

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MODELAMENTO E CORREÇÃO DE DESCENTRALIZAÇÃO DAS
IMAGENS DE TEMPO DE TRÂNSITO**

ANNA CARMELA FISCHETTI



**BELÉM
2003**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

MODELAMENTO E CORREÇÃO DE DESCENTRALIZAÇÃO DAS IMAGENS DE TEMPO DE TRÂNSITO

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

ANNA CARMELA FISCHETTI

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data da aprovação:

Nota:

COMITÊ DE TESE:

Prof. Dr. André José Neves Andrade (Orientador)

Prof. Dr. Jadir da Conceição da Silva

Profa. Dra. Valquíria Gusmão Macedo

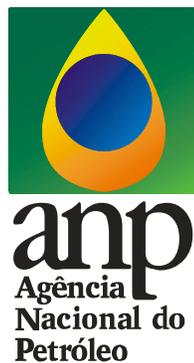
BELÉM
2003

Dedico este trabalho à minha família e, em especial, aos meus queridos pais Giuseppe Fischetti e Maria da Conceição Rocha Fischetti, por estarem sempre ao meu lado, dando-me incentivo e apoio nas horas mais difíceis, permitindo-me chegar aonde cheguei.

Ao meu orientador, Prof. Dr. André Andrade, pela colaboração, amizade e preciosos ensinamentos obtidos durante todas as etapas, os quais foram fundamentais para a realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus agradecimentos ao programa de recursos humanos patrocinado pela Agência Nacional do Petróleo (PRH 006) pela concessão de bolsa de estudos, bem como ao CNPq e ao convênio de infra-estrutura ANP/FINEP – UFPa.



SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	iv
RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	2
1- INTRODUÇÃO.....	3
2- METODOLOGIA.....	4
2.1- A FERRAMENTA UBL.....	4
2.2- MODELAMENTO DAS IMAGENS DE TEMPO DE TRÂNSITO.....	14
2.3- CORREÇÃO DO EFEITO DA DESCENTRALIZAÇÃO.....	19
3- RESULTADOS.....	22
3.1- MODELAMENTO DAS IMAGENS DE TEMPO DE TRÂNSITO.....	22
3.1.1- Poço Ovalizado.....	23
3.1.2- Poço com Desmoronamento.....	32
3.2- CORREÇÃO DO EFEITO DA DESCENTRALIZAÇÃO DA FERRAMENTA.....	41
3.2.1- Poço Ovalizado.....	41
3.2.2- Poço com desmoronamento.....	43
4- CONCLUSÕES.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS:

- Figura 1: (a) Visão geral da ferramenta de imageamento ultrassônico do poço (UBI) e (b) Vista em detalhe do transdutor ultrassônico montado na base da ferramenta.....5
- Figura 2: Princípio do imageamento ultrassônico do poço. As duas medidas registradas pela ferramenta: tempo de trânsito e amplitude refletida são obtidas a partir do processamento dentro do poço.....6
- Figura 3: Percurso em espiral realizado pela varredura ultrassônica da parede do poço a alta (direita) e baixa (esquerda) velocidade.....6
- Figura 4: Imagem da amplitude refletida em um carbonato destacando seu abundante fraturamento.....9
- Figura 5: Desmoronamentos vistos nas imagens da amplitude refletida e do tempo de trânsito, caracterizando-se pela criação de bandeamentos nas imagens (acima) e na seção transversal do poço (B-B) construída a partir dos dados de tempo de trânsito (abaixo). Note uma pequena rotação azimutal em relação à direção Leste-Oeste dos desmoronamentos.....11
- Figura 6: Um poço afetado pelo movimento do rejeito direcional durante a perfilagem. A seção transversal mostra que dois círculos de raios iguais, mas com centros afastados podem ser ajustados. Este afastamento corresponde a quantidade do deslizamento na direção horizontal....12
- Figura 7: Imagens ultrassônicas de uma seqüência de arenito com estratificação cruzada mostrando superfícies vizinhas (senóides verdes) e camadas com estratificação cruzada (senóides vermelhas). As profundidades estão em *pés*.....13

Figura 8: Analogia entre a questão da Teoria da Elasticidade que define uma placa sólida de dimensão lateral infinita submetida ao efeito de um furo circular e uma camada reservatório pouco espessa atravessada por um poço gerando a aparição de um campo de tensões.....	14
Figura 9: Círculo de Mohr representando as tensões tangencial (σ_{θ}) e radial (σ_r) como as tensões principais máxima e mínima, respectivamente.....	16
Figura 10: Geometria envolvida na correção do efeito da descentralização da ferramenta.....	20
Figura 11: Pares de tensões horizontais principais (σ_H) e secundárias (σ_h) atuando em um poço, mostrando o efeito que as mesmas podem causar no poço.....	23
Figura 12: Seção transversal do poço estando a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal principal maior do que o par de tensões horizontal secundária.....	24
Figura 13: Seção transversal do poço estando a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária maior do que o par de tensões horizontal principal.....	25
Figura 14: Seção transversal do poço estando a ferramenta descentralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal principal maior do que o par de tensões horizontal secundária.....	26
Figura 15: Seção transversal do poço estando a ferramenta descentralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária maior do que o par de tensões horizontal principal.....	27
Figura 16: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta centralizada em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal principal maior do que o par de tensões horizontal secundária.....	28

Figura 17: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta centralizada em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária maior do que o par de tensões horizontal principal.....	29
Figura 18: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta descentralizada em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal principal maior do que o par de tensões horizontal secundária.....	30
Figura 19: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta descentralizada em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária maior do que o par de tensões horizontal principal.....	31
Figura 20: Seção transversal do poço estando a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal principal muito maior do que o par de tensões horizontal secundária, caracterizando o desmoronamento nesta direção.....	33
Figura 21: Seção transversal do poço estando a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária muito maior do que o par de tensões horizontal principal, caracterizando o desmoronamento nesta direção.....	34
Figura 22: Seção transversal do poço estando a ferramenta descentralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal principal muito maior do que o par de tensões horizontal secundária, caracterizando o desmoronamento nesta direção.....	35
Figura 23: Seção transversal do poço estando a ferramenta descentralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária muito maior do que o par de tensões horizontal principal, caracterizando o desmoronamento nesta direção.....	36
Figura 24: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta centralizada em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal principal muito maior do que o par de tensões horizontal secundária.....	37

Figura 25: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta centralizada em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária muito maior do que o par de tensões horizontal principal.....	38
Figura 26: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta descentralizada em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal principal muito maior do que o par de tensões horizontal secundária.....	39
Figura 27: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta descentralizada em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária muito maior do que o par de tensões horizontal principal.....	40
Figura 28: Imagem de tempo de trânsito gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal principal maior do que o par de tensões horizontal secundária.....	42
Figura 29: Imagem de tempo de trânsito gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária maior do que o par de tensões horizontal principal.....	43
Figura 30: Imagem de tempo de trânsito gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal principal muito maior do que o par de tensões horizontal secundária.....	44
Figura 31: Imagem de tempo de trânsito gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária muito maior do que o par de tensões horizontal principal.....	45

RESUMO

As imagens da parede do poço obtidas através da ferramenta UBI (Ultrasonic Borehole Imager) são amplamente utilizadas por geólogos e engenheiros de petróleo para identificar eventos geológicos nas paredes de poços abertos e na inspeção dos tubos de revestimento, uma vez que este perfil praticamente fornece uma fotografia da parede do poço.

As ferramentas de imageamento acústico produzem imagens do tempo de trânsito e da amplitude do pulso acústico gerado pela ferramenta e refletido na parede do poço. Entretanto, estas imagens podem ter uma interpretação não realista, uma vez que elas podem ter seu aspecto alterado em razão do movimento da ferramenta no interior do poço.

Este trabalho apresenta o modelamento das imagens de tempo de trânsito a partir da aplicação do critério de Coulomb para a ruptura da parede do poço submetida a um estado plano de tensões, a qual fornecerá a seção do poço, que é a forma geométrica que será traçada pela ferramenta de imageamento acústico do poço.

O deslocamento ascensional da ferramenta e as imperfeições da parede do poço, normalmente, são os responsáveis pelo deslocamento da posição do transdutor em relação ao eixo do poço. Este efeito pode ter grande responsabilidade nas imperfeições das imagens de tempo de trânsito. Assim, a correção dessas imagens, chamada de correção da descentralização, busca o reposicionamento do transdutor para a posição do eixo do poço.

Apresenta-se, também, um método de correção do efeito da descentralização da ferramenta baseado neste modelamento. O método é proposto com base na geometria analítica plana e no método do raio para a definição do tempo de trânsito do pulso acústico, com o objetivo de reconstruir as imagens de tempo de trânsito obtidas com a ferramenta descentralizada, ou seja, corrigir estas imagens tornando-as como se fossem obtidas com a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço.

ABSTRACT

The imaging tools used to borehole wall features identification have been largely utilized by geologist and oil engineers to identify geological events in a open hole and inspect the casing tube.

The acoustic borehole imaging tools generate a transit time image and an acoustic amplitude image that are used to this proposes. However those logs may have a non-realist interpretation, since some tools effect can negatively influence in the images appearance.

This paper presents a transit time image model starting from the application of the Coulomb's approach to the borehole wall rupture submitted to a plane state of tensions which will supply the borehole section that is the geometric form that will be mapped by the acoustic borehole imaging toll.

The tool up displacement and the borehole wall imperfections are usually the responsible for the transducer displacement in relation to the borehole axis. This effect may have important responsibility in the acoustic images imperfections. Thus, a computational process of transducer repositioning in the borehole axis position obtains the correction of those images, called decentralization correction.

A method of tool decentralization effect correction is presented too based on this model which is proposed based on the plane analytic geometry and in the ray method to the definition of the transit time of the acoustic pulse, with the objective of reconstruct the transit time images achieved by the decentralized tool, that is to say, correct these images becoming as they were achieved by the centralized tool in relation to the borehole axis.

1- INTRODUÇÃO

As novas tendências da perfilagem de poço estão ampliando o uso dos perfis de imageamento da parede do poço, uma vez que estes perfis, praticamente, fornecem uma fotografia da parede do poço, através do registro da amplitude refletida e do tempo de trânsito do pulso acústico. O perfil de imagens ultrasônicas do poço (UBI) identifica as características da parede do poço pelo registro de uma fotografia acústica e está sendo um grande aliado, na determinação dessas características.

Entretanto, essas imagens podem apresentar interpretações enganosas, com a ocorrência da descentralização da ferramenta em relação ao eixo do poço, que influencia negativamente na imagem produzida, gerando, então, imagens completamente diferentes do que seriam as imagens reais.

Algumas propostas para a correção do efeito da descentralização da ferramenta nas imagens ultrasônicas de poço foram apresentadas, onde se pode citar Hayman et al. (1998), os quais usam um algoritmo para a correção do efeito da descentralização da ferramenta em um computador na superfície, a partir dos dados obtidos dentro do poço de amplitude refletida e tempo de trânsito, onde este algoritmo não é afetado pela presença de fraturas e desmoronamentos verticais. Cita-se, também, Menger (1994), o qual usa um método determinístico para corrigir o efeito da descentralização da ferramenta nas imagens de amplitude refletida, a partir da posição da ferramenta no poço junto com as curvas características de calibração da ferramenta medidas no laboratório.

Apresenta-se uma proposta para o modelamento das imagens de tempo de trânsito, a qual fornecerá um modelo da parede do poço tanto com a ferramenta centralizada como com a ferramenta descentralizada em relação ao eixo do poço, a partir da aplicação do critério de Coulomb para a ruptura da parede do poço submetida a um estado plano de tensões (Bell, 1990).

A partir deste modelamento é apresentada uma proposta para a correção do efeito da descentralização da ferramenta nas imagens de tempo de trânsito, com base na geometria analítica plana e no método do raio (Psencik, 1994), com o objetivo de gerar novas imagens, a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta.

2- METODOLOGIA

Nesta seção, apresenta-se o modelamento das imagens de tempo de trânsito para a ferramenta centralizada, bem como para a ferramenta descentralizada em relação ao eixo do poço e o método de correção do efeito da descentralização da ferramenta baseado neste modelamento, começando com a descrição da ferramenta, a qual fornece informações técnicas importantes, assim como, uma descrição das imagens por ela obtidas e suas principais aplicações; o modelamento da imagem de tempo de trânsito desenvolvido a partir de um modelo da parede do poço; e o método de correção do efeito da descentralização da ferramenta baseado na geometria analítica plana e no método do raio.

2.1- A FERRAMENTA UBI

A ferramenta consiste de uma sonda com um transdutor ultrasônico giratório de 7,5 rev/seg na parte inferior e um cartucho eletrônico na parte superior (Figura 1a).

O elemento principal é o transdutor ultrasônico que também atua como um receptor (Figura 1b). Ele é conduzido por um motor, a fim de rotacionar ao redor do eixo da ferramenta algumas vezes por segundo, durante o qual ele emite pequenos pulsos ultrasônicos. O pulso propaga-se através da lama do poço, reflete na superfície da parede do poço e então retorna ao transdutor (Figura 2). Duas quantidades são medidas:

- O intervalo de tempo de trânsito, definido como o tempo necessário para o pulso ir do transdutor à parede do poço e voltar; e
- A amplitude do sinal recebido refletido na parede do poço.

Inicialmente, transdutores com frequências em torno de 2Mhz foram usados, mas em ferramentas mais novas esta frequência foi diminuída para poucas centenas de Khz. A amostragem azimutal nas primeiras ferramentas era acima de 600 amostras por rotação, resultando em um espaçamento azimutal de menos de 1 grau. As ferramentas modernas têm uma menor razão de amostragem, aproximadamente 180 por rotação, ou uma amostra a cada dois graus. A orientação azimutal do transmissor é obtida pela marcação de cada passagem em relação

à marca de referência da ferramenta (“marca zero”), cuja orientação é obtida a partir de um acelerômetro de três eixos e um magnetômetro instalados na ferramenta.

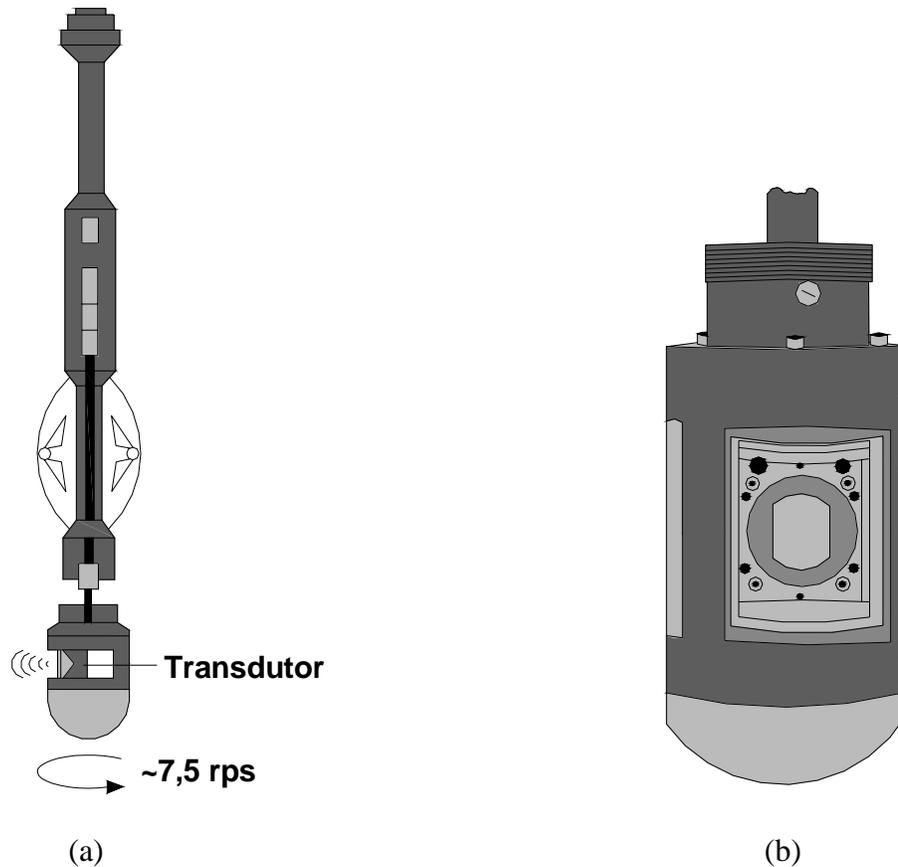


Figura 1: (a) Visão geral da ferramenta de imageamento ultrassônico do poço (UBI) e (b) Vista em detalhe do transdutor ultrassônico montado na base da ferramenta (Luthi, 2001).

A varredura ultrassônica segue um percurso em espiral ascendente ao longo do eixo do poço (ou descendente, dependendo do modo em que a ferramenta é manipulada), por meio do qual o espaçamento da espiral depende da velocidade da perfilagem: quanto mais rápida a ferramenta for perfilada mais espaçado será o percurso da espiral (Figura 3). Assim, a velocidade lenta da perfilagem é principalmente imposta pelo limite vertical da amostragem. Uma razão maior de rotação do transdutor poderia, teoricamente, aumentar a velocidade da perfilagem, mas as considerações mecânicas e a exatidão da orientação azimutal parecem limitar isto.

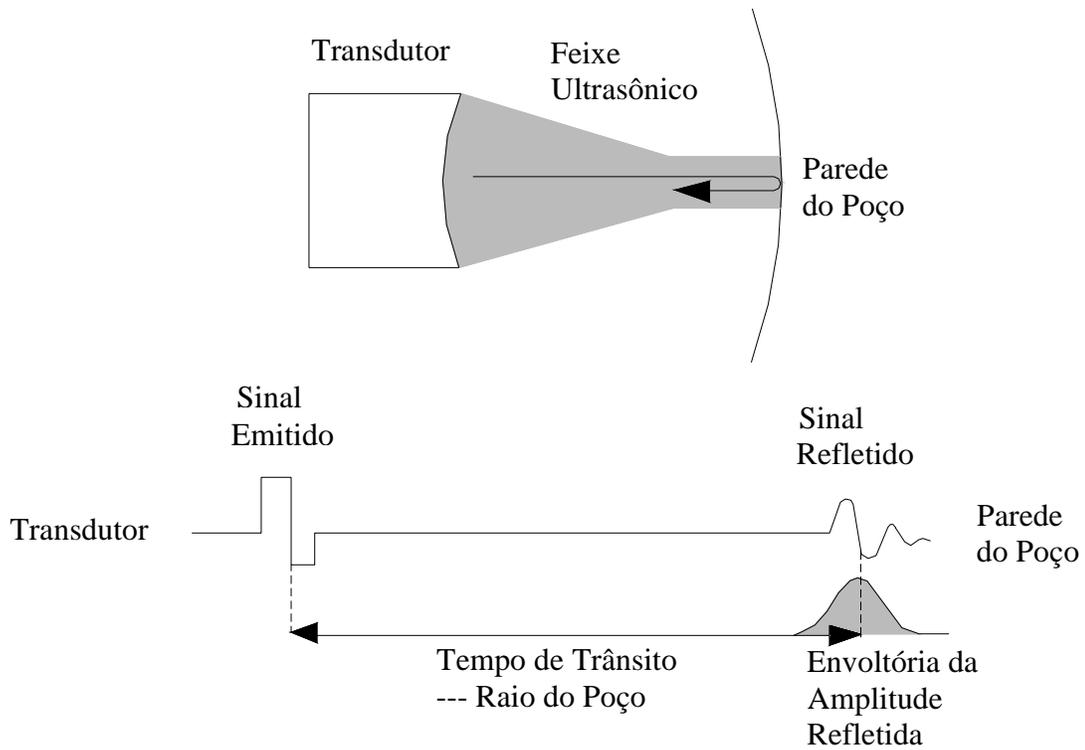


Figura 2: Princípio do imageamento ultrassônico do poço. As duas medidas registradas pela ferramenta: tempo de trânsito e amplitude refletida são obtidas a partir do processamento dentro do poço (Luthi, 2001).

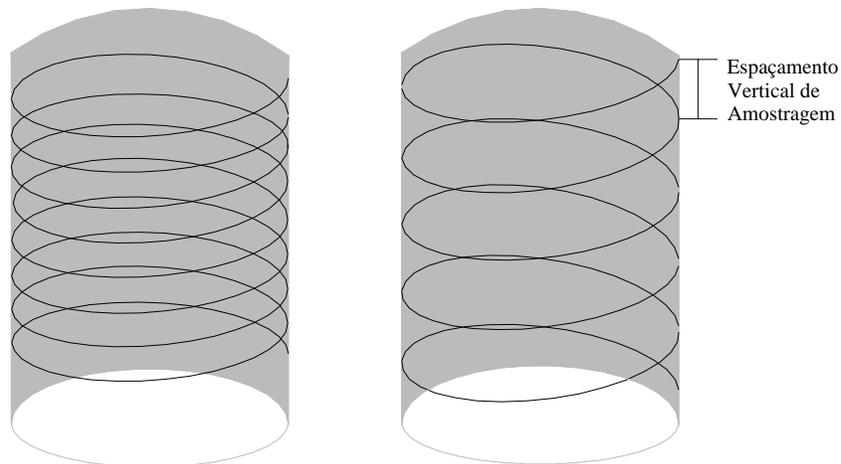


Figura 3: Percurso em espiral realizado pela varredura ultrassônica da parede do poço a alta (direita) e baixa (esquerda) velocidade (Luthi, 2001).

As ferramentas de imageamento ultrassônico do poço contêm um processador interno que digitaliza e filtra os sinais refletidos imediatamente na chegada. Então, eles determinam os picos de reflexão e calculam o tempo de trânsito, assim como a amplitude; o último é feito pelo ajuste de uma envoltória ao redor do sinal de pico (Figura 2). O dado processado é, então, transmitido para a superfície onde é transformado em uma imagem orientada, que pode ser processada futuramente.

Uma importante melhoria nestas ferramentas é a introdução de transdutores focalizados. Estes têm uma superfície côncava que focaliza o feixe em direção ao alvo esperado dentro de uma área menor do que o tamanho do próprio transdutor. Deste modo, a resolução espacial é melhorada e os efeitos da descentralização, assim como, a sensibilidade à rugosidade da parede são reduzidos.

Na ferramenta UBI existe um único transdutor focalizado, o qual pode operar a 250 kHz com uma resolução de 9 mm ou a 500 Khz com uma resolução de aproximadamente 5 mm. O transdutor é montado sobre uma unidade rotativa na base da ferramenta em contato direto com a lama, cujo tamanho pode ser adaptado ao diâmetro do poço a fim de determinar o foco ótimo.

A representação gráfica básica destas medidas é, essencialmente, a mesma das imagens elétricas, com o gráfico profundidade/azimute proposto inicialmente por Zemanek et al. (1970). O esquema de cores é também o mesmo das imagens elétricas, com cores mais luminosas usadas para as maiores amplitudes refletidas e menores raios do poço.

Dentro da discussão da interpretação das imagens ultrassônicas de poço, enfatizaremos as áreas onde estas imagens têm mostrado particular utilidade e nos limitaremos às aplicações em poço aberto. Dentre estas, estão principalmente as aplicações estruturais como:

- Análise das fraturas;
- Análise da forma do poço: desmoronamentos, deslizamentos, ovalizações; e
- Análise do acamamento

Análise das Fraturas

As fraturas estão entre as mais proeminentes características nas imagens ultrasônicas de poço, obtidas a partir das imagens da amplitude refletida e têm sido descritas desde os primeiros trabalhos até agora. Enquanto mergulhos e azimutes das fraturas podem ser convenientemente estimados (exceto em poços ovalizados), as aberturas das fraturas não podem ser obtidas. O curto comprimento de onda usado no imageamento ultrasônico do poço se dá praticamente na superfície do poço e um leve lascamento ou alargamento das fraturas pode fazer com que elas apareçam largas. A Figura 4 mostra um exemplo de carbonato fraturado onde se pode destacar a presença de fraturas inclinadas, uma vez que se percebe, claramente, a aparência senoidal das fraturas na imagem da amplitude refletida, caracterizando uma determinada inclinação das fraturas em relação ao eixo do poço. Observa-se, ainda, no mínimo dois grupos de fraturas presentes, com um aparecendo mais largo do que o outro. Entretanto, devido a seus íngremes mergulhos, estas fraturas “mais largas” estão mais propensas ao lascamento e suas larguras podem, verdadeiramente, ser menores do que aquelas do outro grupo.

Análise da Forma do Poço

As imagens de tempo de trânsito e, em uma proporção inferior, a imagem da amplitude refletida contém informações valiosas sobre a geometria do poço em uma resolução muito alta. As de interesse particular são:

- Desmoronamentos do poço;
- Alargamentos do poço, causados por uma variedade de fatores; e
- Deslocamento do poço devido o deslizamento.

Os desmoronamentos são causados pela concentração de tensões em um regime de tensões anisotrópico, permitindo uma fratura cisalhante, antes que os esforços normais sejam suficientemente grandes para desestabilizar o poço. Isto resulta em duas áreas alargadas e defeituosas em lados opostos do poço. Elas podem ser vistas na imagem da amplitude refletida como zonas de baixa reflexividade, enquanto que a imagem de tempo de trânsito as mostra como

locais de alargamentos, ou seja, gera a criação de um bandejamento na imagem de tempo de trânsito, com a formação de faixas de cores alternadas (claras e escuras), caracterizando uma desuniformidade na seção transversal do poço. A Figura 5 mostra desmoronamentos na curva usual de profundidade/azimute e na seção transversal do poço, estando isto bem caracterizado no bandejamento das imagens.

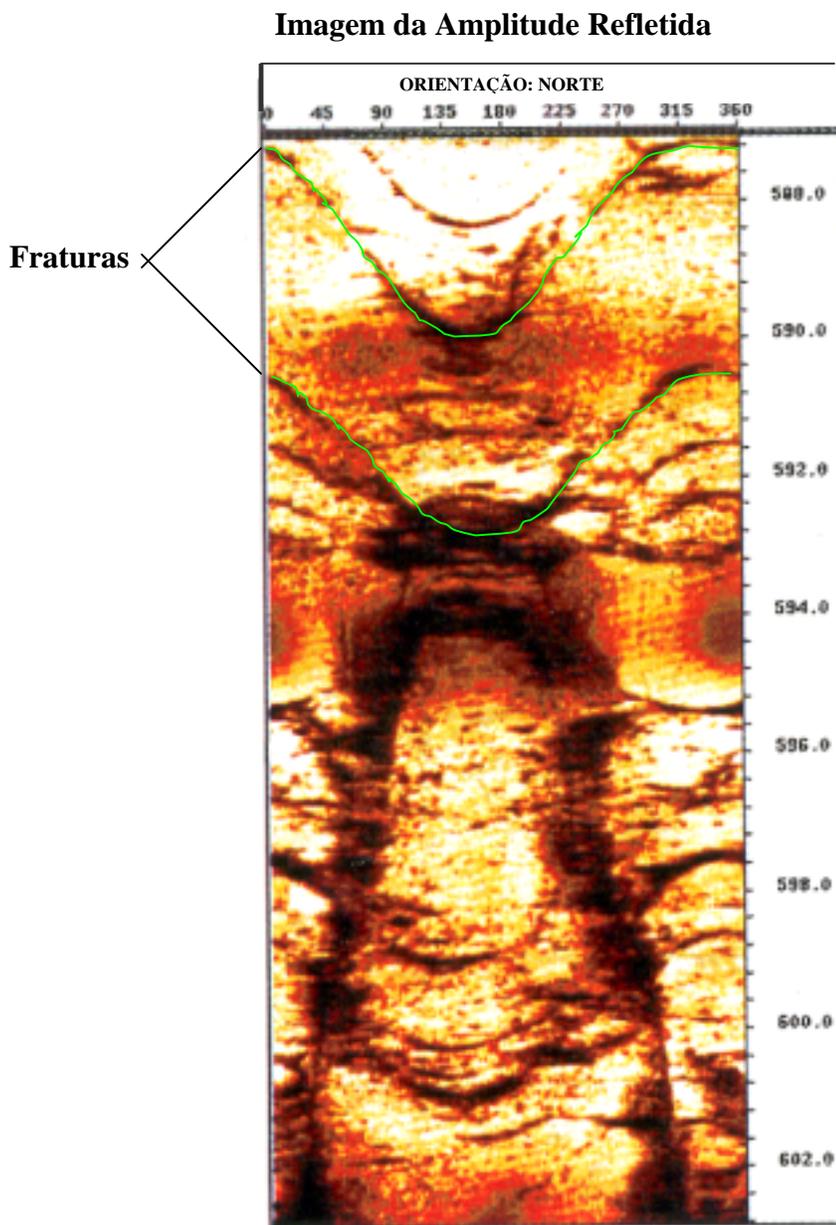


Figura 4: Imagem da amplitude refletida em um carbonato destacando seu abundante fraturamento (Luthi, 2001).

Os alargamentos do poço são comumente observados nas imagens ultrassônicas de poço e certos cuidados tem que ser tomados para não confundí-los com desmoronamentos. Os gráficos da seção transversal do poço são úteis nesta tarefa. Os alargamentos do poço podem ser causados por uma série de fatores, onde se pode citar um de grande importância:

- As tensões anisotrópicas ou as propriedades das rochas podem conduzir a alargamentos elípticos do poço (“ovalização”).

O deslocamento do poço devido ao deslizamento que é um fenômeno que foi descoberto apenas recentemente usando imagens ultrassônicas do poço (Cornet et al., 1997). A Figura 6 mostra a imagem de uma seção transversal de um poço interceptando uma falha junto com um gráfico em espiral do poço. Inspeções minuciosas no gráfico da seção transversal do poço revelam que existem duas partes do poço, ambas perfeitamente na medida, como indicado pelo ajuste dos círculos correspondentes, em tamanho, ao diâmetro da broca. Os centros destes dois círculos são alterados em alguns centímetros. Isto não é, portanto, um dos tipos de alargamentos mencionados acima. Mais propriamente, o poço moveu-se ao longo da falha, provavelmente porque a lama de perfuração invadiu a falha e reduziu seu atrito fazendo com que a falha se reative. A forma do poço indica um movimento do rejeito direcional, com o deslocamento dos dois centros dos círculos indicando a quantidade de movimento.

Análise do Acamamento

A análise do acamamento a partir das imagens da amplitude refletida é, muitas vezes, difícil devido à baixa razão sinal/ruído. Ela é, portanto, proveitosa para resumir aqueles fatores externos que afetam a qualidade da imagem, a maioria é:

- Rugosidade do poço: quanto mais liso melhor;
- Fluido da lama: a água é melhor do que o óleo;
- Peso da lama: quanto mais leve melhor;
- Transdutores: as maiores frequências dão uma melhor resolução, mas o sinal é mais fraco;
- Perfilagem: as velocidades mais lentas dão uma melhor resolução.

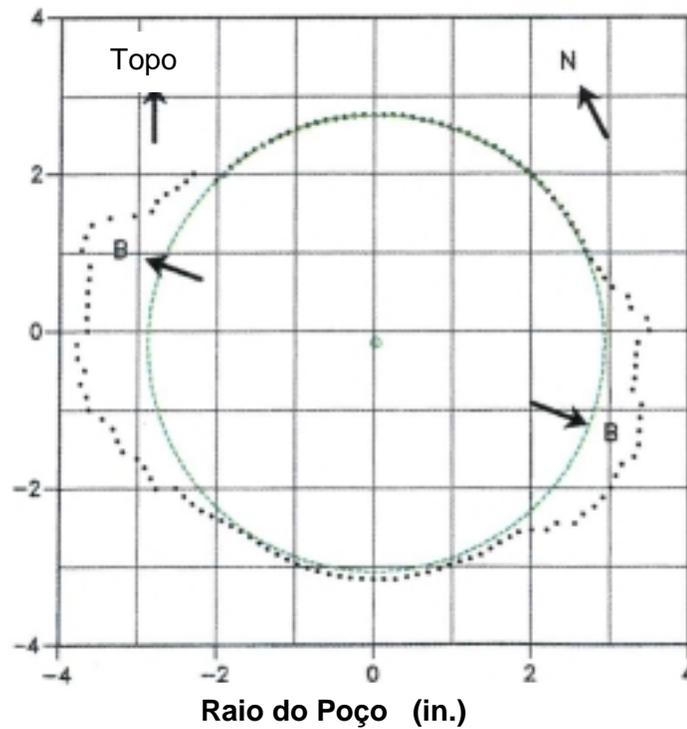
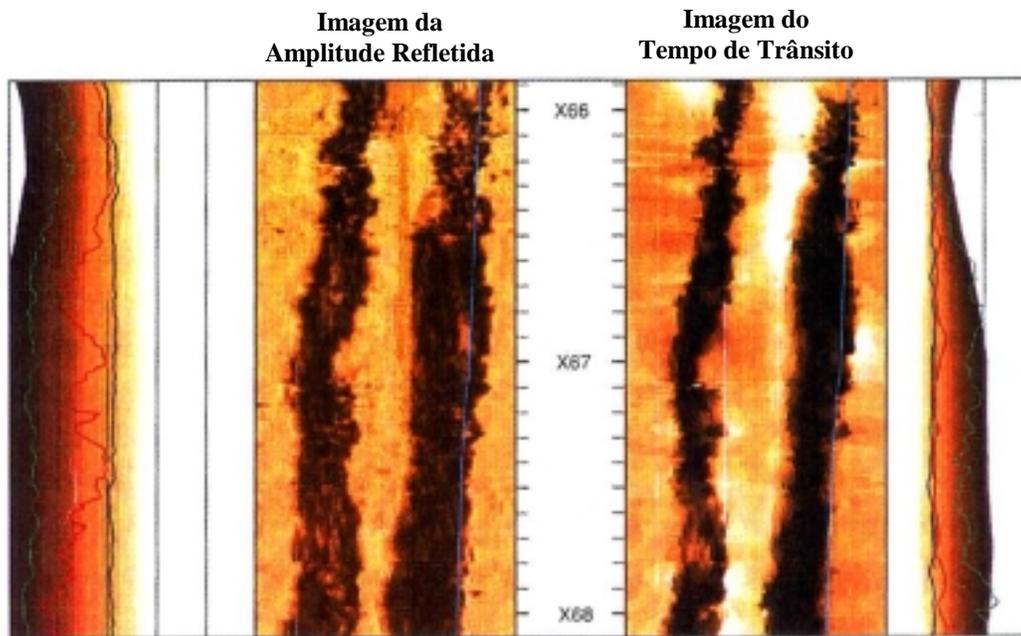


Figura 5: Desmoronamentos vistos nas imagens da amplitude refletida e do tempo de trânsito, caracterizando-se pela criação de bandeamentos nas imagens (acima) e na seção transversal do poço (B-B) construída a partir dos dados de tempo de trânsito (abaixo). Note uma pequena rotação azimutal em relação à direção Leste-Oeste dos desmoronamentos (Luthi, 2001).

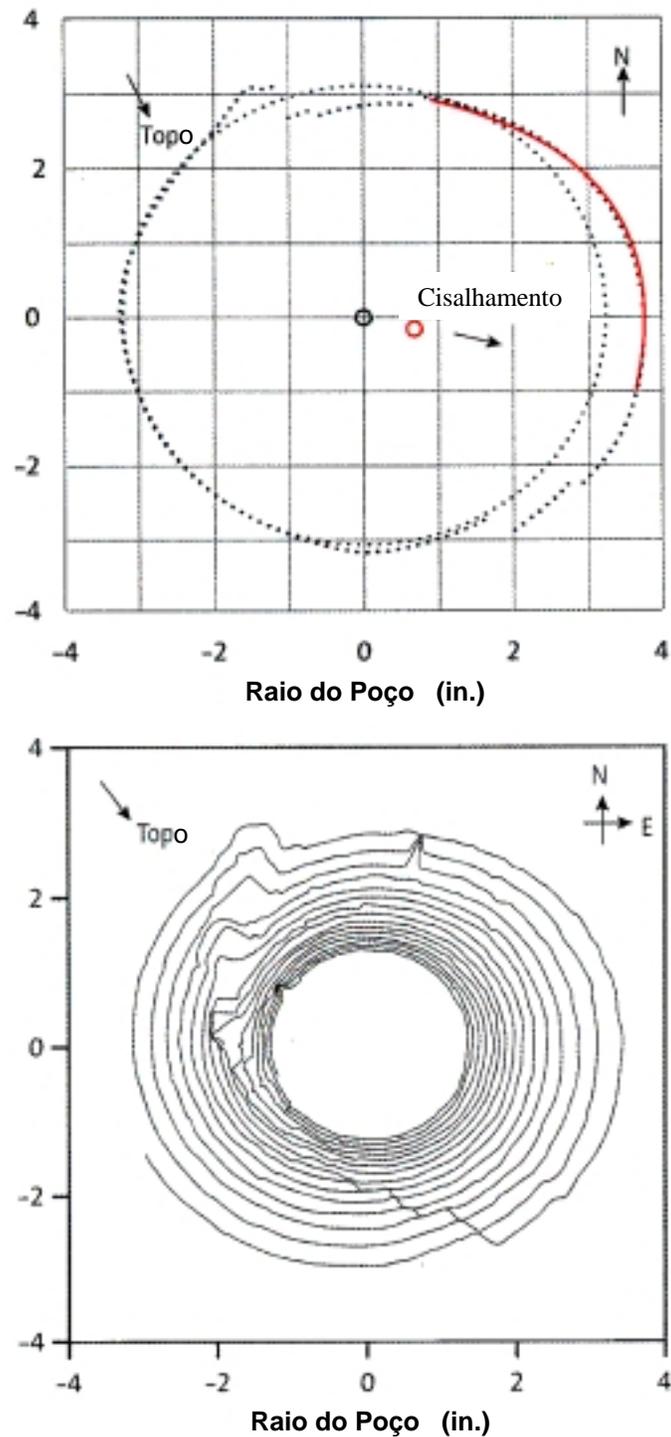


Figura 6: Um poço afetado pelo movimento do rejeito direcional durante a perfilagem. A seção transversal mostra que dois círculos de raios iguais, mas com centros afastados podem ser ajustados. Este afastamento corresponde a quantidade do deslizamento na direção horizontal (Luthi, 2001).

A Figura 7 é um exemplo proveniente de uma seqüência de arenito com estratificação cruzada. As principais interfaces, assim como, as estratificações cruzadas podem ser facilmente distinguidas e seus mergulhos e azimutes podem ser medidos para interpretações sedimentares futuras.

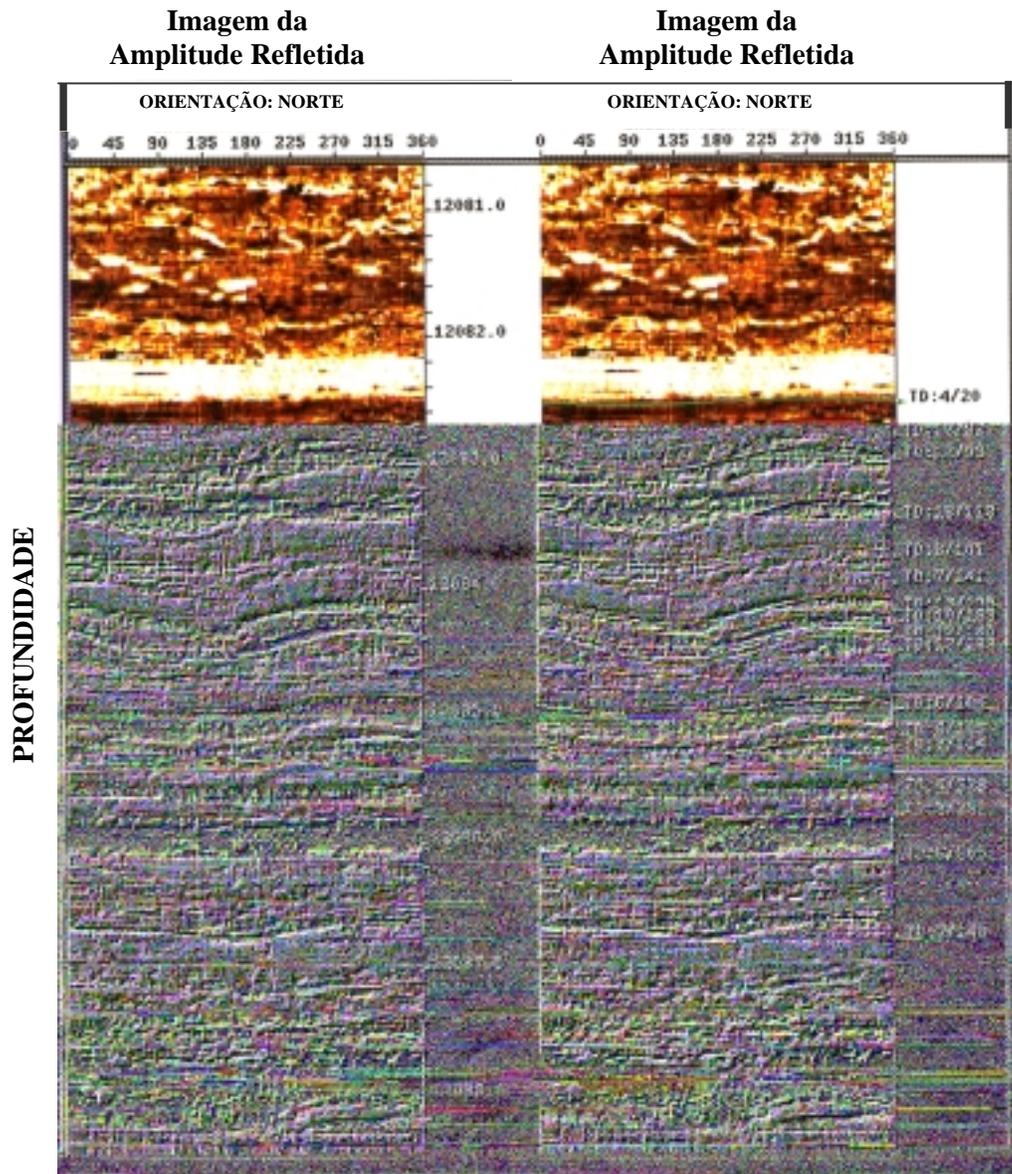


Figura 7: Imagens ultrassônicas de uma seqüência de arenito com estratificação cruzada mostrando superfícies vizinhas (senóides verdes) e camadas com estratificação cruzada (senóides vermelhas). As profundidades estão em *pés* (Luthi, 2001).

2.2- MODELAMENTO DAS IMAGENS DE TEMPO DE TRÂNSITO

Como parte principal do modelamento das imagens de tempo de trânsito tem-se uma questão célebre da Teoria da Elasticidade, a qual considera uma placa sólida de dimensão lateral infinita submetida ao efeito de um furo circular e mantida sob compressão lateral, que transporta-nos à realidade da geofísica de poço onde se tem uma camada reservatório atravessada por um poço, o que, conseqüentemente, gera a aparição de um campo de tensões sob este poço (Figura 8).

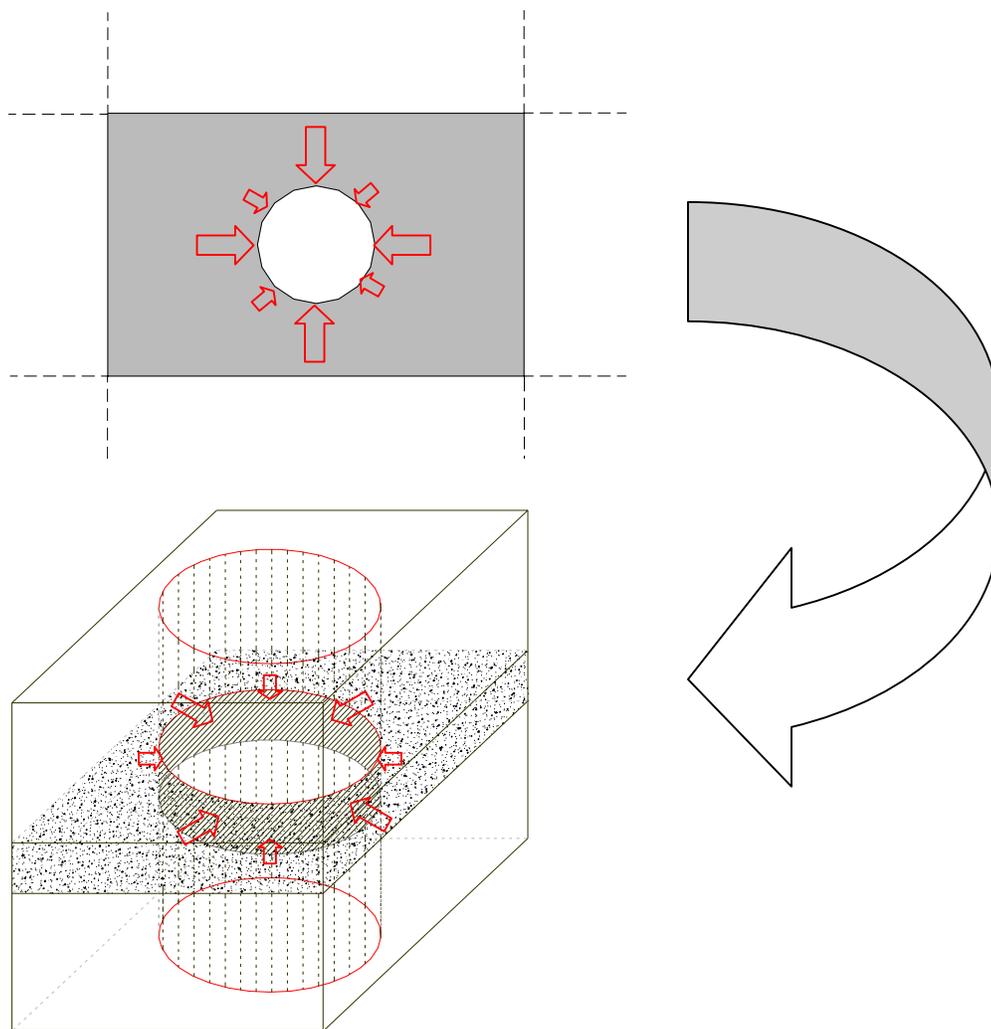


Figura 8: Analogia entre a questão da Teoria da Elasticidade que define uma placa sólida de dimensão lateral infinita submetida ao efeito de um furo circular e uma camada reservatório pouco espessa atravessada por um poço gerando a aparição de um campo de tensões.

Este campo de tensões caracteriza-se pelo par de tensões horizontais, ou seja, tensão horizontal principal (σ_H) e tensão horizontal secundária (σ_h).

A análise destas tensões gerou uma solução para o aparecimento do campo de tensões sob o poço (Bell, 1990), baseada em um sistema de coordenadas cilíndricas, com a origem no centro do poço e o eixo vertical coincidente com o eixo do poço, onde foram desenvolvidas as equações que determinam as tensões atuantes em um ponto qualquer, afastado de uma distancia radial r do eixo do poço, na forma:

$$\sigma_r = \frac{(\sigma_H + \sigma_h)}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(\sigma_H + \sigma_h)}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta, \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta, \quad (3)$$

onde σ_θ é a tensão tangencial, σ_r a tensão radial, $\tau_{r\theta}$ a tensão de cisalhamento no plano $r\theta$, σ_H a tensão horizontal principal, σ_h a tensão horizontal secundária, a é o raio do poço e θ é o ângulo que a direção de σ_H faz com a reta que liga o centro do poço ao ponto r (Figura 9).

Entretanto, para a realidade da geofísica de poço é necessário levar-se em consideração o peso da lama contida no poço, uma vez que ela irá influenciar na estabilidade da parede do poço. Para isso, faz-se uma analogia à solução dada para o cilindro de Lamé (Teoria da Elasticidade), uma vez que se considera que o reservatório possui um diâmetro muito maior que o diâmetro do poço, que a pressão externa ao reservatório é nula e que a pressão na parede do poço é a diferença entre a pressão da lama e a pressão de poros da formação, pode-se, então, modelar a influência da pressão da lama sobre as tensões na vizinhança do poço através das seguintes equações:

$$\sigma_r = \frac{a^2}{r^2} (P_w - P_e), \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{a^2}{r^2} (P_w - P_e), \quad (5)$$

onde P_w é a pressão interna do poço e P_e a pressão estática dos fluidos da formação.

Com isso, tem-se que a soma das contribuições do poço e da lama resultará nas tensões finais atuantes na vizinhança do poço. Então:

$$\sigma_r = \frac{(\sigma_H + \sigma_h)}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 - 4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{a^2}{r^2} (P_w - P_e), \quad (6)$$

$$\sigma_\theta = \frac{(\sigma_H + \sigma_h)}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{a^2}{r^2} (P_w - P_e), \quad (7)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{(\sigma_H - \sigma_h)}{2} \left(1 + 2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta. \quad (8)$$

Estas tensões finais atuantes em um corpo elástico podem ser representadas por um círculo em coordenadas cartesianas (círculo de Mohr), com a tensão normal como abscissa e a tensão cisalhante como ordenada, onde as tensões principais máxima e mínima são as tensões tangencial (σ_θ) e radial (σ_r) que normalmente encontra-se no plano horizontal (Figura 9).

O ápice do círculo representa o valor máximo da tensão de cisalhamento τ e o ponto em que a linha envoltória dos círculos corta o eixo das ordenadas corresponde à resistência da rocha ao cisalhamento τ_0 . A teoria propõe que a região além da envoltória dos círculos de Mohr representa os estados de tensão sob os quais a rocha sofre ruptura, por isso, essa linha é conhecida como envoltória de ruptura.

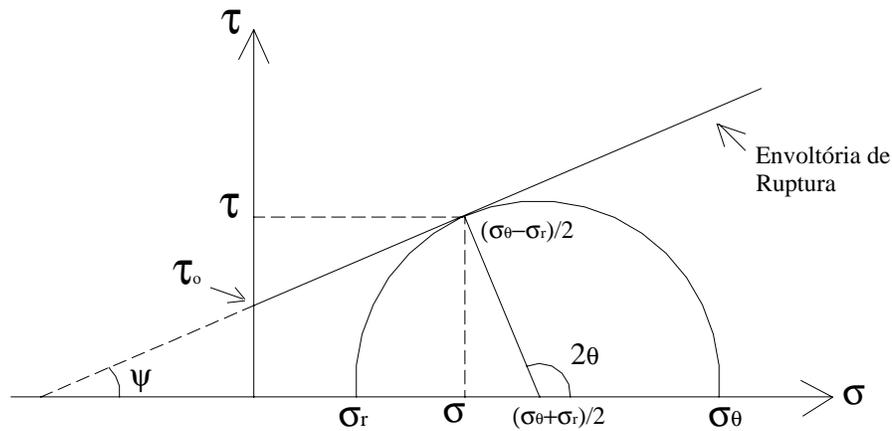


Figura 9: Círculo de Mohr representando as tensões tangencial (σ_θ) e radial (σ_r) como as tensões principais máxima e mínima, respectivamente.

Parte-se, então, para a determinação do raio do poço deformado, ou seja, submetido às tensões descritas anteriormente. Para isso é necessário saber que existem vários mecanismos de instabilidade mecânica possíveis em um poço e, conseqüentemente, vários critérios de ruptura regendo estas instabilidades, porém, uma maneira de chegar-se ao raio do poço deformado é obtida a partir da utilização do critério de ruptura de Coulomb, aplicado apenas à superfície que define a parede do poço. Tem-se, então, que a tensão de cisalhamento crítica (τ_{crit}), necessária para causar a ruptura da formação, é dada por:

$$\tau_{crit} = \tau_o + \mu\sigma, \quad (9)$$

onde τ_o é a resistência da rocha ao cisalhamento, μ o coeficiente de fricção interna da rocha e σ a tensão normal.

Quando o critério de ruptura de Coulomb é representativo do comportamento de uma dada formação, o valor máximo da resistência ao cisalhamento para o qual a rocha sofrerá ruptura (τ_o) pode ser calculado igualando o raio do círculo de Mohr à distância do centro do círculo à linha de ruptura, levando-se em consideração, ainda, que segundo o critério de ruptura de Coulomb, o parâmetro μ é obtido a partir do círculo de Mohr através da tangente do ângulo formado pela envoltória e a reta das tensões normais, sendo aproximadamente igual a $\mu = tg(\pi/6)$, tem-se, então, que a tensão de cisalhamento é obtida por:

$$\tau_o = \left(\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{2} \right) (1 + \mu^2)^{1/2} - \left(\frac{\sigma_\theta + \sigma_r}{2} \right) \mu. \quad (10)$$

A seção de ruptura da parede do poço pode ser calculada substituindo-se os parâmetros σ_r e σ_θ das equações (6) e (7), na equação (10), chegando-se a uma equação na forma:

$$Ax^4 + Bx^2 + C = 0 \quad (11)$$

onde

$$x = \frac{a}{r}, \quad (12)$$

$$A = -\frac{3}{2} z (\sigma_H + \sigma_h) \cos 2\theta,$$

$$B = \frac{1}{2} [z (\sigma_H + \sigma_h) + (z + \mu) (\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta - 2P_w z + 2P_e z],$$

$$C = -\frac{z (\sigma_H - \sigma_h) \cos 2\theta}{2} - \frac{\mu (\sigma_H + \sigma_h)}{2} - \tau_o,$$

onde $z = (1 + \mu^2)^{1/2}$.

A partir da seção circular do poço com raio igual a a e com a menor raiz positiva da equação (11), pode-se, então, calcular o novo raio do poço, que resultará na seção do poço deformada pela equação (12).

Neste ponto, qualquer seção da parede do poço pode ser modelada, considerando-a submetida a qualquer campo de tensão horizontal, que é o principal responsável pela deformação da seção circular original do poço. Assim, as ovalizações da parede do poço podem ser convenientemente modeladas. Uma ovalização é diagnosticada por dois alargamentos da parede do poço, com larguras semelhantes e uma separação entre elas de aproximadamente 180°.

A seção do poço obtida é a forma geométrica que será traçada pela ferramenta de imageamento acústico, conforme figuras exibidas nas seções posteriores, onde, a partir do modelamento pode-se gerar seções transversais do poço sendo submetidas a quaisquer pares de tensões horizontais.

Considerando apenas a situação de incidência normal do pulso acústico, ou seja, modelando-se uma seção transversal do poço sem irregularidades (lisa), a fim de que no momento em que o pulso acústico chocar-se com a parede do poço, ele reflita sem nenhuma angulação, pode-se obter, através do método do raio (Psencik, 1994), o tempo de trânsito do pulso acústico, a partir do posicionamento do transdutor em um ponto da seção do poço, como mostra a Figura 10.

A partir da determinação da seção do poço, considerada constante com a profundidade, obtém-se os tempos de trânsito definindo-se a variação da excentricidade para cada profundidade, ou seja, conhecendo-se a quantidade que a ferramenta deslocou, pode-se obter, assim, os valores

de tempo de trânsito com a ferramenta descentralizada. O conjunto de tempos de trânsito arranjados na forma matricial é convertido para a sua representação em imagem RGB, ou seja, a partir da matriz de tempo de trânsito, pode-se, através do processamento de imagens digitais, convertê-la em uma imagem, que nada mais é do que a imagem da parede do poço.

2.3- CORREÇÃO DO EFEITO DA DESCENTRALIZAÇÃO

Uma proposta de correção do efeito da descentralização da ferramenta é apresentada com base na geometria analítica plana. A partir da matriz que gera a imagem de tempo de trânsito, obtém-se a matriz correspondente ao raio do poço considerando a velocidade acústica do fluido, normalmente medida pela ferramenta. Cada linha completa da matriz do raio do poço representa a geometria da parede do poço naquela profundidade. Apesar do movimento helicoidal da ferramenta, pode-se, com grande precisão, admitir-se que um ponto da parede do poço amostrado com um ângulo de 0° é o mesmo ponto amostrado na rotação do transdutor, equivalente à 360° . Assim, a linha da matriz do raio do poço pode ser tomada como a representação, em coordenadas polares, do perímetro da parede do poço.

A conversão da matriz do raio para coordenadas cartesianas fornece a posição do perímetro do poço em relação a um par de eixos (x, y) . Admite-se o centro do poço registrado pela ferramenta, como o centro de gravidade da seção do poço. Este ponto é tomado como a origem do par de eixos, o qual possui o norte magnético como orientação do eixo x , de acordo com as medidas realizadas pela ferramenta.

Considerando os eixos coordenados, segundo o qual apresenta-se a forma geométrica do poço em coordenadas cartesianas, pode-se definir um ponto P , chamado de excentricidade, localizado pelo par de coordenadas (x', y') . Este ponto define a real posição do transdutor em relação ao eixo do poço posicionado na origem. A obtenção do par ordenado (x', y') é o objeto da correção da descentralização.

Para a localização do ponto P extrai-se da forma da parede do poço, referenciada nos eixos coordenados, quatro vetores com origem em P e extremidade na interseção da forma da parede do poço com os eixos coordenados $(r1, r2, r3, r4)$, conforme mostra a Figura 10. A partir desta observação pode-se caracterizar ri ($i=1, 2, 3,4$) como a representação da distância entre o ponto P e um ponto amostrado pela ferramenta na parede do poço, com um ângulo múltiplo de π ,

ou seja, são os valores do raio mensurados pela ferramenta. Assim, as relações trigonométricas entre os triângulos envolvidos, permitem escrever os seguintes pares de equações:

$$\begin{cases} ax' = \frac{1}{4}(r_4^2 - r_2^2) \\ a - x' = r_2 \sin \theta \end{cases}$$

$$\begin{cases} by' = \frac{1}{4}(r_3^2 - r_1^2) \\ b - y' = r_1 \sin \theta \end{cases}$$

As coordenadas do ponto P são fornecidas pelas raízes reais das equações:

$$4x'^2 + 4x'r_2 \sin \theta - (r_4^2 - r_2^2) = 0, \quad (13)$$

$$4y'^2 + 4y'r_1 \sin \theta - (r_3^2 - r_1^2) = 0, \quad (14)$$

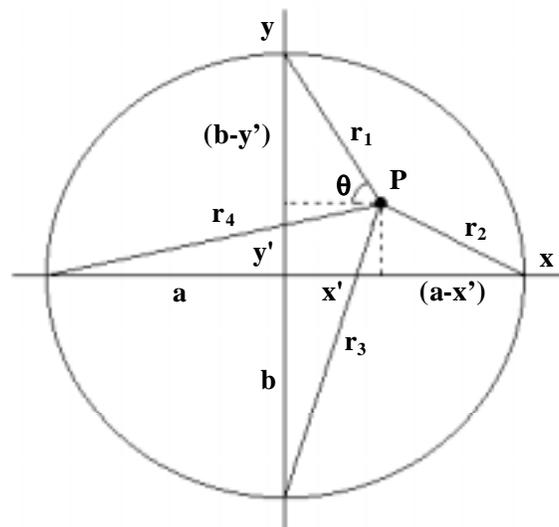


Figura 10: Geometria envolvida na correção do efeito da descentralização da ferramenta.

onde θ é o ângulo entre o raio e a horizontal por P , ou seja, é o ângulo de amostragem.

Os raios do poço corrigidos são obtidos por:

$$a = r_2 \operatorname{sen} \theta + x', \quad (15)$$

$$b = r_1 \operatorname{sen} \theta + y', \quad (16)$$

onde a e b são os raios do poço com a ferramenta centralizada.

A partir da localização do ponto P procede-se a correção de todos os outros raios mensurados, obtendo-se a forma do poço na sua real representação, considerando-se a ferramenta coincidente com o eixo do poço.

3- RESULTADOS

A partir da compreensão do surgimento de um campo de tensões em uma camada reservatório atravessada por um poço, sendo que este campo de tensões caracteriza-se pelo par de tensões horizontais, ou seja, tensão horizontal principal (σ_H) e tensão horizontal secundária (σ_h), pode-se, então, entender o efeito que estas tensões irão causar quanto à forma do poço (Figura 11) e, com isso, obter-se a seção transversal do poço a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito, tanto para o caso em que a ferramenta de imageamento acústico esteja centralizada, como quando a ferramenta esteja descentralizada e, conseqüentemente, gerar-se as respectivas imagens. O próximo passo será a aplicação do método de correção do efeito da descentralização da ferramenta sob as imagens obtidas com a ferramenta descentralizada e a obtenção das imagens corrigidas a partir do método de correção, revelando a eficiência deste quanto à semelhança em relação às imagens obtidas com a ferramenta centralizada. Vale ressaltar que, tanto para o modelamento das imagens de tempo de trânsito quanto para a correção das imagens obtidas com a ferramenta descentralizada, iremos exemplificar apenas casos relevantes ao uso das imagens de tempo de trânsito, como os poços ovalizados e os poços com desmoronamentos, uma vez que poços circulares irão gerar imagens, com a ferramenta centralizada, de apenas uma banda de cor, tornando sem sentido sua explanação.

3.1- MODELAMENTO DAS IMAGENS DE TEMPO DE TRÂNSITO

Nesta seção mostraremos as imagens obtidas a partir do modelamento das imagens de tempo de trânsito, tanto para o caso de poço ovalizado quanto para o caso de poço com desmoronamento, com a ferramenta estando uma vez centralizada e outrora descentralizada em relação ao eixo do poço.

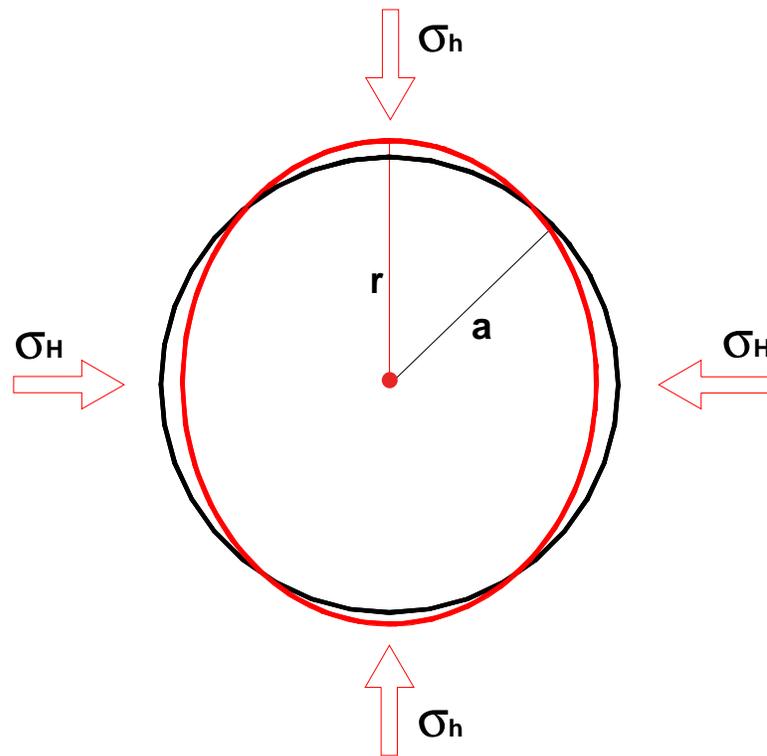


Figura 11: Pares de tensões horizontais principais (σ_H) e secundárias (σ_h) atuando em um poço, mostrando o efeito que as mesmas podem causar no poço.

3.1.1- Poço Ovalizado

A partir da caracterização do par de tensões horizontais atuantes no poço pode-se, então, modelar as imagens de tempo de trânsito, resultando, assim, na forma geométrica que será traçada pela ferramenta de imageamento acústico do poço (seção transversal), através do arranjo matricial do conjunto de tempos de trânsito, ou seja, a partir da matriz de tempo de trânsito faz-se a sua conversão para imagem de tempo de trânsito através do processamento de imagens digitais, tanto para o caso da ferramenta estar centralizada em relação ao eixo do poço, como também, através do mesmo procedimento, modelar-se as imagens de tempo de trânsito para o caso em que a ferramenta esteja descentralizada em relação ao eixo do poço.

Para o primeiro caso de modelamento das imagens de tempo de trânsito, que é aquele onde a ferramenta está centralizada em relação ao eixo do poço, dois exemplos serão mostrados.

No primeiro exemplo (Figura 12) tem-se uma seção transversal gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido à tensão horizontal principal de 8500 psi, tensão horizontal secundária de 5500 psi e resistência ao cisalhamento, segundo o critério de Coulomb, de 1500 psi.

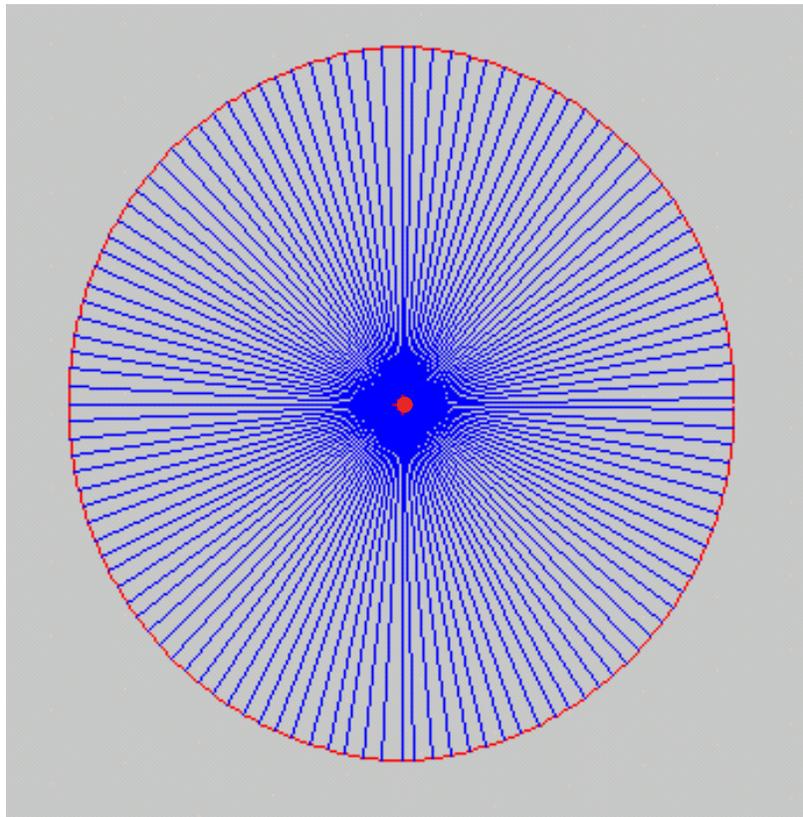


Figura 12: Seção transversal do poço estando a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal principal maior do que o par de tensões horizontal secundária.

No segundo exemplo (Figura 13) tem-se uma seção transversal gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido aos pares de tensões atuantes na ordem de intensidade inversa ao exemplo anterior (Figura 12), ou seja, os valores dos pares de tensões horizontal e secundária serão trocados.

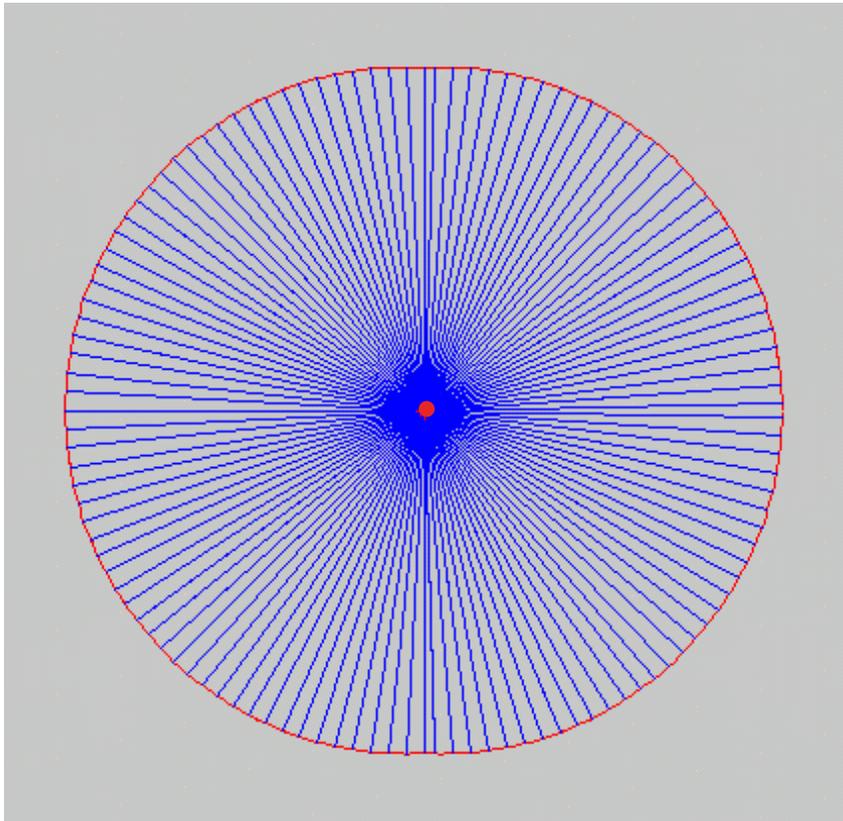


Figura 13: Seção transversal do poço estando a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária maior do que o par de tensões horizontal principal.

Para o segundo caso de modelamento das imagens de tempo de trânsito, que é aquele onde a ferramenta está descentralizada em relação ao eixo do poço, analogamente ao caso anterior, dois exemplos serão mostrados.

No primeiro exemplo (Figura 14) tem-se uma seção transversal gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido à tensão horizontal principal de 8500 psi, tensão horizontal secundária de 5500 psi e resistência ao cisalhamento, segundo o critério de Coulomb, de 1500 psi.

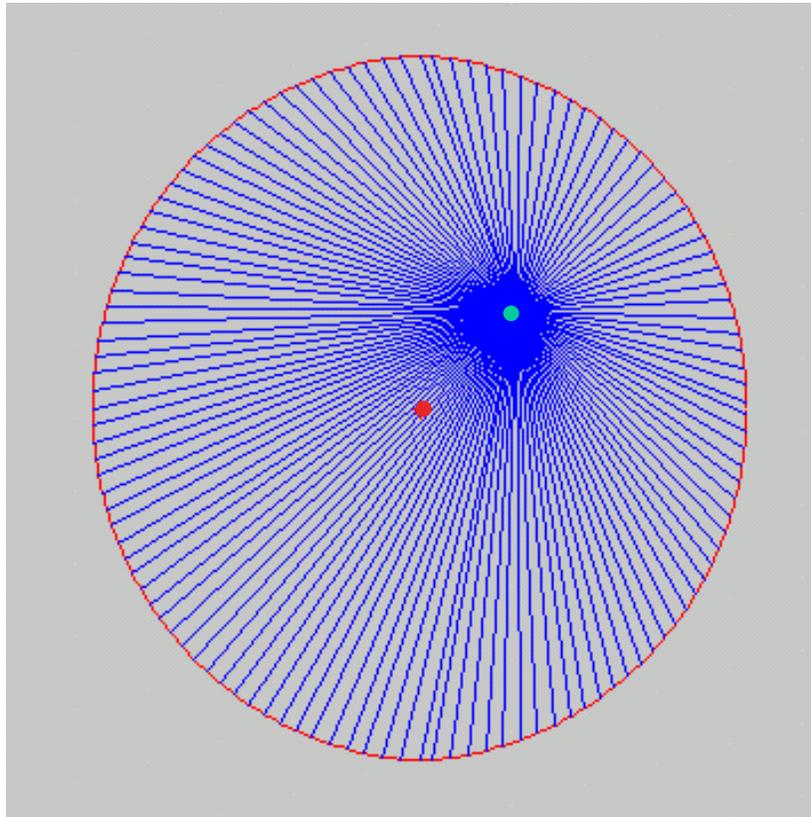


Figura 14: Seção transversal do poço estando a ferramenta descentralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal principal maior do que o par de tensões horizontal secundária.

No segundo exemplo (Figura 15) tem-se uma seção transversal gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido aos pares de tensões atuantes na ordem de intensidade inversa ao exemplo anterior (Figura 14), ou seja, os valores dos pares de tensões horizontal e secundária serão trocados.

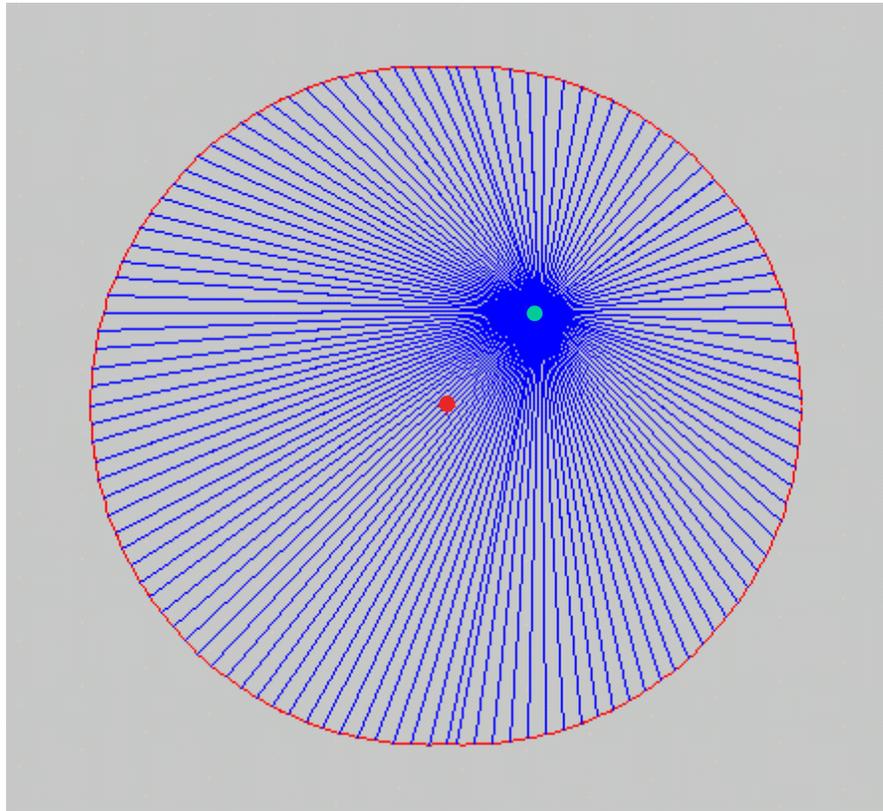


Figura 15: Seção transversal do poço estando a ferramenta descentralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária maior do que o par de tensões horizontal principal.

Com isso pode-se, então, obter as imagens de tempo de trânsito a partir do modelamento citado. Primeiramente, para o caso da ferramenta estar centralizada em relação ao eixo do poço, dois exemplos serão mostrados.

No primeiro exemplo (Figura 16) tem-se uma imagem gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido à tensão horizontal principal de 8500 psi, tensão horizontal secundária de 5500 psi e resistência ao cisalhamento, segundo o critério de Coulomb, de 1500 psi.

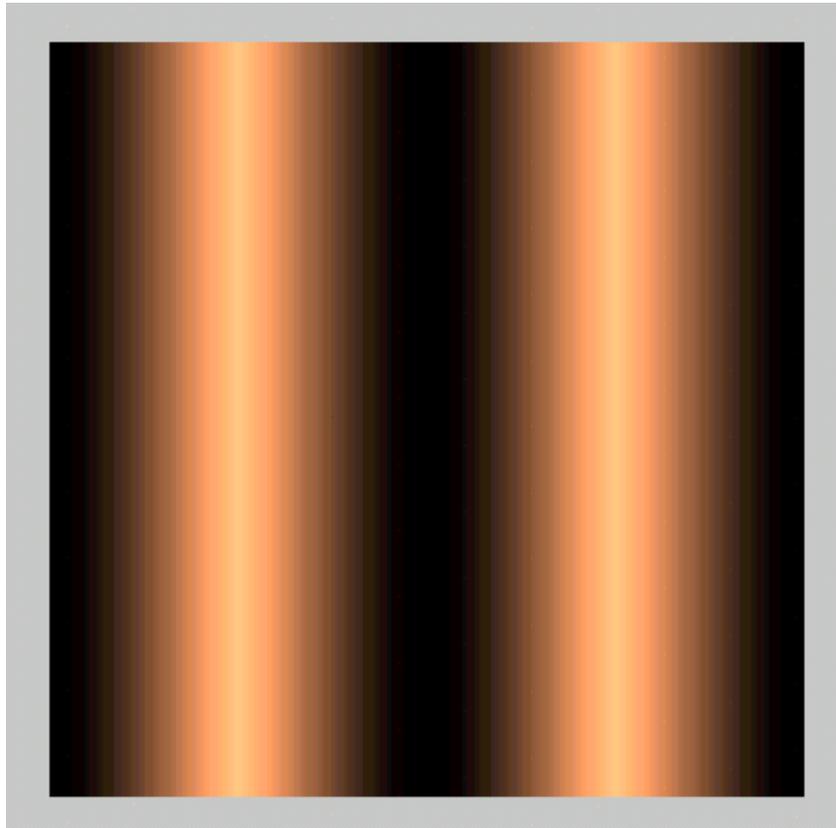


Figura 16: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta centralizada em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal principal maior do que o par de tensões horizontal secundária.

Verifica-se nesta imagem a criação de quatro bandas de cores, sendo duas faixas mais claras e duas faixas mais escuras. As faixas de cores mais claras indicam valores reduzidos de tempo de trânsito, ou seja, a ferramenta de imageamento acústico de poço está mais próxima da parede do poço e as faixas de cores mais escuras indicam valores elevados de tempo de trânsito, ou seja, a ferramenta de imageamento acústico de poço está mais afastada da parede do poço. Esta analogia entre o bandeamento da imagem de tempo de trânsito e a posição da ferramenta pode ser bem entendida visualizando-se a Figura 12 e a Figura 16.

No segundo exemplo (Figura 17) tem-se uma imagem gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido aos pares de tensões atuantes na ordem de intensidade inversa ao exemplo anterior (Figura 16), ou seja, os valores dos pares de tensão horizontal e secundária serão trocados.

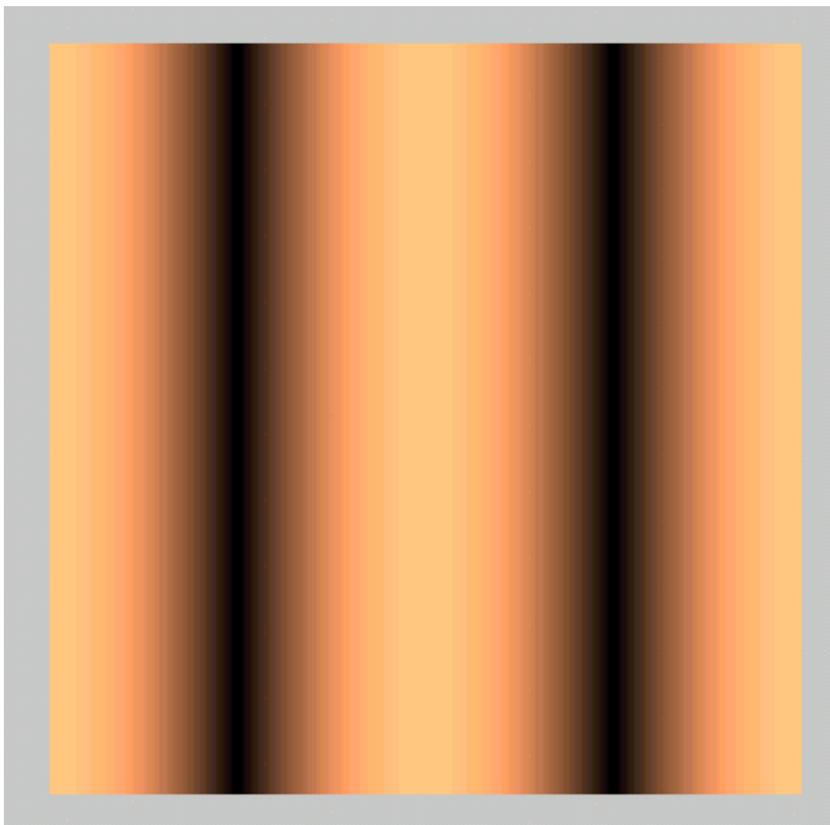


Figura 17: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta centralizada em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária maior do que o par de tensões horizontal principal.

Verifica-se nesta imagem, analogamente ao exemplo anterior (Figura 16), a criação de quatro bandas de cores, sendo duas faixas mais claras e duas faixas mais escuras. Conforme já mencionado, pode-se fazer uma analogia entre o bandeamento da imagem de tempo de trânsito e a posição da ferramenta, a partir da visualização da Figura 13 e da Figura 17.

Posteriormente, para o caso da ferramenta estar descentralizada em relação ao eixo do poço, analogamente ao caso anterior, dois exemplos serão mostrados, sendo que ao primeiro e ao segundo exemplos serão atribuídas as mesmas condições de intensidade dos pares de tensões atuantes que foram utilizados no caso da ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço.

No primeiro exemplo (Figura 18) tem-se uma imagem gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito, onde se verifica a criação de apenas duas bandas de cores, sendo uma faixa mais clara e outra faixa mais escura, isto pode ser facilmente entendido, pois uma vez que a ferramenta está descentralizada em relação ao eixo do poço, somente duas áreas irão se sobressair: uma bem próxima à ferramenta e outra bem distante à ferramenta. Esta analogia entre o bandeamento da imagem de tempo de trânsito e a posição da ferramenta pode ser entendida visualizando-se a Figura 14 e a Figura 18.

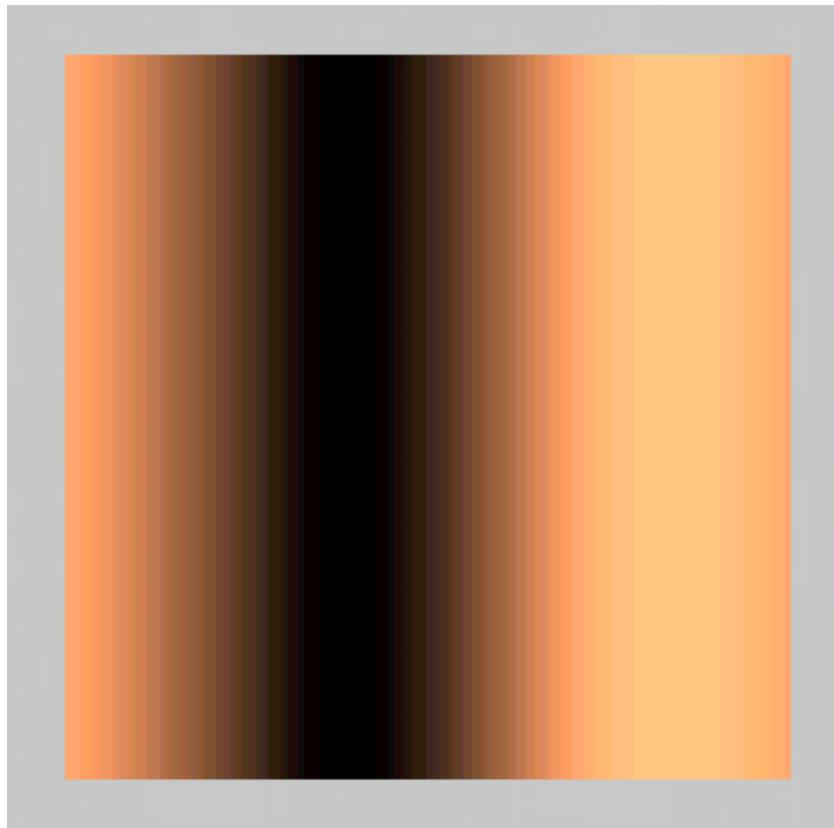


Figura 18: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta descentralizada em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal principal maior do que o par de tensões horizontal secundária.

No segundo exemplo (Figura 19) tem-se uma imagem gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito, onde se verifica, analogamente ao exemplo anterior (Figura 18), a criação de apenas duas bandas de cores, sendo uma faixa mais clara e outra faixa mais escura. Conforme já mencionado, pode-se fazer uma analogia entre o bandeamento da imagem de tempo de trânsito e a posição da ferramenta a partir da visualização da Figura 15 e da Figura 19.

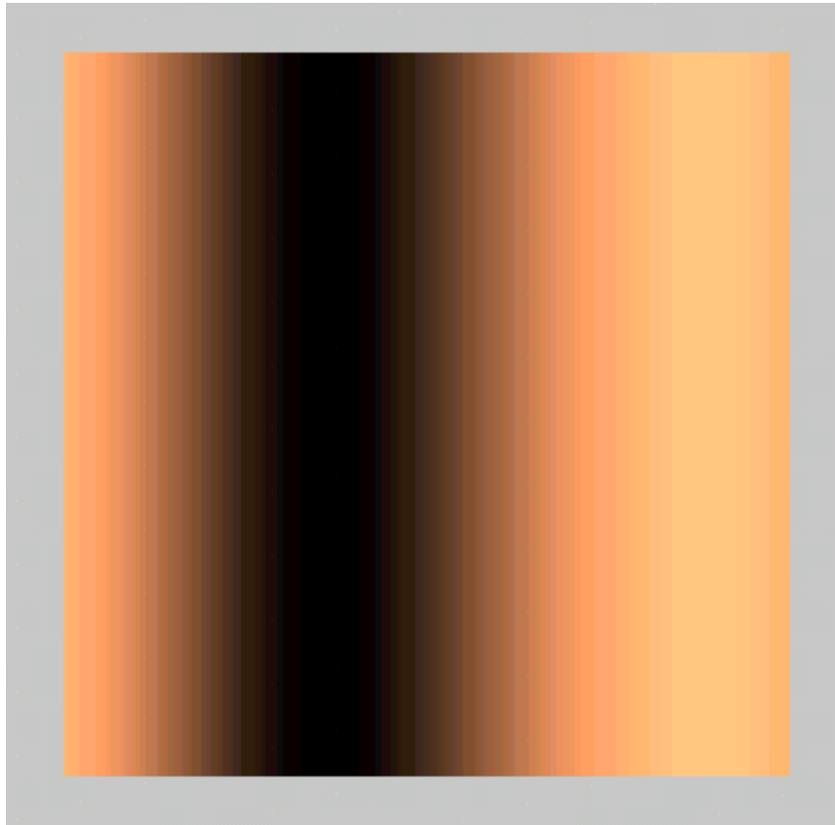


Figura 19: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta descentralizada em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária maior do que o par de tensões horizontal principal.

Verifica-se a grande semelhança entre os dois exemplos anteriores (Figura 18 e Figura 19), isto pode ser facilmente compreendido porque a ferramenta de imageamento acústico de poço, para ambos os casos, foi deslocada para a mesma direção (Nordeste), então, conseqüentemente, os menores e os maiores valores de tempo de trânsito, ou seja, as duas bandas de cores, serão na mesma direção.

3.1.2- Poço com Desmoronamento

A partir da caracterização do par de tensões horizontais atuantes no poço pode-se, então, modelar as imagens de tempo de trânsito, resultando, assim, na forma geométrica que será traçada pela ferramenta de imageamento acústico do poço (seção transversal), através do arranjo matricial do conjunto de tempos de trânsito, ou seja, a partir da matriz de tempo de trânsito faz-se a sua conversão para imagem de tempo de trânsito através do processamento de imagens digitais, tanto para o caso da ferramenta estar centralizada em relação ao eixo do poço, como também, através do mesmo procedimento, modelar-se as imagens de tempo de trânsito para o caso em que a ferramenta esteja descentralizada em relação ao eixo do poço.

Para o primeiro caso de modelamento das imagens de tempo de trânsito, que é aquele onde a ferramenta está centralizada em relação ao eixo do poço, dois exemplos serão mostrados.

No primeiro exemplo (Figura 20) tem-se uma seção transversal gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido à tensão horizontal principal com valor de intensidade muito maior do que a tensão horizontal secundária e resistência ao cisalhamento, segundo o critério de Coulomb, de 1500 psi. Nota-se que na direção onde está atuando a tensão horizontal de maior intensidade, há um desmoronamento da parede do poço.

No segundo exemplo (Figura 21) tem-se uma seção transversal gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido aos pares de tensões atuantes na ordem de intensidade inversa ao exemplo anterior (Figura 20), ou seja, os valores dos pares de tensões horizontal e secundária serão trocados. Nota-se, também, que na direção onde está atuando a tensão horizontal de maior intensidade, há um desmoronamento da parede do poço.

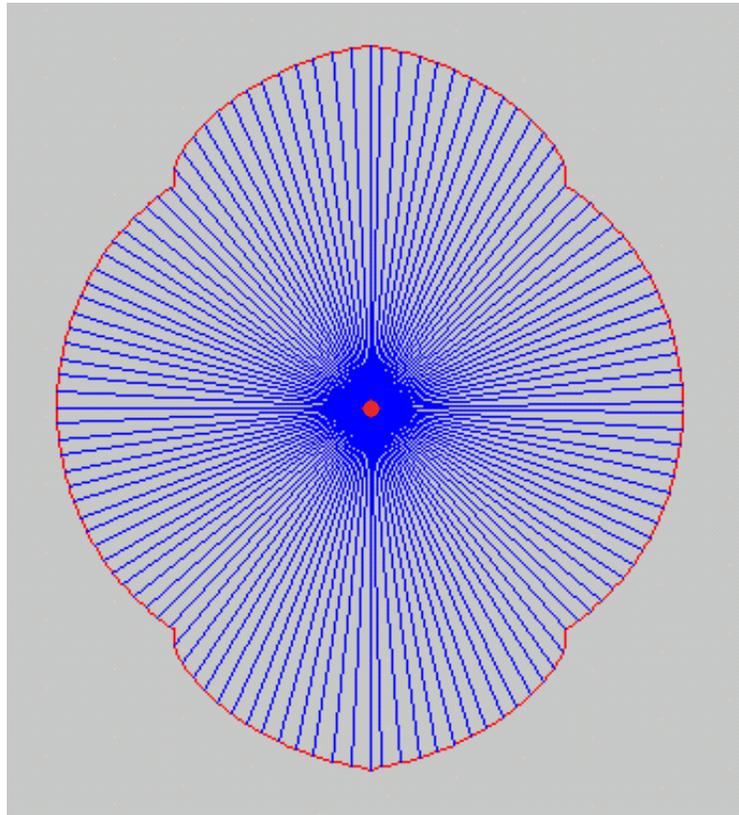


Figura 20: Seção transversal do poço estando a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal principal muito maior do que o par de tensões horizontal secundária, caracterizando o desmoronamento nesta direção.

Para o segundo caso de modelamento das imagens de tempo de trânsito, que é aquele onde a ferramenta está descentralizada em relação ao eixo do poço, analogamente ao caso anterior, dois exemplos serão mostrados.

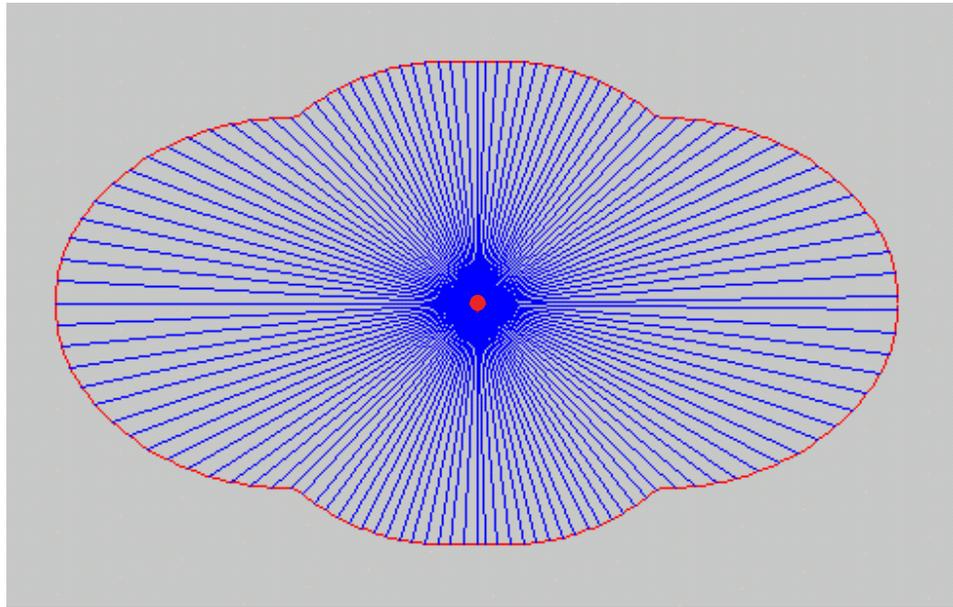


Figura 21: Seção transversal do poço estando a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária muito maior do que o par de tensões horizontal principal, caracterizando o desmoronamento nesta direção.

No primeiro exemplo (Figura 22) tem-se uma seção transversal gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido à tensão horizontal principal com valor de intensidade muito maior do que a tensão horizontal secundária e resistência ao cisalhamento, segundo o critério de Coulomb, de 1500 psi. Nota-se que na direção onde está atuando a tensão horizontal de maior intensidade, há um desmoronamento da parede do poço.

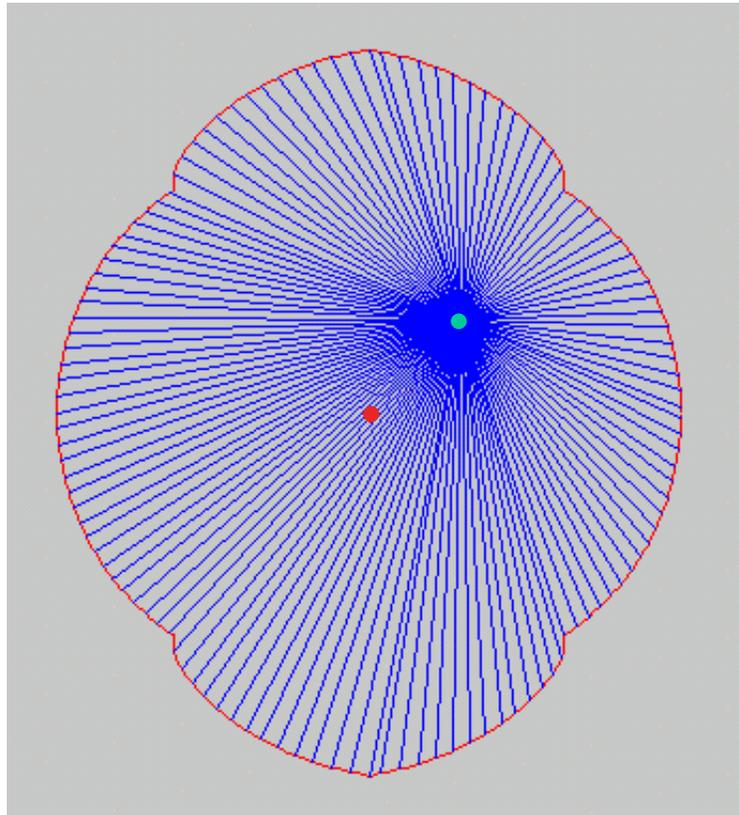


Figura 22: Seção transversal do poço estando a ferramenta descentralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal principal muito maior do que o par de tensões horizontal secundária, caracterizando o desmoronamento nesta direção.

No segundo exemplo (Figura 23) tem-se uma seção transversal gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido aos pares de tensões atuantes na ordem de intensidade inversa ao exemplo anterior (Figura 22), ou seja, os valores dos pares de tensões horizontal e secundária serão trocados. Nota-se, também, que na direção onde está atuando a tensão horizontal de maior intensidade, há um desmoronamento da parede do poço.

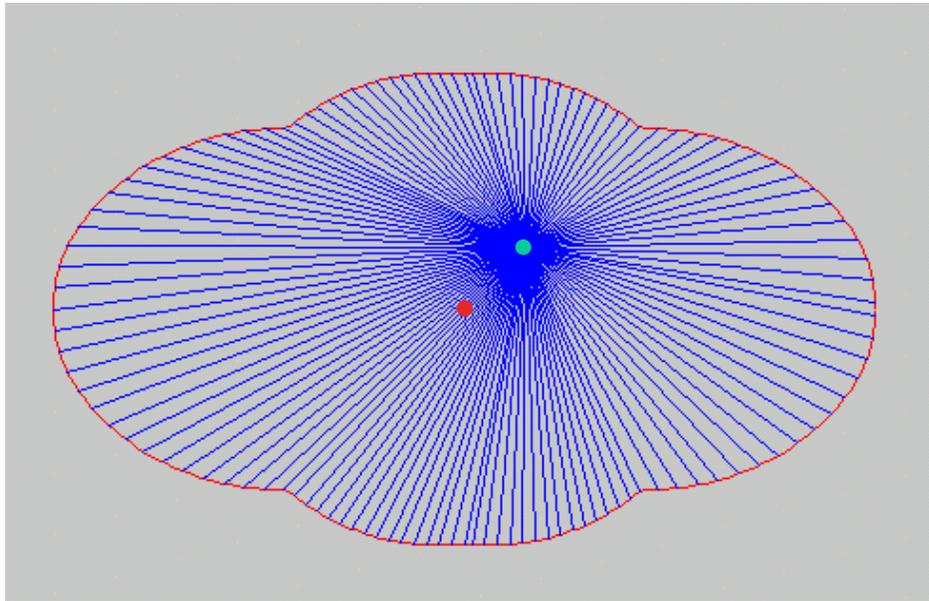


Figura 23: Seção transversal do poço estando a ferramenta descentralizada em relação ao eixo do poço, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária muito maior do que o par de tensões horizontal principal, caracterizando o desmoronamento nesta direção.

Com isso pode-se, então, obter as imagens de tempo de trânsito a partir do modelamento citado. Primeiramente, para o caso da ferramenta estar centralizada em relação ao eixo do poço, dois exemplos serão mostrados.

No primeiro exemplo (Figura 24) tem-se uma imagem gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido à tensão horizontal principal com valor de intensidade muito maior do que a tensão horizontal secundária e resistência ao cisalhamento, segundo o critério de Coulomb, de 1500 psi.

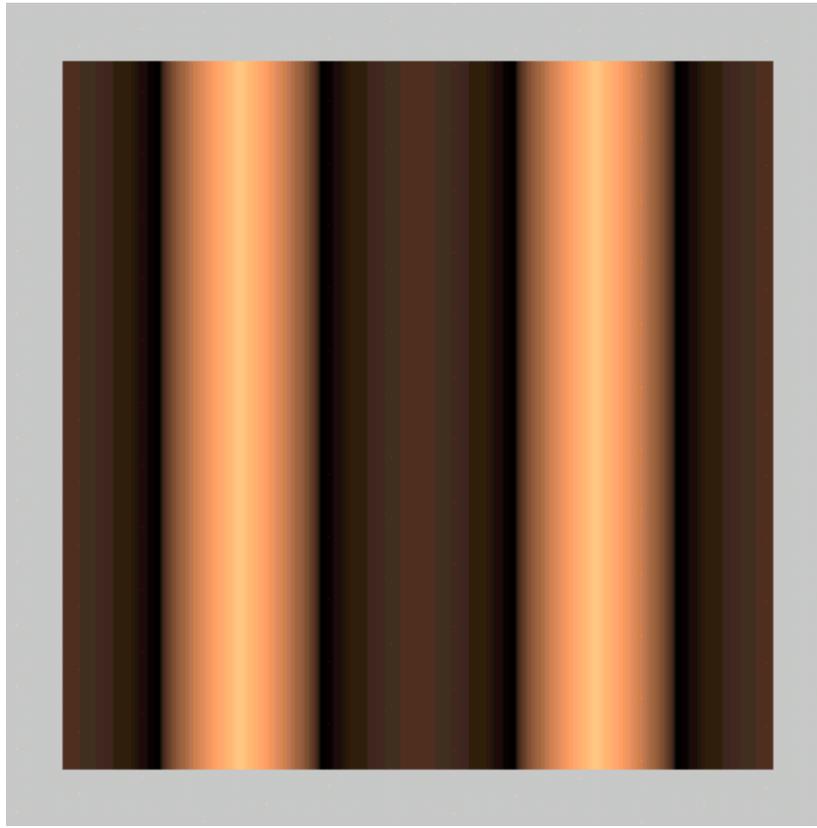


Figura 24: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta centralizada em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal principal muito maior do que o par de tensões horizontal secundária.

Verifica-se nesta imagem a criação de quatro bandas de cores, sendo duas faixas mais claras e duas faixas mais escuras. As faixas de cores mais claras indicam valores reduzidos de tempo de trânsito, ou seja, a ferramenta de imageamento acústico de poço está mais próxima da parede do poço e as faixas de cores mais escuras indicam valores elevados de tempo de trânsito, ou seja, a ferramenta de imageamento acústico de poço está mais afastada da parede do poço. Esta analogia entre o bandeamento da imagem de tempo de trânsito e a posição da ferramenta pode ser bem entendida visualizando-se a Figura 20 e a Figura 24.

No segundo exemplo (Figura 25) tem-se uma imagem gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito submetido aos pares de tensões atuantes na ordem de intensidade inversa ao exemplo anterior (Figura 24), ou seja, os valores dos pares de tensão horizontal e secundária serão trocados.

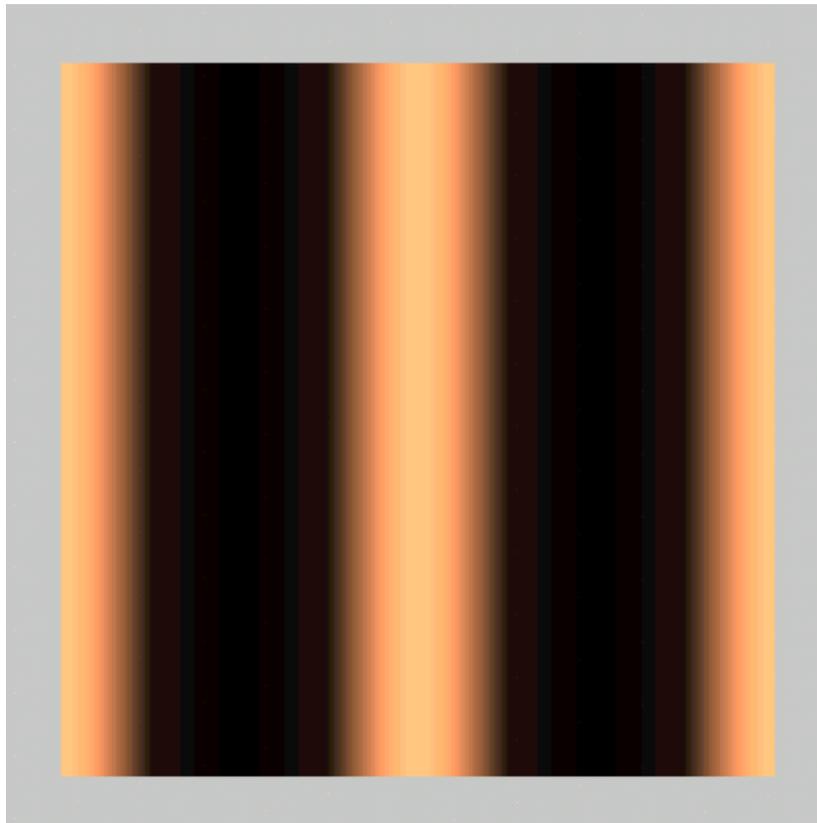


Figura 25: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta centralizada em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária muito maior do que o par de tensões horizontal principal.

Verifica-se nesta imagem, analogamente ao exemplo anterior (Figura 24), a criação de quatro bandas de cores, sendo duas faixas mais claras e duas faixas mais escuras. Conforme já mencionado, pode-se fazer uma analogia entre o bandeamento da imagem de tempo de trânsito e a posição da ferramenta, a partir da visualização da Figura 21 e da Figura 25.

Posteriormente, para o caso da ferramenta estar descentralizada em relação ao eixo do poço, analogamente ao caso anterior, dois exemplos serão mostrados, sendo que ao primeiro e ao segundo exemplos serão atribuídas as mesmas condições de intensidade dos pares de tensões atuantes que foram utilizados no caso da ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço.

No primeiro exemplo (Figura 26) tem-se uma imagem gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito, onde se verifica a criação de apenas duas bandas de cores, sendo uma faixa mais clara e outra faixa mais escura, isto pode ser facilmente entendido, pois uma vez que a ferramenta está descentralizada em relação ao eixo do poço, somente duas áreas irão se sobressair: uma bem próxima à ferramenta e outra bem distante à ferramenta. Esta analogia entre o bandeamento da imagem de tempo de trânsito e a posição da ferramenta pode ser entendida visualizando-se a Figura 22 e a Figura 26.

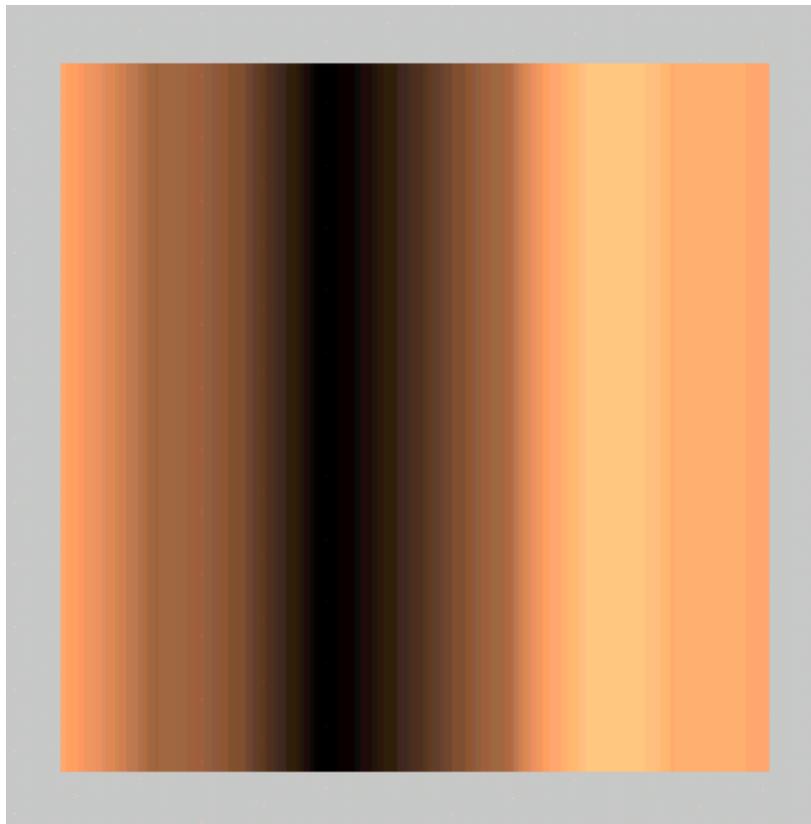


Figura 26: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta descentralizada em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal principal muito maior do que o par de tensões horizontal secundária.

No segundo exemplo (Figura 27) tem-se uma imagem gerada a partir do modelamento da imagem de tempo de trânsito, onde, diferentemente do exemplo anterior (Figura 26), não mais se verifica a criação de apenas duas bandas de cores, mas sim de quatro bandas de cores. Isto ocorre porque mesmo a ferramenta de imageamento acústico de poço estando descentralizada em relação ao eixo do poço, os desmoronamentos da parede do poço irão gerar áreas mais próximas à ferramenta, mesmo estas áreas estando na zona mais distante em relação à ferramenta. Isto pode ser facilmente entendido fazendo-se uma analogia entre o bandeamento da imagem de tempo de trânsito e a posição da ferramenta a partir da visualização da Figura 23 e da Figura 27.

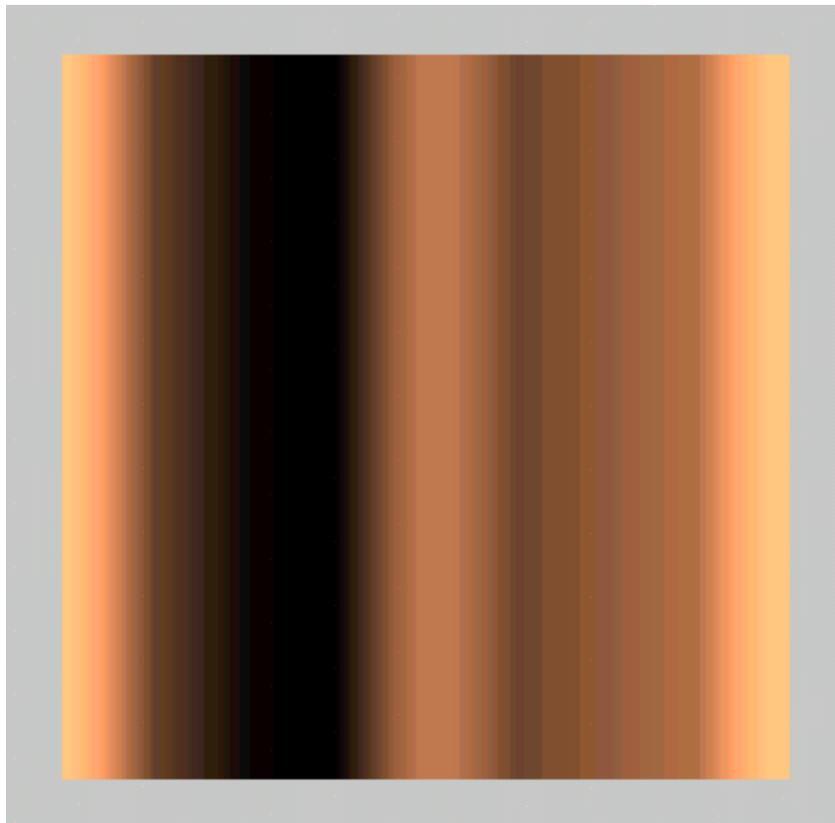


Figura 27: Imagem de tempo de trânsito gerada pela ferramenta descentralizada em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária muito maior do que o par de tensões horizontal principal.

Apesar de não haver uma semelhança global entre os dois exemplos anteriores, pode-se notar uma semelhança no posicionamento das faixas, predominantemente, escuras entre eles. Isto é justificado pelo fato de que, para ambos os casos, a ferramenta de imageamento acústico de poço foi deslocada para a mesma direção (Nordeste).

3.2- CORREÇÃO DO EFEITO DA DESCENTRALIZAÇÃO DA FERRAMENTA

Nesta seção mostraremos as imagens obtidas a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta através do modelamento das imagens de tempo de trânsito, tanto para o caso de poço ovalizado quanto para o caso de poço com desmoronamento.

3.2.1- Poço Ovalizado

A partir do modelamento das imagens de tempo de trânsito e com a posterior obtenção das imagens obtidas a partir deste modelamento, tanto com a ferramenta centralizada quanto com a ferramenta descentralizada, pode-se, então, aplicar o método de correção do efeito da descentralização da ferramenta sob as imagens obtidas com a ferramenta descentralizada em um poço ovalizado e, assim, gerar as novas imagens de tempo de trânsito a partir da correção da descentralização, para isso dois exemplos serão mostrados.

No primeiro exemplo (Figura 28) tem-se uma imagem gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um modelamento submetido à tensão horizontal principal de 8500 psi, tensão horizontal secundária de 5500 psi e resistência ao cisalhamento, segundo o critério de Coulomb, de 1500 psi.

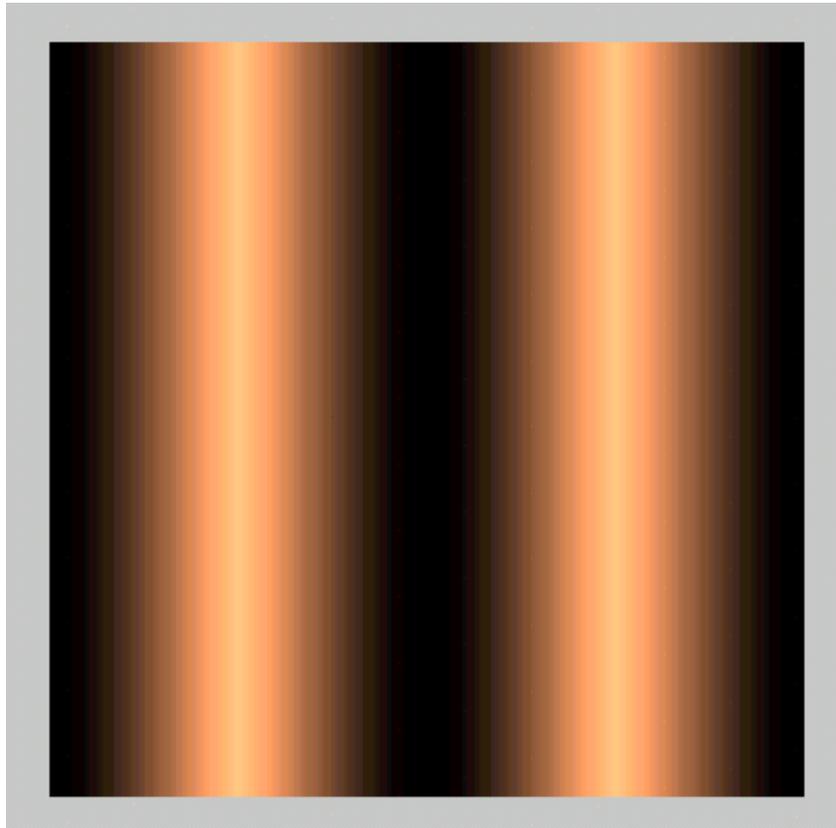


Figura 28: Imagem de tempo de trânsito gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal principal maior do que o par de tensões horizontal secundária.

No segundo exemplo (Figura 29) tem-se uma imagem gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um modelamento submetido aos pares de tensões atuantes na ordem de intensidade inversa ao exemplo anterior (Figura 28), ou seja, os valores dos pares de tensão horizontal e secundária serão trocados.

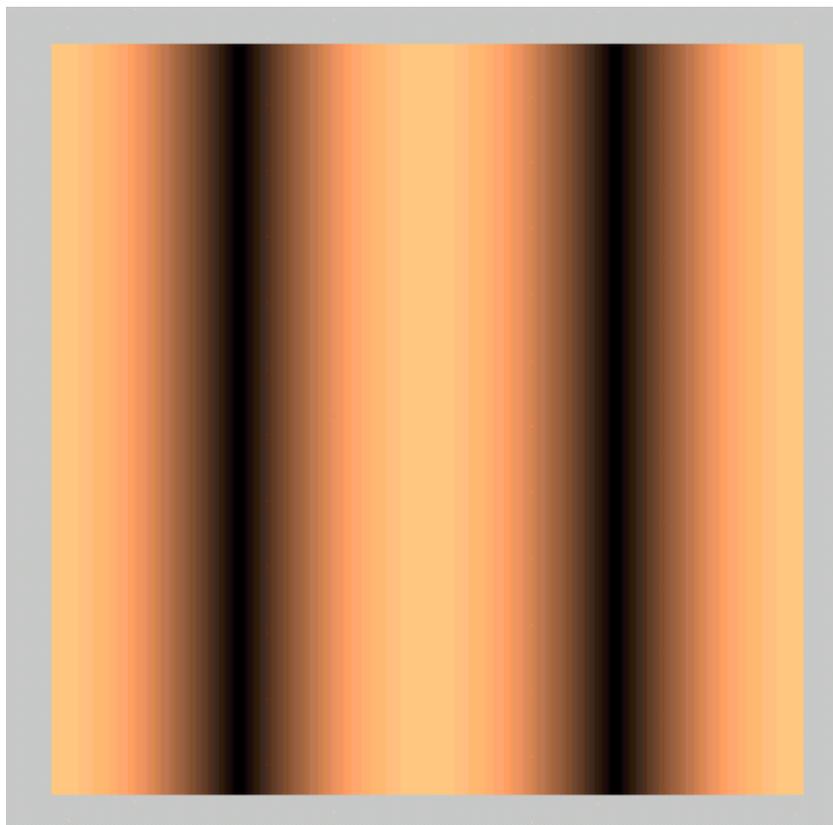


Figura 29: Imagem de tempo de trânsito gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um poço ovalizado, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária maior do que o par de tensões horizontal principal.

Nota-se, em ambos os casos (Figura 28 e Figura 29), a grande semelhança das imagens obtidas pelo método de correção do efeito da descentralização da ferramenta, com as imagens obtidas a partir do modelamento das imagens de tempo de trânsito com a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço (Figura 16 e Figura 17), confirmando a eficácia do método de correção do efeito da descentralização da ferramenta nas imagens de tempo de trânsito.

3.2.2- Poço com Desmoronamento

A partir do modelamento das imagens de tempo de trânsito e com a posterior obtenção das imagens obtidas a partir deste modelamento, tanto com a ferramenta centralizada quanto com a ferramenta descentralizada, pode-se, então, aplicar o método de correção do efeito da

descentralização da ferramenta sob as imagens obtidas com a ferramenta descentralizada em um poço com desmoronamento e, assim, gerar as novas imagens de tempo de trânsito a partir da correção da descentralização, para isso dois exemplos serão mostrados.

No primeiro exemplo (Figura 30) tem-se uma imagem gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um modelamento submetido à tensão horizontal principal com valor de intensidade muito maior do que a tensão horizontal secundária e resistência ao cisalhamento, segundo o critério de Coulomb, de 1500 psi.

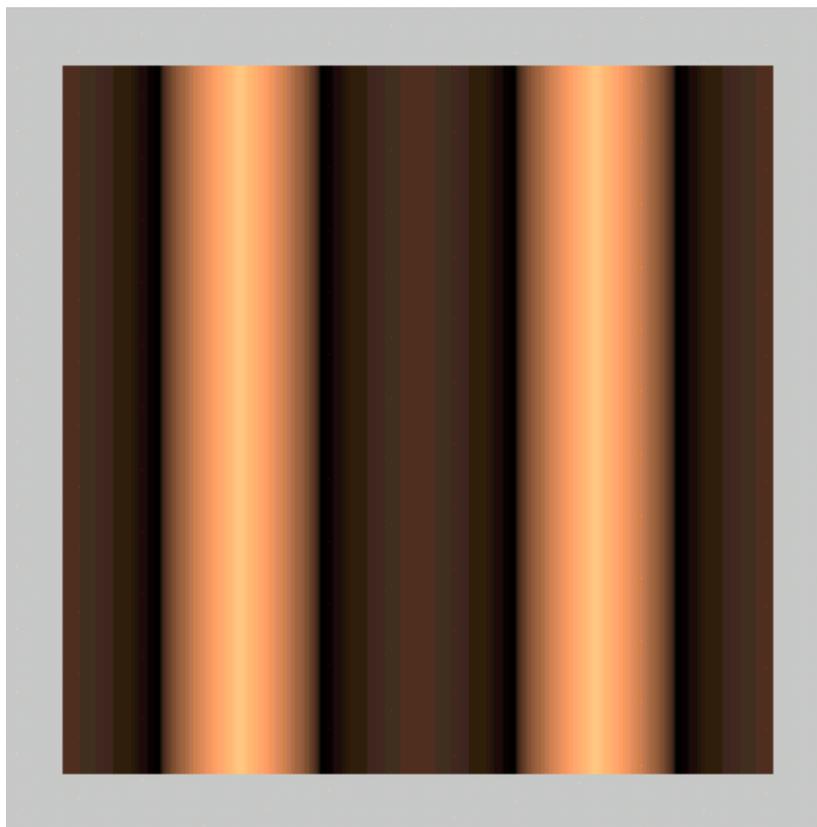


Figura 30: Imagem de tempo de trânsito gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal principal muito maior do que o par de tensões horizontal secundária.

No segundo exemplo (Figura 31) tem-se uma imagem gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um modelamento submetido aos pares de tensões atuantes na ordem de intensidade inversa ao exemplo anterior (Figura 30), ou seja, os valores dos pares de tensões horizontal e secundária serão trocados.

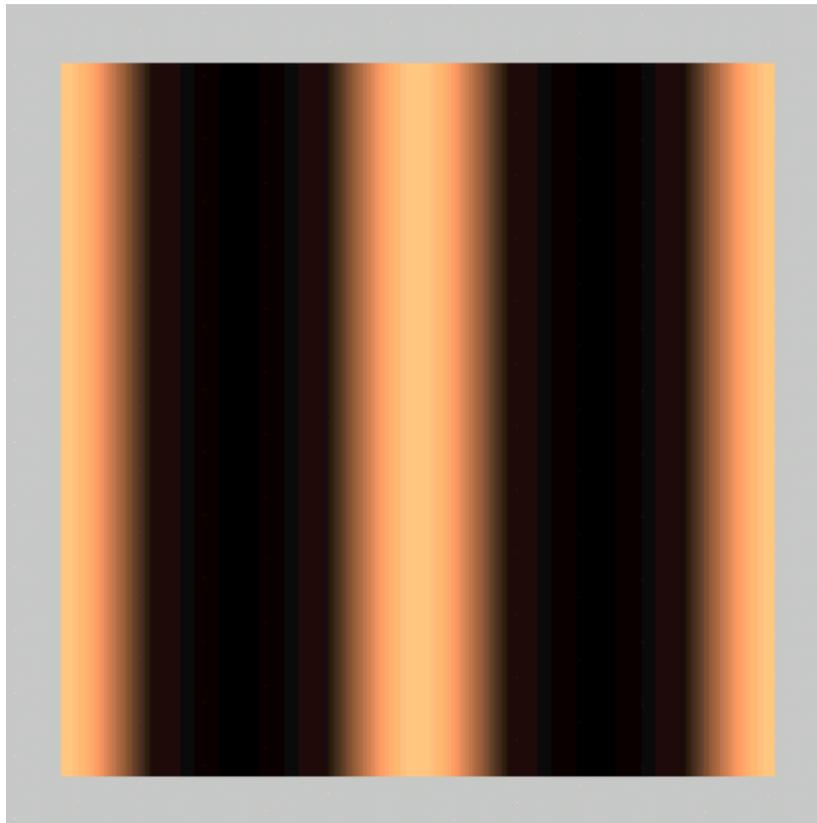


Figura 31: Imagem de tempo de trânsito gerada a partir da correção do efeito da descentralização da ferramenta em um poço com desmoronamento, com a intensidade do par de tensões horizontal secundária muito maior do que o par de tensões horizontal principal.

Nota-se, em ambos os casos (Figura 30 e Figura 31), a grande semelhança das imagens obtidas pelo método de correção do efeito da descentralização da ferramenta, com as imagens obtidas a partir do modelamento das imagens de tempo de trânsito com a ferramenta centralizada em relação ao eixo do poço (Figura 24 e Figura 25), confirmando a eficácia do método de correção do efeito da descentralização da ferramenta nas imagens de tempo de trânsito.

4- CONCLUSÕES

As imagens acústicas da parede do poço obtidas através da ferramenta UBI (Ultrasonic Borehole Imager) surgiram como mais um aliado para a identificação de eventos geométricos e geológicos presentes nas paredes dos poços e para a inspeção dos tubos de revestimento nos poços produtores, uma vez que estas imagens são praticamente uma fotografia da parede do poço.

Neste trabalho somente é abordada a imagem de tempo de trânsito, que é obtida a partir do intervalo de tempo necessário para o pulso acústico ir do transdutor à parede do poço e retornar, a qual fornece informações sobre a geometria da parede do poço. A partir desta imagem pode-se identificar características importantes da parede do poço, como: ovalizações, desmoronamentos, entre outras, que serão de suma importância para a avaliação do critério de estabilidade do poço. Isto nos fornece a possibilidade de apresentar um modelamento das imagens de tempo de trânsito a partir da aplicação do critério de ruptura de Coulomb, a qual fornecerá a seção transversal do poço, que nada mais é do que a forma geométrica que será traçada pela ferramenta de imageamento acústico.

Entretanto, estas imagens de tempo de trânsito podem ter uma interpretação não realista, uma vez que elas podem ter seu aspecto alterado em razão do movimento da ferramenta no interior do poço, assim como, sofrer influência das imperfeições da parede do poço.

Com isto, apresenta-se, também, um método de correção do efeito da descentralização da ferramenta, com base na geometria analítica plana e no método do raio, confirmando a grande eficácia do método de correção, quando se faz uma comparação com as imagens obtidas com a ferramenta centralizada.

Tem-se este trabalho como um passo inicial e pode-se, conseqüentemente, buscar a aplicação do método de correção do efeito da descentralização da ferramenta à dados reais e aprofundar-se na aplicação do modelamento das imagens acústicas para estudos sobre a estabilidade de poços, corroborando o avanço técnico-científico na indústria de óleo e gás.

Com a possibilidade de operar-se o processo inverso do apresentado neste trabalho e a partir das imagens de tempo trânsito pode-se obter os pares de tensões atuantes na parede do poço e, assim, fazer uma avaliação sobre a estabilidade mecânica dos poços.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BELL, J. S. 1990. Investigating stress regimes in sedimentary basins using information from oil industry wireline logs and drilling records. *Geological applications of wirelines logs*. p. 305-325. (Geological society special publication, 48).
- CORNET, F. H.; HELM, J.; POITRENAUD, H.; ETCHECOPAR, A. 1997. Seismic and aseismic slips induced by large-scale fluid injections. *Pure & applied geophysics*, 150, p. 563-583.
- HAYMAN, A. J.; PARENT, P.; CHEUNG, P.; VERGES, P. 1998. Improved borehole imaging by ultrasonics. *SPE production & facilities*, February, p. 5-13.
- LUTHI, S. M. 2001. *Geological well logs: their use in reservoir modeling*. Berlin, Springer-Verlag. 373p.
- MENGER, S. 1994. New aspects of the borehole televiewer decentralization correction. *The log analyst*. July-August, p. 14-20.
- PSENCIK, I. 1994. Introduction to seismic methods. *Lecture notes*, PPPG/UFBa.
- ZEMANEK, J.; GLENN, E. E.; NORTON, L. J.; CALDWELL, R. L. 1970. Formation evaluation by inspection with the borehole televiewer. *Geophysics*, 35, p. 254-269.