



Análise dos Resultados de Anisotropia Obtidos com Perfil Sônico confrontados com registros de Imagem Acústica, Resistiva e VSP em Rochas Carbonáticas

Carlos Francisco Beneduzi, Adriana de Oliveira Godói, José Acúrcio Canário de Moraes, Petrobras

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The paper intends to present the results obtained with sonic tool data in order to characterize the elastic anisotropy of aptian formations in two wells located at Santos Basin.

Several borehole logging tools - sonic logs, acoustic and electric image logs, VSP walkaround and walkaway – had been their results compared each other and with the seismic surface data results.

The recent improvements introduced in acoustic logging tools had allowed the acquisition of several elastic constants and Thomsen γ and ε parameters opening the possibility to characterize 3D anisotropy. The results were compared with the VSP walkaway and walkaround anisotropy measurements.

The major agreement of results were observed between the acquisitions made with similar wavelength: borehole seismic and seismic surface on one side; sonic tools and acoustic and electric image logs on the other side, showing that the resolution of the method is a determining factor in the measurement.

The Stoneley wave analysis enabled to identify open fractures in the reservoir. Results were compared with azimuthal anisotropy data obtained from the crossed dipole acquisition and acoustic and electrical image logs data showing reasonable correlation.

Introdução

O estágio atual do conhecimento de caracterização acústica da natureza anisotrópica de uma formação permite identificar gênese da anisotropia, direção e magnitude dos esforços e os regimes tensionais atuantes na área; gera informações a respeito da variação radial de velocidades (zonas alterada e virgem) e de mobilidade dos fluidos no reservatório; parametriza velocidades (V_{p_v} e V_{s_v}) em poços e/ou formações inclinadas em relação aos eixos de simetria.

A análise dos dados permitiu caracterizar os esforços atuantes na área dos dois poços perfurados em rochas de idade aptiana na bacia de Santos, sendo os resultados confrontados com informações dos perfis de imagem e de VSP.

A introdução do transmissor dipolo - fonte de excitação unidirecional da formação – e o arranjo ortogonal de seus transmissores possibilitando aquisições *inline* e *crossline* dos receptores tornou factível a utilização de algoritmos que identificam cisalhante rápida e lenta e sua direção em um plano perpendicular ao eixo do poço (anisotropia azimutal). A análise do comportamento de dispersão da onda flexural gerada pelo dipolo permitiu a caracterização da anisotropia quanto a sua gênese – se intrínseca (fraturas, acamamento) ou causada por *stress*.

Algoritmos que incluem a modelagem da presença de ferramenta deformável no cálculo da propagação da onda Stoneley no poço e ferramentas dotadas de transmissores dipolo de largo espectro de frequência necessárias para calcular as variações radiais da velocidade cisalhante possibilitaram o cálculo dos módulos de cisalhamento C_{44} , C_{55} e C_{66} . A partir desses valores inúmeras aplicações se tornaram factíveis: parametrização de propriedades elásticas em meio anisotrópico, caracterização de meios anisotrópicos transversalmente isotrópicos (TIV e TIH) e ortorrômbicos, identificação de mobilidade de fluidos próximo a parede do poço e quando associado a dados de VSP desenvolver modelos de velocidade anisotrópicos para aplicações de AVO.

Método

A maior parte das rochas apresenta características anisotrópicas. Na sua forma mais simples, um sólido transversalmente isotrópico (TI), apresenta um eixo de simetria onde em qualquer direção em um plano perpendicular a esse eixo não há variação da propriedade medida. Na forma ortorrômbica as propriedades variam ao longo dos três planos. Apenas um caso entre os tipos de anisotropia TI, permite solução analítica – quando o eixo de simetria coincide com o eixo do poço – nos outros são requeridas análises numéricas. Todo o tratamento matemático, inclusive a formulação de Thomsen (1986) assume que as rochas são fracamente anisotrópicas (<20%) de maneira a simplificar significativamente os cálculos. O caso mais simples de anisotropia - um sólido TI - tem suas propriedades elásticas definidas por cinco constantes de rigidez elástica:

C_{11} , C_{13} , C_{33} , C_{44} e C_{66}

O tensor C para um meio TI é expresso por:

$$C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & C_{44} & 0 \\ & & & & & C_{66} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

Quatro dessas constantes podem ser expressas em termos de velocidades medidas (Auld,1990):

$$C_{11} = \rho V_{PH}^2 \dots\dots\dots(1)$$

$$C_{33} = \rho V_{PV}^2 \dots\dots\dots(2)$$

$$C_{66} = \rho V_{SH}^2 \dots\dots\dots(3)$$

$$C_{44} = \rho V_{SV}^2 \dots\dots\dots(4)$$

onde ρ é a densidade, V_{PH} e V_{SH} são as velocidades compressional e cisalhante horizontais, V_{PV} e V_{SV} são as velocidades compressional e cisalhante verticais - para um sólido TIV.

$$C_{12} = C_{11} - 2C_{66} \dots\dots\dots(5)$$

C_{13} , importante parâmetro para a geofísica, controla a forma da superfície da onda e possui uma solução complexa.

A parametrização das propriedades elásticas de um meio TI - padronizadas pela indústria – é feita através das velocidades compressional e cisalhante verticais e dos parâmetros de Thomsen:

$$\varepsilon = \frac{c_{11} - c_{33}}{2c_{33}} \dots\dots\dots(6)$$

$$\gamma = \frac{c_{66} - c_{44}}{2c_{44}} \dots\dots\dots (7)$$

$$\delta = \frac{(c_{13} + c_{44})^2 - (c_{33} - c_{44})^2}{2c_{33}(c_{33} - c_{44})} \dots\dots\dots (8)$$

ε é o parâmetro de anisotropia da velocidade compressional; γ é o parâmetro de anisotropia da velocidade cisalhante e δ , importante para a correção de velocidades sísmicas, é o parâmetro que explica a diferença entre V_{NMO} e V_{VERT} . Esses parâmetros podem ser obtidos com maior confiabilidade de registros de VSP (*walkway, walkaround, multi-offset*); entretanto, além de ser na escala sísmica, seu registro é limitado a determinados horizontes do reservatório.

Algumas ferramentas de sônico digital podem atualmente obter em poços verticais através da aquisição de dipolo cruzado, as constantes elásticas de cisalhamento C_{44} e também C_{55} caso a anisotropia seja TIH; C_{66} da inversão do registro da onda Stoneley e C_{33} da onda compressional através da aquisição do monopolo, C_{11} é

apenas obtido em aquisições em poços horizontais (Fig. 1). Com as quatro constantes elásticas é possível calcular os parâmetros γ e ε de Thomsen. Para o parâmetro δ é necessário o cálculo de C_{13} atualmente obtido através de simplificações feitas com parâmetros medidos em laboratório. Eles permitem também o cálculo de C_{11} e C_{12} apenas com registro em poço vertical.

O valor de C_{66} é obtido do conteúdo de baixa frequência da onda Stoneley (onda de tubo); sua propagação provoca um deslocamento radial das paredes do poço que é controlado pelo componente horizontal do módulo de cisalhamento.

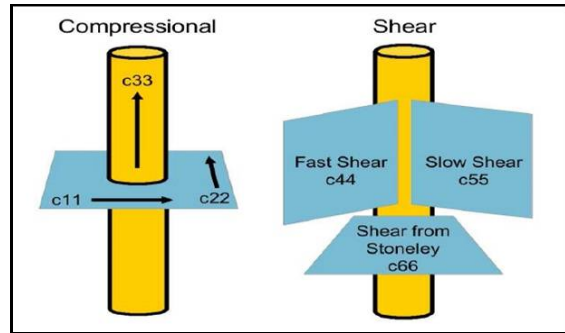


Fig. 1 – Constantes de rigidez elásticas obtidas com uma ferramenta acústica em um poço vertical (exceto C_{11} e C_{22}) caracterizado por anisotropia TIV (Schlumberger, 2012)

Exemplos

Dada a natureza dos dados disponíveis (medidas em poço vertical) o trabalho vai limitar-se a analisar o comportamento dos dados de anisotropia azimutal e os valores de C_{44} , C_{55} , C_{66} e de γ . Com esses dados é possível determinar o tipo de anisotropia presente nas rochas atravessadas pelo poço e o regime de *stress* da área próxima.

$$C_{44} = C_{55} = C_{66} \Leftrightarrow \text{isotrópico} \Leftrightarrow \sigma_v = \sigma_H = \sigma_h$$

$$C_{44} = C_{55}; C_{66} \Leftrightarrow \text{TIV} \Leftrightarrow \sigma_v; \sigma_H = \sigma_h$$

$$C_{44} \neq C_{55}; C_{66} \Leftrightarrow \text{TIH} \Leftrightarrow \sigma_v; \sigma_H \neq \sigma_h$$

$$C_{44} \neq C_{55} \neq C_{66} \Leftrightarrow \text{Ortorrômico} \Leftrightarrow \sigma_v \neq \sigma_H \neq \sigma_h$$

Os dados foram confrontados com registros de imagem, VSP e processamento da onda Stoneley para identificação de fraturas nos poços Alfa e Beta em rochas de idade aptiana da Bacia de Santos.

3.1. Alfa

O poço localiza-se em um *trend* NE-SW, orientado por grandes lineamentos com direção aproximada N15°. Com desvio máximo de 1,5° no intervalo perfurado o poço pode ser considerado vertical. O mergulho das camadas, de acordo com dados de imagem, do topo da seção até X020m é de 10° W-NW em média; daí até a base do intervalo registra valores entre 20° e 30° NW (Fig. 4). Resultados de anisotropia TTI obtidos de dados VSP *walkaway* confirmam esse dado; não constatarem mergulho de camadas no intervalo superior (intv.

X865/X987m) e valor médio de mergulho de 23° no intervalo inferior (intv. X063/X185m).

A análise dos registros se fará em dois intervalos em função das peculiaridades da aquisição do VSP:

Intervalo A (X850-X065m) - Abrange as zonas AAA1, AAA2, AAA3 e BBB3. Possui registro de VSP *walkaround* e *walkaway*. Os registros acústicos apresentam valores iguais das constantes C_{44} , C_{55} e C_{66} , indicando ambiente isotrópico, confirmado pela ausência de anisotropia azimutal no registro de dipolo cruzado (Fig. 3). A análise de fraturas através do SonFrac™ apresenta anomalias de forte intensidade a X923m e intv. X979/X983m com correspondência no perfil de imagem resistiva e acústica. *Breakouts* foram constatados apenas nos intvs X895/X898 e X934/X937m com direção $N135^\circ$; fraturas parcialmente abertas ocorrem muito espaçadamente, as mais representativas no intv. X981/X983m, evidenciando um ambiente de anisotropia muito baixo e localizado. Laminações mais perceptíveis no perfil elétrico, ocorrem freqüentemente na Fm BBB, junto ao topo, em especial nos intvs X025/X035m e X043/X047m.

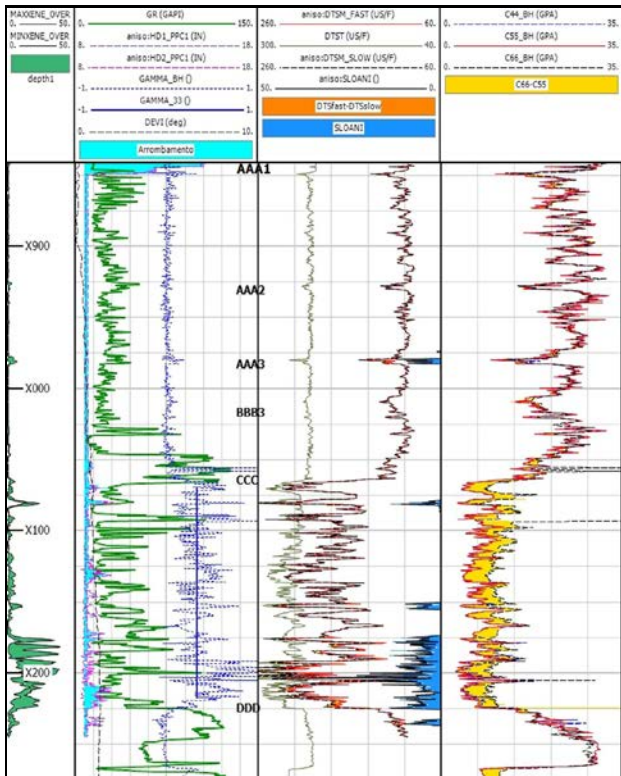


Fig. 3 - Observa-se dois comportamentos distintos das constantes de cisalhamento (*track 4*). Acima de X065m, $C_{44}=C_{55}=C_{66}$ (isotrópico); abaixo $C_{44}=C_{55}<C_{66}$ (ambiente TIV)

Os dados de VSP *walkaround*, processados nesse intervalo, indicam na análise das ondas cisalhantes descendentes lentas e rápidas, anisotropia TIH com fraturas alinhadas na direção $N75^\circ$ com densidade de 6% (modelo de Hudson), considerada baixa a moderada. Confirmando esse dado, na sísmica constata-se zonas de fraturas com direção $N70^\circ$, cortando o *trend* de grandes falhas $N15^\circ$ no mapa sísmico do topo de zona

AAA1.

Intervalo B (X065-X225m) - Abrange a zona C, e tem registro de VSP *walkaway*. O *caliper* irregular em boa parte do intervalo, especialmente em X207/X225m, exige cautela na análise dos registros de poço.

No registro acústico, o comportamento das constantes elásticas é indicativo de ambiente TIV ($C_{44}=C_{55}<C_{66}$) em todo o intervalo; o registro de dipolo cruzado, com as ressalvas das condições de *caliper*, indica presença de anisotropia azimutal (TIH) induzida por *stress* no intv. X175/X225m com direção da cisalhante rápida para $N45^\circ$ - dado robusto apenas no intv. X180/X190m. O SonFrac™, com as ressalvas ao *caliper* já mencionadas, apresenta anomalias de reflexão no intv. X068/X220m, entretanto, no intv. X068/X155m elas estão associadas a anomalias modeladas, influência de eventos originados por irregularidades do *caliper*, mudança de litologia, laminações. No intv. X175/X220m as anomalias são menos freqüentes embora os eventos espúrios se mantenham, elevando o grau de incerteza a respeito desse dado.

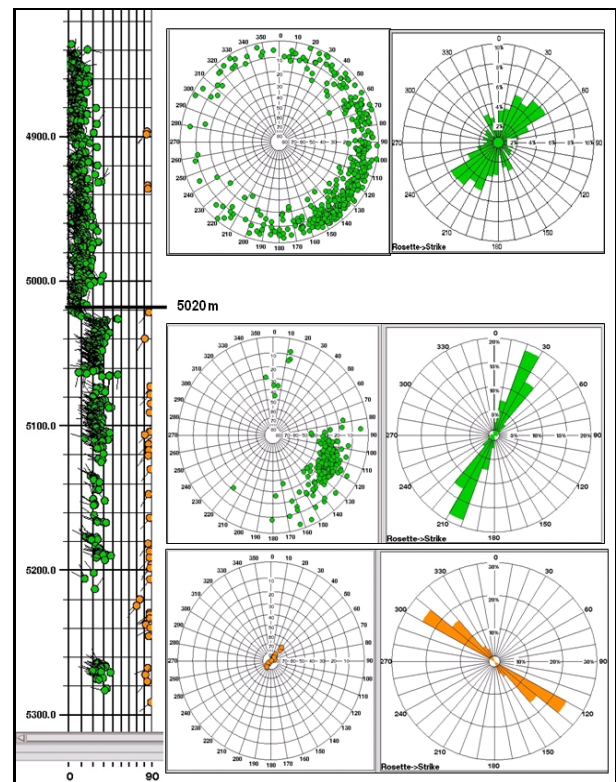


Fig. 4 - À esquerda *ladpoles* do perfil de imagem mostram a clara mudança no valor dos mergulho das camadas a partir de X020m ($10^\circ/30^\circ$) ilustrados nos dois diagramas de roseta superiores (mergulho e direção); direção e mergulho dos *breakouts* no diagrama inferior.

O perfil de imagem revela como feição dominante *breakouts* com direção $N130^\circ$ no intv. X087/X225m (Fig 4), caracterizando o intervalo como TIH; acamamentos diminuem sua freqüência em relação à zona B3, sendo observados apenas nos intvs X058/X062m e X134/X136m; laminações no intv. X055/X057m.

Dados de VSP *walkaway* para essa seção forneceram um valor de ε de 0.32. Sayers (2005) estabeleceu a seguinte relação entre os parâmetros ε e γ de Thomsen (1986) para folhelhos:

$$\varepsilon \approx 0.8 - 1.0 * \gamma$$

O valor médio de $\gamma = 0.33$ obtido do registro acústico de poço para esse intervalo (Fig. 3, *track 1*) confirma essa relação confirmando o dado do VSP. Essa laminação, entretanto, é visível em raros intervalos no perfil de imagem.

3.2. Beta

O poço localiza-se no ápice de uma estrutura no *trend* NW-SE, em área adjacente a Alfa. A área é caracterizada por dois sistemas de falhas; um de orientação N320°, N340° e outro a N70°. É um poço vertical, com inclinação média de 3° na seção perfilada. Atravessou carbonatos das Zonas AAA1, AAA2 e AAA3. Os dados do VSP zero *offset* e *walkaway* mostram camadas com mergulho de 0-5° no intervalo perfilado. Dados do perfil de imagem mostram mergulhos mais acentuados; os valores médios oscilam entre 0° e 10° no intervalo, localmente chegam a 25° (intv. X015/X025m) (Fig. 6).

O *caliper* irregular em alguns intervalos comprometeu significativamente a análise dos dados do perfil acústico induzindo falsas anomalias ou mascarando as reais. É constante a presença de reflexões provocadas por irregularidades de poço nas formas de onda Stoneley modeladas a partir do modelo de Tezuka (SonFrac™) (Fig 5, *track 7*). O comportamento das constantes elásticas parece ter sido afetado; C_{66} diminuiu significativamente seus valores nesses intervalos. Daí a necessidade da análise de outros dados como os de imagem, para validar a informação desses registros.

A análise dos registros se fará em dois intervalos em função das características do registro do dipolo cruzado e dos resultados do SonFrac™.

Intervalo A (X820/X135m) – Abrange as zonas AAA1, AAA2 e topo de AAA3; tem cobertura dos registros VSP *walkaway* e *walkaround*. Apesar das inúmeras anomalias sugeridas pela análise de dados de anisotropia azimutal e SonFrac™, as irregularidades da parede do poço comprometem sua confiabilidade, havendo necessidade de validação por outros métodos.

A análise de anisotropia azimutal tem indicações robustas nos intvs X822/X824m, X826/X830m, X894/X900m, X909/X918m, X958/X973m, 4980/4983m, X080/X092m, X094/X100m, X125/X134m (Fig 5, *track 1*). Os gráficos de dispersão mostram predominantemente anisotropia por *stress* com a direção da cisalhante rápida variando entre N10°/45°. Demais anomalias associadas a irregularidades de *caliper*. O SonFrac™ confirma a maior parte das anomalias anteriores e sugere ainda presença de fraturas verticais/sub-verticais abertas nos intvs X901/X908m, X922/X928m, X935/X940m, X058/X064m.

Quanto ao tipo de anisotropia, o intv. X788/X805m, acima desse intervalo, com análise prejudicada pelas condições de *caliper*, apresenta $C_{66} < C_{55} = C_{44}$. Com os dados

disponíveis pode-se inferir não tratar-se de um meio TI dada a ausência de anomalia nos dados de anisotropia azimutal e no SonFrac™ (elimina a hipótese de meio TIH) e o valor negativo de γ , (descarta a hipótese de meio TIV). No intervalo em análise, todas as anomalias de anisotropia azimutal acima citadas, mostraram $C_{66} < C_{55} < C_{44}$, sugerindo ambiente TIH (assumindo-se que os valores de C_{66} estejam afetados por mobilidade de fluido) ou ortorrômbico. Esse comportamento é mantido também nos intervalos onde o diâmetro do poço está afetado pelo *caliper*, com C_{66} apresentando valores ainda menores. Essa relação muda apenas no intv. X986/X996m com $C_{66} \approx C_{44} < C_{55}$.

Dois pequenos intervalos apresentam $C_{66} = C_{55} = C_{44}$, sugerindo ambiente isotrópico: intvs X016/X036m, X102/X108m; reforça essa hipótese a ausência de anomalias nos resultados de anisotropia azimutal e SonFrac™.

Os dados dos perfis de imagem acústica, revelam feições carsticas no intv X825/X880m (o *caliper* apresenta-se muito irregular no intervalo). O intv. X890/X915m é dominado por uma feição de *breakouts* com direção N120° que se estende de modo incipiente até a base do intervalo; fraturas de baixa amplitude preponderam verticais/sub-verticais no intv X075/X115m, com direção preferencial N10°/30° e N50°/70°.

Os dados de VSP *walkaround* indicam anisotropia do tipo TIH apenas para o intv. X000/X120m (Zona A3) com fraturas alinhadas na direção N140°, com densidade de 7-9% (método de Hudson) caracterizando o intervalo como medianamente fraturado. No intv. X785/X000m (A1, A2) não há evidência da presença desse tipo de anisotropia. Na sísmica, mapa do topo da zona A1, mostra que a área do poço é dominada por três sistemas de falhas: N340°, N320° e N70°, e por três famílias de fraturas: N20°, N75° e N340° informação que se ajusta de alguma maneira aos dados fornecidos pelos métodos anteriores.

Intervalo B (X135/X306m) - Abrange a base da zona AAA3 e tem cobertura de VSP *walkaround* e *walkaway*. O resultado dos registros acústicos mostram $C_{66} < C_{44} \approx C_{55}$ com ausência de anomalia tanto nos dados de anisotropia azimutal quanto no SonFrac™ (Fig. 5, *tracks 1 e 6*) descartando a hipótese de meio TIH; por sua vez o valor negativo de γ elimina a hipótese de meio TIV.

Exceção para os intvs X234/X242m, X294/X304m que reproduzem as relações observadas no intervalo superior, caracterizados por anomalias tanto de anisotropia azimutal com direção da cisalhante N10°, quanto no SonFrac™ mas com análise prejudicada pelas irregularidades do *caliper*.

Os dados de imagem acústica revelam apenas duas feições claras de *breakout* nos intvs. X235/X243m X290/X304m com direção N100° coerente com a informação dos registros acústicos.

Nenhuma anomalia foi constatada nos registros de VSP *walkaround*.

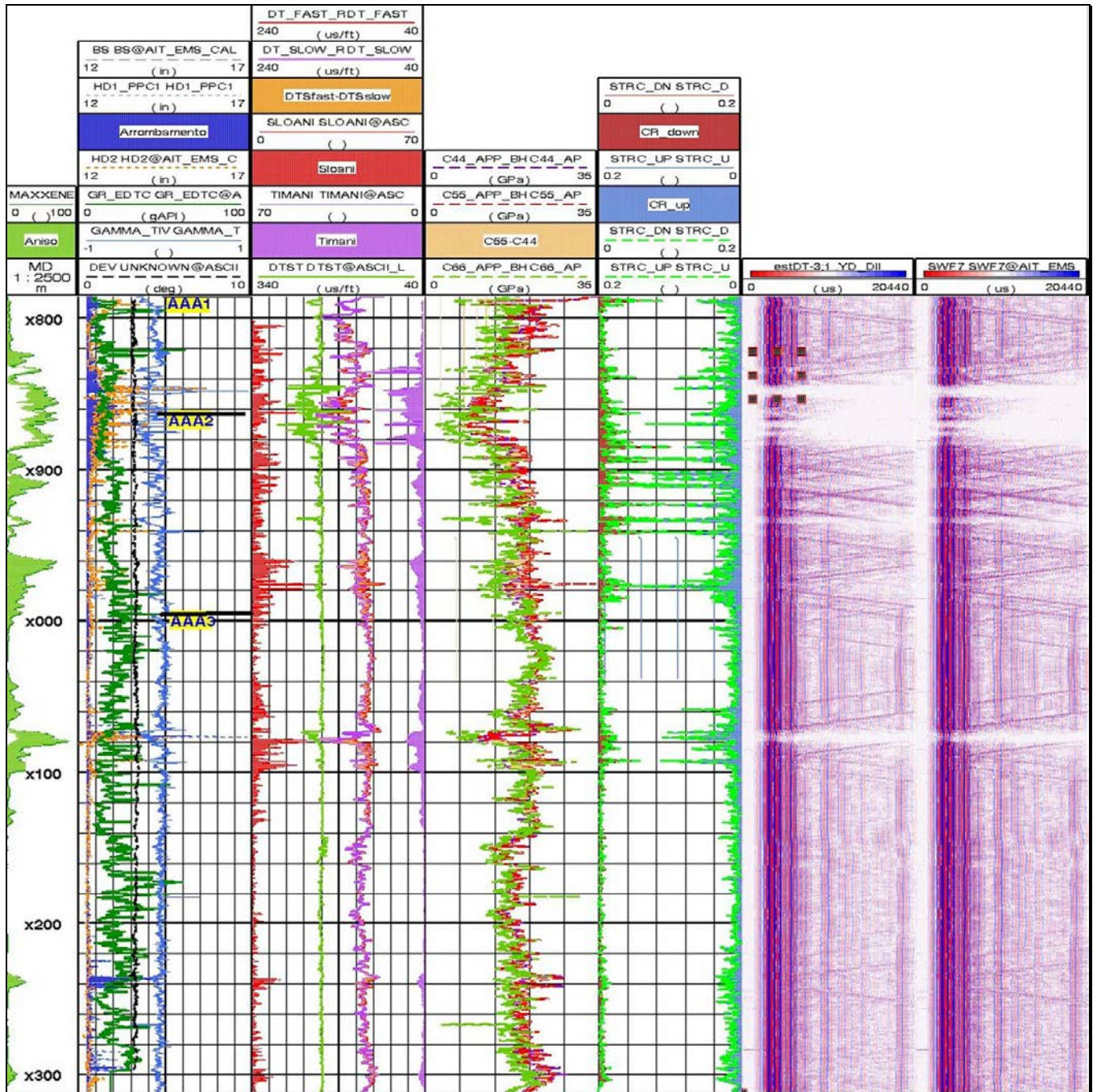


Fig 5 - Podem ser observados duas tendências nos registros acústicos (anisotropia azimutal e Sonfrac™). Fortes anomalias acima de X135m sugerem um provável ambiente TIH. Abaixo as anomalias praticamente desaparecem sugerindo ausência de ambiente TIH e TIV, já que γ apresenta sistematicamente valores negativos.

Conclusões

Alfa

- No intervalo A (X850-X065m) os dados da sísmica e do VSP *walkaround* identificam um sistema de fraturas N70° (ambiente TIH) não

visualizado pelos registros de poço (ambiente isotrópico).

- No intervalo B (X065-X225m) Os resultados de VSP e dos perfis acústicos identificam um meio TIV mas as feições dos perfis de imagem sugerem meio TIH, além de não apresentarem evidência de meio TIV.

Beta

- No intervalo A (X820/X135m) o grande número de eventos identificados pela sísmica, sugerindo meio TIH, permite que haja concordância parcial com todos os outros métodos. O VSP *walkaround* identifica um sistema orientado N140° (intv. X000/X120m) concordando com os sistemas NW-SE da sísmica; os registros acústicos respondem ao sistema NE-SW indicando anomalias localizadas com direção da cisalhante rápida N10°/45°; os registros de imagem com direções de *breakout* a N120° e falhas e fraturas a N10°/30° e N50°/70° (intv. X075-X115m) dão consistência ao dado dos perfis acústicos.
- No intervalo B (X135/X306m) não há registro de ambiente anisotrópico no VSP *walkaround*, informação respaldada pelos registros de poço à exceção de dois intervalos em que ambos identificam um possível ambiente TIH com direção da cisalhante rápida para N10° (dipolo cruzado) e direção de *breakouts* para N100° (registro de imagem). Falhas e fraturas presentes no mapa sísmico do topo do A1, estendem-se por todo o intervalo perfilado.

A análise conjunta dos dados revelou que:

- Métodos acústicos e de imagem revelaram-se complementares com os dados de imagem validando informações dos registros acústicos em intervalos onde as condições de *caliper* afetaram o registro (intvs X234/X242m, X294/X304m em Beta).
- A discordância de resultados entre métodos com diferentes escalas de investigação, sugere ser essa a principal razão para explicar resultados conflitantes como a diferença entre ambientes de anisotropia sugeridos por sísmica de subsuperfície e sísmica de poço com os métodos acústicos e de imagem a exemplo do que ocorreu no intervalo A de Alfa. Entretanto, outros fatores devem ser investigados. Cabe lembrar que os modelos utilizados para caracterizar os diferentes cenários de anisotropia admitem premissas que os simplificam significativamente. Provavelmente a complexidade desses ambientes seja bem maior do que a definida por eles.

Nomenclatura

SonFrac™ - Programa Schlumberger para obter índice de mobilidade do fluido a partir da onda Stoneley.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer ao geólogo Renato Kramberger Carvalho pelas informações a respeito da área de Beta e aos técnicos da Schlumberger Renzo Francia Mimbela e Rafael Guerra pelas discussões a respeito das aquisições e interpretação dos dados das ferramentas acústicas e sísmicas.

Referências

- Albuquerque, V., Castillo, J., Guerra, R., Ali, S., Armstrong, P., 2012, 3DVSP, Walkaway, Walkaround, Zero-Offset VSP and Geogram Processing: Final Report (Beta), Schlumberger.
- Auld, B., 1990, Acoustic Fields and Waves in Solids, Vol.1, Krieger Publ. Co.
- Costa, M., Galaguzza, M., Rufino, R., Guerra, R., 2009, Walkaway, Walkaround, Zero-Offset VSP and Geogram Processing: Final Report (Alfa), Schlumberger.
- Hornby, B.E., Howie, J.M., Ince, D.W., 2003, Anisotropy Correction for Deviated-well sonic logs: Application to Seismic Well Tie: Geophysics, **68**, 464-471.
- Norris, A.N., Sinha, B.K., Weak Elastic Anisotropy an the Tube Wave: Geophysics, **58**, 1091-1098
- Sayers, C.M., 2005, Seismic Anisotropy in Shales: Geophysical Prospecting, **53**, 667-676.
- Schlumberger, 2012, Análise de Anisotropia Sônica 3D & Onda Stoneley – Sonic Scanner – Beta.
- Tang, X.M, Cheng, A., 2004, Quantitative Borehole Acoustic Methods, Amsterdam, Elsevier, 255 p.
- Thomsen, L., 1986, Weak elastic anisotropy: Geophysics, **51**, 1954-1966.
- Walsh, J., Sinha, B. K., Donald, A., 2006, Formation Anisotropy Parameters Using Borehole Sonic Data: SPWLA, 47th Annual Logging Symposium.

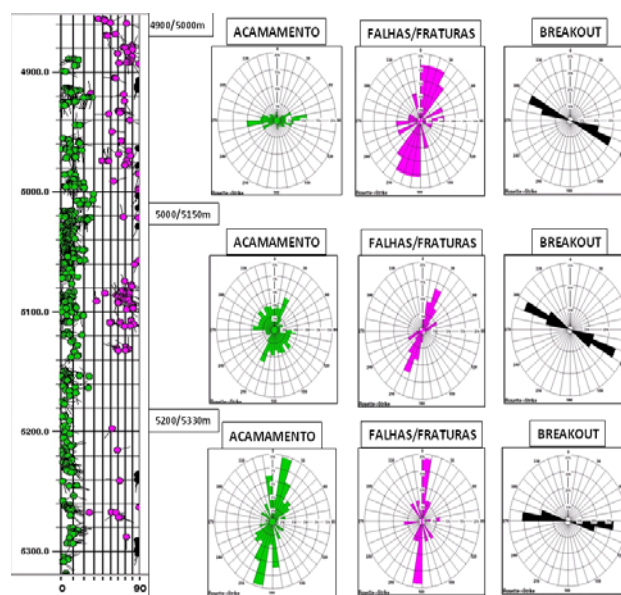


Fig. 6 – Tadpoles do perfil de imagem mostram valores médios de mergulho das camadas de 10° Sistema de fraturas orientados N0°/30°; *breakouts* N90°/120°