇÃO DAS ALTERAÇÕES EM UMA BARREIRA INSTALADA EM UM FURO DE SONDAÇÃO QUE ATRAVESSA A FORMAÇÃO, E MÉTODO PARA A MONITORAÇÃO DA FORÇA DE UMA BARREIRA INSTALADA EM UM FURO DE SONDAÇÃO QUE ATRAVESSA A FORMAÇÃO. Aparelho e método para a caracterização de uma barreira instalada em um furo de sondagem que atravessa uma formação, incluindo a localização de uma ferramenta acústica com um receptor e um transmissor em uma localização no furo de sondagem, ativar a ferramenta acústica para formar formas de onda acústicas, em que o receptor registra as formas de onda acústicas, e processar as formas de onda para identificar os parâmetros de barreira como uma função da profundidade e de azimute ao longo do furo de sondagem, em que as formas de onda compreendem, pelo menos, dois dentre sinais sônicos, sinais de pulso-eco ultrassônicos, e sinais de pitch-catch (emissão-captura) ultrassônicos.

“MÉTODO PARA CARACTERIZAR UMA BARREIRA FÍSICA, MÉTODO PARA MONITORAR ALTERAÇÕES EM UMA BARREIRA FÍSICA E MÉTODO PARA MONITORAR A FORÇA DE UMA BARREIRA FÍSICA”

REFERÊNCIA REMISSIVA A PEDIDOS CORRELATOS

[001]Este pedido reivindica prioridade do Pedido Não Provisório US nº 14/170427 depositado em 31 de janeiro de 2014, toda a divulgação do qual sendo aqui expressamente incorporada a título de referência no presente documento.

CAMPO

[002]As modalidades aqui se referem a caracterização da integridade de cimento usando informação acústica coletada com o uso de múltiplas medições acústicas realizadas em múltiplas faixas de frequência.

INTRODUÇÃO

[003]O diagnóstico eficaz do isolamento zonal do poço tornou-se crítico com regulamentações governamentais mais rigorosas. Estes regulamentos exigem que operadores de petróleo e gás forneçam e mantenham os poços com vedações de pressão que impedem que o fluxo descontrolado de fluidos de formação subterrânea, tais como fluidos de gás natural, salinas e de hidrocarbonetos vaze para a atmosfera ou para uma formação subterrânea. O diagnóstico deve ser realizado seguindo um trabalho de cimentação ou durante a vida de um poço ou no fim da sua vida antes da obstrução e abandono.

[004]As medições acústicas são amplamente utilizadas para fornecer um diagnóstico da condição do cimento colocado. No entanto, métodos de inversão e de interpretação para estas medições sofrem muitas limitações que impedem a sua eficácia de tornar-se um diagnóstico inequívoco sobre o que enche o espaço anular entre a revestimento e formação em um invólucro de coluna única ou entre o invólucro primário e o invólucro secundário, e o invólucro secundário e a formação em uma situação de coluna dupla. As acústicas são afetadas por

vários mecanismos que vão desde o estrutural (ou seja, a posição da ferramenta no interior do revestimento, a geometria do revestimento dentro do furo, a geometria do furo, etc.), a parâmetros de materiais intrínsecos (propriedades de volume do material anular, revestimento, formação, fluido de sondagem), bem como às condições interfaciais (a ligação do cimento ao revestimento e a formação).

[005] Quando parametrizadas em conformidade, estas condições produzem uma grande quantidade de informação, previamente desconhecida, tais como velocidades da onda de cimento e parâmetros de ligação que necessitam de dados de múltiplas medições com sensibilidades idealmente ortogonais para estas incógnitas (caso contrário, a multiplicidade de dados acrescenta informações redundantes úteis para o trabalho bruto mas, de outra forma, de uso limitado na inversão de todas as incógnitas pertinentes).

[006] Para completar, vamos começar descrevendo as medições atuais, abrangendo brevemente o modo como elas são utilizadas e listando suas limitações quando cada uma é usada separadamente.

Medições acústicas atuais, suas vantagens e limitações

[007] Há dois tipos de medições acústicas que estamos interessados:

1- Medições Ultrassônicas (de alta frequência) como implementadas em ISSOLATION SCANNER™, uma ferramenta de medição disponível comercialmente a partir da Schlumberger Technology Corporation of Sugar Land, Texas. A frequência de sinal varia de 80 kHz a várias centenas de kHz. Dois tipos de configurações são considerados (ver Figura 1):

a. Pulso-eco com um único transmissor-receptor que pulsa um feixe acústico na incidência normal à parede interna do revestimento e recebe a energia de eco de retorno. Esta

técnica de medição é incorporada em USI™ (Ultrasonic Imager), mas também no ISOLATIONSCANNER™. Na incidência normal e nos revestimentos de aço finos, que têm 15mm de espessura ou mais finas, um modo de espessura de revestimento é excitado na faixa de frequência típica de 200 a 500 kHz e conduz a uma resposta ressonante para a forma de onda recebida. Este modo de revestimento corresponde ao modo de S₁ Lamb de revestimento. A técnica de inversão estima a ressonância de decaimento e a associa com uma impedância acústica (igual ao produto da velocidade de onda de compressão e densidade) (Z_{cmt}) para o cimento. No revestimento mais espesso (> 15mm), o sinal recebido é visto como sendo de feito de ecos isolados temporais decorrentes de múltiplas reflexões resolúveis que ocorrem nas paredes do revestimento. O processamento das amplitudes desses ecos também leva a uma estimativa da impedância acústica do cimento Z_{cmt}.

[008]A limitação principal da técnica de pulso-eco é a sua incapacidade para sondar mais profundamente do que a região de revestimento-cimento imediata. A precisão da inversão é fortemente dependente da impedância acústica do fluido de sondagem dentro do qual a ferramenta está imersa. Além disso, o decaimento da amplitude é igualmente sensível à impedância do cimento, uma vez que é a sua ligação com o revestimento: um desligamento que reflete uma lacuna física na interface revestimento - cimento e reduz a impedância de cimento invertida de modo que ela fica próxima da impedância do fluido, resultando em ambiguidades quanto a se há cimento ou fluido atrás do revestimento.

b. Pitch-catch (emissão-captura) com transmissores e receptores separados. Uma modalidade desta técnica é implementada no gerador de imagens de onda flexural sobre o ISOLATION SCANNER™. Dependendo do ângulo de orientação dos

transdutores de transmissão e recepção, um dos vários modos de Lamb de revestimento pode ser excitado e detectado. No ISOLATION SCANNER™, um transmissor e dois receptores são utilizados. Além disso, os ângulos dos transdutores e a separação são otimizados para excitar e detectar o modo flexural do revestimento que é identificado como o modo Lamb antissimétrico mais baixo (A_0).

[009] Dois atributos dos sinais recebidos são utilizados para inverter as propriedades do cimento: (i) a amplitude do pico relacionado com a propagação de eco no revestimento, uma vez que decai a partir do primeiro receptor para o segundo - o que é chamado de atenuação flexural (Flex_ATT) e é usado para discriminar o cimento do líquido e do gás, e (ii) o eco de reflexão na interface de formação de cimento, chamado de eco da terceira interface ou TIE; que quando está presente nos dados, o seu tempo de trânsito pode ser utilizado para inverter para a velocidade de onda do cimento. Dependendo das propriedades do cimento, o TIE pode ser simples ou múltiplos, t é visto como sendo um eco de reflexão de cisalhamento-cisalhamento único (SS) de para um cimento com V_p maior do que cerca de 2800 m/s (o cimento é dito ser acusticamente rápido; cimentos de classe H não contaminados de lama pertencem a esta categoria). O TIE é visto como sendo feito de dois ou três ecos representando reflexos de compressão-compressão (PP), PS/SP convertido e de SS para um cimento com V_p inferior a cerca de 2500 m/s (o cimento é dito ser acusticamente lento; cimentos de espuma e de peso leve pertencem a esta categoria). Inversão desses ecos produz quer V_p ou V_s ou ambos, dependendo dos ecos rastreados e disponíveis para inversão.

[0010] Uma limitação do uso de Flex_ATT é o fato de sua dependência da impedância acústico do cimento ser o dobro do valor: o que significa que o baixo Z_{cmt} (como para o

cimento leve) e alto Zcmt (como para o cimento de classe H) podem ter o mesmo valor do Flex_ATT. Na inversão para o ISSOLATION SCANNER™ a impedância acústica invertida de pulso-eco é usada para tentar remover esta ambiguidade. No entanto, dado o problema com a alta sensibilidade à impedância da lama da inversão de dados de pulso-eco, tal como salientado acima, esta integração nem sempre é bem-sucedida e tem sido visto por vezes mais de uma contaminação dos dados de Flex_ATT mais robustos.

[0011] Uma segunda limitação diz respeito ao fato de que o TIE não está sempre presente nos dados por razões que se acreditam serem devido à atenuação de alta onda elástica no cimento, grande rugosidade da interface cimento-formação, ou uma correspondência de impedância de onda elástica na interface cimento-formação.

2- Medições sônicas (de baixa frequência) como implementadas em SONICSCANNER™. A frequência de sinal varia de algumas centenas de Hz a 20 kHz. No modo de aquisição de Registro de todos os Dados do SONICSCANNER™, a medição é muito rica em dados já que múltiplos modos de furo de sondagem são excitados e detectados utilizando uma multiplicidade de transmissores e registros individuais de receptores em uma matriz axial e azimutal. Estes incluem o modo monopolo que pode ser excitado tanto em baixas quanto em altas frequências e com fontes de monopolo distantes e próximas (em relação à matriz de receptor), e o modo dipolo que pode ser excitado em duas direções ortogonais, produzindo a excitação de dipolo cruzado.

[0012] A excitação monopolar próxima fornece também o sinal de perfil de cimentação (Cement-Bond-Log (CBL)), bem como os dados de perfil de densidade variável (Variável-Density-Log (VDL)). Estas são medições disponíveis com ferramentas de registro de ligação de cimento de geração mais

velha. Tipicamente, a amplitude de sinal da parte que chega primeiro nos dados de CBL está correlacionada com a presença de cimento no anel com o sinal estando alto, sempre que há uma falta de cimento ou uma falta de boa aderência de cimento ao revestimento. Os dados de VDL exibidos indicam se as chegadas de formações estão presentes ou não. Sua presença indica o acoplamento à formação por meio do cimento, que é fixo à formação, e vice-versa para a sua ausência.

[0013] A medição sônica tem várias limitações, incluindo a falta de resolução azimutal, baixa resolução axial (da ordem de 1m), e sensibilidade a vários mecanismos ao longo da região de sondas como excentrização do revestimento, canal de fluido, defeitos na bainha de cimento, descolamento em uma ou ambas as interfaces, e cobertura da totalidade ou de uma parte da faixa azimutal, etc..

[0014] A Figura 1 é um desenho esquemático de várias vistas do ISOLATION SCANNER™ mostrando a medição de onda flexural por pitch-catch implementada com um transmissor e dois receptores, e a medição por pulso-eco com um transmissor-receptor localizado a 180 graus da parte de pitch-catch. Também são mostradas as vistas superior e lateral idealizadas do ambiente do furo revestido em um poço de campo petrolífero composta de, a partir de dentro para fora, fluido de sondagem, revestimento de aço (cinza muito escuro), um anel cimentado (cinza escuro), e formação rochosa circundante (cinza claro). O esboço mostra esquemas para as técnicas de medição de pulso-eco ultrassônico (centro) e de pitch-catch (à direita). Os transdutores ultrassônicos ancorados na ferramenta introduzem som no revestimento de aço (altamente contrastante) para sondar e imagear o conteúdo do anel cimentado por trás do revestimento.

[0015] A Figura 2 é um desenho esquemático de uma ferramenta SONIC SCANNER™ mostrando vários transmissores

(monopolo e dipolo-cruzado) e uma seção de revestimento do receptor de uma matriz de 13 estações com 8 receptores azimutais em cada estação, bem como um diagrama esquemático que descreve a medição em um poço cimentado e revestido.

FIGURAS

[0016] A Figura 1 é um compósito de vistas em seção de uma ferramenta ISOLATION SCANNER™ e esboços idealizados das medições de pulso-eco (centro) e de pitch-catch (direita) implementadas na ferramenta.

[0017] A Figura 2 é uma vista em seção de uma ferramenta SONIC SCANNER™ e esboço idealizado da medição sônica implementada na ferramenta.

[0018] A Figura 3 é uma vista esquemática de um percurso helicoidal em um poço de perfuração traçado pela ferramenta ISOLATIONSCANNER.

[0019] A Figura 4 é um fluxo de trabalho de uma modalidade da integração de medições ultrassônicas de resolução azimutal de alta frequência e de medições sônicas de leitura radialmente profunda de baixa frequência.

[0020] A Figura 5 é uma vista em corte de um poço de perfuração, revestimento, formação e outros componentes de uma modalidade.

[0021] A Figura 6 é um fluxo de trabalho mais detalhado para uma modalidade de integração de medições ultrassônicas e medições sônicas apresentadas na Figura 4.

[0022] A Figura 7 é um esboço de um invólucro de revestimento duplo com cimento colocado entre os dois revestimentos e entre o revestimento externo e a formação.

[0023] A Figura 8 é um fluxo de trabalho de uma modalidade da integração de medições ultrassônicas e medições sônicas para uma situação de revestimentos duplos e de múltiplos revestimentos.

[0024] A Figura 9 é um fluxo de trabalho de uma

modalidade para uma inversão baseada em forma de onda aplicada às medições ultrassônicas de pitch-catch e de pulso-eco.

[0025] A Figura 10 é uma plotagem das formas de onda calculadas e experimentais da medição de pulso-eco ultrassônica no domínio do tempo (esquerda) e no domínio da frequência (direita).

[0026] A Figura 11 é uma plotagem de formas de onda calculadas e experimentais da medição de pitch-catch ultrassônica em quatro posições do receptor em relação ao transmissor.

[0027] A Figura 12 é um fluxo de trabalho para uma modalidade de uma inversão baseada em dispersão com atenuação de onda de Lamb aplicada à medição de pitch-catch ultrassônica com múltiplas modalidades (excitação de múltiplas ondas de Lamb separadamente).

[0028] A Figura 13 é uma plotagem de dispersões de atenuação de modo flexural ultrassônico para diferentes níveis de ligação de cimento a uma placa de aço.

[0029] A Figura 14 é um fluxo de trabalho para uma modalidade de inversão baseada em atributos gerais aplicada à medição de pulso-eco e de pitch-catch ultrassônica (com potencialmente mais de uma modalidade) e diferente de atributos de atenuação modal.

[0030] A Figura 15 é um fluxo de trabalho de uma modalidade que foca a inversão baseada em dispersão sônica com parâmetros restritos obtidos a partir da inversão de dados ultrassônicos como descrito nos fluxos de trabalho de inversões sônicas e ultrassônicas integradas mostradas nas Figs. 6 & 8.

[0031] A Figura 16 é uma série incluindo uma plotagem de um invólucro de revestimento duplo com ambos os revestimentos excêntricos com respeito um ao outro e ao furo

de perfuração (painel superior), uma plotagem de formas de onda de matriz receptora sônica calculada para condições de excentrização de dois revestimentos (painel intermediário), e dispersões de lentidão sônica calculadas (painel inferior).

[0032] A Figura 17 é um fluxo de trabalho de uma modalidade para prever a longevidade da bainha de cimento para manter o isolamento zonal de uma inversão integrada de dados de multimodalidade de tempo decorrido.

[0033] A Figura 18 é uma série de plotagens de velocidades de onda de barreira e compatibilidades de ligação como uma função do tempo.

[0034] A Figura 19 é um fluxo de trabalho de uma modalidade para prever a evolução temporal das propriedades de velocidade de onda e de ligação da barreira para a inversão de multimodalidades de dados de medição adquiridos em vários momentos durante as operações de perfuração.

SUMÁRIO

[0035] As modalidades da presente invenção se referem a um aparelho e métodos para caracterizar uma barreira instalada em um furo de sondagem que atravessa uma formação, incluindo localizar uma ferramenta acústica com um receptor e um transmissor em uma localização no furo de sondagem, ativar a ferramenta acústica para formar formas de onda acústica, em que o receptor registra as formas de onda acústica, e processar as formas de onda para obter e identificar os parâmetros de barreira como uma função da profundidade e de azimute ao longo do furo de sondagem, em que as formas de onda compreendem pelo menos dois dentre sinais sônicos, sinais de pulso-eco ultrassônicos, e sinais de pitch-catch ultrassônicos.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[0036] As limitações acima mencionadas são particularmente críticas quando uma única modalidade de

medição é utilizada para inverter para o estado do conteúdo do anel. As limitações são agravadas em configurações onde o número de incógnitas aumenta, como no caso em que mais de um revestimento está presente entre o furo perfuração e formação. Estas limitações são atenuadas à medida que as modalidades são usadas conjuntamente na inversão.

[0037] Aqui descrevemos uma inversão abrangente que alavanca os pontos fortes de cada uma das modalidades acústicas utilizadas para a avaliação de cimento de forma complementar. Por modalidades acústicas, queremos dizer as medições atuais e adicionais que podem ser implementadas como uma ferramenta de avaliação de cimento de última geração para a perfilagem em rede fixa, bem como através de outros meios de implantação, tais como a Perfilagem durante a Perfuração (Logging While Drilling) em colunas de perfuração ou através de tubulação em espiral. O resultado é um diagnóstico muito menos ambíguo do conteúdo do anel e se fornece isolamento hidráulico.

[0038] Aqui nós também descrevemos uma inversão integrada para as medições que estão disponíveis em ISOLATIONSCANNER™ e SONICSCANNER™, bem como extensões para estas modalidades que se acreditam que fornecem mais robustez à inversão integrada de multimodalidade. O resultado final é uma interpretação inequívoca das propriedades do material que enche o espaço anular de interesse.

Incógnitas e parâmetros na inversão

[0039] A avaliação de cimento significa fornecer uma avaliação qualitativa e quantitativa de uma série de questões e incógnitas. Como uma questão prática, o objetivo geral é avaliar a integridade da barreira englobando um poço de perfuração incluindo as superfícies e o material do revestimento, o cimento ou resina ou outro material de vedação rígida entre o revestimento e a formação, e a

formação. Alguns poços de perfuração podem ter várias camadas concêntricas de revestimento, cimento, revestimento, cimento, etc., que formam a barreira. Às vezes, enchimentos, aparas, pedaços de formação, propantes, areia ou outro resíduo pode fazer parte da barreira. Em algumas modalidades, o fluido de serviços de poço ou de perfuração residual pode ser parte da barreira. Em algumas modalidades, porções do material podem estar faltando, rachadas, deformadas ou não sólidas.

1- Enchimento anular - o espaço anular é enchido com um sólido ou um líquido?

Se o preenchimento anular é sólido, quais são as suas propriedades mecânicas como refletidas nas velocidades de onda acústicas (compressão V_p e cisalhamento V_s) e densidade ρ ? Embora nós usemos o termo acústica, percebemos que quando a energia se propaga no revestimento, cimento e formação, ela o faz pelas regras de propagação de ondas elásticas onde tanto as ondas de compressão quanto de cisalhamento estão envolvidas.

2- Quais são as distribuições azimutais (indexada pela variável ϕ) e axiais (z) do cimento?

Quais são $V_p(\phi, z)$ e $V_s(\phi, z)$? Estes valores são mais baixos em determinadas seções azimutais que indicam a contaminação de cimento por lama como tem sido observado a partir de dados de campo ou talvez indicando falta de um material sólido em certos canais para que $V_s(\phi, z)$ seja quase zero?

O sólido é bem ligado ao revestimento ou é retirado para criar uma lacuna ou microanel que pode permitir a canalização de fluido? A parametrização da ligação é descrita por um modelo de conformidade que atribui variáveis η_{N2} e η_{T2} às condições de ligação normal e tangencial à medida que sondado acusticamente. O modelo de conformidade é para ligações em um poço revestido cimentado. Um subscrito 2 é utilizado para

designar a ligação na segunda interface em reconhecimento da semântica bem estabelecida que atribui o eco de reflexão de terceira interface para a interface de formação de cimento e, portanto, a interface de revestimento de cimento é chamada de segunda interface. Existem, em princípio duas direções tangenciais, a axial e a azimutal e, portanto, deve haver dois parâmetros de conformidade tangencial. Por uma questão de simplicidade vamos usar apenas um e associá-lo à sondagem ao longo da propagação de ondas axial quer no invólucro de modo de Lamb ultrassônico ou no caso sônico.

4- O poço sólido é ligado à formação ou é retirado para criar uma lacuna ou microanel que pode permitir a canalização de fluidos? De forma semelhante ao caso 3 acima, podemos atribuir variáveis de conformidade η_{N3} e η_{T3} para esta ligação.

5- O cimento sólido está fissurado ou está apresentando espaços vazios preenchidos com fluido? E se assim for, estas fissuras ou espaços vazios estão conectadas e se estendem através de seções axiais para permitir a canalização de fluidos entre as zonas? Vamos atribuir a variável $M(\phi, z)$ para representar as distribuições de fissuras e/ou espaços vazios. Do ponto de vista de isolamento hidráulico, é a permeabilidade associada com $M(\phi, z)$ que é de pertinência para o diagnóstico. No entanto, a acústica por si só não pode fornecer uma quantificação deste parâmetro. Por isso, vamos tentar usar uma representação estática para isso em termos de $M(\phi, z)$.

6- Há um parâmetro auxiliar pertencente à questão de excentrização de revestimento dentro do furo. Apesar da excentrização de revestimento, Cas1Ecc, não é um parâmetro que descreve o estado do anel, é importante no sentido de que, quando o revestimento é estimado como sendo excêntrico, a conclusão é que a lama pode não ter sido completamente

deslocada e substituída pela pasta de cimento durante a execução do trabalho de cimentação e a expectativa é que as propriedades do cimento, nesse local de profundidade e acima dele, sejam suscetíveis de terem sido impactadas negativamente (por exemplo, contaminadas ou com um canal de fluido).

[0040] Em resumo, a avaliação do anel de cimento com acústica significa inverter para um número de incógnitas que são função do azimute e do eixo furo de perfuração (ϕ, z):

- 1- $Vp(\phi, z)$ e $Vs(\phi, z)$; bem como densidade $\rho(\phi, z)$.
- 2- $\eta_{N2}(\phi, z)$ e $\eta_{T2}(\phi, z)$
- 3- $\eta_{N3}(\phi, z)$ e $\eta_{T3}(\phi, z)$
- 4- $M(\phi, z)$

[0041] A inversão para estas diversas variáveis exige a integração de várias medições para reduzir a não singularidade e incerteza. Existem fatores de motivação adicionais para integrar múltiplas medições, devido principalmente à sensibilidade dos dados e à inversão para parâmetros ambientais que não podem ser conhecidos com uma precisão suficiente ou que podem impedir algumas das medições, mas não todas. Por exemplo, espera-se que a impedância acústica de fluido Z_{mud} (velocidade de onda x densidade), que é necessária com alta precisão para a inversão da medição de eco-pulso, não desempenhe um papel importante em uma inversão de multimodalidades. Além disso, quando a lama é pesada e altamente atenuante, as medições ultrassônicas podem ser prejudicadas enquanto as medições sônicas de baixa frequência são muito menos afetadas. Além disso, se a interface de revestimento - cimento exibe um microanel cheio de ar (conhecido como microanel seco), a sondagem ultrassônica é prejudicada e a energia permanece presa dentro do revestimento com transmissão insignificante na bainha de cimento. Neste caso, esperamos que a medição

sonora com frequência muito menor se acople ao cimento e forneça alguma sensibilidade a esta condição.

Medições consideradas

[0042] Em termos de medições, vamos considerar que as modalidades de ultrassônicas incluem pelo menos o pulso-eco, o modo de Lamb flexural e o modo de Lamb extensional. Os modos de Lamb adicionais também podem fazer parte do conjunto de dados incluídos na inversão integrada. As medições das modalidades sônicas aqui consideradas compreendem os modos que podem ser excitados e detectados na ferramenta SONICSCANNER™ - ou seja, os modos de monopólio e de dipolo, bem como os modos de quadripolo que podem ser detectados sob excentrização de revestimento. Para os revestimentos centrados, os modos de quadripolo também podem ser detectados quando excitados como através da modificação ou adição de um transmissor de quadripolo.

Escala espacial dos parâmetros

[0043] A escala em que as incógnitas definidas acima podem, eventualmente, ser invertidas depende da resolução espacial de medição. Pulso-eco tem uma área de cobertura de cerca de 1" (2,5 cm), tanto azimutalmente quanto axialmente; pitch-catch com o modo flexural ou extensional tem uma área de cobertura de cerca de 4 a 8" (10 a 20cm) axialmente e cerca de 2" (5cm) azimutalmente, onde a medição sônica de monopolo se integra em todo o azimute e com uma área de cobertura axial de ~ 75" (~ 180cm). Em contraste, os dados sônicos de dipolo respondem pelas propriedades elásticas nos dois quadrantes opostos definidos pela direção de disparo do transmissor de dipolo. A área de cobertura axial é dependente da extensão axial da abertura de receptor que pode variar de cerca de 30 polegadas (~ 76 cm) a 72 polegadas (~180 cm). No entanto, devido a amostragem de ferramenta ao longo do poço de perfuração, sendo puxada para cima e descrevendo uma

trajetória helicoidal (ver Figura 3), ser escassa, tipicamente a cerca de 3" ou 6" e, por vezes, mais que isso, as medições de pulso-eco e pitch-catch serão consideradas como sondagem em uma escala espacial similar de cerca de 6". A integração, no entanto, entre ultrassônico e sônico vai exigir o escalonamento das incógnitas (parâmetros listados acima).

[0044] A Figura 3 fornece uma vista esquemática de um percurso da ferramenta. À medida que a ferramenta ultrassônica, tal como ISOLATION SCANNER™ digitaliza o ambiente do furo revestido, ela descreve um percurso helicoidal com amostragem axial de cerca de 4" e amostragem azimutal de 2,5, 5 ou 10 graus, dependendo da aplicação em mão.

[0045] Na seguinte descrição da inversão integrada, é conveniente estabelecer uma distinção entre configurações de uma única coluna e múltiplas colunas. Em ambas as configurações, vamos supor que a ferramenta acústica é colocada no interior do revestimento mais interno e introduz som de energia acústica para este revestimento. Uma única coluna significa que avaliamos um único anel cimentado existente entre o revestimento e a formação. A configuração de múltiplas colunas significa que avaliamos mais de um anel cimentado: o anel primário entre o revestimento primário e o revestimento secundário, e o anel secundário entre o revestimento secundário e revestimento ou formação terciária.

Configuração de revestimento único:

[0046] Um possível fluxo de trabalho para a integração das várias medições é mostrado na Figura 4. A Figura 4 fornece um fluxo de trabalho para a integração de medições ultrassônicas de resolução azimutalmente de alta frequência e medições sônicas de leituras radialmente profundas de baixa frequência. As medições ultrassônicas são

compostas de eco-pulso que excita o modo S1 (no modo de não propagação), e o pitch-catch que excita os modos flexural (A0) e extensional (S0) no modo de propagação axialmente. A sua integração em uma inversão conjunta fornecer parâmetros no cimento adjacente ao revestimento tais como as velocidades de onda do cimento, V_p^* e V_s^* (além disso, a impedância acústica, Z^*), bem como os parâmetros de ligação da interface revestimento-cimento - chamados de "bond2" η_{N2} e η_{T2} . Estes parâmetros são expressos como funções do azimute (ϕ) e do eixo do furo de perfuração (z). Eles são dimensionados até a escala sondada pelas medições sônicas e utilizados como restrições sobre a inversão da informação de multimodo sônico (dispersão e outros atributos) para inverter para as propriedades do cimento que se estendem por todo o percurso para a parede da formação e incluindo os parâmetros de ligação na interface de formação - cimento.

[0047] O asterisco (*) nos parâmetros de cimento V_p^* , V_s^* e Z^* indica que eles pertencem à região do cimento adjacente ao revestimento como representado no desenho na Figura 5. Isto reflete a situação em que os dados ultrassônicos não exibem sinais de reflexão a partir da interface de formação - cimento e, portanto, a inferência não pode ser feita com uma certeza sobre a extensão dos parâmetros de cimento a serem invertidos. Neste caso, a inversão de dados sônicos vai se concentrar em estabelecer a extensão da validade destes parâmetros. Além disso, o sônico é usado para estabelecer a natureza da ligação na interface formação - cimento.

[0048] O anel cimentado é dividido em dois anéis circulares, como mostrado à direita da Figura 5, para indicar a região adjacente ao revestimento que é invertível a partir dos dados de medições ultrassônicas, sempre que este não apresenta ecos de reflexão a partir da interface de formação

- cimento.

[0049] A Figura 6 fornece um fluxo de trabalho mais detalhado para a integração de medições ultrassônicas e medições sônicas do que o mostrado na Figura 4. A Figura 6 mostra, adicionalmente, a introdução de parâmetros de entrada (caixa à esquerda) que podem ou não estar disponíveis. A inversão para a excentrização de revestimento a partir dos dados ultrassônicos é usada como uma restrição adicional na inversão dos dados sônicos baseados em dispersão. O escalonamento das propriedades obtidas a uma escala espacial de cerca de 6" a partir da inversão dos dados ultrassônicos para uma escala dez vezes maior (cerca de 75") relevante para realizar a inversão dos dados sônicos pode ser realizado através de várias maneiras. Por exemplo, os métodos de média de volume ponderado podem ser usados para as velocidades de onda enquanto que a média ponderada da superfície pode ser usada para os parâmetros de ligação.

[0050] A premissa central da inversão conjunta para as medições ultrassônicas encontra-se no fato de que as diferentes modalidades de onda excitam diferentes movimentos de partículas do revestimento de aço e anel de cimento. Na medição de pulso-eco, o movimento da partícula associado com a onda é predominantemente normal (ou para fora do plano) para a interface de revestimento - cimento e, portanto, é sensível principalmente ao estado da ligação normal entre o revestimento e o cimento bem como quanto à propriedade de onda compressão do cimento como expressa através de sua impedância acústica (ou seja, o produto da densidade do cimento por sua velocidade de onda de compressão).

[0051] Por outro lado, as medições de pitch-catch excitam predominantemente a propagação de modos de Lamb dentro do revestimento cujos movimentos de partículas associados dependem da faixa de frequências considerada (isto

é conhecido como dispersão estrutural). Por exemplo, um modo particular, um modo particular pode ter um movimento de partículas predominantemente para fora do plano dentro da faixa de baixa frequência do sinal e um movimento de partícula predominantemente no plano, ou um movimento equilibrado para fora do plano, e no plano, longe da faixa de baixa frequência. Além disso, estas características podem diferir para o próximo modo de Lamb, que é excitado. Estas propriedades de dispersão de frequências são exploradas para focar as sensibilidades para as incógnitas específicas descritas acima. Por exemplo, o movimento no plano será altamente sensível à presença de um deslizamento ou de um descolamento suave entre o revestimento e o cimento que pode não ser detectado com uma modalidade com um movimento fora de plano. Além disso, o mesmo movimento no plano também será muito sensível à presença de um fluido em contato com o revestimento, portanto, fornecendo os meios para distinguir o cimento ligado a partir de um fluido.

[0052] A variedade rica em movimento de partícula associada com os vários modos de Lamb e suas dispersões é explorada na inversão considerada aqui através de diversos meios, tal como descrito na seção sobre "abordagens de inversão" listada abaixo.

Configuração de revestimento duplo ou de múltiplo revestimento:

[0053] A Figura 7 fornece um esboço de um caso de coluna dupla com cimento colocado entre as duas colunas e entre a coluna externa e a formação.

[0054] A Figura 8 é um fluxo de trabalho de uma modalidade da integração de medições ultrassônicas e medições sônicas para uma situação de colunas duplas e múltiplas. De forma análoga à inversão de coluna única, os dados ultrassônicos são usados para inverter os parâmetros de

bainha de cimento colocados entre o primeiro e o segundo revestimentos. Estes parâmetros invertidos são então utilizados como restrições na inversão para a bainha de cimento além do segundo revestimento. Devido a bainha de cimento interno ser delimitada por um revestimento de aço, espera-se que os dados ultrassônicos apresentem ecos de reflexão na terceira interface devido ao forte contraste na interface de aço - cimento. Estes dados deverão permitir uma inversão mais precisa das velocidades de onda de cimento (sob o conhecimento dos diâmetros e espessuras de revestimento interno e externo), bem como a quantidade de excentrização, se estiver presente, entre o revestimento interno e o segundo revestimento.

Abordagens de inversão:

[0055] A inversão das várias medições pode se basear em uma das várias abordagens dependendo de vários elementos.

(i) A inversão pode ser com base nas formas de onda. Isto é possível com a disponibilidade de códigos de modelagem de avanço rápidos e apropriados. Estes códigos podem, adicionalmente, ser calibrados para auxiliar o sistema eletrônico de sinal e os parâmetros ambientais que não são capturados pelo modelo utilizado para a medição. Por ser possível uma boa extensão para as medições ultrassônicas, a sua inversão de dados pode ser exercida desta forma. Por outro lado, os códigos sônicos disponíveis permanecem computacionalmente dispendiosos e, portanto, não propensos à abordagem de inversão baseada em forma de onda. Um exemplo de um fluxo de trabalho é mostrado na Figura 9, que é o fluxo de trabalho de uma modalidade para uma inversão baseada em forma de onda aplicada às medições de pulso-eco e de pitch-catch ultrassônicas. Os códigos de modelagem de avanço são utilizados para gerar as formas de onda que são comparadas com as formas de onda medidas e registradas no desajuste. O

desajuste é reduzido através de iterações sobre os parâmetros de cimento, incluindo o estado das ligações. O esquema iterativo interrompe e fornece números quantitativos finais para os parâmetros de ligação e do cimento quando o desajuste se torna menor que a quantidade prescrita.

[0056] Um exemplo para a modelagem de avanço da medição de pulso-eco é ilustrado na Figura 10, que mostra uma validação dos resultados a partir de um código de modelagem contra os resultados experimentais. A plotagem da esquerda na Figura 10 mostra uma comparação entre o sinal do transdutor experimental (sólido escuro) e o sinal calculado (sólido claro) a partir de um modelo 3D rigoroso para a medição de pulso-eco de avaliação de cimento para um tubo de aço carregado com água em ambos os lados. A plotagem de inserção mostra uma visão expandida da resposta ressonante do revestimento. A plotagem à direita mostra a comparação entre as amplitudes espectrais de Fourier associadas. O entalhe em torno de 0,3 MHz é indicado com uma seta - ele representa a ressonância de espessura do revestimento fundamental que constitui a base da medição. A sua posição e a largura espectral estão relacionadas com a espessura do revestimento e a impedância do meio no anel em contato com o revestimento.

[0057] Um segundo exemplo de modelação de avanço, agora para medição de pitch-catch, é ilustrado na Figura 11, o que mostra uma validação dos resultados a partir de um código de modelagem para esta medição em relação aos dados experimentais. A Figura 11 mostra uma comparação entre o modelo (azul) e os dados experimentais (vermelho) para a primeira chegada (modo flexural), em uma variedade de espaçamento de transmissor-receptor (TR) de para a geometria mostrada à direita na Figura 1 (para um revestimento cilíndrico circundado por água em ambos os lados).

(ii) A inversão pode ser com base em atributos de forma

de onda. A amplitude, o tempo de chegada, a dispersão de frequência de fase e, adicionalmente, a atenuação de amplitude são exemplos de atributos que são primeiro estimados a partir dos sinais e, em seguida, utilizados na inversão. Esperamos usar esta abordagem, tanto para inversão de dados ultrassônicos quanto sônicos e a abordagem é ilustrada pelo fluxo de trabalho mostrado na Figura 12, que é um fluxo de trabalho para a inversão baseada em atributos aplicada à medição de pitch-captura ultrassônica com múltiplas modalidades (excitação de múltiplas ondas de Lamb separadamente). O pré-processamento extrai atributos particulares para cada modo de Lamb, tais como a atenuação, que podem ser dependentes da frequência. Estes atributos são então comparados com uma biblioteca multidimensional de atributos pré-calculados como uma função das propriedades do cimento. Uma correspondência com um critério específico fornece o conjunto de parâmetros de cimento invertidos.

[0058] Uma biblioteca de atributo é construída utilizando os resultados da modelagem que englobam ambos os valores previstos de tais atributos para uma faixa de valores típicos dos parâmetros de revestimento cimentados, parâmetros de lama e furos e geometria da ferramenta, bem como a sensibilidade computada de atributos para os vários parâmetros. Os atributos medidos são então utilizados para melhor ajustar os da biblioteca usando uma métrica que é dependente das sensibilidades pré-computadas. Este ajuste é feito em conjunto com uma operação de calibração ou normalização que reduz o efeito da variabilidade da aquisição individual, tais como os decorrentes de variações de resposta do transdutor ou efeitos ambientais não modelados.

[0059] Um exemplo de dispersão de atenuação modal como um atributo é mostrado na Figura 13. A Figura 13 mostra as curvas de dispersão de atenuação para o modo flexural em

uma chapa de aço cimentada de um lado com vários graus de ligação do cimento para o aço.

(iii) A inversão pode se basear em uma abordagem híbrida entre a inversão baseada em forma de onda e a inversão baseada em atributos, cada uma apresentando as características descritas acima.

[0060] A Figura 14 é um fluxo de trabalho para a inversão baseada em atributos aplicada à medição de pulso-eco e de pitch-catch ultrassônica (com potencialmente mais de uma modalidade). O pré-processamento extrai atributos particulares para cada medição, tais como taxa de decaimento para pulso-eco e atenuação para os modos flexural e extensional. Estes atributos são então comparados com uma biblioteca multidimensional de atributos pré-calculados como uma função das propriedades do cimento e das propriedades de ligação. Uma correspondência com um critério específico fornece o conjunto de parâmetros de cimento invertidos.

Modalidade para a inversão integrada dos dados de medição ultrassônica

[0061] Nesta seção, vamos supor que temos acesso a todas as modalidades possíveis de medições ultrassônicas e listar uma das implementações previstas para a inversão integrada.

1. **Medição de pulso-eco:** se nos revestimentos finos com formas de ondas ressonantes ou revestimento espesso com uma série de ecos isolados, assumimos a inversão para:

1.1. A relação $F(\phi, z)|^{pe}$ da impedância acústica de cimento e parâmetro de ligação normal na interface de revestimento - cimento: (vamos usar o sobrescrito "pe" para indicar estimativas invertidas a partir dos dados de pulso-eco)

$$F(\phi, z)|^{pe} = \text{função de } (V_p(\phi, z) \rho(\phi, z)|^{pe2} \text{ e } \eta_{N2}(\phi, z)|^{pe})$$

[0062] Esta relação pode ser expressa em várias formas. Por exemplo, o modelo de linha de transmissão-1D bem conhecido que é usado no método de inversão atual pode ser utilizado com a adição de uma impedância que representa a ligação não ideal entre o revestimento e o cimento e que depende do parâmetro conformidade $\eta_{N2}(\phi, z)$.

1.2. Se ecos na terceira interface estão presentes nestes dados, os quais podem ser inspecionados pela presença de efeitos de galáxia-padrão no mapa da impedância (isto é, $F(\phi, z)|^{pe}$) o processamento usando técnicas como processamento de bin (Patente dos Estados Unidos Número 5.216.638 fornece mais detalhes e é incorporada a título de referência) pode ajudar a extrair o eco da terceira interface e produzir uma estimativa para o $Vp(\phi, z)|^{pe2}$ de compressão do cimento, fazendo uma estimativa do tamanho do furo e/ou da geometria. Em casos de avaliação de uma coluna dupla, a expectativa é que, se o revestimento interno é excêntrico com respeito à cadeia externa, o eco da terceira interface deve estar presente nos dados, a menos que o cimento seja altamente atenuante devido à contaminação da lama, por exemplo.

[0063] Os detalhes adicionais podem ser encontrados nas três referências seguintes.

[1] "Geophysical prospecting using sonics and ultrasonics," B. K. Sinha and S. Zeroug in Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, Ed. J. G. Webster, 340-365 (Pub. John Wiley & Sons, 1999).

[2] "Forward modeling for ultrasonic leaky Lamb-wave based imaging through a highly contrasting steel cylindrical layer," In IEEE Ultrasonics Symposium, 2004, 23-27 de agosto de 2004, 672 - 675, Vol.1.

[3] "Quantitative Corrosion Evaluation in Wells Using a Multi-Function Ultrasonic Imager," in Proc. IEEE Ultrason. Symp., (Nov. 1995), A. Hayman et al.

Todas as três referências são aqui incorporadas a título de referência.

2. Medição de pitch-catch - flexural e extensional: os dados de ambos os modos podem fornecer potencialmente estimativas das propriedades de cimento e de ligação de revestimento - cimento do processamento da chegada de revestimento e, para o modo flexural, o eco da terceira interface.

2.1. A atenuação pode ser estimada através de dois ou mais receptores. Dois atributos podem ser usados: o decaimento de pico do envelope de energia, $A(\phi, z)$, bem como a atenuação de dispersão (ou seja, como uma função da frequência), $\alpha(f; \phi, z)$:

$$A(\phi, z) \text{ flex } \& \alpha(f; \phi, z) \text{ flex gerando } Vp(\phi, z) \text{ flex1; } \eta_{T2}(\phi, z) \text{ flex2 e } \eta_{N2}(\phi, z) \text{ flex2}$$

e

$$A(\phi, z) \text{ ext } \& \alpha(f; \phi, z) \text{ ext gerando } Vp(\phi, z) \text{ ext1; } \eta_{T2}(\phi, z) \text{ ext2 e } \eta_{N2}(\phi, z) \text{ ext2}$$

2.2. O eco da terceira interface, quando presente, fornece estimativas das velocidades de onda de cimento sob a suposição de que o tamanho de furo é conhecido:

$$Vp(\phi, z) \text{ flex2 } \& Vs(\phi, z) \text{ flex2}$$

[0064] Note que apenas um dos dois pode ser invertido, dependendo do número de ecos da terceira interface rastreados (TIEs) presentes nos dados.

2.3. O TIE flexural também pode fornecer uma estimativa da união da interface de formação - cimento das refletividades associadas aos vários TIEs:

$$Rss(\phi, z) \text{ flex3, } Rps(\phi, z) \text{ flex3, e } Rpp(\phi, z) \text{ flex3 gerando } \eta_{T3}(\phi, z) \text{ flex e } \eta_{N3}(\phi, z) \text{ flex}$$

[0065] Nós aqui assumimos o caso geral onde todos os três TIEs (SS, PS/SP e PP) estão presentes e invertidos.

2.4. O TIE flexural também pode fornecer uma estimativa da excentrização do primeiro revestimento:

Cas1Ecc

2.5. Se uma estimativa da velocidade de onda de cimento é derivada do processamento das chegadas anteriores no sinal, então os TIEs podem ser usados para inverter a espessura anular sem a necessidade de fazer uma suposição sobre o furo ou diâmetro do revestimento externo.

[0066] As várias estimativas são combinadas judiciosamente usando técnicas que são bem estabelecidas na inversão de problemas de múltiplos parâmetros de vários dados (fusão de dados, inversão multifísica etc.). Estes podem ser determinísticos ou probabilísticos. Uma abordagem determinística pode consistir em ajustar as medições em conjunto com as previsões de um modelo dependente dos parâmetros de interesse. O melhor ajuste, em seguida, gera os valores estimados desses parâmetros que representam os estados da natureza.

[0067] A abordagem probabilística é baseada na inferência Bayesiana e na teoria de evidências de Dempster-Shafer. A abordagem Bayesiana se baseia em tratar todos os estados da natureza ou parâmetros como tendo uma distribuição de probabilidade que reflete uma medida de crença em seus valores. Antes de qualquer medição, há uma distribuição de probabilidade inicial hipotética de um estado de natureza chamado *a priori* indicando a crença inicial sobre esse estado. Essa crença pode ser baseada, por exemplo, em um conhecimento geral das propriedades dos materiais relevantes ou derivadas de experimentos passados em cenários semelhantes. Esta distribuição inicial é então utilizada juntamente com as medições pertencentes ao parâmetro para se obter uma distribuição atualizada ou posterior, que indica a crença sobre o parâmetro após as medições serem tomadas. A estimativa do parâmetro pode ser tomada como o valor máximo da distribuição de probabilidades que produz a estimativa

máxima a posteriori, ou pode ser obtida a partir da média ou mediana da distribuição posterior. A incerteza ou barras de erro são derivadas similares obtidas a partir da largura da distribuição em torno da estimativa indicada. A atualização da probabilidade é realizada usando uma regra de Bayes, como mostrado abaixo, e também pode ser utilizada para combinar várias medições ou estimativas para os nossos propósitos. Damos uma breve descrição de como duas medições diferentes podem ser combinadas no esquema abaixo.

[0068] Vamos supor que estamos interessados em um estado de natureza, θ , como um parâmetro de ligação, e temos dois dados, D_1 e D_2 , que oferecem informações sobre θ e podem ser obtidos a partir de medições e/ou estimativas, cada uma, derivadas de uma inversão. Então poderíamos descrever a distribuição de probabilidade conjunta do parâmetro e dados como $p(\theta, D_1, D_2)$. Isto pode ser equivalentemente descrito em termos de condicionamento sobre o parâmetro ou os dados como segue.

$$p(\theta, D_1, D_2) = p(D_1, D_2 | \theta)p(\theta) = p(\theta | D_1, D_2)p(D_1, D_2)$$

[0069] Notamos que $p(\theta)$ refere-se à distribuição anterior de θ , enquanto $p(\theta | D_1, D_2)$ é a probabilidade posterior que está condicionada nos dados D_1 e D_2 que são observados. Portanto, a regra de Bayes fornece a receita para obter a distribuição posterior:

$$p(\theta | D_1, D_2) = \frac{p(D_1, D_2 | \theta)p(\theta)}{p(D_1, D_2)}$$

Aqui $p(D_1, D_2 | \theta)$ refere-se à probabilidade de observar os dados sendo determinado um valor de θ (também chamado de probabilidade) e é dependente da medição e erro de modelo e $p(D_1, D_2)$ refere-se às evidências e é obtido pela integração da probabilidade no numerador ao longo da faixa de θ .

[0070] Os detalhes da integração e a computação do posterior são dependentes do problema específico. Geralmente os erros nos dados D1 e D2 obtidos a partir das medições múltiplas podem ser assumidos como sendo independentes e por isso, pode-se simplificar: $p(D1, D2 | \theta) = p(D1 | \theta) p(D2 | \theta)$. Além disso, a evidência é usada para validar e conciliar os modelos utilizados na inversão usando a teoria de evidências.

Uma modalidade para a inversão integrada dos dados de medições sônicas

[0071] As medições sônicas também podem ser invertidas, em algumas modalidades. Prevê-se que as dispersões dos vários modos detectados devem ser usadas para inferir nas propriedades do cimento que não são invertíveis a partir da medição ultrassônica, assim como no estado da interface de cimento-formação (ver Figura 9 para um exemplo de um fluxo de trabalho para a inversão de dados de medição ultrassônica).

[0072] A Figura 15 é um fluxo de trabalho com foco na inversão baseada em dispersão sônica dispersão com parâmetros restritos obtidos a partir de inversão de dados ultrassônicos como representados nos fluxos de trabalho de inversões sônicas e ultrassônicas integradas mostrado nas Figs. 6 e 8. O algoritmo de inversão minimiza diferenças entre as dispersões de referência medidas e calculadas para diferentes valores de parâmetros de cimento de interesse, tais como, $Vp2$, $Vs2$, η_{N2} , η_{T2} , η_{N3} e η_{T3} . Uma dispersão de referência é obtida a partir de um conjunto prescrito de parâmetros de entrada estimados a partir das medições ultrassônicas e em maior escala para a análise de dados sônicos. Duas abordagens diferentes podem ser utilizadas para estimar os parâmetros de cimento a partir dos dados sônicos medidos: Em primeiro lugar, uma rotina de modo de busca de verificação de raiz rápida - pode gerar dispersões modais computadas como uma

função dos parâmetros de cimento relevantes. As diferenças entre as dispersões modais computadas e medidas são minimizadas variando um ou mais dos parâmetros relevantes de cimento. Os parâmetros de cimento estimados são aqueles que minimizam diferenças abaixo de um limiar entre as dispersões medidas e computadas acima de uma largura de banda escolhida. Em segundo lugar, as diferenças entre as dispersões de referência medidas e calculadas podem ser relacionadas com os parâmetros de cimento de interesse em termos de uma perturbação de volume integral como uma função da frequência para facilitar o processo de inversão. Em seguida, simplifica-se para resolver esta equação integral para os parâmetros de cimento de interesse.

[0073] A Figura 16 mostra um exemplo de resultados sônicos previstos correspondentes a uma excitação de dipolo dentro de uma configuração de coluna dupla. O revestimento interno e externo é excêntrico com respeito um ao outro e ambos são excêntricos com respeito ao furo de sondagem, tal como representado no esboço na parte superior da figura. Os sinais de matriz de receptor, calculados com um código de diferença finita, são mostrados na parte intermediária da figura, e comparados com o caso em que ambas as colunas estão centradas em relação uma à outra e ao furo. As curvas de dispersão de lentidão correspondentes são mostradas nos gráficos de dispersão mais baixas para ambos os casos excêntrico e centrado. O caso excêntrico mostra atributos adicionais que são utilizados para estimar a excentrização de revestimento. Verificamos que estes atributos são também sensíveis às propriedades do material que enche o espaço entre os dois revestimentos e o revestimento externo e a formação. Quando o cimento preenche esses espaços, também verificamos que eles são sensíveis às propriedades de ligação.

Inversão de dados de tempo decorrido

[0074] Quando os dados acústicos das medições de multimodalidade descritas acima são adquiridos em dois ou mais de dois casos durante a vida útil do poço, a inversão irá focar sobre as variações dos parâmetros de inversão.

[0075] A degradação do anel de cimento ao longo de alguns anos de uso pode ser manifestada em termos de mudanças nas propriedades elásticas do cimento ($\Delta Vp(\phi, z)$, $\Delta Vs(\phi, z)$, e $\rho(\phi, z)$). Por exemplo, a redução de tempo decorrido nas velocidades de compressão e de cisalhamento, em conjunto com a densidade de massa, pode ser utilizada como um indicador da integridade mecânica prejudicada do cimento causada pela introdução de fraturas e canais de fluido no anel de cimento por trás do revestimento.

[0076] No entanto, outra fonte de degradação pode ser atribuída a mudanças nas conformidades normal e tangencial na segunda ($\Delta \eta_{N2}(\phi, z)$ e $\Delta \eta_{T2}(\phi, z)$) ou terceira ($\Delta \eta_{N2}(\phi, z)$ e $\Delta \eta_{T2}(\phi, z)$) interfaces fora do revestimento que podem ser causadas pela presença de microanéis enchidos com fluidos ou secos. As propriedades do cimento, também podem ser expressas em termos de módulos de massa (K) e de cisalhamento (μ) que estão relacionados com as velocidades de onda de compressão e de cisalhamento, bem como a densidade de massa: $\rho Vp^2 = K + 4\mu/3$; e $\rho Vs^2 = \mu$. As estimativas de tempo decorrido das propriedades do cimento e indicadores de qualidade de ligação podem ajudar a estimar a taxa de degradação das propriedades elásticas do cimento. O conhecimento da taxa de decaimento de tais propriedades pode ajudar a prever a vida de cimento restante ou longevidade além do qual a qualidade do cimento seria tão degradada que isolamento zonal seria comprometido.

[0077] A Figura 17 mostra um fluxo de trabalho para a predição da longevidade da bainha de cimento para manter o isolamento zonal, monitorando mudanças de tempo decorrido nos

módulos de massa de cimento e de cisalhamento juntamente com conformidades normal e tangencial na segunda (revestimento/cimento) ou terceira (cimento/formação) interface, bem como a densidade de massa. O sobrescrito nos parâmetros indica o tempo de medição. Por exemplo, $\eta^{(1)}_{N2}$ indica a conformidade normal no tempo $t1$ na 2^a interface. Note que ambas as conformidades normais e tangenciais são zero na configuração ligada ao poço. A degradação do isolamento de zona pode ser monitorada por um aumento nas conformidades normais e tangenciais na segunda ou na terceira interface.

[0078] No fluxo de trabalho na Figura 17, uma aproximação linear é usada para prever a evolução das propriedades de cimento em conta das alterações estimadas nos parâmetros das duas medições efetuadas em $t1$ e $t2$. As relações não lineares menos aproximadas podem ser usadas especialmente se mais de duas medições de tempo decorrido são tomadas. A extrapolação fornece o tempo aproximado no futuro em que os parâmetros de cimento evoluem para atingir um nível abaixo de um limiar estimado *a priori* que resultaria no prejuízo da integridade da bainha e comprometeria o isolamento zonal.

[0079] A perfuração de poço consiste em várias etapas em que os furos de sondagem de diâmetros decrescentes são perfurados em sequência. À medida que uma seção profundidade específica é perfurada, ela é revestida e cimentada, antes do processo prosseguir com a perfuração das próximas seções mais profundas. Durante as fases de disparo da coluna de perfuração, as medições em toda a seção revestida e cimentada podem ser realizadas com ferramentas sônicas e ultrassônicas de perfuração durante a perfilagem na coluna de perfuração. A inversão de multimodalidade, tal como aqui descrita é usada para inverter para as propriedades de barreira por trás do

revestimento, tais como velocidades de onda e parâmetros de ligação das interfaces de revestimento - cimento e formação - cimento.

[0080] Os parâmetros invertidos podem ser plotados para monitorar sua evolução com o tempo.

[0081] A Figura 18 mostra plotagens que descrevem a evolução esperada destes parâmetros com o tempo. Em particular, espera-se que as propriedades se assentem em certo nível dentro de tempos especificados após o processo de cimentação. Estes níveis e suas durações associadas são parâmetros críticos que podem informar sobre a integridade do isolamento zonal de barreira alcançado, bem como ajudar a melhorar o projeto da formulação de barreira (cimento) e o processo para a próxima seção de poço a ser revestida e cimentada, bem como para os futuros poços. A Figura 19 mostra um fluxo de trabalho que transmite as etapas relacionadas com este método. Note que nas Figuras 18 e 19, os parâmetros de ligação sem subscrito devem ser entendidos como se referindo às interfaces de revestimento - cimento e cimento - formação.

[0082] Algumas modalidades podem se beneficiar da caracterização de uma barreira instalada em um furo de sondagem que atravessa a formação, incluindo localizar uma ferramenta acústica com um receptor e um transmissor em uma localização no furo de sondagem, ativar a ferramenta acústica para formar formas de onda acústicas, em que o receptor registra as ondas acústicas, e processar as formas de onda para se obter e identificar parâmetros de barreira como uma função da profundidade e de azimute ao longo do furo de sondagem, em que as formas de onda compreendem, pelo menos, dois dentre sinais sônicos, sinais de pulso-eco ultrassônicos e sinais de pitch-catch ultrassônicos. Em algumas modalidades, os parâmetros de barreira são velocidades de onda de barreira, conformidades de ligação em uma interface

de revestimento - barreira e de barreira - formação, indicações de anormalidades da barreira, e combinações dos mesmos. Em algumas modalidades, o tratamento compreende redimensionar os parâmetros de barreira obtidos com o processamento de dados ultrassônicos para um comprimento espacial sônico. Em algumas modalidades, os parâmetros de barreira são usados para identificar regiões ao longo do furo de sondagem para serviços de poço adicionais. Em algumas modalidades, a localização e ativação ocorrem durante a perfuração. Algumas modalidades podem se beneficiar da repetição da localização, ativação e processamento para determinar as alterações de barreira ao longo do tempo.

[0083] Algumas modalidades podem se beneficiar da caracterização de uma barreira instalada em um furo de sondagem que atravessa a formação, incluindo localizar uma ferramenta acústica de um teor de alta frequência na faixa de 80 kHz e superior com um receptor e um transmissor em uma localização no furo de sondagem, ativar a ferramenta acústica para formar formas de onda acústicas, em que o receptor registra as ondas acústicas e em que as formas de onda compreendem sinais de pulso-eco e sinais de pitch-catch e processar as formas de onda para obter parâmetros de barreira iniciais como uma função do azimute e da profundidade ao longo do poço. Em algumas modalidades, os parâmetros de barreira são compostos de velocidades de onda de barreira, conformidades de ligação em uma interface de revestimento - barreira e de barreira - formação e indicações de anormalidades da barreira e combinações dos mesmos. Algumas modalidades podem se beneficiar da comparação de parâmetros de cimento iniciais usando um simulador de medição e atualizando os parâmetros de cimento iniciais. Em algumas modalidades, o processamento compreende a inversão da forma de onda completa ou a inversão baseada em atributos ou

baseada em ambos. Em algumas modalidades, o simulador de medição comprehende os parâmetros de revestimento, parâmetros de lama, a geometria do poço e parâmetros da ferramenta.

[0084] Algumas modalidades se beneficiam da caracterização de múltiplas barreiras em múltiplas colunas de revestimento instaladas em um furo de sondagem que atravessa a formação, incluindo localizar uma ferramenta sônica em uma localização no furo de sondagem, ativar a ferramenta sônica para gerar formas de onda, registar as formas de onda, em uma matriz de receptores, processar essas formas de onda para obter dispersões associadas com os modos de propagação e frequências ressonantes sônicas medidas associadas aos modos de não propagação, calcular as dispersões de referência e as frequências ressonantes, calcular as diferenças entre as dispersões medidas e de referência, comparar as dispersões medidas e de referência, atualizar os parâmetros de cimento não invertidos a partir dos dados ultrassônicos e repetir a comparação, e caracterizar a integridade mecânica das barreiras nas colunas de múltiplos revestimentos. Em algumas modalidades, a ferramenta sônica comprehende um transmissor de monopolo, transmissor de dipolo, transmissor de quadripolo ou uma combinação dos mesmos. Em algumas modalidades, a ferramenta sônica gera formas de onda que são de monopolo, de dipolo, de quadripolo ou uma combinação dos mesmos. Em algumas modalidades, o cálculo comprehende múltiplas colunas de revestimento com múltiplas barreiras usando parâmetros de barreira de cimento e a qualidade de ligação estimada a partir dos dados ultrassônicos em conjunto com os parâmetros de entrada para a geometria do furo e propriedades de lama. Em algumas modalidades, os parâmetros de cimento não invertidos a partir dos dados ultrassônicos comprehendem $Vp2$, $Vs2$, $\eta N2$, $\eta T2$, $\eta N3$, $\eta T3$ e combinações dos mesmos. Algumas modalidades se beneficiam da produção de um conjunto completo

de parâmetros de cimento que compreendem $Vp1$, $Vs1$, $\eta N2$, $\eta T2$, $\eta N3$, $\eta T3$, $VP2$, $Vs2$, e combinações dos mesmos.

[0085] Algumas modalidades se beneficiam da monitoração das alterações em uma barreira instalada em um poço que atravessa uma formação incluindo medir os dados para calcular as propriedades elásticas do cimento e as propriedades de ligação interfacial em um momento inicial e em momento posterior, comparar as propriedades elásticas e as propriedades de ligação interfacial obtidas na fase inicial e tempos posteriores, calcular diferenças nestas propriedades elásticas e de ligação em vários momentos, calcular a taxa de decaimento dependente do tempo das propriedades elásticas e de ligação, calcular o tempo adicional necessário para as propriedades elásticas e de ligação para degradar abaixo de um limite aceitável resultando em prejuízo da integridade da bainha que comprometeria o isolamento zonal.

[0086] Algumas modalidades podem se beneficiar da monitoração da força de uma barreira instalada em um furo de sondagem que atravessa a formação, incluindo coletar os dados sônicos e ultrassônicos através de seções revestidas na perfuração durante a perfilagem, calcular e plotar as propriedades elásticas do cimento e as propriedades de ligação interfaciais em um momento inicial e várias momentos subsequentes, calcular as velocidades de cisalhamento ou de compressão, as conformidades normal e tangencial em momentos diferentes, estimar os tempos tP e tS para as velocidades de onda VP e VS para atingir valores de estado estacionário próximos, estimar tempos tN e tT para as conformidades normal e tangencial ηN e ηT para atingir valores de estado estacionário próximos, determinar o tempo necessário para fornecer a força de barreira necessária para uma completação bem-sucedida do poço com força barreira adequada para o isolamento zonal, e aplicar as lições aprendidas para

projetar as formulações de cimento melhoradas e realizar melhores empregos de cimento para garantir o isolamento zonal durável, eficiente e rentável nos poços futuros.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para caracterizar uma barreira física compreendendo uma pluralidade de revestimentos e uma pluralidade de preenchimentos anulares instaladas em um furo de sondagem que atravessa uma formação, o método **caracterizado** por compreender:

localizar uma ferramenta acústica com pelo menos um receptor e pelo menos um transmissor em uma localização no furo de sondagem, em que a ferramenta acústica é configurada para realizar pelo menos duas das (i) medições sônicas, (ii) medições ultrassônicas de pulso-eco e (iii) medições ultrassônicas de pitch-catch (emissão-captura) da barreira física;

usar pelo menos um transmissor da ferramenta acústica, gerando pelo menos dois tipos de formas de onda acústica que interagem com a pluralidade de revestimentos e a pluralidade de preenchimentos anulares da barreira física, em que pelo menos os dois tipos de formas de onda acústica compreendem pelo menos dois de (i) formas de onda sônicas, (ii) formas de onda ultrassônicas de pulso-eco, em que o pelo menos um transmissor é orientado normal à barreira física e (iii) formas de onda ultrassônicas de pitch-catch (emissão-captura), em que pelo menos um transmissor é orientado em um ou mais ângulos para excitar pelo menos um modo dentro da barreira física;

usar pelo menos um receptor da ferramenta acústica, registrar as formas de onda resultantes que resultam da interação de pelo menos dois tipos de formas de onda acústicas com a pluralidade de revestimentos e a pluralidade de preenchimentos anulares da barreira física para obter pelo menos dois tipos de dados de forma de onda acústica, em que pelo menos os dois tipos de dados de forma de onda acústica compreendem pelo menos dois dentre (i) dados de formas de

onda sônicas, (ii) dados de formas de onda ultrassônicas de pulso-eco e (iii) dados de formas de onda ultrassônicas de pitch-catch; e

processar pelo menos os dois tipos de medições de dados de forma de onda acústica usando uma inversão para determinar os parâmetros de barreira como uma função do azimute e da profundidade ao longo do furo de sondagem.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que o preenchimento anular compreende cimento.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado** pelo fato de que a barreira compreende as superfícies entre a formação e o cimento.

4. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que os parâmetros de barreira compreendem pelo menos um de (i) velocidades de onda de barreira, (ii) conformidade de ligação em uma interface de revestimento - cimento, (iii) conformidade de ligação em uma interface de cimento - formação, (iv) indicações de anormalidades da barreira e (v) combinações dos mesmos.

5. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que o processamento compreende expandir os parâmetros de barreira obtidos com o processamento de dados ultrassônicos para um comprimento espacial sônico.

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que pelo menos um receptor compreende múltiplos receptores.

7. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que pelo menos o transmissor compreende múltiplos transmissores.

8. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que os parâmetros de barreira são

usados para identificar regiões ao longo do furo de sondagem para fazer serviços de poço adicionais.

9. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que a localização, a ativação e o registro ocorrem durante uma operação de perfuração de furo de sondagem.

10. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** por compreender ainda repetir a localização, a ativação, o registro e o processamento para determinar alterações da barreira ao longo do tempo.

11. Método para caracterizar uma barreira física compreendendo uma pluralidade de revestimentos e pelo menos um preenchimento anular instalado em um furo de sondagem que atravessa a formação, o método **caracterizado** por compreender:

localizar uma ferramenta acústica compreendendo pelo menos um transmissor e pelo menos um receptor em um local no furo de sondagem, em que a ferramenta acústica é configurada para realizar medições de pulso-eco e medições de pitch-catch da barreira física;

usar pelo menos um transmissor da ferramenta acústica, gerando (i) formas de onda de pulso-eco que interagem com a barreira física e que têm uma frequência de pelo menos 80 kHz, em que pelo menos um transmissor é orientado normal para a barreira física e (ii) formas de onda pitch-catch que interagem com a barreira e que têm uma frequência de pelo menos 80 kHz, em que pelo menos um transmissor é orientado em um ou mais ângulos para excitar pelo menos um modo dentro da barreira física;

usar pelo menos um receptor, registrando formas de onda de pulso-eco resultantes que resultam da interação das formas de onda de pulso-eco com a barreira física e formas de onda de pitch-catch resultantes que resultam da interação das formas de onda de pitch-catch com a barreira física para

obter dados de forma de onda de pulso-eco e dados de forma de onda de pitch-catch; e

processar os dados de forma de onda de pulso-eco e os dados de forma de onda de pitch-catch usando uma inversão para obter os parâmetros de barreira iniciais em função do azimute e da profundidade ao longo do furo de sondagem .

12. Método, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado** pelo fato de que os parâmetros de barreira compreendem pelo menos um de (i) velocidades de onda de barreira, (ii) conformidade de ligação em uma interface de revestimento - cimento, (iii) conformidade de ligação em uma interface de cimento - formação, (iv) indicações de anormalidades da barreira, e (v) combinações dos mesmos.

13. Método, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado** pelo fato de que o processamento compreende ainda:

processar os dados de forma de onda de pulso-eco e dados de forma de onda de pitch-catch usando a inversão para obter parâmetros de barreira iniciais;

gerar uma forma de onda de referência usando um simulador de medição e os parâmetros de barreira iniciais;

comparar pelo menos um dos dois tipos de formas de onda e a forma de onda gerada; e

atualizar os parâmetros de barreira iniciais com base na comparação.

14. Método, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado** pelo fato de que a inversão compreende inversão da forma de onda completa, inversão baseada em atributos ou ambas.

15. Método, de acordo com a reivindicação 13, **caracterizado** pelo fato de que o simulador de medição usa parâmetros de revestimento, parâmetros de lama, geometria do poço e parâmetros da ferramenta para gerar a forma de onda

gerada.

16. Método para caracterizar uma barreira física compreendendo múltiplos revestimentos e múltiplos preenchimentos anulares instalados em um furo de sondagem que atravessa uma formação, o método **caracterizado** por compreender:

localizar uma ferramenta sônica em uma localização no furo de sondagem, em que a ferramenta sônica compreende um transmissor e uma matriz de receptores;

usar o transmissor da ferramenta sônica, gerar formas de onda sônicas que interagem com a barreira física;

usar a matriz de receptores, registrar formas de onda resultantes que resultam da interação das formas de onda sônicas e da barreira física para obter dados de forma de onda sônica;

processar os dados de forma de onda sônica para obter dispersões medidas;

calcular dispersões de referência usando parâmetros de barreira obtidos a partir da inversão de dados ultrassônicos obtidos de medições ultrassônicas da barreira;

comparar as dispersões medidas e as dispersões de referência;

atualizar os parâmetros de barreira que não foram obtidos da inversão de dados ultrassônicos obtidos de medições ultrassônicas da barreira física;

repetir o cálculo, comparar e atualizar para minimizar as diferenças entre as dispersões medidas e as dispersões de referência; e

caracterizar a integridade mecânica da barreira física utilizando os parâmetros da barreira.

17. Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que o transmissor da ferramenta sônica compreende um transmissor de monopolo, transmissor de

dipolo, transmissor de quadripolo, ou uma combinação dos mesmos.

18. Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que o transmissor da ferramenta sônica gera formas de onda que são monopolo, dipolo, quadripolo, ou uma combinação das mesmas.

19. Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que calcular as dispersões de referência compreende calcular dispersões de referência para uma barreira que inclui múltiplos revestimentos e múltiplos preenchimentos anulares usando (i) parâmetros de revestimento, (ii) parâmetros de lama, (iii) geometria do furo, (iv) parâmetros de cimento obtidos da inversão de dados ultrassônicos obtidos a partir de medições ultrassônicas da barreira e (v) parâmetros de ligação obtidos a partir da inversão de dados ultrassônicos obtidos a partir de medições ultrassônicas da barreira.

20. Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que os parâmetros de barreira que não foram obtidos a partir da inversão de dados ultrassônicos obtidos a partir de medições ultrassônicas da barreira compreendem pelo menos um dentre velocidade de onda de compressão em uma interface de revestimento-cimento (V_{p2}), velocidade de onda de cisalhamento em uma interface de revestimento-cimento (V_{s2}), complacência normal em uma interface de revestimento-cimento (η_{N2}), complacência tangencial em uma interface de revestimento-cimento (η_{T2}), complacência normal em uma interface de formação de cimento (η_{N3}), complacência tangencial em uma interface de cimento-formação (η_{T3}), e suas combinações.

21. Método, de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado** pelo fato de que a caracterização compreende emitir parâmetros de barreira compreendendo velocidade de

onda de cimento compressional obtida da inversão de dados ultrassônicos (V_{p1}), velocidade de onda de cimento de cisalhamento obtida de inversão de dados ultrassônicos (V_{s1}), velocidade de onda compressional em uma interface revestimento-cimento (V_{p2}), velocidade de onda de cisalhamento em uma interface de cimento de revestimento (V_{s2}), complacência normal em uma interface de cimento-revestimento (η_{N2}), complacência tangencial em uma interface de cimento-revestimento (η_{T2}), complacência normal em uma interface de formação de cimento (η_{N3}), complacência tangencial em uma interface de cimento-formação (η_{T3}) e combinações dos mesmos.

22. Método para monitorar alterações em uma barreira física, em que a barreira física compreende uma pluralidade de revestimentos e pelo menos um preenchimento anular com cimento instalados em um furo de sondagem que atravessa a formação, o método **caracterizado** por compreender:

realizar medições acústicas na barreira física gerando formas de ondas acústicas usando um transmissor acústico que interage com a barreira física e registrando as formas de ondas acústicas resultantes que resultam da interação das formas de ondas acústicas com a barreira física usando um receptor acústico para obter dados acústicos em um tempo inicial e um tempo subsequente, em que as formas de onda acústicas geradas pelo transmissor acústico incluem uma ou mais das formas de onda de pulso-eco ultrassônico e formas de onda de pitch-catch ultrassônicas, em que o transmissor ultrassônico é orientado em um ângulo para excitar pelo menos um modo dentro do barreira física ao gerar formas de onda ultrassônicas de pitch-catch e é orientada normal para a barreira física ao gerar formas de onda ultrassônicas de pulso-eco;

calcular as propriedades elásticas do cimento e as

propriedades de ligação interfacial no momento inicial e no momento subsequente;

comparar as propriedades elásticas e propriedades de ligação interfacial obtidas no momento inicial e no momento subsequente;

calcular as diferenças nas propriedades elásticas e propriedades de ligação interfacial obtidas no momento inicial e no momento subsequente;

calcular a taxa dependente do tempo de degradação das propriedades elásticas e de ligação usando as diferenças; e

calcular o tempo para as propriedades elásticas e de ligação degradarem abaixo de um limite aceitável, resultando em integridade da bainha de barreira prejudicada que comprometeria o isolamento zonal.

23. Método para monitorar a força de uma barreira física instalada em um furo de sondagem que atravessa uma formação, o método **caracterizado** por compreender:

realizar uma operação de perfuração e realizar medições sônicas e ultrassônicas na barreira física em uma pluralidade de tempos de medição enquanto a operação de perfuração é realizada gerando, com um transmissor sônico e um transmissor ultrassônico, sônico e uma ou mais das formas de onda de pulso-eco ultrassônico e formas de onda de pitch-catch ultrassônicas que interagem respectivamente com a barreira física, e registrando, usando pelo menos um receptor sônico e pelo menos um receptor ultrassônico, as formas de onda sônicas e ultrassônicas resultantes que resultam respectivamente da interação das formas de onda sônicas e ultrassônicas com a barreira física, para obter dados sônicos e ultrassônicos, em que o transmissor ultrassônico é orientado em um ângulo para excitar pelo menos um modo dentro da barreira física ao gerar formas de onda de pitch-catch ultrassônicas e é orientado normal para a barreira física ao

gerar formas de onda pulso-eco ultrassônicas;

calcular uma pluralidade de propriedades de barreira como uma função do tempo de medição usando os dados sônicos e ultrassônicos;

estimar os tempos para a pluralidade de propriedades de barreira para atingir valores quase estáveis; e

determinar o tempo necessário para fornecer resistência de barreira necessária para uma conclusão bem-sucedida do furo de sondagem com resistência de barreira adequada para isolamento zonal usando os tempos para a pluralidade de propriedades de barreira para atingir valores quase de estado estacionário.

24. Método, de acordo com a reivindicação 23, **caracterizado** pelo fato de que a pluralidade de propriedades de barreira compreende pelo menos uma dentre (i) velocidade de onda de compressão da barreira como uma função do tempo de medição, (ii) velocidade de onda de cisalhamento da barreira como uma função do tempo de medição, (iii) conformidade normal da barreira como uma função do tempo de medição e (iv) conformidade tangencial da barreira como função do tempo.

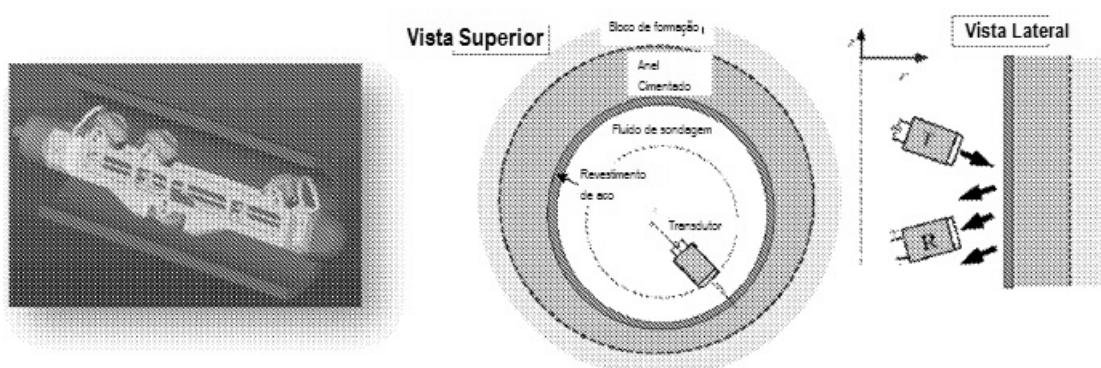


Figura 1

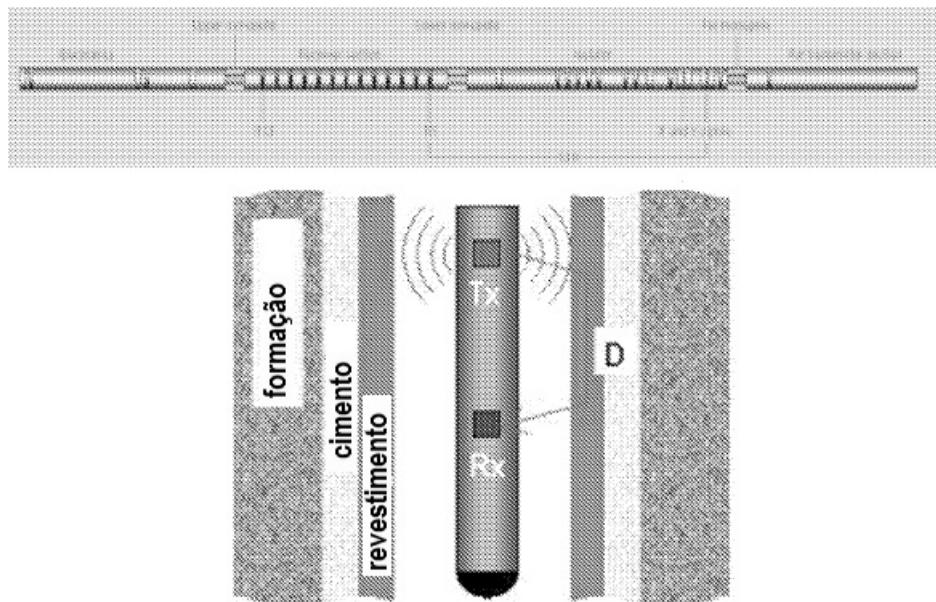


Figura 2

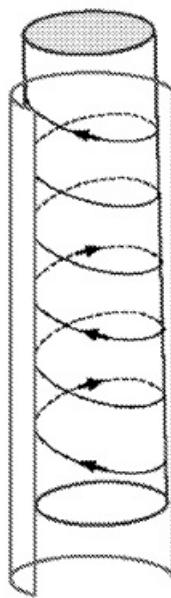


Figura 3

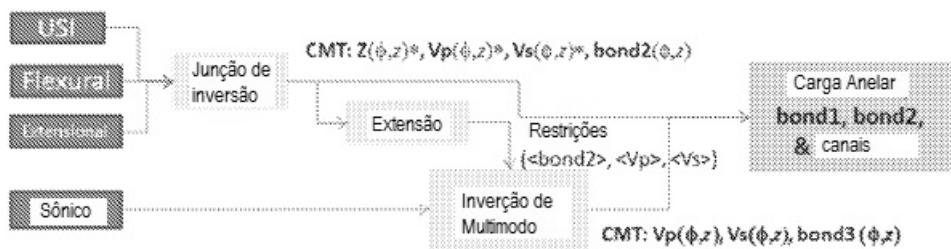


Figura 4

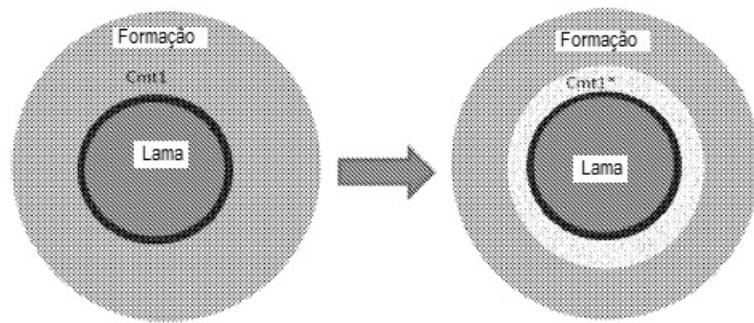


Figura 5

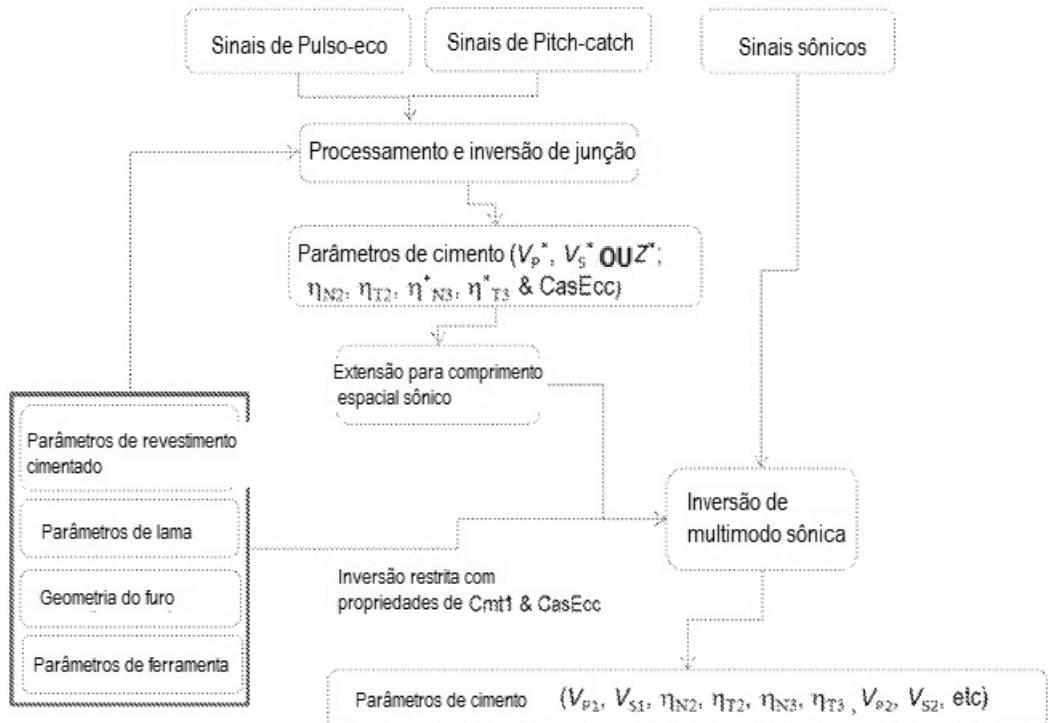


Figura 6

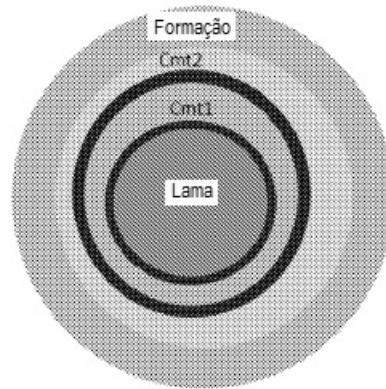


Figura 7

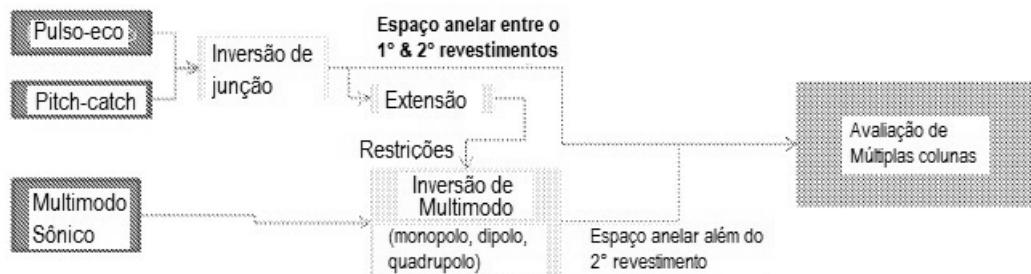


Figura 8

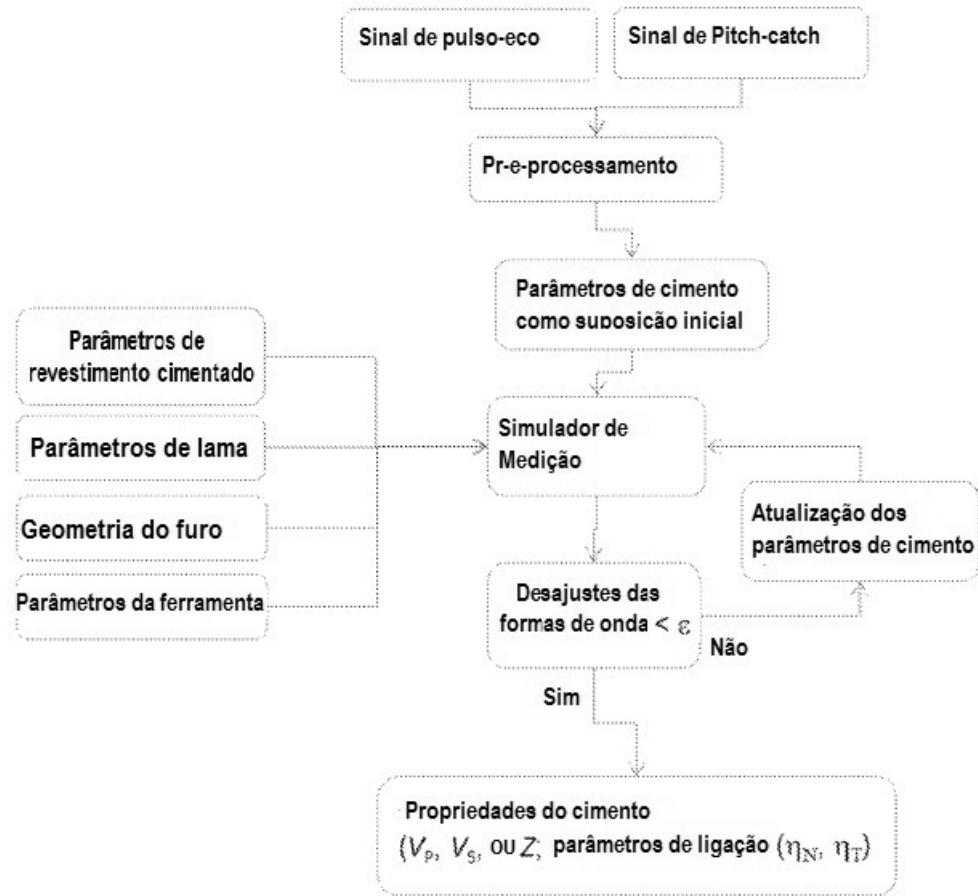


Figura 9

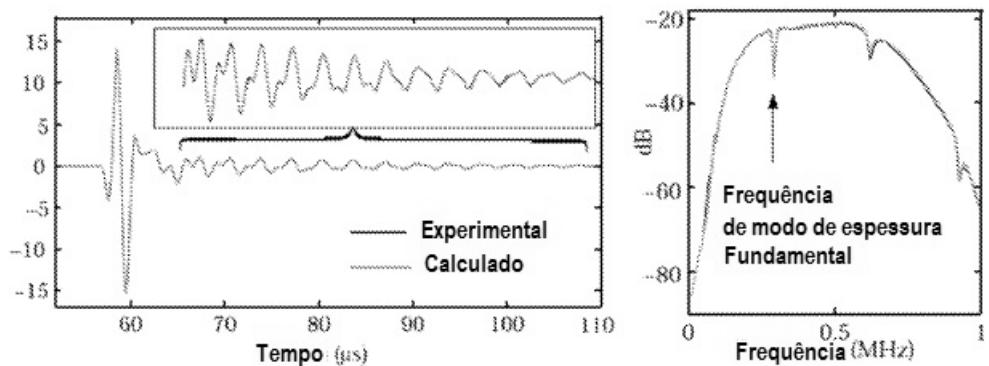


Figura 10

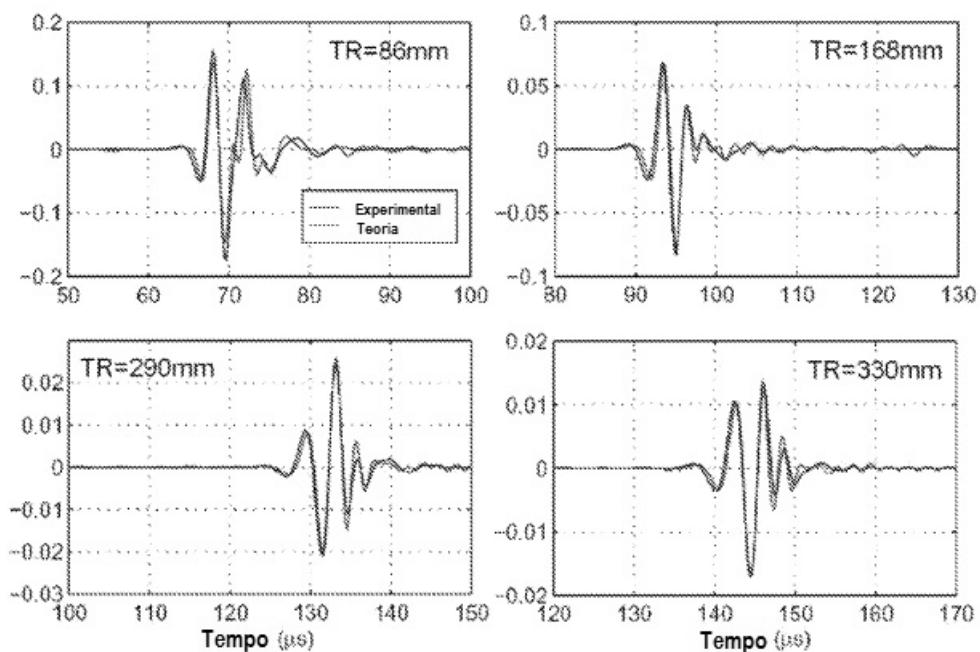


Figura 11

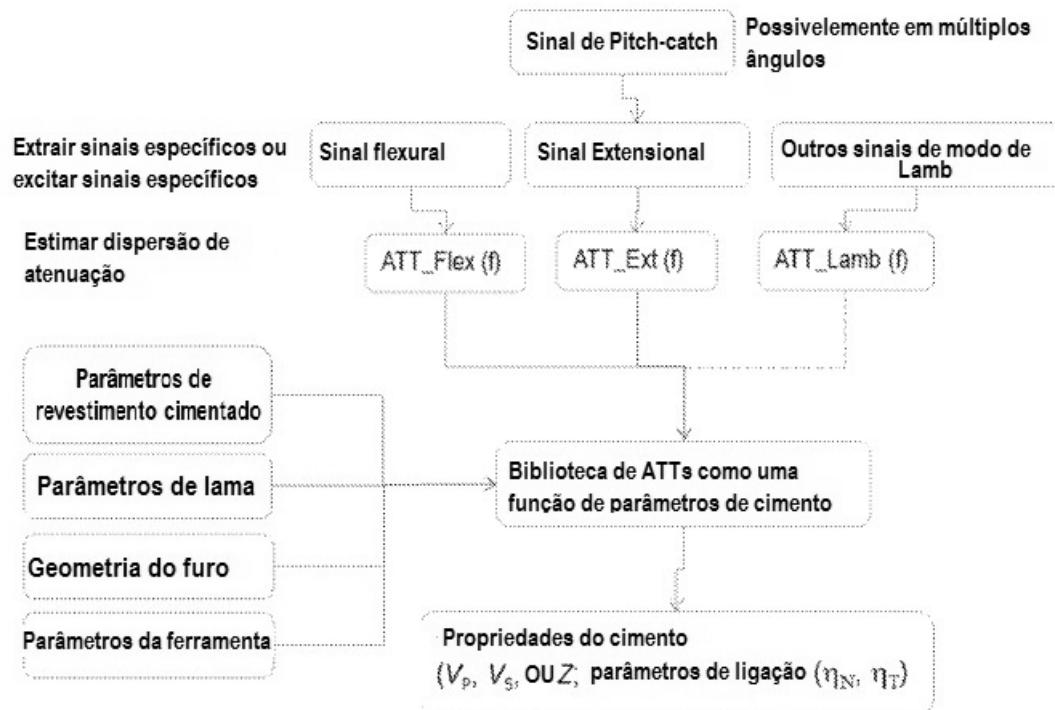


Figura 12

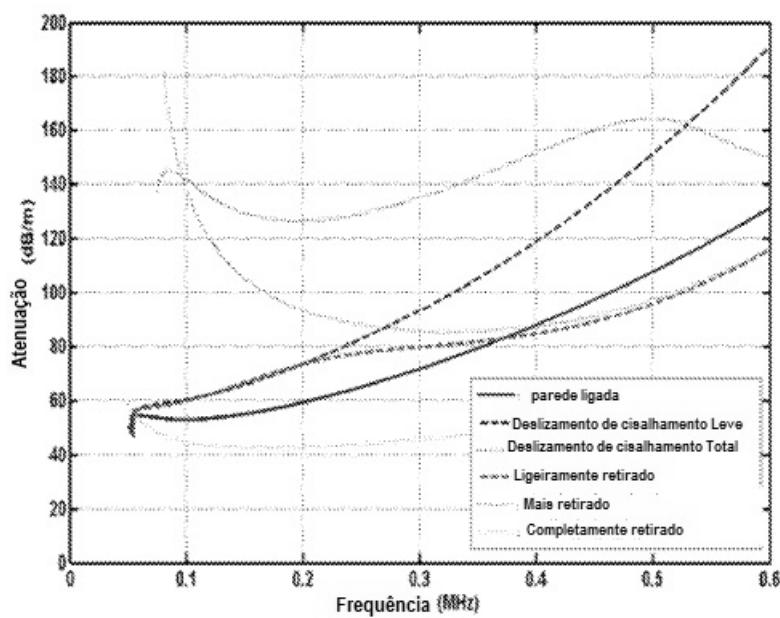


Figura 13

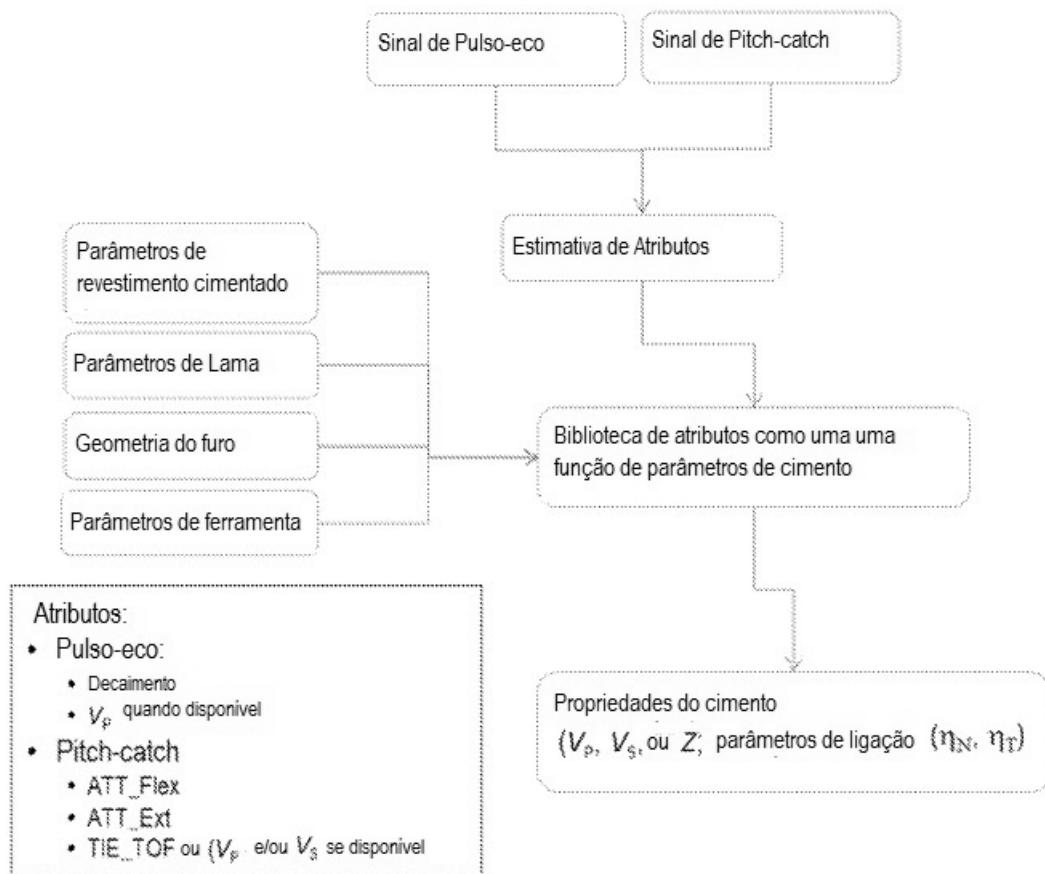


Figura 14

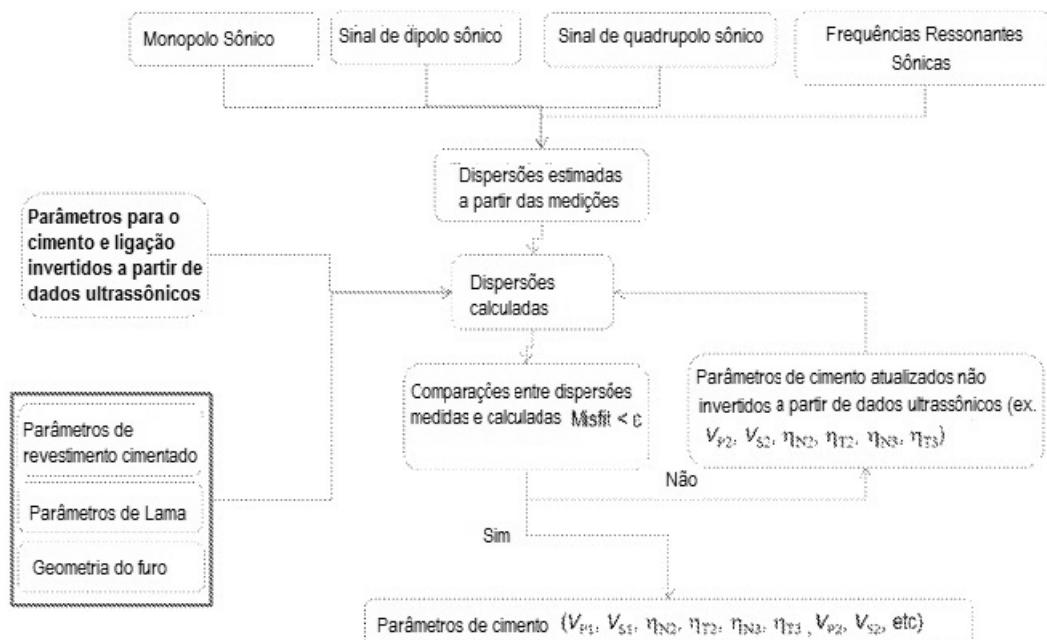
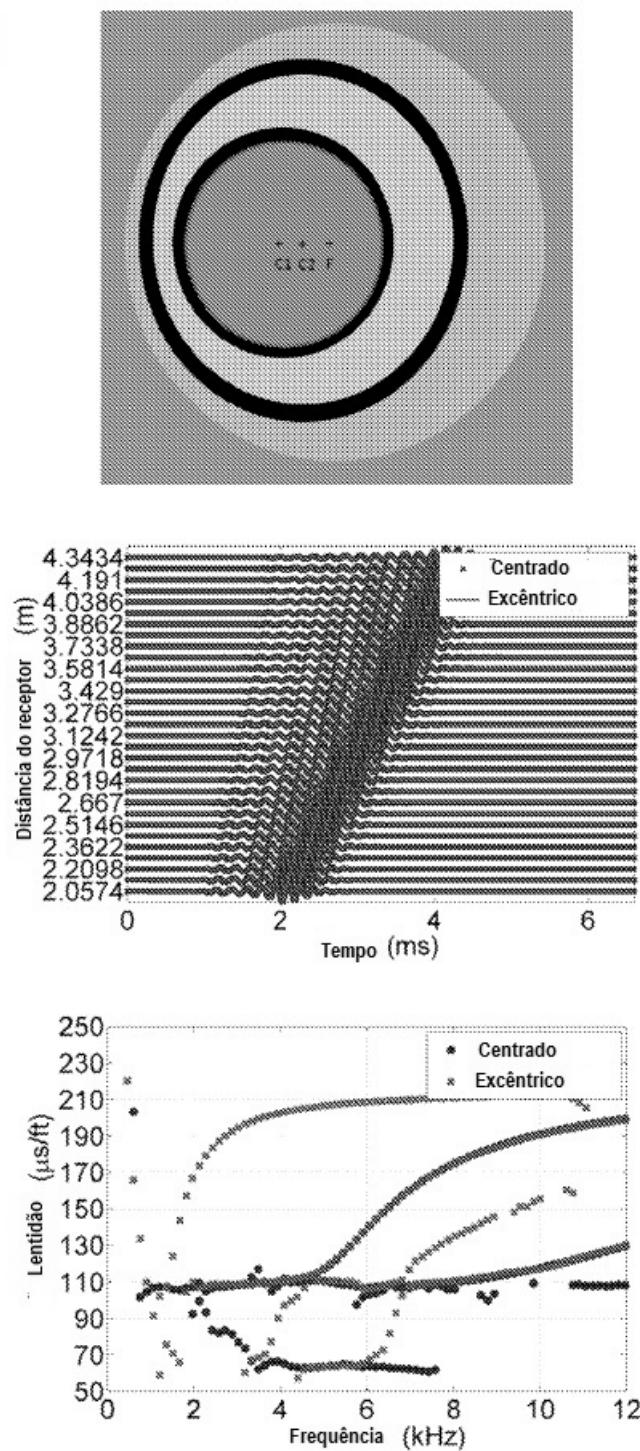


Figura 15

Figura 16

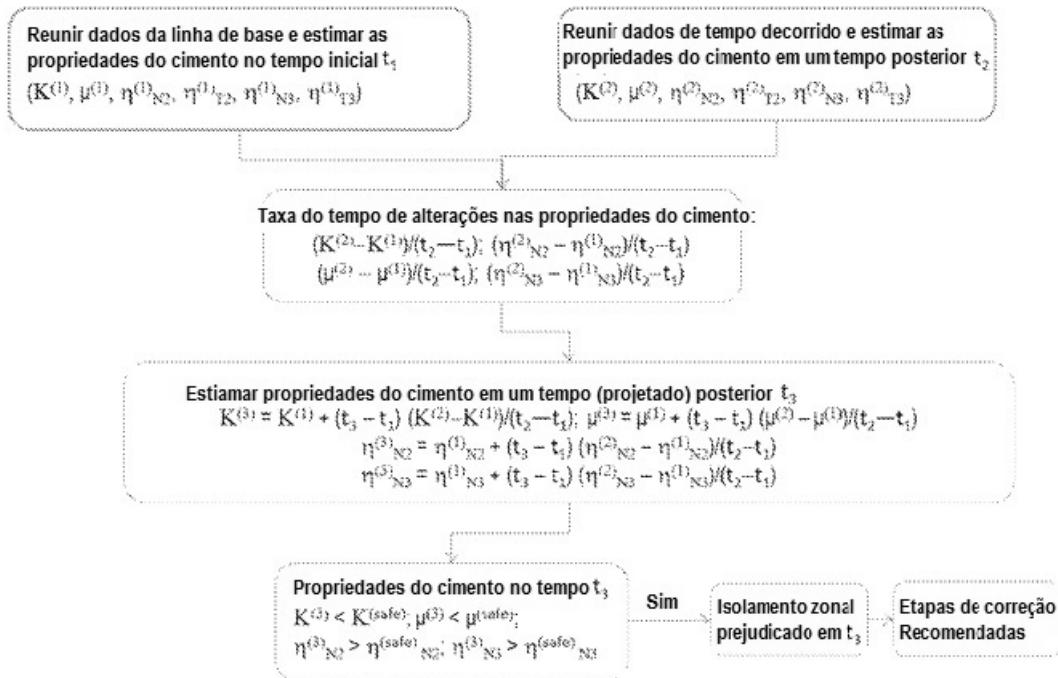


Figura 17

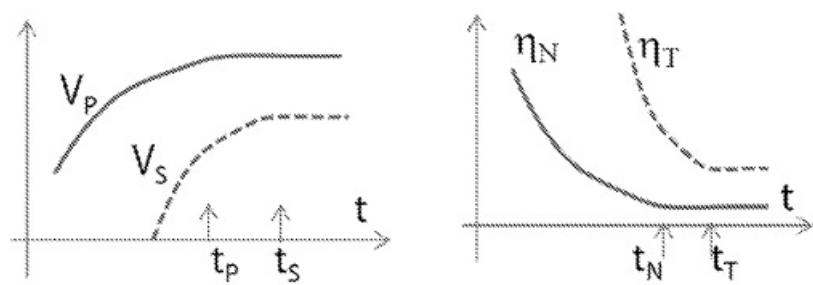


Figura 18

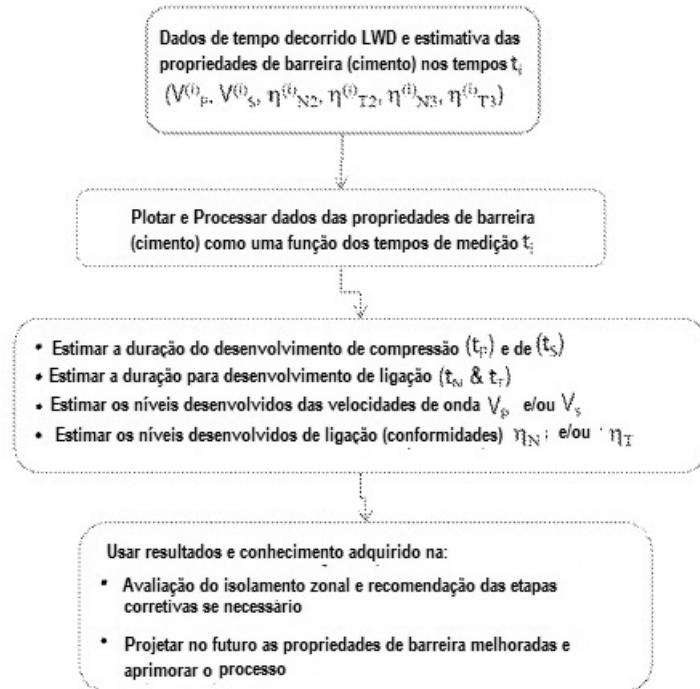


Figura 19