



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

(11) BR 112016016503-9 B1



(22) Data do Depósito: 15/12/2014

(45) Data de Concessão: 15/03/2022

(54) Título: MÉTODO PARA CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FÍSICO DE UMA BARREIRA INSTALADA EM UM FURO PERFURADO QUE ATRAVESSA A FORMAÇÃO

(51) Int.Cl.: E21B 47/00; G01V 1/40; G01V 1/48.

(30) Prioridade Unionista: 16/01/2014 US 14/157,359.

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

(72) Inventor(es): SMAINE ZEROUG; JIAQI YANG; SANDIP BOSE.

(86) Pedido PCT: PCT US2014070249 de 15/12/2014

(87) Publicação PCT: WO 2015/108638 de 23/07/2015

(85) Data do Início da Fase Nacional: 15/07/2016

(57) Resumo: MÉTODO PARA CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FÍSICO DE UMA BARREIRA INSTALADA EM UM FURO PERFURADO QUE ATRAVESSA A FORMAÇÃO. Aparelhos e métodos para caracterização do estado físico de uma barreira instalada em um furo de poço que atravessa uma formação incluindo a localização de uma ferramenta ultrassônica com uma pluralidade de receptores espaçados e um transmissor em uma localização no furo de poço, ativação da ferramenta ultrassônica para formar velocidades de onda ultrassônicas, em que os receptores espaçados registram as velocidades de onda ultrassônicas, alinhando o transmissor e os receptores espaçados, em que as velocidades de onda ultrassônicas compreendem modos de Lamb propagados, processando as configurações de onda ultrassônicas para obter uma primeira representação gráfica de atenuação de dispersão de amplitude como uma função da frequência e uma primeira representação gráfica de dispersão de fase de velocidade de fase como uma função da frequência, processando as dispersões de atenuação para identificar descontinuidades e relacionando estas descontinuidades a velocidades de onda de barreira.

MÉTODO PARA CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FÍSICO DE UMA BARREIRA INSTALADA EM UM FURO PERFURADO QUE ATRAVESSA A FORMAÇÃO

CAMPO DA DIVULGAÇÃO

[0001] Modalidades desta invenção dizem respeito à utilização de dispersões de frequência de amplitude de sinal ultrassônico para quantificar propriedades do cimento.

FUNDAMENTOS

[0002] A avaliação acústica da integridade do cimento do poço é importante para determinar se o cimento ou um material de vedação equivalente foi colocado no espaço anular entre o compartimento e a formação e se proporciona isolamento zonal hidráulico entre os estratos da formação atravessados pelo poço perfurado. Falha no isolamento zonal pode levar a consequências significativas sobre o meio ambiente, bem como sobre a viabilidade econômica da produção do poço.

SUMÁRIO

[0003] Modalidades neste documento se relacionam a aparelhos e métodos para caracterização do estado físico de uma barreira instalada em um furo de poço que atravessa uma formação incluindo a localização de uma ferramenta ultrassônica com uma pluralidade de receptores espaçados e um transmissor em uma localização no furo de poço, ativação da ferramenta ultrassônica para formar velocidades de onda ultrassônicas, em que os receptores espaçados registram as velocidades de onda ultrassônicas, alinhando o transmissor e os receptores espaçados, em que as velocidades de onda ultrassônicas compreendem modos de Lamb propagados, processando as configurações de onda ultrassônicas para obter uma primeira representação gráfica de atenuação de dispersão de amplitude

como uma função da frequência e uma primeira representação gráfica de dispersão de fase de velocidade de fase como uma função da frequência, processando as dispersões de atenuação para identificar descontinuidades e relacionando estas descontinuidades a velocidades de onda de barreira.

BREVE DESCRIÇÃO DAS FIGURAS

[0004] A Figura 1 é uma vista esquemática em corte de um poço de exploração revestido que atravessa uma formação com tubo de revestimento (casing) e cimento, com perfilagem realizada por uma ferramenta de avaliação de cimento ultrassônica Schlumberger.

[0005] A Figura 2 é uma representação gráfica da atenuação de amplitude de sinal como uma função da frequência para o modo flexural.

[0006] A Figura 3 é uma representação gráfica da atenuação de amplitude de sinal como uma função da frequência para o modo extensional.

[0007] A Figura 4 é uma representação gráfica da velocidade de fase como uma função da frequência para os modos extensional e flexural para uma chapa de aço de espessura 3/8 polegadas na água.

[0008] A Figura 5 é uma representação gráfica da velocidade de fase como uma função da frequência com a delimitação de regiões de propagação e não propagação de ondas volumétricas no espaço anular.

[0009] A Figura 6 é uma representação gráfica da velocidade de fase como uma função da frequência com a delimitação das faixas de frequência de propagação e não propagação (ou evanescência) para valores assumidos de velocidade de onda no espaço anular.

[00010] A Figura 7 é uma representação gráfica da atenuação de amplitude de sinal como uma função da frequência (esquerda) e uma representação gráfica da velocidade de fase (direita) para os modos flexural e extensional.

[00011] A Figura 8 é uma representação gráfica de sinais calculados como uma função do tempo e espaçamento do transmissor-receptor.

[00012] A Figura 9 é uma série de representações gráficas de velocidade (parte superior) e de atenuação (parte inferior) como uma função da frequência.

[00013] A Figura 10 é uma série de representações gráficas de velocidade (em cima) e de atenuação (inferior) como uma função da frequência.

[00014] A Figura 11 é uma vista esquemática de um aparelho para transmissão e recepção de um sinal acústico em uma chapa sólida suportada por um fluido ou outro sólido.

[00015] A Figura 12 é uma representação gráfica de sinais adquiridos experimentalmente como uma função do tempo e do transmissor-receptor em mm.

[00016] A Figura 13 é uma representação gráfica de sinais adquiridos experimentalmente como uma função do tempo e o transmissor-receptor em mm.

[00017] A Figura 14 é uma série de representações gráficas de velocidade (parte superior) e de atenuação (parte inferior) como uma função da frequência.

[00018] A Figura 15 é uma série de representações gráficas de velocidade (parte superior) e de atenuação (parte inferior) como uma função da frequência.

[00019] A Figura 16 é uma série de representações gráficas de velocidade (parte superior) e de atenuação (parte inferior) como uma função da frequência.

[00020] A Figura 17 é um fluxograma de uma das modalidades dos métodos descritos neste documento.

[00021] A Figura 18 é um fluxograma de uma das modalidades dos métodos descritos neste documento.

[00022] A Figura 19 é uma representação gráfica da razão de amplitudes espectrais do sinal como uma função da frequência.

[00023] A Figura 20 é um fluxograma de uma das modalidades dos métodos descritos neste documento.

[00024] A Figura 21 é uma série de representações gráficas de propriedades de barreira como uma função de profundidade subterrânea, azimute e frequência.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[00025] O fornecimento de uma barreira eficaz em um furo revestido que atravessa uma formação subterrânea, muitas vezes referida como isolamento zonal, requer uma combinação sofisticada de projetos de perfuração e completação, seleção de materiais e colocação, e implementação prática como ilustrado na Figura 1. A Figura 1 proporciona uma vista em corte de um poço de exploração 101 que contém uma ferramenta acústica 102 que é utilizada para avaliar o espaço anular cimentado 108 entre o tubo de revestimento 105 e a formação 110. O poço de exploração 101 é englobado pelo tubo de revestimento 105. O tubo de revestimento 105 divide uma superfície de revestimento de poço 106 com o poço de exploração 101 e uma superfície de revestimento de cimento 107 com o cimento 108. Da mesma forma, o cimento 108 divide uma superfície de cimento da formação 109 (por vezes referido como

espaço anular) com a formação 110. Estes componentes trabalham em conjunto de modo a formar uma barreira 111 entre o poço perfurado 101 e a formação 110.

[00026] O cimento 108 e as superfícies 107 e 109 entre o tubo de revestimento e o cimento e a formação podem ser contínuas e homogêneas, mostrando materiais em contato total um com o outro, formando uma vedação contínua entre estes materiais. Delaminação, descolagem, incursão de fluidos, cimento mal curado, reações químicas e erosão em combinação com outros fatores podem produzir superfícies que não estão completamente em contato umas com as outras e/ou cimento com fracas propriedades de vedação. Isto é, o exterior do cimento na superfície 107 pode ou não se unir com o exterior do tubo de revestimento na superfície 107; de forma semelhante, o exterior do cimento na superfície 109 pode não confinar totalmente a superfície externa da formação na superfície 109. Estas inconsistências de ligação à superfície podem permitir fluxo de fluido indesejável e falha de barreira como resultado. Do mesmo modo, o cimento 108 pode não ser contínuo e/ou suficientemente forte para impedir o fluxo de fluido indesejável dentro dele, resultando, por conseguinte, em insuficiência de barreira. A Figura 1 tem apenas um conjunto de tubos de revestimento e cimento. Em algumas modalidades, pode haver múltiplos tubos de revestimentos rodeados por vários componentes de cimento. Por exemplo, este é o caso nas partes superficiais do poço, onde um tubo de revestimento de superfície, tubo de revestimento intermediário e tubo de revestimento de produção podem geralmente estar em certas seções de profundidade. Além disso, uma tubulação de produção

dentro do tubo de revestimento de produção também pode estar presente.

[00027] Uma série de fatores tem influência sobre a qualidade da cimentação do espaço anular [referência ao artigo da 'Oilfield Review': "Ensuring Zonal Isolation Beyond the Life of the Well," publicação de Schlumberger Oilfield Review, 2008]. Por exemplo, se os fluidos de perfuração são deixados no tubo de revestimento e na parede da formação, então uma ligação satisfatória entre o cimento e a formação ou tubo de revestimento é impedida. Adicionalmente, ou se os fluidos de perfuração se misturarem com a pasta de cimento e a mistura permanecer em estado líquido, é provável que se formem canais de comunicação entre as zonas ao longo do furo perfurado. Furos mal perfurados podem ter áreas de enchente que prendem fluidos de perfuração gelificados e que podem contaminar a pasta de cimento impedindo a cura adequada. Má centralização do tubo de revestimento também pode minar uma boa colocação de cimento uma vez que a pasta de cimento terá dificuldade para deslocar fluidos de perfilagem no lado estreito do espaço anular. Em alguns ambientes, pode haver uma péssima mistura destes fatores que promovem a falha da barreira.

[00028] Medição acústica da barreira pode ajudar a identificar problemas. Normalmente, a energia da onda acústica agitada com transdutores acústicos é irradiada em direção ao tubo de revestimento enquanto os transdutores realizam a varredura azimutal do tubo de revestimento. A energia da onda elástica é então agitada dentro do tubo de revestimento e pode ser irradiada para o espaço anular entre o tubo de revestimento e a formação (ou entre um tubo de revestimento principal e um secundário, uma vez que ocorre em várias

situações de colunas). Parte da energia podem irradiar de volta para o poço perfurado, onde é detectada com um ou vários transdutores acústicos. Algumas modalidades podem utilizar transdutores que são fixados diretamente ao tubo de revestimento para agitar e detectar a energia da onda elástica no tubo de revestimento e o espaço anular.

[00029] Dentro de modalidades que utilizam transdutores acústicos não fixados ao tubo de revestimento, são utilizados dois tipos de configurações. A primeira configuração emprega uma medição de pulso-eco em que um único transdutor é utilizado para agitar o tubo de revestimento e detectar os ecos que se propagam para trás. Isto é feito com a abertura do transdutor irradiando um feixe que aponta normalmente ou quase normalmente para a superfície do tubo de revestimento. Variações desta podem incluir um transdutor com uma abertura dividida em duas seções, em que a primeira seção irradia e a segunda seção detecta energia da onda acústica refletida a partir da superfície do tubo de revestimento.

[00030] A segunda configuração emprega uma configuração pitch-catch em que pelo menos um ou mais transdutores de transmissão e pelo menos um ou mais transdutores de recepção são utilizados. Uma modalidade desta técnica é implementada no gerador de imagens de onda flexural no ISOLATIONSCANNER™ da Schlumberger. Esta ferramenta encontra-se comercialmente disponível por Schlumberger Technology Corporation de Sugar Land, Texas. Dependendo do ângulo de orientação dos transdutores de transmissão e recepção, um dos mais de um dos modos quase-Lamb do tubo de revestimento podem ser agitados e detectados. No IsolationScanner, um transmissor e dois receptores são utilizados. Além disso, os ângulos e a

separação dos transdutores são otimizados para excitar e detectar o modo flexural do tubo de revestimento, também conhecido como o modo quase-Lamb antissimétrico mais baixo (A_0). Note que a denominação de quase-Lamb refere-se ao fato de que o tubo de revestimento de aço, que é cilíndrico em geometria, pode dar suporte aos modos que estão próximos nas suas características aos verdadeiros modos de Lamb que podem ser suportados por uma chapa de aço das mesmas propriedades e espessura do material.

[00031] Dois atributos dos sinais recebidos são utilizados para inverter para as propriedades do cimento: (i) a atenuação da atenuação flexural (Flex_ATT) usada para discriminar cimento de líquido e gás e (ii) o eco de reflexão na interface cimento-formação, referido como o eco de terceira interface ou de TIE (third-interface echo), utilizado para inverter a onda de velocidade do cimento. Dependendo das propriedades do cimento, o TIE pode ser simples ou múltiplo. É um eco de reflexão de cisalhamento-cisalhamento (shear-shear, SS) para um cimento que é acusticamente rápido, como cimentos classe H não contaminados por lama. O TIE é feito de dois ou três ecos representando reflexões compressional-compressional (PP), PS/SP convertido e SS para um cimento que é acusticamente lento, como cimentos leves e de espuma. A inversão de esses ecos produz tanto a velocidade de onda compressional de cimento (V_p) ou velocidade de onda de cisalhamento (V_s) ou ambas, dependendo dos ecos rastreados e disponíveis para inversão.

[00032] Algumas modalidades podem estender a técnica pitch-catch implementada no ISOLATIONSCANNER™ com uma matriz de elementos de recepção em vez dos dois receptores que são

implementados nesta ferramenta, bem como com uma matriz de transmissores. Modalidades deste documento incluem métodos para o processamento dos dados adquiridos com uma matriz de receptores estreitamente espaçados em uma configuração pitch-catch semelhante utilizada para o ISOLATIONSCANNER™. Neste documento também é descrito o uso dos dados de ISOLATIONSCANNER™ para extrair mais informações do que as historicamente já disponíveis.

[00033] O método neste documento refere-se a uma matriz de processamento para calcular a informação de dispersão dos sinais recebidos pela matriz receptora. Os sinais ultrassônicos de interesse se relacionam com a agitação e a detecção dos modos quasi-Lamb fundamentais do tubo de revestimento: o modo antissimétrico de ordem zero (A_0) referido como o modo flexural e o modo simétrico de ordem zero (S_0) referido como o modo extensional. Deve ser notado que o método também pode acomodar o processamento de modos quasi-Lamb adicionais de ordem superior (A_1 , A_2 , S_1 , S_2 , etc.). Quando estes modos são agitados e detectados, suas dispersões de amplitude também podem ser usadas para inversão das propriedades de cimento.

[00034] Modelagem e dados experimentais mostram que o processamento de matriz para estimar a informação de dispersão relacionada aos sinais recebidos pode fornecer assinaturas que estão diretamente relacionadas as velocidades de onda do cimento (ou propriedades mecânicas, como módulos de massa e de cisalhamento se a densidade de cimento é assumida como conhecida ou medida de forma independente). Geralmente, o conhecimento das velocidades de onda fornece evidência direta, inequívoca e quantitativa sobre a presença de cimento sólido

no tubo de revestimento. As velocidades de onda invertidas também podem ser utilizadas para prever a longevidade da bainha de cimento durante a vida do poço, particularmente se as medições são feitas com uma técnica de intervalo de tempo para monitorar a evolução do tempo da resistência mecânica da bainha de cimento. Ou seja, as alterações podem ser usadas para estimar a longevidade da integridade mecânica da barreira. Além disso, as perturbações da informação de dispersão estimada através das zonas de profundidade ou faixas azimutais podem estar relacionadas a defeitos do cimento, como a contaminação por lama e craqueamento, assim como a existência de canais que podem permitir canalização hidráulica. Este tratamento é análogo ao processamento de matriz conduzido para sinais de perfilagem sônicos para extrair dispersões de lentidão dos modos do furo de poço. Neste documento é utilizado um método de inversão para avaliar as propriedades mecânicas das bainhas de cimento em um poço revestido e cimentado e descrever o uso da utilização da dispersão da amplitude de sinal e dispersão de fase para a inversão das velocidades de onda do cimento. Dispersão refere-se à variação do atributo em questão (fase ou amplitude) dentro da largura de banda de frequência do sinal detectado.

[00035] As dispersões de amplitude do sinal são esperadas para apresentar descontinuidades em frequências específicas. Uma descontinuidade refere-se a uma mudança brusca no valor do atributo ou para uma mudança brusca na tendência do atributo com frequência. A Figura 2 representa a dispersão de atenuação para o modo flexural para um revestimento de espessura 3/8" cercado por água no seu interior e por cimento no exterior. As várias curvas representam várias condições de ligação na

interface tubo de revestimento-cimento. A atenuação do modo flexural do tubo de revestimento como uma função da frequência para uma configuração de água-aço-cimento para as várias condições de ligação da interface tubo de revestimento-cimento. Note a descontinuidade nas curvas em torno de 150-170 kHz independentemente da condição de ligação, exceto quando o cimento está completamente separado, para o qual não há nenhuma descontinuidade. O cimento utilizado neste exemplo tem velocidade de onda compressional, V_p , igual a 2600m/s. A atenuação é inferior abaixo desta frequência e maior acima dela. A Figura 3 é semelhante à Figura 2 mas mostra a atenuação correspondente ao modo extensional do tubo de revestimento como uma função da frequência para uma configuração de água-aço-cimento para várias condições de ligação da interface tubo de revestimento-cimento. O cimento utilizado para este exemplo tem V_p igual a 3625 m/s. Aqui, a descontinuidade ocorre em cerca de 0.3MHz e a atenuação é maior abaixo desta frequência e inferior acima dela.

[00036] Estas descontinuidades são relacionadas a transição entre o regime em que o modo de propagação quase-Lamb em questão pode emitir energia compressional ou de cisalhamento para a bainha de cimento, para a qual a atenuação de amplitude é alta e o regime onde esta não pode irradiar energia para uma destas ondas é baixo. Inicialmente, revisamos a física de propagação da onda dos modos quase-Lamb e sua radiação na bainha de cimento, e então fornecemos workflows ilustrativos para as modalidades deste documento.

A lei de Snell - Propagação versus evanescência no cimento

[00037] A transferência de energia proveniente dos

transdutores de transmissão imersos no fluido de furo de poço para a bainha de cimento é efetuada através dos modos de tubo de revestimento quase-Lamb, seja no modo flexural ou no modo extensional ou em um modo de ordem mais alta. A seguir, vamos nos limitar aos modos flexural e extensional tendo em mente que a mesma física se aplica a modos de ordem mais alta. Em cada frequência, a lei de Snell requer que a lentidão horizontal seja a mesma no fluido de perfuração, na camada de aço e no meio de cimento. Portanto, para o modo flexural com velocidade de fase indicada por $V_{flex}(w)$,

$$\frac{\sin\{\theta(w)\}}{V_{fluid}} = \frac{1}{V_{flex}(w)} = \frac{\sin\{\theta_{P,S}(w)\}}{V_{P,S}}$$

[00038] onde V_{fluid} é o som da velocidade da onda no fluido do furo perfurado com um ângulo de propagação $\theta(w)$ calculado a partir da superfície normal à de tudo de revestimento, enquanto $V_{P,S}$ refere-se as velocidades de onda compressional (P) ou de cisalhamento (S) no cimento com ângulos de propagação correspondente $\theta_{P,S}$. Por simplicidade, assumimos que as ondas se propagam no fluido e no cimento sem sofrer dispersão (esta é uma suposição razoável, mas lammas pesadas e cimentos leves e/ou cimentos de espuma podem exigir outras premissas). A equação correspondente pode ser escrita para o modo extensional.

[00039] As características de V_{flex} e velocidades de onda correspondentes para o modo extensional, V_{ext} , são impostas pelas propriedades elásticas e espessura do aço. A Figura 4 mostra as características de dispersão dos modos flexural e extensional (Lamb) para uma chapa de aço de espessura de 3/8 polegadas em água (uma chapa é uma boa aproximação ao tubo de

revestimento cilíndrico na nossa faixa de interesses de alta frequência.).

[00040] A equação acima fornece a condição de combinação de fase para o modo flexural ou extensional para lançar uma onda volumétrica no cimento. No entanto, dependendo da razão de $V_{P,s}$ a V_{flex} o ângulo de propagação no cimento pode ser real ou imaginário. Para a onda se propagar no interior da bainha de cimento como uma onda volumétrica, seu ângulo $\theta_{P,s}$ tem que ser real. Isto impõe que $V_{P,s} < V_{flex}$ para o modo flexural irradie energia de propagação para o cimento. Da mesma forma, isto impõe que $V_{P,s} < V_{ext}$ para o modo extensional irradie energia de propagação para o cimento. Quando esta condição não for satisfeita para uma ou ambas velocidades de onda de cimento ($V_{P,s}$), então a(s) onda(s) correspondente(s) são evanescentes (isto é, não se propagam) na bainha de cimento.

[00041] Como a Figura 5 retrata, três regiões no plano de dispersão de frequência-velocidade podem ser definidas em termos de se os modos flexural e extensional podem irradiar energia de onda volumétrica para a bainha de cimento. As curvas de dispersão de velocidade de onda flexural e extensional de tubo de revestimento demarcam regiões para três regimes de propagação na bainha do cimento. A propagação de ondas volumétricas ocorre no cimento a partir de qualquer um dos dois modos sempre que a velocidade de fase do modo é maior do que a velocidade de onda volumétrica no cimento. Quando a velocidade de fase do modo de tubo de revestimento é maior do que a velocidade de onda volumétrica, o modo pode irradiar ondas volumétricas para o cimento. Quando não for o caso, a energia irradiada para o cimento permanece presa próxima ao tubo de revestimento como uma onda evanescente. Deve ser

notado que o modo ainda pode irradiar para o fluido no outro lado. As curvas de dispersão de velocidade de onda flexural e extensional de tubo de revestimento demarcam então regiões para três regimes de propagação na bainha do cimento.

[00042] A Figura 6 é a mesma que a Figura 5, mas mostra dois exemplos de uma velocidade de onda compressional V_1 em torno de 2350m/s e um segundo exemplo com uma velocidade de onda compressional V_2 em torno de 3800m/s. Ambos valores são realistas para velocidades de onda compressional de cimento em poços de petróleo. Por exemplo, cimentos leves/espumosos podem ter V_p a 2350 m/s e em torno dela, enquanto cimentos classe H têm maior V_p em torno de 3800 m/s. Para o primeiro, o modo extensional irá irradiar uma onda volumétrica compressional no cimento enquanto o modo flexural só irá fazê-lo para a maior banda de frequências indicada ($f > 150\text{kHz}$) para a qual a velocidade de fase flexural é maior (supersônica) do que V_1 . Para este último, o modo flexural não irá irradiar onda volumétrica compressional no cimento, ao passo que o modo extensional irá fazê-lo na banda de frequência menor conforme indicado ($f < 260\text{ kHz}$). Energia de não propagação se torna evanescente no cimento. As mesmas conclusões seriam aplicáveis para a propagação de ondas de cisalhamento no cimento se V_1 ou V_2 devessem denotar ondas de velocidade de cisalhamento. As interseções de uma linha horizontal em V_1 ou V_2 com as curvas de dispersão dos modos flexural e extensional indicam a frequência de transição na qual o regime de propagação muda de cimento propagador para evanescente ou o contrário. A diferença na curvatura de ambas as dispersões de modo conduz a um reverso no regime de propagação com relação a faixa de frequência, como pode ser reunida a partir da Figura 6.

[00043] A relação entre a propagação ou evanescência volumétrica na bainha de cimento e atenuação de amplitude de modo de tubo de revestimento é bastante simples. Enquanto se propaga no tubo de revestimento, o modo flexural ou extensional irradia energia de volta para o fluido do furo perfurado, bem como no interior da bainha de cimento. No entanto, a extensão da irradiação para o cimento é alta quando há radiação de uma onda volumétrica e baixa quando há evanescência. Na frequência de transição como indicado na Figura 6, é esperado que a atenuação da amplitude apresente uma mudança perceptível.

Usando a descontinuidade nas dispersões de atenuação

[00044] A frequência na qual a dispersão do modo de atenuação exibe descontinuidade pode então ser utilizada em conjunto com as dispersões de modo de velocidade de onda, mostrado na Figura 4, para a leitura da velocidade de onda correspondente a esta descontinuidade.

[00045] A Figura 7 mostra o conceito geral, fornecendo dispersões para atenuação da amplitude do sinal (representação gráfica da esquerda) e velocidades de fase (representação gráfica da direita) para os modos de tubo de revestimento flexural e extensional. A frequência F_0 da descontinuidade na atenuação do modo flexural corresponde a uma velocidade de onda específica na dispersão da velocidade de fase, como mostrado na representação gráfica da direita. O valor estimado, V_0 , corresponde a velocidade de onda volumétrica do cimento na no espaço anular entre o tubo de revestimento e a formação. Independentemente de se tratar de velocidade de onda de compressão ou de cisalhamento, a cerca de 2600 m/s, o valor indica se o conteúdo do espaço anular é feito de um sólido.

Outras considerações mostram que esta é a velocidade de onda compressional do cimento, não do cisalhamento. As curvas sólidas correspondem a soluções obtidas a partir do que é conhecido como agentes de resolução de pesquisa de modo para a configuração considerada. Os pontos resultam da utilização de um estimador de dispersão em formas de onda sintéticas, para a mesma configuração, gerados através da simulação da medição pitch-catch como descrito acima. O estimador de dispersão pode incluir uma transformada contínua em ôndulas e/ou um algoritmo de aprendizagem Bayesiana escasso. As velocidades de onda de cimento são escolhidas de modo que existe uma descontinuidade na curva de dispersão de atenuação das ondas flexurais. Deve ser notado que a frequência F_0 desta descontinuidade corresponde a uma velocidade de onda específica na dispersão da velocidade de fase para o modo flexural, como mostrado na representação gráfica da direita. O valor estimado, V_0 , em torno de 2600 m/s corresponde a velocidade de onda volumétrica do cimento no espaço anular entre o tubo de revestimento e a formação. Independentemente de se tratar de velocidade de onda de compressão ou de cisalhamento, a cerca de 2600 m/s, o valor indica se o conteúdo do espaço anular é feito de um sólido. Outras considerações mostram que esta é a velocidade de onda compressional do cimento, não do cisalhamento.

Aplicações em dados sintéticos de simulações numéricas

[00046] Nós usamos um modelo numérico para simular a medição pitch-catch ultrassônica em geometria planar. Detalhes são fornecidos por "Forward modeling for ultrasonic leaky Lamb-wave based imaging through a highly contrasting steel cylindrical layer" Zeroug S., IEEE Ultrasonics Symposium, Vol.

1, páginas 672-675, (2004), que é incorporado neste documento por referência. Uma matriz receptora idealizada é usada para reunir uma matriz de formas de onda com espaçamento de transmissor-receptor igual. Os parâmetros do experimento numérico são fornecidos nas legendas das Figuras 8 a 10. As formas de onda são então processadas com um algoritmo de lápis matriz modificado descrito em mais detalhe em Ekstom, Michael "Dispersion Estimation from Borehole Acoustic Arrays Using a Modified Matrix Pencil Algorithm," Procedimentos de Asilomar-29, IEEE 1996, páginas 449-53, que é incorporado neste documento por referência. Representações gráficas da dispersão de fase de velocidade e de dispersão de atenuação de amplitude são geradas.

[00047] As Figuras 8 e 9 mostram uma representação gráfica da matriz de forma de onda sintética e o processamento do algoritmo lápis matriz modificado resulta em um caso em que um fluido preenche o espaço anular. Estes dados estabelecem representações gráficas da linha de base. Pode ser notado que a velocidade de fase e a atenuação de amplitude para ambos os modos flexural e extensional são bem estimadas. A Figura 8 é um conjunto de formas de onda sintetizadas para o alinhamento do transdutor a 25 graus e recebidas com uma matriz posicionada a partir de 150 mm a 400 mm de distância do transmissor, com de uma distância inter-receptor de 5 mm. Parâmetros: um pulso de origem com frequência central de 200 kHz é usado (veja representações gráficas de amplitude espectral na Fig. 6; espessura do tubo de revestimento: 9,525 mm (3/8"); parâmetros acústicos: fluido de furo perfurado: $v_p = 1,480$ m/s, densidade = 1000 kg/m³; Aço: $V_P = 5880$ m/s, $v_s = 3220$ m/s, densidade = 7800 kg/m³; Cimento: de acordo com os

parâmetros do fluido de furo perfurado. O espaço anular é assumido como sendo infinitamente espesso.

[00048] A Figura 9 é uma representação gráfica de curvas de dispersão para a matriz da forma de onda na Figura 8. A linha horizontal no painel velocidade de fase (parte superior esquerda) representa a velocidade de onda no espaço anular. Deve ser notada que a atenuação para o modo flexural é estável em torno de -70 dB/m. (Deve ser notado também que a atenuação nestas representações gráficas é expressa com um sinal negativo. Às vezes o sinal é descartado como na Figura 7.) Parâmetros TKO: ordem de pólo = 2; tolerância = 40%. A linha horizontal no painel velocidade de fase (parte superior esquerda) representa a velocidade de onda no espaço anular.

[00049] A Figura 10 é uma representação gráfica semelhante à da Figura 9, mas para um espaço anular cementado com $V_P = 2600\text{m/s}$, $V_S = 1200\text{m/s}$, densidade = 1200 kg/m^3 . Deve ser notada a descontinuidade da curva de atenuação flexural (esquerda inferior) em cerca de 150 kHz, abaixo da qual a atenuação é estável em torno de -50 dB/m e acima da qual se aumenta para cerca de -120 dB/m. Nesta frequência, a curva de velocidade de fase flexural (superior esquerdo) intersecta a linha horizontal que corresponde à velocidade de onda do cimento (2600m/s).

Aplicações em dados experimentais do tipo matriz

[00050] Dados de uma experiência realizada em um ambiente de laboratório são processados de acordo com o esquema descrito acima para os dados sintéticos. Esta experiência pertencia a estimar o efeito de desligamento entre a chapa de aço e um espaço anular sólido simulado neste documento com uma chapa feita de LUCITE. O arranjo experimental está esquematizado na

Figura 11 com os transdutores imersos em água alinhados a 35 graus para agitar de modo otimizado o modo flexural do aço de espessura de cerca de 3/8 polegadas. Neste ângulo, não esperamos agitar o modo extensional da placa de aço.

[00051] A Figura 11 fornece a geometria do arranjo experimental realizado em um tanque de água. Dois transdutores de pistão com 1 polegada de diâmetro são usados no modo pitch-catch para agitar uma chapa de aço retangular de espessura de 3/8 polegadas por 24 polegadas por 16 polegadas que é apoiada por um bloco de Lucite. Os blocos de aço e Lucite são fixados hermeticamente ou separados por calços de 250 micrômetros de diâmetro. Em um exemplo, o bloco de Lucite é removido por uma polegada de distância da chapa de aço.

[00052] A série seguinte de figuras ilustra os resultados obtidos de acordo com a configuração ilustrada na Figura 11. A Figura 12 é uma representação gráfica em escalas de cinza dos sinais detectados pelo receptor, conforme que é movida para longe do transmissor, gerando uma série de formas de onda com taxa de amostragem de 10 mm. A Figura 13 é semelhante à Figura 12, mas os dados são fechados em tempo (time-gated) de modo a remover as chegadas após o sinal de tubo de revestimento principal. Estes são os dados que são processados através de um algoritmo de lápis matriz modificado. Em seguida, a Figura 14 fornece resultados de algoritmo lápis matriz modificado para o caso em que o bloco de aço e de Lucite sejam separados por uma camada de fluido de 1". O modo flexural é predominantemente agitado e detectado. Sua atenuação de amplitude é bem estimada pelo algoritmo lápis matriz modificado variando quase monotonicamente entre -75 e -100 dB/m.

[00053] Além disso, a Figura 15 inclui representações gráficas de resultados do algoritmo lápis matriz modificado para o caso em que o bloco de Lucite seja fixado à chapa de aço. A atenuação de amplitude de modo flexural (painel inferior esquerdo) exhibe uma descontinuidade em frequências em torno de 200-250 kHz. Nesta frequência, a curva de dispersão de fase (canto superior esquerdo) cruza o nível de velocidade 2700 m/s (mostrado na linha horizontal), indicando que a velocidade de onda de compressão de Lucite é igual ou muito próxima a este valor. Este valor é próximo do valor publicado de 1680 m/s. (Deve ser notado que o cisalhamento para Lucite é conhecido por ser em torno de 1100-1300 m/s). A Figura 16 é semelhante à Figura 15, mas esta é para o caso em que o bloco de Lucite e a chapa de aço são separados por calços de 250 micrômetros simulando uma condição de ligação com uma camada fina de fluido. Aqui também, a atenuação de amplitude de modo flexural apresenta uma descontinuidade nas frequências em torno de 200-250 kHz, embora a descontinuidade não seja tão grande como na Figura 15, devido a uma condição de ligação diferente.

Workflow

[00054] Um workflow geral prevista está ilustrado na Figura 17. O fluxograma para estimar velocidades de onda de cimento a partir de dispersões de atenuação dos modos flexural e extensional apresenta métodos 1601-1606. Em algumas modalidades, os métodos são realizados por ordem sequencial. Algumas modalidades podem se beneficiar de métodos adicionais ou da execução de métodos em arranjos alternativos. Inicialmente, o método 1601 inclui a coleta de formas de onda ultrassônicas a vários receptores axiais. O método 1602

identifica os modos flexural e extensional e estima a fase e a dispersão de amplitude para todos os modos quase-Lamb; um método lápis matriz modificado como TKO ou outros métodos de estimativa de dispersão podem ser usados para esta finalidade. O método 1603 inclui a detecção de descontinuidades em uma ou ambas as dispersões de atenuação e estimativa das frequências correspondentes. Um método como o teste baseado em hipótese para a detecção de um salto na característica de atenuação em cada frequência utilizando a atenuação e/ou incertezas estimadas nestas e nas frequências vizinhas ou outras abordagens semelhantes, pode ser utilizado para este fim. O método 1604 usa as dispersões de velocidade de fase para estimar a velocidade de onda correspondente à frequência de descontinuidade. O método 1605 caracteriza o velocidade de onda estimada como velocidade de onda de cisalhamento ou compressional utilizando a informação de processamento invertido auxiliar e conhecimento a priori, como velocidades de onda de cimento já esperadas, obtidas a partir de medições efetuadas antes da cimentação de um poço. O método 1606 fornece a velocidade de onda de cimento como compressional e de cisalhamento.

Modificação do workflow para matriz de receptor escassa

[00055] A matriz de receptor pode ser escassa com um pequeno número de receptores espaçados demasiado distantes uns dos outros. Neste exemplo, os dados podem não permitir uma estimativa precisa suficiente das dispersões de velocidade de onda. No entanto, espera-se que a dispersão de atenuação ainda possa ser estimada a partir dos dados. Isto é assim porque o processamento adequado da informação de fase do sinal,

responsável pela dispersão de velocidade de onda requer uma abertura de receptor larga o suficiente com alta taxa de amostragem (por exemplo, um grande número de elementos receptores espaçados uns dos outros). Isto não é necessário para o processamento adequado da informação de atenuação do sinal.

[00056] Neste exemplo, as dispersões de velocidade de onda para os modos flexural e extensional precisam ser calculadas. Isto é possível desde que os parâmetros de tubo de revestimento de aço, nomeados espessura, velocidades de onda P e S e densidade são conhecidos. Notamos que estas especificações são geralmente disponíveis e fornecidas pelos fabricantes de tubo de revestimento. Para calcular as dispersões de velocidade de onda, usamos um modo de pesquisa para o problema de Lamb como é bem conhecido por aqueles versados na técnica. Notamos que, para compartimentos de aço, estas dispersões de velocidade de onda são independentes das propriedades do fluido de perfilagem e cimento que rodeiam o tubo de revestimento de aço, por causa do contraste elástico substancial entre o aço e o fluido de perfilagem e entre o aço e o cimento. Assim, assumindo por exemplo água em ambos os lados do compartimento para calcular as dispersões de velocidade de onda, produz uma boa aproximação para as dispersões reais para as quais o tubo de revestimento está ligado ao cimento.

[00057] O workflow geral modificado previsto está ilustrado na Figura 18, que é um fluxograma genérico para estimar velocidades de onda de cimento a partir de dispersões de atenuação dos modos flexural e extensional para uma matriz de receptor com um número escasso de elementos. As dispersões de

velocidade de onda são calculadas e não estimadas a partir dos dados adquiridos, usando o conhecimento dos parâmetros de de tubo de revestimento (espessura, velocidades de onda P e S e densidade).

Método para os dados do receptor duplo ISOLATIONSCANNER™

[00058] Em seguida, fazemos uma revisão da adaptação das mesmas idéias para a configuração em que a matriz de receptores é feita de apenas dois elementos, como é o caso para o ISOLATIONSCANNER™. A matriz de receptor é muito escassa para permitir mesmo que a dispersão de atenuação seja estimada a partir dos dados utilizando as técnicas de processamento de matriz. É demonstrado um método para capturar com alguma aproximação as características de descontinuidade na base de determinação de propriedades do cimento.

[00059] Os dois receptores do ISOLATIONSCANNER™ estão posicionados a 250 e 350 mm de distância do transmissor. Um método baseia-se na razão de amplitude espectral das formas de onda adquiridas a estes dois receptores.

Aplicação da razão de amplitude espectral aos dados experimentais

[00060] Continuando a análise dos dados experimentais descritos acima, a Figura 19 apresenta esta razão de amplitudes espectrais dos sinais adquiridos a 250 mm e 350 mm expressa, para os dois casos: (i) a chapa de Lucite é fixada à chapa de aço e (ii) é separada por uma camada espessa de água de 1". Podemos fazer duas observações: (1) a razão captura bem a faixa de atenuação estimada por um algoritmo de lápis matriz modificado (que varia de 0 a -200 dB/cm); e (2) a

descontinuidade na variação espectral também está presente no caso do Lucite fixado nas frequências entre 200 e 250 kHz. A Figura 19 proporciona uma razão entre as amplitudes espectrais dos sinais adquiridos a 250 mm e 350 mm expressas em dB/cm, para os dois casos indicados na legenda. Deve ser notada a descontinuidade na amplitude entre 200 e 250 kHz, para o caso de Lucite fixado (i).

[00061] A presença da descontinuidade na representação gráfica da razão espectral permite estimar a velocidade de onda de cimento a partir de uma medição de dois receptores (ou uma com um pequeno número de receptores que não permite o processamento de matriz de acordo com as seções acima):

1 - Adquirir velocidades de onda Próximas e Distantes com ISOLATIONSCANNER™.

2- Para ambas as formas de onda, extrair a chegada do tubo de revestimento dentro de uma janela grande o suficiente que, no entanto, exclui chegadas que podem ter se propagado no interior da bainha de cimento e refletida a partir da interface de cimento-formação ou qualquer outra chegada não identificada como a chegada de tubo de revestimento.

3- Estimar a razão espectral das chegadas de tubo de revestimento extraídas Distante a Próxima conforme a fórmula:

$$ATT(f) = 20 * \log_{10}(\text{abs}(\text{FFT}(\text{CasingArrival_FAR})) / \text{abs}(\text{FFT}(\text{CasingArrival_NEAR}))) * 1000$$

onde CasingArrival_FAR e CasingArrival_NEAR são os sinais extraídos de acordo com a etapa 2 e FFT refere-se a transformada rápida de Fourier, que calcula a transformada de Fourier de uma forma de onda de domínio de tempo. Observe que a distância entre os dois receptores é de 10 cm, a

multiplicação da razão por 1000 traz a expressão da razão a unidades de dB/m. Deve ser notado que métodos semelhantes aos da fórmula acima podem ser utilizados para estimar esta razão.

4- Realizar uma representação gráfica e analisar a razão como uma função da frequência (dentro da faixa de frequências significativa, onde a razão sinal-ruído é favorável) para descontinuidades, utilizando métodos de processamento de sinais bem conhecidos. Tal método pode empregar estimativa baseada em hipóteses.

5- Sempre que uma descontinuidade for detectada conforme a etapa 4, estimar a frequência f_0 e a incerteza associada Δf_0

6- Assumir que os dados são predominantemente feitos do modo flexural de tubo de revestimento, usar a curva de dispersão de velocidade de fase para o modo flexural de tubo de revestimento (calculada de acordo com o método descrito acima), estimar o valor da velocidade de fase flexural, V_{cmt_est} e seu erro, ΔV_{cmt_est} correspondendo a frequência f_0 e seu erro Δf_0 .

a. Nota 1: O cálculo da dispersão de velocidade de fase para o modo flexural do tubo de revestimento pode ser realizado antes da perfilagem e armazenado em tabelas de dispersões. Isto exige o conhecimento de (i) espessura do tubo de revestimento, (ii) velocidades de onda compressional e de cisalhamento e (iii) densidade do tubo de revestimento. Para uma aproximação de primeira ordem, parâmetros do fluido de perfilagem e meio no espaço anular (cimento ou outros) não influenciam as curvas de dispersão de velocidade de fase. Valores aproximados para os parâmetros (i) a (iii) podem ser usados a partir de especificações do fabricante do tubo de

revestimento, sem produzirem curvas de dispersão errôneas ou não utilizáveis. Se a precisão é necessária para a espessura do tubo de revestimento, esta pode ser estimada a partir da medição pulso-eco implementada no IsolationScanner, caso em que o cálculo das curvas de dispersão é feito após a perfilagem.

b. Nota 2: As dispersões de velocidade de fase podem ser calculadas em tempo real usando um algoritmo de busca de modo. Uma aproximação aceitável pode ser feita assumindo uma chapa de aço no fluido - desde que as dispersões de velocidade de fase não sejam perturbadas com qualquer ordem bastante significativa pela geometria cilíndrica do tubo de revestimento e/ou com o tubo de revestimento cimentado. Em alternativa, as dispersões de velocidade de fase podem ser extraídas a partir de tabelas de dispersões computadorizadas de acordo com os parâmetros (i) a (iii) acima mencionados.

7- este valor de velocidade de fase V_{cmt_est} com sua incerteza ΔV_{cmt_est} corresponde à velocidade de onda volumétrica responsável pela existência da descontinuidade na dispersão de atenuação. Produzir este valor como a velocidade de onda de cimento invertida.

[00062] Se a velocidade de onda de cimento estimada representa a velocidade de onda compressional ou de cisalhamento, esta pode ser determinada a partir do próprio valor e dos valores esperados para a formulação de cimento usada no campo:

a. Nota 1: Medições de superfície das velocidades de onda compressional e as vezes de cisalhamento tipicamente são tomadas no local antes da cimentação do poço. Estas medições podem ser utilizadas para atribuir a velocidade de

onda de cimento invertido às ondas compressional ou de cisalhamento.

b. Nota 2: É conhecido que valores superiores a 2500 m/s correspondem à V_p e que abaixo de cerca de 2100m m/s, a V_s . Os valores típicos de V_p e V_s de cimento medidos no laboratório em temperaturas ambientes são listados na Tabela 1.

8- Se os dados são determinados a serem predominantemente feitos do modo extensional em vez do modo flexural, as etapas descritas acima ainda se aplicam, fazendo referência às dispersões de modo de tubo de revestimento para o extensional. A ferramenta ISOLATIONSCANNER foi concebida para agitar e detectar de forma óptima o modo flexural do tubo de revestimento, o modo extensional não deve ser predominantemente agitado e detectado. No entanto, quando os ângulos de alinhamento do transdutor sobre a ferramenta de perfilagem são reduzidos para a faixa de cerca de 20 graus (para um fluido de perfilagem típico), seria de se esperar que o modo extensional dominasse os dados.

[00063] A Figura 20 fornece um fluxograma genérico para estimar a velocidade de onda do cimento a partir do esquema de razão de amplitude espectral para os dados do ISOLATIONSCANNER™ de receptor duplo. O fluxograma para estimar velocidades de onda do cimento e erro associado apresenta métodos 1901-1910. Em algumas modalidades, os métodos são realizados por ordem sequencial. Algumas modalidades podem se beneficiar de métodos adicionais ou da execução de métodos em arranjos alternativos. Inicialmente, o método 1901 adquire formas de onda ultrassônicas de receptor Próximas e Distantes. O método 1902 identifica e extrai a chegada do tubo de revestimento para as duas formas de onda. O método 1903 estima

a dispersão de atenuação através do cálculo da razão de amplitude espectral Distante/Longe e o método 1904 detecta descontinuidade na dispersão de atenuação e identifica a frequência e o erro correspondente. Os métodos 1905, 1906 e 1907 podem ser feitos simultaneamente, individualmente ou separadamente. O método 1905 estima a espessura do tubo de revestimento a partir de dados de pulso-eco. O método 1907 introduz os parâmetros de tubo de revestimento, como espessura, velocidades de onda e densidade. O método 1906 calcula a dispersão os modos flexural e extensional geralmente usando os resultados dos métodos 1905 e 1907. O método 1908 combina informações dos métodos 1904, 1905, 1906 e 1907, estimando a velocidade de onda e erro da dispersão da velocidade da frequência e erro correspondentes. O método 1909 identifica a velocidade de onda e erro como método compressional ou de cisalhamento e o método 1910 fornece a velocidade de onda de cimento e o erro associado.

| Amostra n° | Vp (m/s) | Vs (m/s) |
|------------|----------|----------|
| 1 | 3736 | 2040 |
| 2 | 3854 | 2094 |
| 3 | 3166 | 1750 |
| 4 | 3100 | 1747 |
| 5 | 3550 | 1992 |
| 6 | 2786 | 1429 |
| 7 | 2848 | 1498 |
| 8 | 3064 | 1694 |
| 9 | 3158 | 1797 |
| 10 | 2851 | 1509 |
| 11 | 2952 | 1527 |
| 12 | 2867 | 1456 |
| 13 | 2683 | 1542 |
| 14 | 2916 | 1538 |
| 15 | 2193 | 1179 |
| 16 | 2248 | 1287 |
| 17 | 2921 | 1558 |
| 18 | 2518 | 1293 |

Tabela 1: São medidas as velocidades de onda compressional (V_p) e de cisalhamento (V_s) em cimentos de poço de exploração de várias formulações. Os valores foram obtidos em laboratório sob condições ambientes de temperatura e pressão.

Aplicação da razão de amplitude espectral aos dados de campo

[00064] Foi aplicado o método da razão de amplitude espectral acima descrito ao campo de dados a partir de um poço. Os resultados são mostrados na Figura 21. O primeiro painel da esquerda exibe a atenuação flexural convencional, como estimado a partir da razão dos picos do envelope. O segundo painel exibe a velocidade de onda do espaço anular invertida usando o processamento dos dados de echo (TIE) da terceira interface (cimento-formação). O terceiro painel apresenta a atenuação flexural a partir da razão de amplitude espectral como uma função da frequência para todas as profundidades em 0 graus de azimuth. O quarto painel exibe uma imagem semelhante, mas em 180 graus de azimuth. Uma vez que existem 360 azimuths associados com a ferramenta fazendo a varredura do tubo de revestimento a de 10 graus, as imagens para os outros 34 azimuths (não mostrados) são semelhantes, mas mostram alguns desvios entre si. O último painel (direita) mostra representações gráficas da frequência na qual a atenuação aumenta (em valores absolutos) de 50 dB a partir da média calculada na faixa de 0,1 a 0,2 MHz. Esta frequência pode ser considerada como proxy para a descontinuidade discutida neste documento e que preferencialmente é estimada a partir dos

dados adquiridos com uma matriz de uma multiplicidade de receptores.

[00065] Nas imagens de razão de amplitude espectral (painéis 3 e 4 na Figura 21), observa-se variações marcadas na atenuação como uma função da frequência. Isto reflete os dados representados graficamente no primeiro painel (imagem de atenuação convencional (ATT)), mas fornece mais informações relacionadas a velocidade de onda do cimento. Como discutido acima em relação à Figura 5 e ao texto correspondente, um aumento súbito na atenuação, por exemplo 50-70 dB/m a um nível >150 dB/m está associado ao cruzamento da curva de dispersão de velocidade de fase do modo flexural, em que abaixo da frequência do cruzamento a atenuação é baixa porque o modo flexural não irradia para a camada de cimento, enquanto que acima da frequência do ponto de cruzamento, este faz isso relativamente bem. Em um certo sentido, a frequência "característica" representada graficamente no painel 5 pode ser considerada como um proxy para a descontinuidade discutida acima. Notamos que as variações de imagem de atenuação em painéis 3 e 4 são consistentes com a velocidade de onda anular invertida a partir do processamento de dados de TIE. Por exemplo, entre XX03m e XX05m, a velocidade de onda de espaço anular está perto de 2200 m/s. Este valor utilizado em conjunto com a curva de dispersão de velocidade de fase do modo flexural do tubo de revestimento (de acordo com a Figura 5) produz uma descontinuidade em frequências baixas (cerca de 100 kHz), abaixo das quais a atenuação é pequena ($\sim < 50$ dB/m) e acima das quais este aumenta dramaticamente a 100 dB/m e mais além. Em outras seções de profundidade, como - XX06-XX14m e onde a velocidade de onda do espaço anular está próxima

daquela de um fluido (-1500 m/s), não há nenhuma descontinuidade esperada. A atenuação é aquela de um espaço anular preenchido de fluido de cerca de 70 dB/m, e mais importante, que se estende ao longo de uma larga faixa de frequência (50-500 kHz) como pode ser observado a partir dos painéis 3 e 4.

[00066] Para completar o workflow de inversão, esta frequência característica (painel 5 na Figura 21) é para ser usado em conjunto com a curva de dispersão da velocidade de fase do modo flexural para extrair uma velocidade de onda característica do cimento.

[00067] O decaimento da energia de modo flexural é um dos parâmetros chave que são usados no processamento comercial do ISOLATIONSCANNER™ para determinar as propriedades do cimento. Esta deterioração é estimada a partir da razão entre o pico do envelope da energia do modo flexural nos dois receptores. No entanto, por si só, esta taxa de decaimento do envelope de energia leva a uma resposta ambígua já que o mesmo valor pode corresponder a um cimento com uma impedância acústica baixa, bem como a um cimento com uma maior impedância acústica (isto é, o resultado de inversão tem seu valor duplicado). Para remover a ambiguidade, o decaimento é tipicamente combinado com a impedância de cimento acústico estimada resultante do processamento da medição de pulso-eco, que também é implementada no ISOLATIONSCANNER™. No entanto, esta última estimativa nem sempre é robusta devido a forte sensibilidade do método de inversão aos efeitos ambientais, como a impedância acústica da lama, bem como a correções baseadas em resultados de modelagem decorrentes da dependência de inversão em um modelo ID simples para a medição. Assim, a avaliação da

dependência de frequência da atenuação como como expresse, por exemplo, através da razão espectral descrita acima, permite remover esta ambiguidade e a dependência na medição de pulso-eco.

- REIVINDICAÇÕES -

1. Método para caracterização do estado físico de uma barreira, compreendendo um tubo de revestimento e um preenchimento de espaço anular, instalada em um furo perfurado que atravessa a formação, caracterizado pelo fato de o método compreender:

localização de uma ferramenta ultrassônica em uma localização no furo perfurado, em que a ferramenta ultrassônica compreende uma pluralidade de receptores espaçados e um transmissor;

ativação da ferramenta ultrassônica para formar formas de ondas ultrassônicas que compreendem modos Lamb propagados dentro do tubo de revestimento, em que os receptores espaçados registram as formas de onda ultrassônicas;

alinhamento do transmissor e dos receptores espaçados; processamento das formas de onda ultrassônicas para obter (i) um primeiro gráfico de atenuação de dispersão de amplitude de atenuação como uma função da frequência e (ii) um primeiro gráfico de fase de velocidade de dispersão de fase como uma função de frequência;

identificação de descontinuidades no gráfico de dispersão de atenuação de amplitude; e

determinação de velocidades de onda de barreira pelo relacionamento das descontinuidades para velocidades de onda de barreira, utilizando o gráfico de dispersão de fase.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de compreender ainda a utilização de velocidades de onda de barreira para identificar a natureza do preenchimento do espaço anular.

3. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de compreender ainda a utilização de velocidades de onda de barreira para distinguir o preenchimento de espaço anular como sólido ou fluido.

4. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de compreender ainda a utilização de velocidades de onda de barreira para calcular as propriedades mecânicas da barreira.

5. Método, de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que as propriedades mecânicas compreendem elasticidade.

6. Método, de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que as propriedades mecânicas são selecionadas a partir do grupo que consiste na razão de Poisson, módulo de Young e densidade de massa.

7. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a ferramenta compreende mais do que um transmissor.

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

9. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a barreira compreende ainda uma formação subterrânea.

10. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a barreira compreende uma superfície do tubo de revestimento.

11. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a barreira compreende ainda uma superfície do furo perfurado.

12. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o processamento das formas de ondas ultrassônicas compreende o processamento de formas de ondas ultrassônicas usando um algoritmo de matriz modificado.

13. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o processamento de formas de ondas ultrassônicas compreende o processamento de formas de ondas ultrassônicas usando um estimador de dispersão com base em um algoritmo de aprendizagem Bayesiana esparso.

14. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o processamento de formas de ondas ultrassônicas compreende o processamento de formas de ondas ultrassônicas usando um estimador de dispersão com base em uma transformada contínua em ôndulas.

15. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que identificar descontinuidade compreende identificar descontinuidades dentro do gráfico de dispersão de atenuação de amplitude usando uma técnica baseada em hipótese para identificar descontinuidades em curvas de dispersão.

16. Método, de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato de que compreende ainda a repetição da ativação para identificar alterações nas propriedades mecânicas da barreira ao longo do tempo.

17. Método, de acordo com a reivindicação 16, caracterizado pelo fato de que compreende ainda a utilização de mudanças para estimar longevidade de integridade mecânica da barreira.

18. MÉTODO PARA CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO FÍSICO DE UMA BARREIRA COMPREENDENDO UM TUBO DE REVESTIMENTO E UM PREENCHIMENTO DE ESPAÇO ANULAR INSTALADA EM UM FURO PERFURADO QUE ATRAVESSA A FORMAÇÃO, o método caracterizado pelo fato de compreender:

localização de uma ferramenta ultrassônica em uma localização no furo perfurado, em que a ferramenta ultrassônica compreende dois receptores espaçados e um transmissor;

ativação da ferramenta ultrassônica para formar formas de ondas ultrassônicas que compreendem modos Lamb propagados dentro do tubo de revestimento, em que os receptores espaçados registram as formas de onda ultrassônicas;

alinhamento do transmissor e dos receptores espaçados, processamento de duas formas de onda ultrassônicas para obter um primeiro gráfico de de atenuação de dispersão de amplitude de atenuação como uma função da frequência,

cálculo de dispersões de velocidades de fase de modo Lamb como uma função como frequência a partir das propriedades do tubo de revestimento;

identificação de descontinuidades no gráfico de dispersão de atenuação de amplitude; e

determinação de velocidades de onda de barreira usando as descontinuidades.

19. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de que as velocidades de onda compreende ondas compressoriais ou de cisalhamento.

20. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de compreender ainda a utilização de

velocidades de onda de barreira para identificar a natureza do preenchimento do espaço anular.

21. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de compreender ainda a utilização de velocidades de onda de barreira para distinguir o preenchimento de espaço anular como sólido ou fluido.

22. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de compreender ainda a utilização de velocidades de onda de barreira para calcular as propriedades mecânicas da barreira.

23. Método, de acordo com a reivindicação 22, caracterizado pelo fato de que as propriedades mecânicas compreendem elasticidade.

24. Método, de acordo com a reivindicação 22, caracterizado pelo fato de que as propriedades mecânicas são selecionadas a partir do grupo que consiste na razão de Poisson, módulo de Young e densidade de massa.

25. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de que processamento de formas de onda ultrassônicas compreende o cálculo de uma razão entre as amplitudes espectrais de sinais provenientes de pelo menos dois receptores, e

em que os sinais representam a propagação de formas de ondas no tubo de revestimento com outros eventos removidos.

26. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de que processamento de formas de ondas ultrassônicas compreende um estimador de dispersão com base em um algoritmo de aprendizagem Bayesiana esparso.

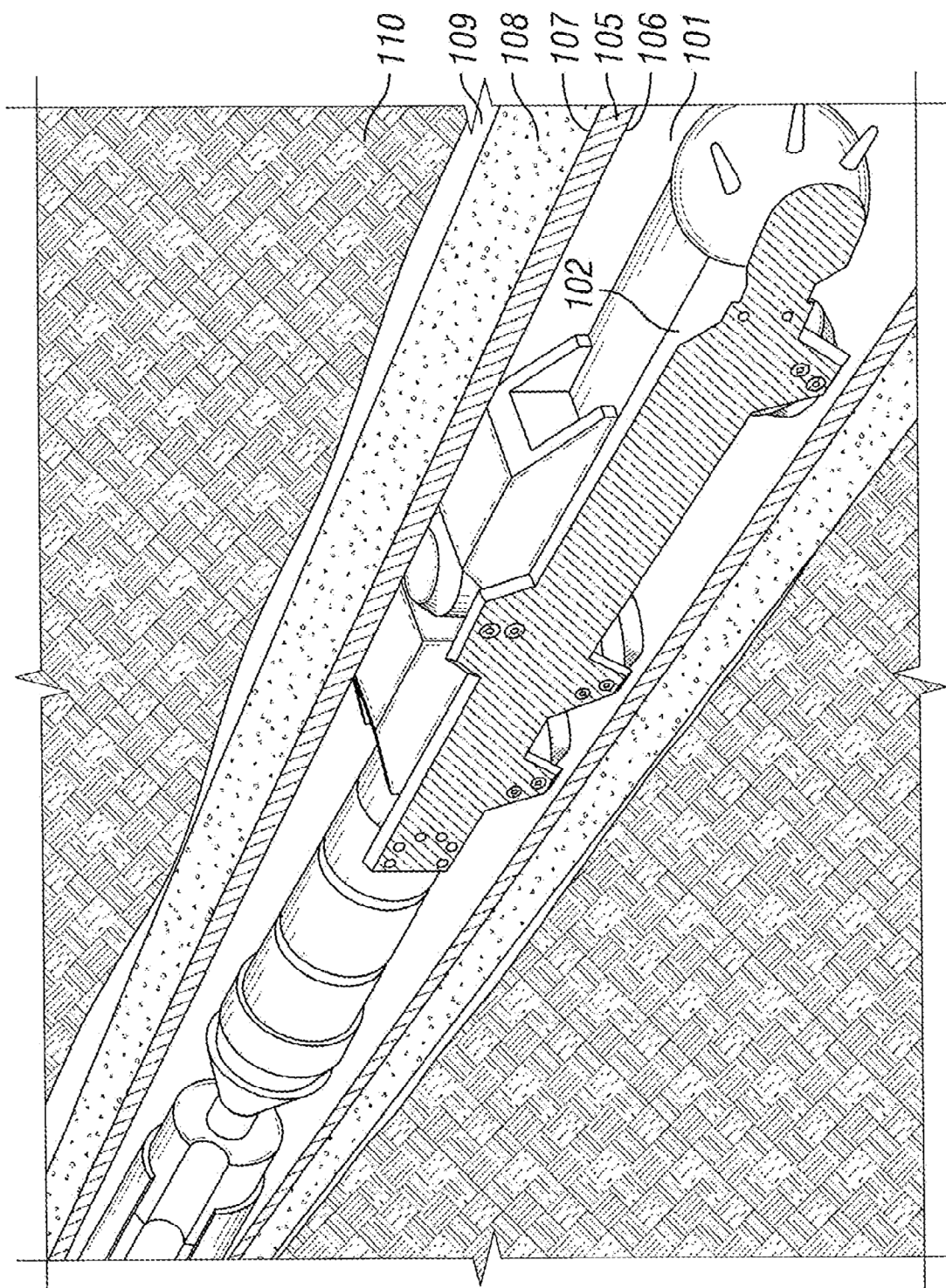
27. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de que processamento de formas de

ondas ultrassônicas compreende um estimador de dispersão com base em uma transformada contínua em ôndulas.

28. Método, de acordo com a reivindicação 22, caracterizado pelo fato de que compreende ainda a repetição da ativação para identificar alterações nas propriedades mecânicas da barreira ao longo do tempo.

29. Método, de acordo com a reivindicação 28, caracterizado pelo fato de compreender ainda a utilização de mudanças para prever longevidade de integridade mecânica da barreira.

30. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de que a determinação de velocidades de onda de barreira compreende relacionar as descontinuidades a velocidades de ondas de barreira usando o gráfico de dispersão.

**Figura 1**

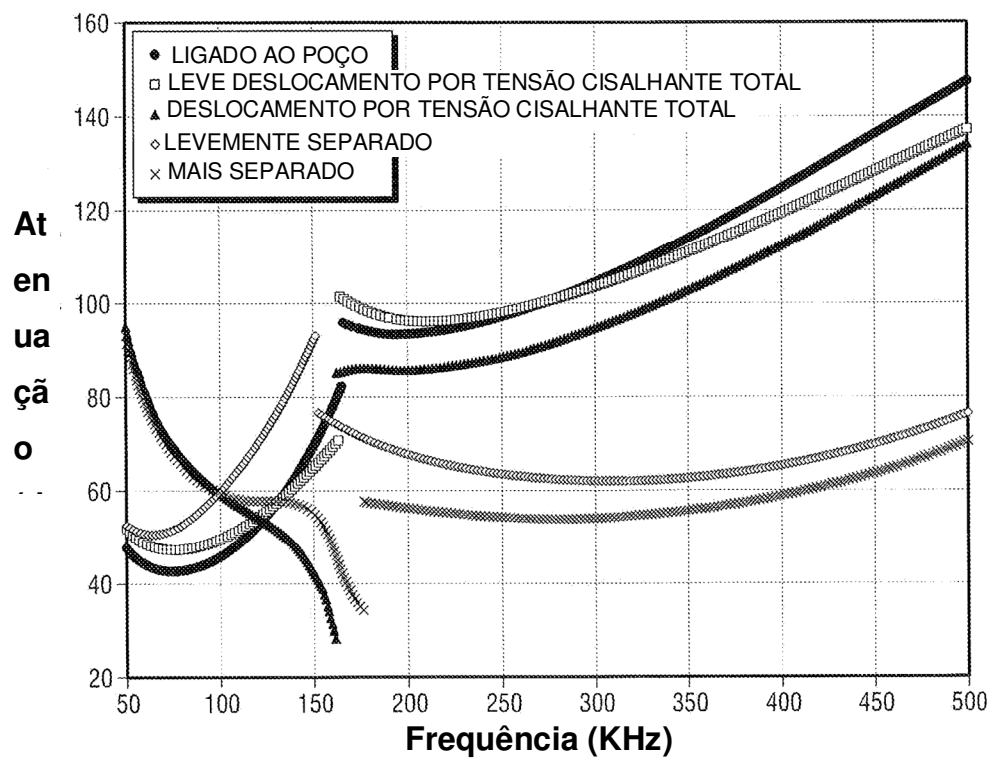


Figura 2

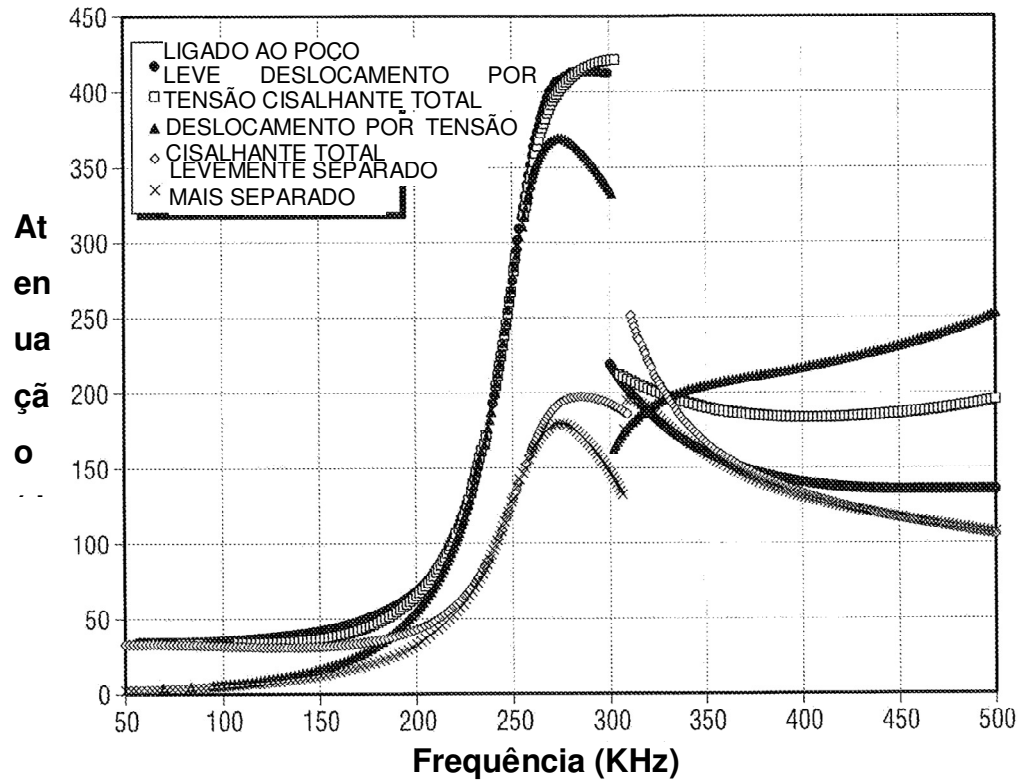


Figura 3

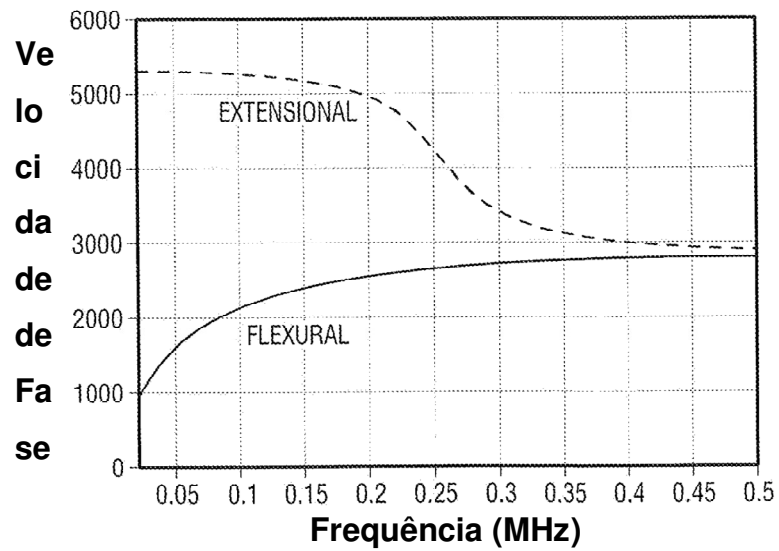


Figura 4

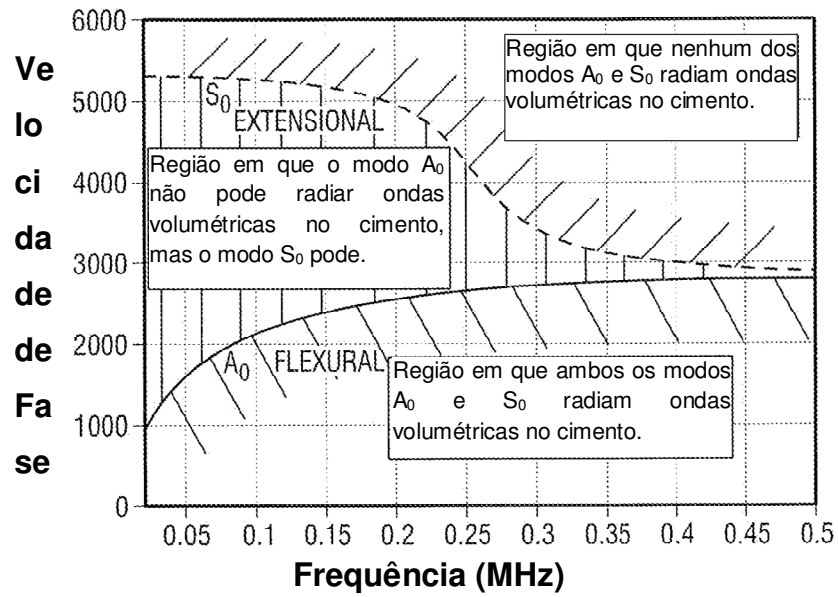


Figura 5

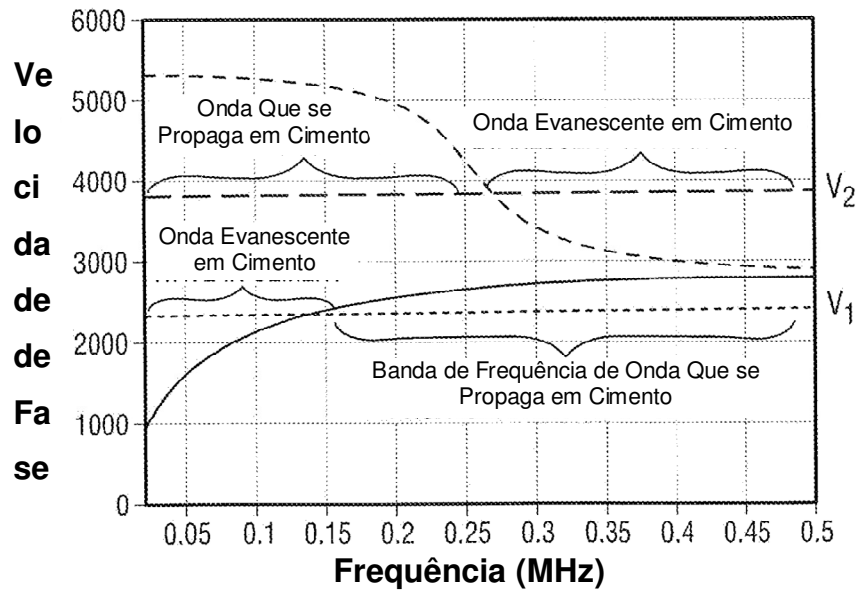


Figura 6

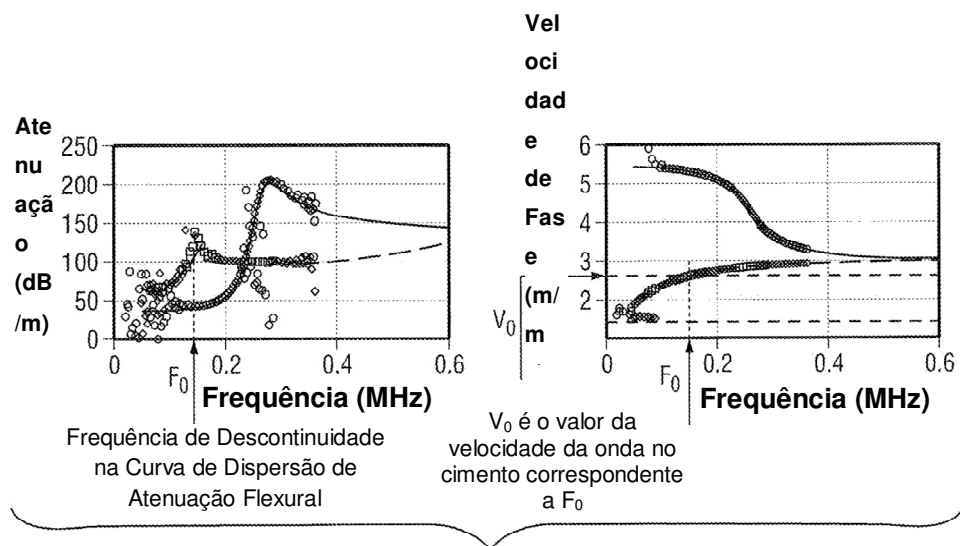


Figura 7

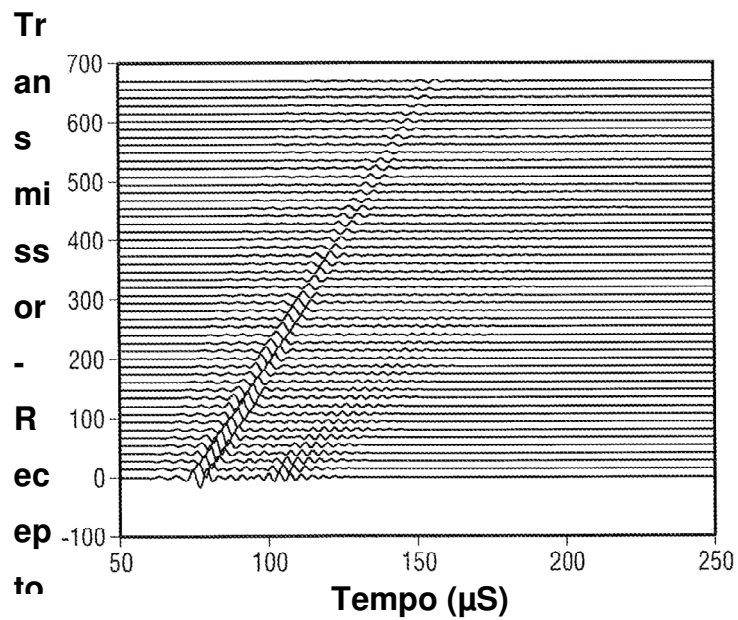
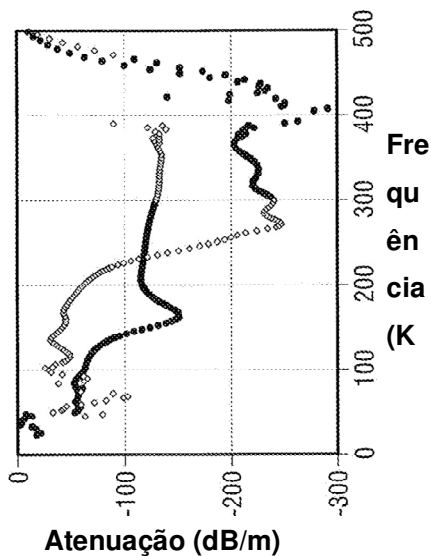
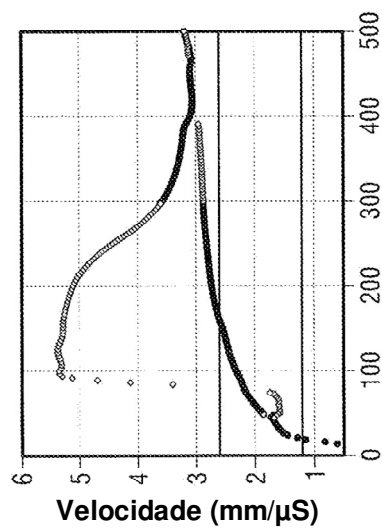
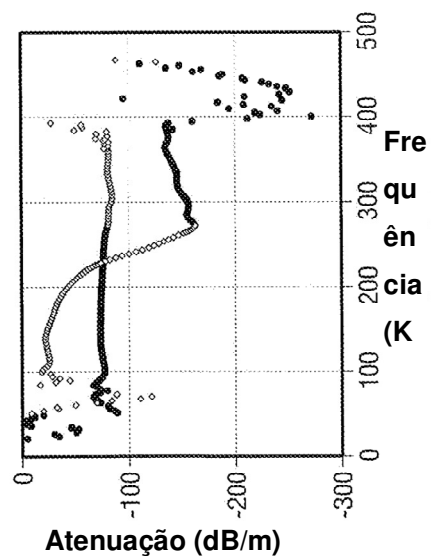
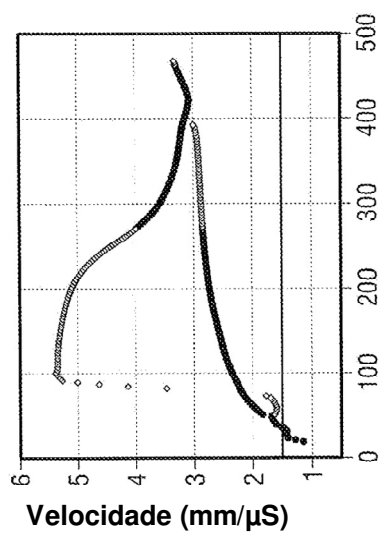


Figura 8

Fi
gu
ra
10Fi
gu
ra

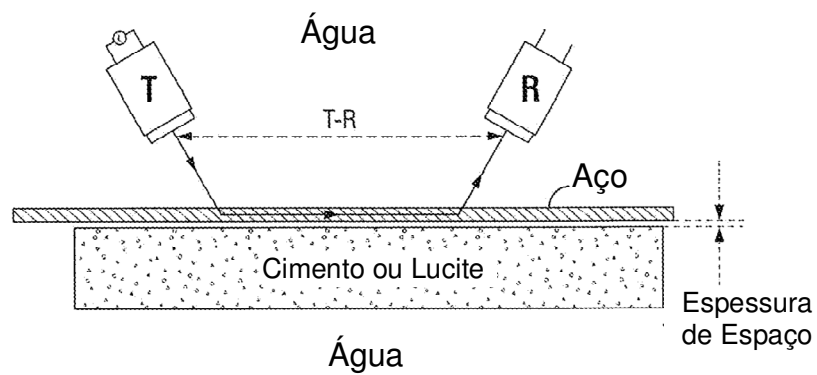


Figura 11

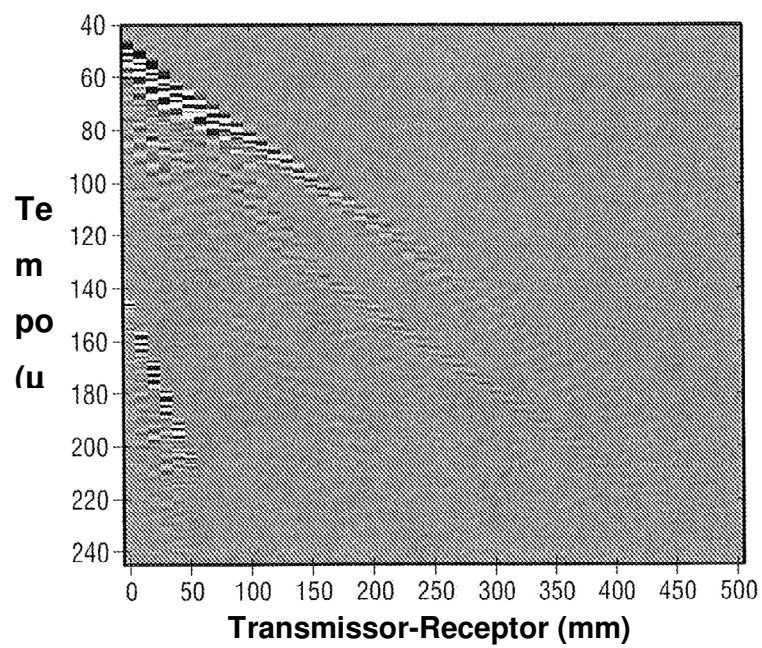
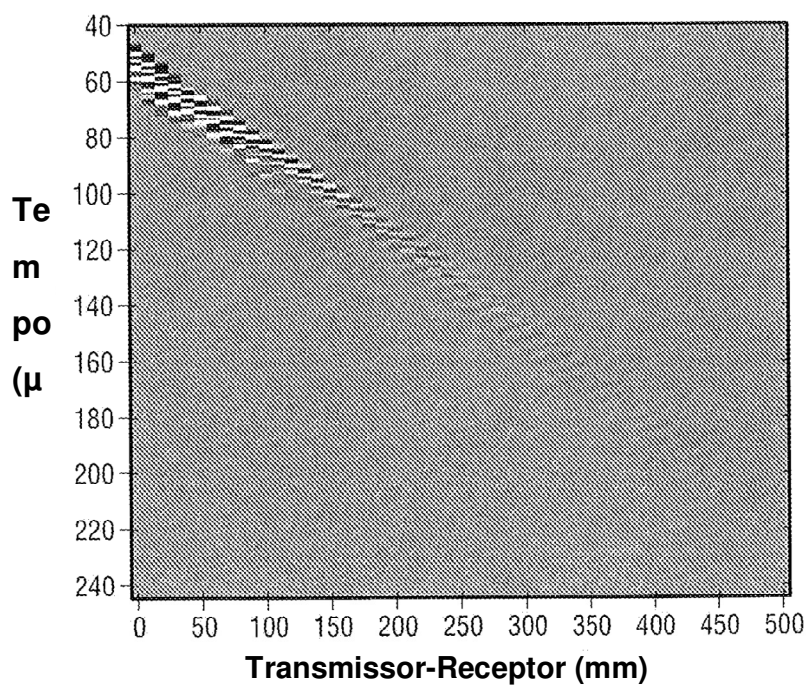
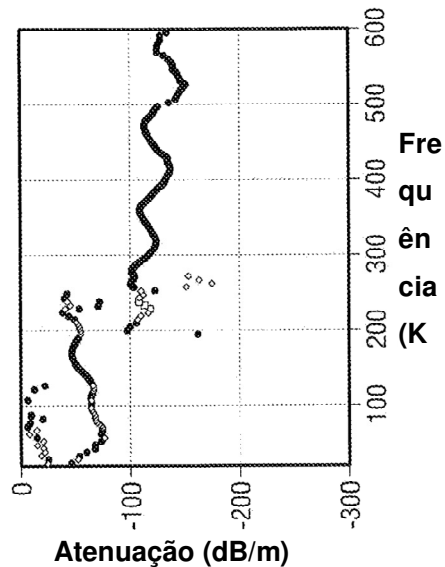
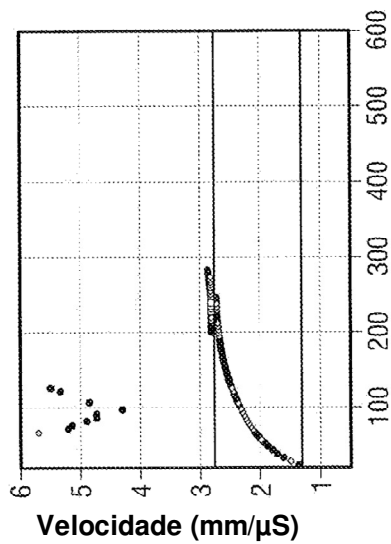
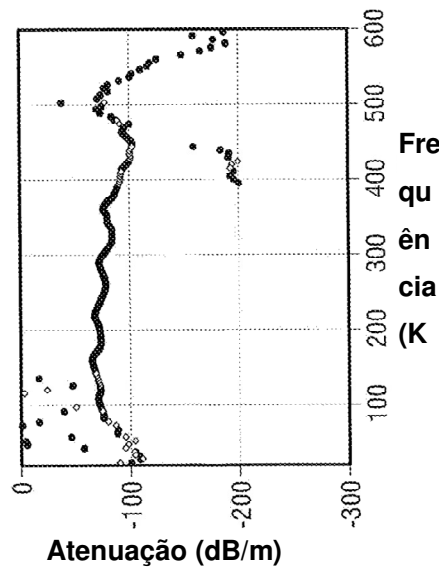
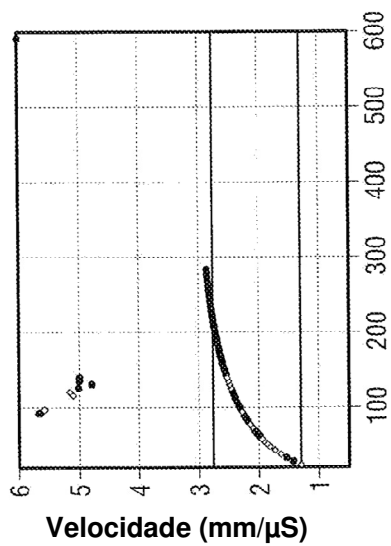


Figura 12

**Figura 13**



**Fig
ura
15**



**Fi
gu
ra
14**

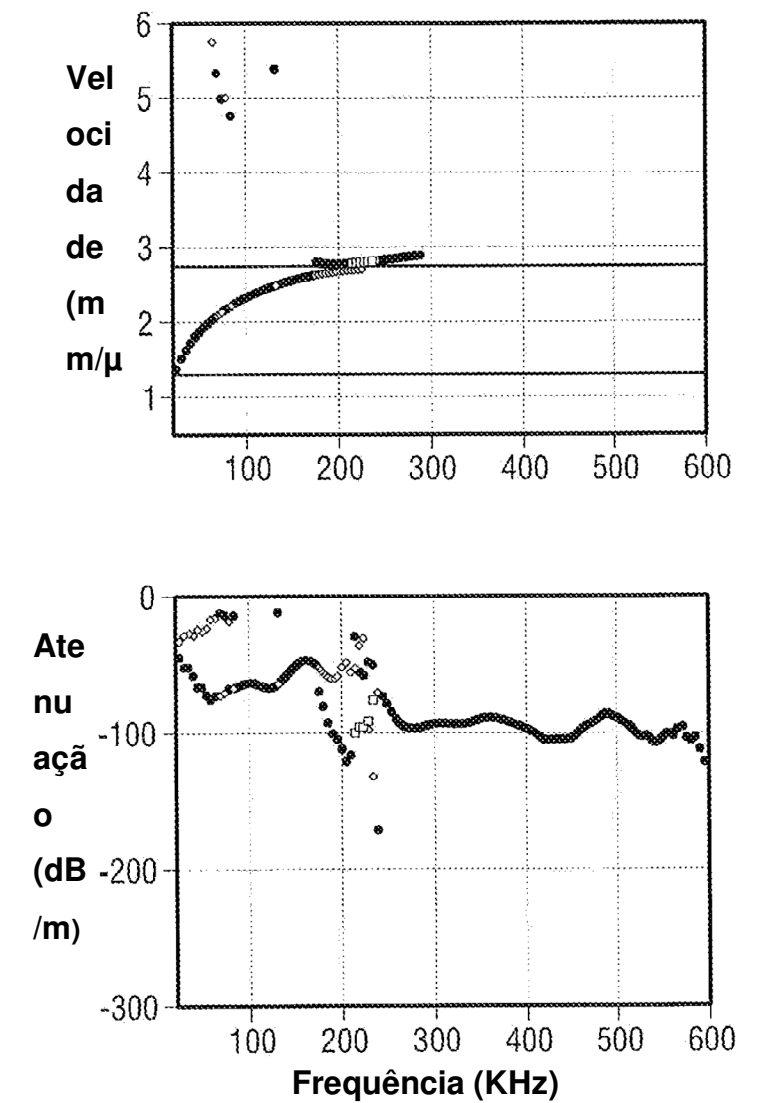
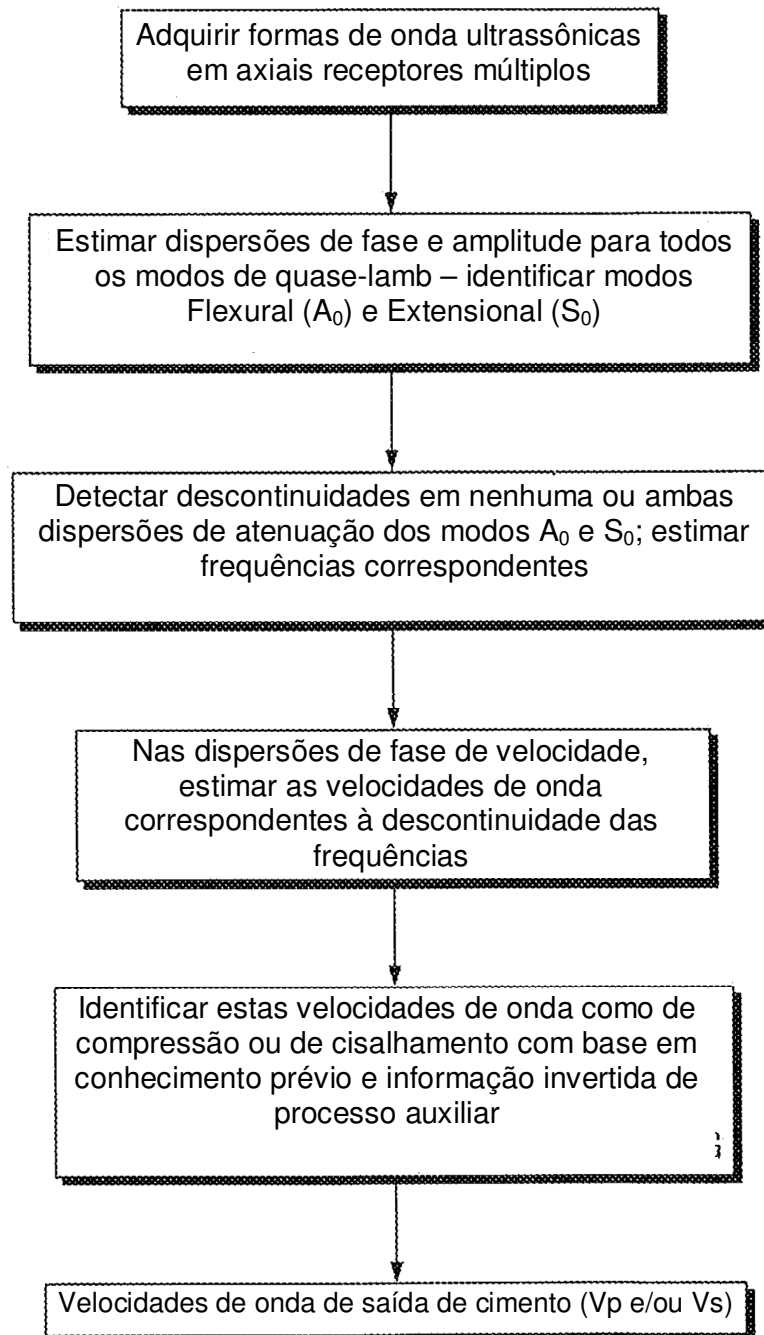


Figura 16

**Figura 17**

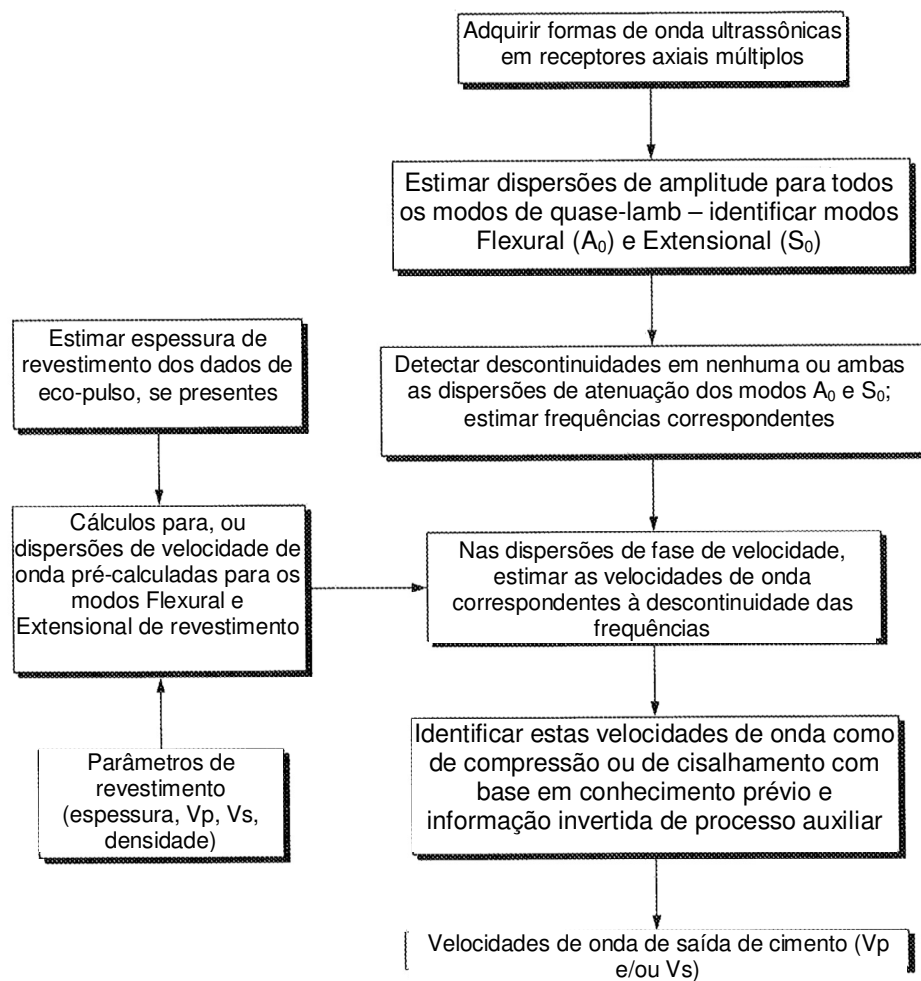


Figura 18

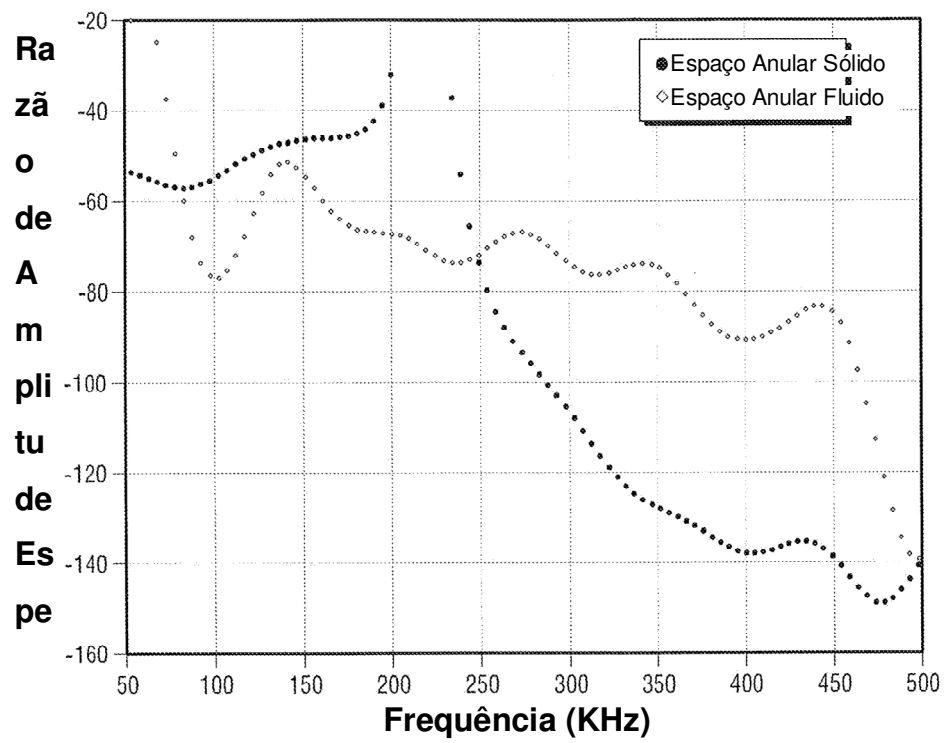


Figura 19

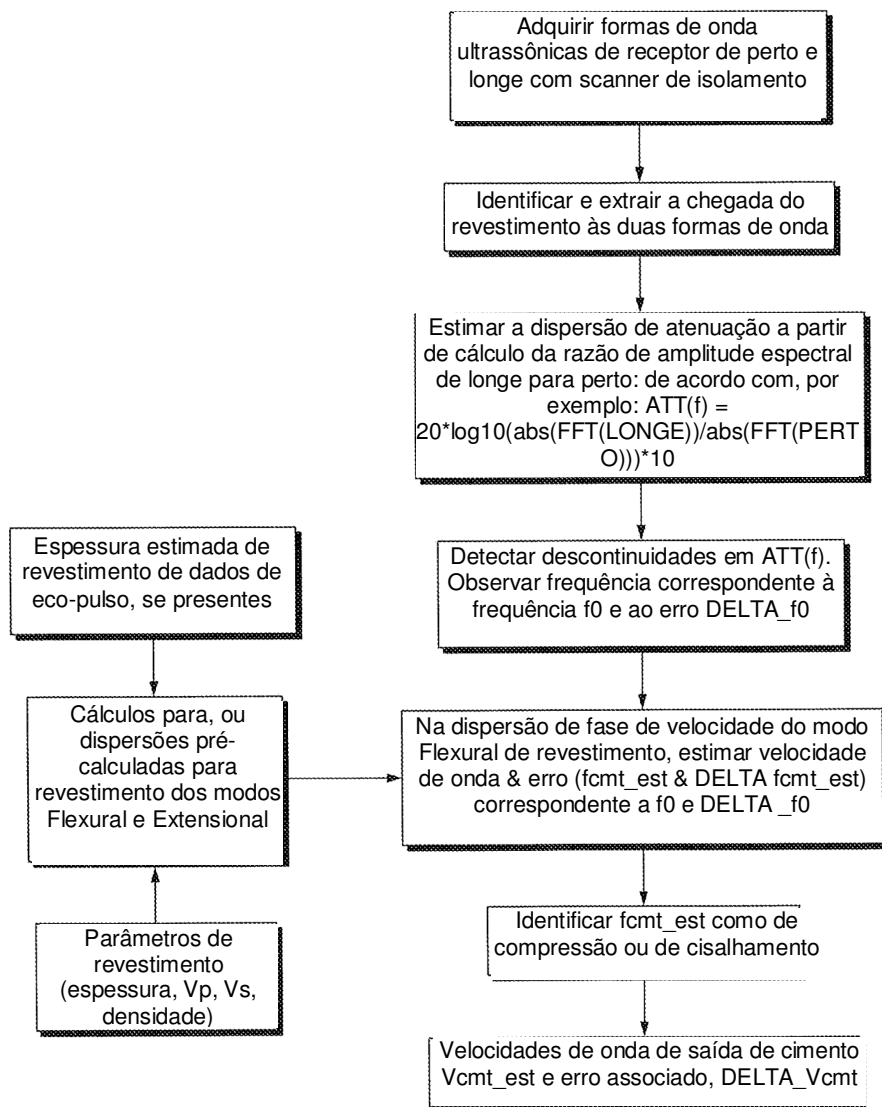


Figura 20

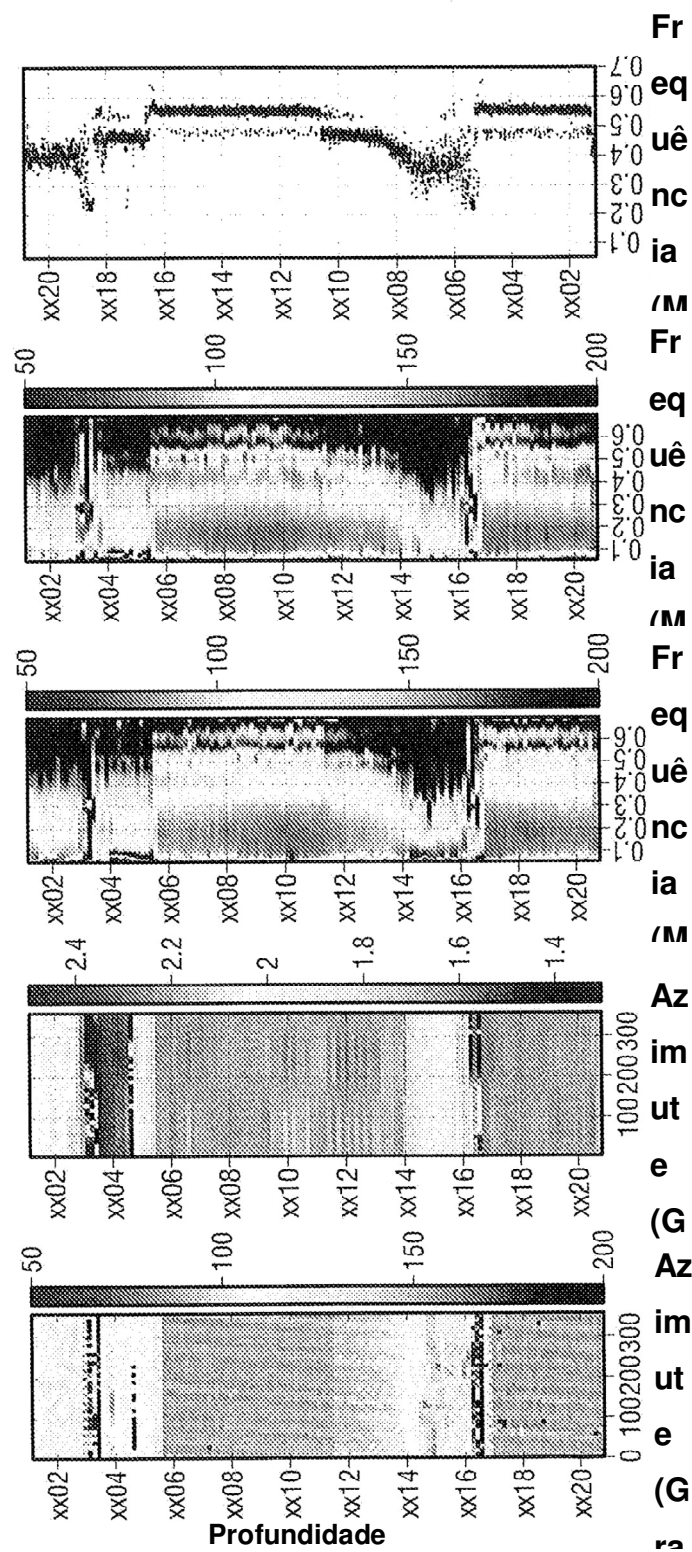


Fig
ura
21