



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
MONOGRAFIA DE BACHARELADO EM GEOLOGIA**

IRAPOAN ALVES DE VELDE

**ESTUDO DE ANISOTROPIA SÍSMICA APLICADO A ROCHAS SEDIMENTARES FINAS,
UTILIZANDO ONDAS ULTRASSÔNICAS P E S A PARTIR DE MODELO FÍSICO LAMINADO
IDEAL**

Orientadora: Dr^a. Paula Lucia Ferrucio da Rocha

Rio de Janeiro

2011

IRAPOAN ALVES DE VELDE

DRE: 103137344

**ESTUDO DE ANISOTROPIA SÍSMICA APLICADO A ROCHAS SEDIMENTARES FINAS,
UTILIZANDO ONDAS ULTRASSÔNICAS P E S A PARTIR DE MODELO FÍSICO LAMINADO
IDEAL**

Monografia defendida no dia 16/02/2011 às 14h no auditório Othon H. Leonards (bloco J1/CCMN/IGEO) e submetida ao Departamento do Curso de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Dr^a. Paula Lucia Ferrucio da Rocha

Banca Examinadora:

Prof.^a Orientadora Dr.^a. Paula Lucia Ferrucio da Rocha (D.Sc., ON/CNPq, Brasil, 1998). UNB

Prof.^o Dr.^o Carlos Eduardo de Moraes Fernandes (L.D., UFRJ, Brasil, 1976). UFRJ

Prof.^o Convidado Dr.^o Guilherme Fernandes Vasquez (D.Sc., UFRJ, Brasil, 2009). PETROBRAS

AGRADECIMENTOS

A minha mãe.

A minha esposa e meus filhos.

Aos colegas do curso de Geologia.

Aos professores do curso de Geologia.

Aos funcionários do curso de Geologia e do CCMN

Aos geofísicos: Guilherme Vasquez, Marcio Mörchbacher,

Júlio Justen, Eduardo Faria, Danian Steinkirch, Luiz Alberto e Eng.^a Ana Julia (CENPES);

Aos técnicos: Marcos de Leão, Daniele Melo e Tagore Ostape e estagiário Louis Dostoievsky (CENPES).

“Cum mente et malleo”

Àos meus filhos:

Kauan e Mayara

Resumo

A anisotropia sísmica radial presente em modelo sintético ideal laminado pode ser comparada com amostras análogas formadas por rochas sedimentares finas e laminadas através da propagação ultrassônica de ondas elásticas P e S em amostras orientadas. Utilizando sistemas elétricos-mecânicos e câmara de simulação de pressões litostáticas, diversos ensaios foram realizados no laboratório de Física de Rochas do CENPES, especializado na investigação de velocidades anisotrópicas, gerando uma rica quantidade de dados que foram processados no programa MatLab e Excel e apresentados na forma de curvas para visualização gráfica e interpretações.

Palavras chaves: anisotropia, ondas P, ondas S.

Abstract

The seismic anisotropy in an ideal synthetic laminated model may be compared with analogue samples of thin and laminated sedimentary rocks obtained through the propagation of ultrasonic elastic P and S waves in oriented samples. With the aid of electro-mechanical systems and lithostatic pressure vessel, several experiments were conducted in the Rocks Physics laboratory of CENPES, specialized in the study of anisotropic velocities, generating a rich amount of data that were processed in Matlab and Excel and presented as curves for graphical display and interpretation.

Key-words: anisotropy, waves P, waves S.

Sumário

1 – Introdução	9
2- Método.....	9
2.1 – A preparação dos ensaios	11
3 – Resultados	15
3.1.1 - Resultados da anisotropia radial no plugue padrão de alumino laminado (esp. – 2,0 mm) sem acoplante entre as placas, ou seja, apenas unidas por pressão de contato.	16
3.1.2 – Resultados das medidas com alumínio fatiado com filme de PVC entre as placas.....	22
3.1.3 – Resultados das medidas com alumínio fatiado com melado entre as placas de alumínio	24
3.2 – Anisotropia do Arenito Berea.....	27
3.3 – Anisotropia do Argilito Elipsóide (P32H).....	30
3.4 – Anisotropia do Arenito fino laminado (T04H).....	33
3.5 – Anisotropia do Folhelho orgânico da Formação Irati - PR (DOL3).....	36
3.6 – Anisotropia do Arenito Botucatu - SP	39
4 – Conclusão.....	43
5 - Referências bibliográficas.....	44

Índice de Figuras

Figura 01 – Modos de propagação das ondas P e S nos sólidos.....	10
Figura 02 – Sistema VELAN de medidas	10
Figura 03– Sistema NER de medidas	11
Figura 04 – Os três modelos de investigação anisotrópica de Vernik <i>et al.</i> com destaque para o modelo adotado nesta monografia	11
Figura 05 – Plugue de 1,5" em alumínio fatiado (espessura de 2,0 mm das placas) feito com usinagem de precisão (<i>laser</i>) conforme 3º modelo de Vernik. Nas imagens acima, o plugue montado a partir das placas e visto de diferentes ângulos.	12
Figura 07 – Plugues horizontais de rochas sedimentares estratificadas finas utilizadas nos ensaios.	13
Figura 08 – Cabeçote e detalhe do Sistema de medidas VPVS1S2 da NER.....	14
Figura 09 – Uso de prensa mecânica (primeira fotografia) para medidas de VELAN.	14
Figura 10 – Primeiras chegadas das ondas P, Sh e Sv.....	17
Figura 11 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P, Sh e Sv.....	17
Figura 12 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas Sh.	18
Figura 13– Acima as fotos mostram a direção de polarização da onda Sh no plugue de alumínio.	18
Figura 14 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas Sh interpretado.....	18
Figura 15 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas Sv.....	19
Figura 16 – Acima as fotos mostram a direção de polarização da onda Sv no plugue de alumínio.	19
Figura 17 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas Sv interpretado.	19
Figura 18 – Curvas de velocidades e vagarosidades da onda S1 no plugue de alumínio sem acoplante entre as placas.....	20
Figura 19 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P.	21
Figura 20 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P interpretado.....	21
Figura 21 – Curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P no plugue de alumínio sem acoplante entre as placas.....	21
Figura 22 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas S1.	22
Figura 23 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas S1 interpretado.	22
Figura 24 – Acima as fotos mostram a colocação do filme de PVC entre as placas do plugue de alumínio....	23
Figura 25 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P.	23
Figura 26 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P interpretado.....	23
Figura 27 – As curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P e S1.	24
Figura 29 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas S1 interpretado.....	25
Figura 30 – Acima as fotos mostram a colocação do mel entre as placas do plugue de alumínio; a preparação para ensaios de anisotropia da onda P no Sistema Velan e o confinamento da amostra de alumínio para as medidas de anisotropia radial das ondas S1 no sistema NER.	25
Figura 31 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P.	25
Figura 32 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P interpretado.....	26
Figura 33 - As curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P e S1.	26
Figura 34 – Arenito Berea desde a extração ao plugue referência para testes no laboratório de Física de Rochas do CENPES.	27
Figura 35 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P, Sh (S1) e Sv (S2).	28

Figura 36 – Acima o gráfico de tempos de chegadas das ondas S1. À direita a fotografia da amostra orientada.....	28
Figura 37 – Acima o gráfico de tempos de chegadas das ondas S1 interpretado.....	29
Figura 38 – Acima o gráfico de tempos de chegadas das ondas P. Ao lado a fotografia da amostra no VELAN.....	29
Figura 39 – Acima o gráfico de tempos de chegadas das ondas P interpretado.....	29
Figura 40 - As curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P e S1.....	30
Figura 41 – Plugue horizontal de argilito (P32H) deformado na forma de elipsóide.....	31
Figura 42 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P, Sh (S1) e Sv (S2). Ao lado foto do plugue orientado (P32H).	31
Figura 43 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1. Ao lado foto em detalhe do plugue orientado.....	31
Figura 44 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1 interpretado.....	32
Figura 45 – Acima o gráfico de tempos de chegadas das ondas P. Ao lado a fotografia da amostra no VELAN.....	32
Figura 46 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P interpretado.....	32
Figura 47 - As curvas de velocidades e vagarosidades das ondas S1.....	33
Figura 49 – Gráfico com as primeiras chegadas em tempo das ondas P, Sh e Sv.....	34
Figura 50 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1.....	34
Figura 51 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1 interpretado. Ao lado foto em detalhe do plugue T04H orientado.....	35
Figura 52 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P. Ao lado foto detalhe do plugue T04H no VELAN.....	35
Figura 53 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P interpretado. Ao lado foto afastada do plugue T04H durante ensaio no Sistema VELAN de medidas de anisotropia.....	35
Figura 54 – Acima as curvas de velocidades e vagarosidades das ondas S1.....	36
Figura 55 – Acima as curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P.....	36
Figura 57 – Acima os gráficos com as curvas de velocidades das ondas P, S1 e S2 (lado esquerdo) e detalhe das curvas com as ondas Sh (S1) e Sv (S2) (lado direito).....	37
Figura 58 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1.....	37
Figura 59 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1 interpretado.....	38
Figura 60 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P.....	38
Figura 61 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P interpretado.	38
Figura 62 – Acima as curvas de velocidades e vagarosidades das ondas S1.....	39
Figura 63 – Acima as curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P.....	39
Figura 64 – Plugues de 4" e 1,5" retirados de boco de arenito Botucatu.....	40
Figura 65 – Acima os gráficos com as curvas de velocidades das ondas P, S1 e S2 (lado esquerdo) e detalhe das curvas com as ondas Sh (S1) e Sv (S2) (lado direito).....	40
Figura 66 – Curvas de velocidades e vagarosidades no TOPO, MEIO e BASE do tarugo de 4".....	41
Figura 67 – Plugue de 4" do Botucatu no Sistema de medidas de velocidades anisotrópicas – VELAN.....	41
Figura 68 – Acima as curvas de velocidades das ondas S1. Ao lado foto detalhe do arenito Botucatu.	42
Figura 69 – Acima as curvas de velocidades das ondas S1 interpretado. Ao lado foto do arenito Botucatu... .	42

1 – Introdução

A anisotropia sísmica nas rochas sedimentares é uma importante propriedade física estudada no campo da Geofísica que merece atenção científica com uso diversificado de métodos e técnicas de investigação.

Nesta monografia venho apresentar a técnica de investigação acústica radial pelo método de emissão ultrassônica de ondas elásticas compressionais P e cisalhantes S em plugues horizontais de rocha sedimentares finas e comparadas a um padrão ideal de alumínio laminado rotacionando-se os sólidos num giro de 360° e medindo o tempo de trânsito a cada 30°.

Com o uso de sistemas eletro-mecânicos de propagação ultrassônica e modelagem de velocidades das ondas elásticas P e S os dados das formas de onda resultantes de cada ensaio foram processados no programas MatLab e Excel. Nos resultados produzidos, analisam-se os efeitos desta anisotropia, entre o tarugo siderúrgico laminado, construído especialmente como padrão para este estudo, e os exemplares análogos formados por rochas sedimentares finamente laminadas.

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Física de Rochas do CENPES com apoio dos técnicos e geofísicos do setor.

2- Método

Os métodos utilizados para estimar a anisotropia num modelo físico construído para este estudo foram: VELAN (Velocidades Anisotrópicas) e Sistema NER (*New England Research, Inc*). Ambos se baseiam na propagação ultrassônica de ondas elásticas planas P (onda primária) e S (onda secundária) no meio poroso utilizando para isto cabeçotes com transdutores piezelétricos feitos de material cerâmico especial e com frequência central de 750 kHz. E por fim, o teste comparativo em diferentes rochas sedimentares laminadas. As ondas P são mais rápidas que as ondas S. A onda S não se propaga em líquidos (Figura 01).

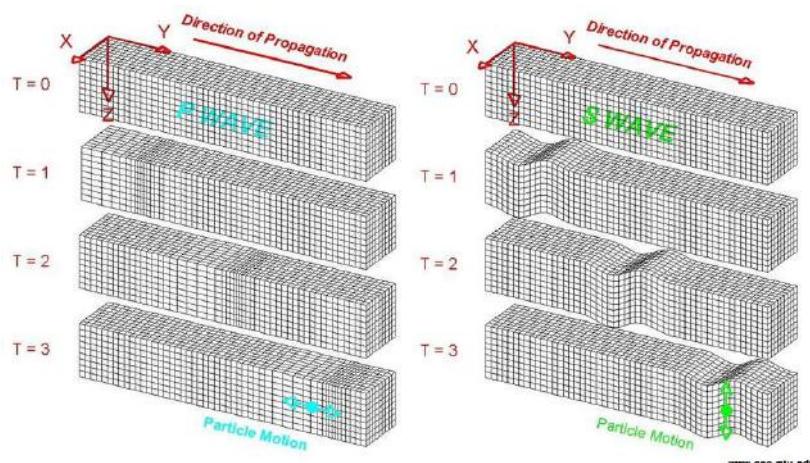


Figura 01 – Modos de propagação das ondas P e S nos sólidos

O Sistema Velan é um sistema eletro-mecânico de medidas de velocidades das ondas elásticas P em corpos sólidos anisotrópicos cilíndricos de 1,5 pol a 4,0 pol de diâmetro. Ele é formado por uma base giratória com passo de 5° onde são analisados os corpos anisotrópicos através do contato de sua superfície com dois transdutores de onda P de 1,5 pol (transmissor e receptor) de 750 kHz na mesma direção. O sinal é transmitido e recebido através de cabos que estão conectados a um pulser/receiver da Panametrics pré-configurado, enquanto que outros cabos, um de *trigger* e outro de saída do sinal, vão para um osciloscópio, onde visualiza-se graficamente o tempo gasto pela onda percorrida no corpo analisado e sua amplitude em milivolts representando a atenuação da onda mecânica neste corpo. Este sistema é aberto e utiliza apenas a pressão de ar-comprimido nos cabeçotes transdutores (*caps*) para prendê-los na superfície da amostra enquanto se anota o tempo de trânsito e sua amplitude no osciloscópio (Figura 02).

O Sistema NER também é um sistema eletro-mecânico cuja diferença do VELAN está na aplicação de pressão confinante triaxial em uma câmara hidrostática com capacidade máxima de 10.000 psi, preenchida com óleo hidráulico. Dentro desta câmara são colocadas amostras de rochas anisotrópicas menores que aqueles usados no VELAN, de 1,0 pol a 1,5 pol de diâmetro, protegidos por camisa nítrica para simular as condições *in situ* de um reservatório de petróleo, por exemplo, (pressão litostática, temperatura, saturação com fluidos e pressão de poros). Neste caso foi utilizada apenas a pressão hidrostática sem uso de temperatura e saturação de fluidos nas amostras analisadas. Este sistema também é formado por um conjunto de *pulser/receiver* responsável por transmitir o pulso mecânico ao plugue e de um osciloscópio para visualizar o tempo gasto pelas ondas elásticas P e S1 e S2. Neste caso vamos analisar o efeito resultante das ondas cisalhantes polarizadas S1 e S2 nas amostras anisotrópicas. As ondas S1 e S2 estão polarizadas perpendicularmente e permitem mapear a anisotropia de uma amostra através da diferença entre os tempos de trânsito destas ondas na amostra. Quanto maior o tempo gasto (atraso) pela onda S em uma determinada direção menor é a velocidade da onda elástica; quanto menor é o tempo gasto maior é a velocidade da onda elástica no corpo. Para os geofísicos os resultados dos ensaios são dados na forma de velocidades (m/s). Para os engenheiros de reservatórios, com foco nas tensões *in situ* que estão submetidas as rochas os resultados são expressos em termos de vagarosidade ($1/V(\text{m/s})$), (Figura 03).

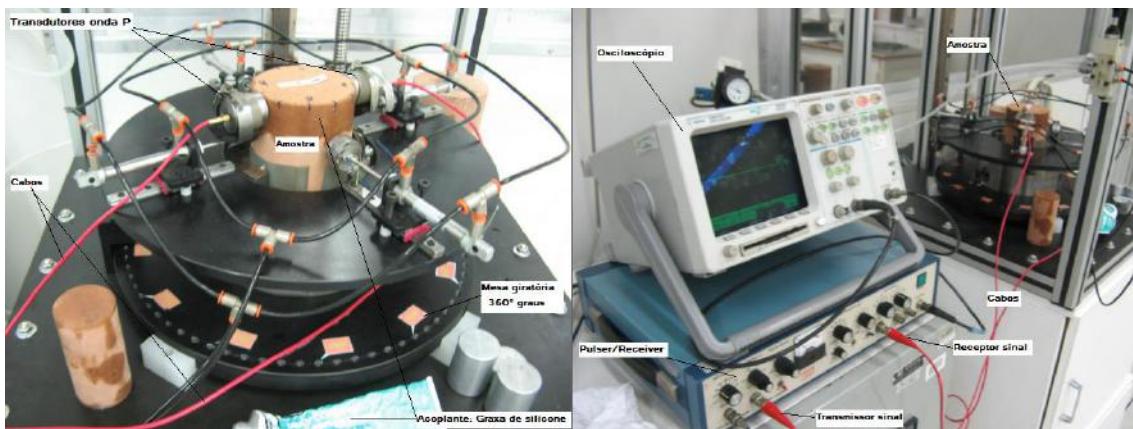


Figura 02 – Sistema VELAN de medidas

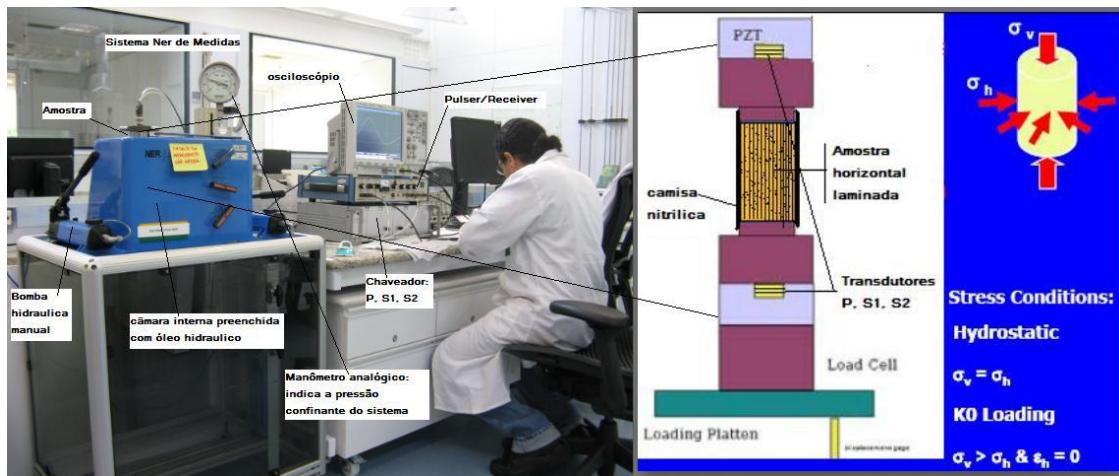


Figura 03– Sistema NER de medidas

Neste estudo estão enfatizados os resultados em termos da defasagem de tempo gasto pela onda para percorrer os sólidos anisotrópicos. Nas amostras horizontais e anisotrópicas, quanto maior o tempo gasto percorrido pelas ondas P e S, em uma direção da amostra orientada, maior é a anisotropia naquela direção. Isto significa que as ondas P e S tendem a incidir na direção perpendicular aos planos de laminação ou acamamento sedimentar. E vice versa, quanto menor o tempo, menor a dificuldade das ondas P e S vibrarem naquela direção e também de forma análoga, estas ondas tendem a se propagar paralelas a laminação ou acamamento sedimentar.

Em cada ensaio são gerados muitos arquivos no formato Comma-Separated Values (.CSV) contendo as funções de duas variáveis (amplitudes e tempos) que são as formas de ondas elásticas transmitidas pelas amostras e visualizadas no visor do osciloscópio, sendo então gravadas em um dispositivo portátil de armazenamento de dados (*pendrive*). Em seguida os dados de cada ensaio são baixados no computador com o programa de cálculo numérico MatLab (*Matrix Laboratory*) onde ocorre o processamento dos dados e a visualização gráfica do conjunto de dados processados.

2.1 – A preparação dos ensaios

Em primeiro lugar foi confeccionado um modelo físico anisotrópico padrão inédito para este estudo produzido por uma empresa do ramo de metais sob medida. O modelo escolhido para este estudo é o terceiro dos três modelos de Vernik (Vernik, L., and Nur, A., 1990¹ e Vernik, L. e Liu, X. 1997²): plugue com laminação na horizontal, plugue com laminação na diagonal (45°) e plugue com laminação na vertical conforme destacado na figura 04.

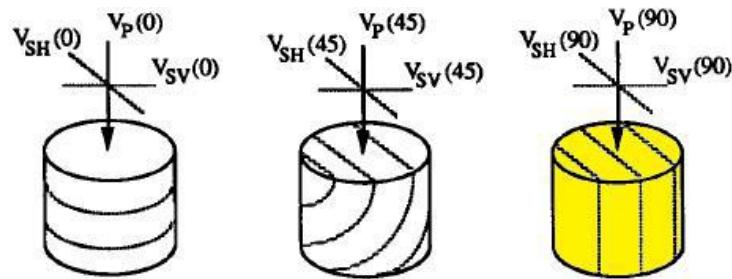


Figura 04 – Os três modelos de investigação anisotrópica de Vernik *et al.* com destaque para o modelo adotado nesta monografia

A escolha deste último modelo foi feita em função do custo, tempo e grau de dificuldade na confecção e do leque de ensaios e resultados a serem obtidos com este modelo a partir da aplicação da técnica ultrassônica. Neste último modelo escolhido de Vernik *et al.*, tem três eixos: VP, VSh e VSv. O VSh está paralelo ao plano laminado e o VSv está perpendicular ao plano laminado. O material escolhido foi o alumínio por apresentar atenuação muito baixa para propagação de ondas elásticas. O modelo foi planejado para compor um tarugo cilíndrico (plugues) de alumínio, fatiado verticalmente em placas com 2,0 mm de espessura e com 1,5 polegadas de diâmetro por 6,0 cm de comprimento (Figura 05). A espessura das placas foi definida para ter dimensão inferior ao comprimento de onda utilizado no Laboratório de Física de Rochas no CENPES, cuja ordem é de 5,3mm de modo a se evitar perdas com reflexão da onda plana incidida sobre a normal das superfícies laminadas e atenuação do sinal. A frequência central das medidas é de 750 kHz.



Figura 05 – Plague de 1,5” em alumínio fatiado (espessura de 2,0 mm das placas) feito com usinagem de precisão (laser) conforme 3º modelo de Vernik. Nas imagens acima, o plague montado a partir das placas e visto de diferentes ângulos.

Os sistemas de medidas devem ser pré-configurados (*pulser/receiver* e osciloscópios) e os parâmetros devidamente registrados para que as medidas tenham a mesma configuração e seus resultados possam ser utilizados e comparados futuramente. O *pulser/receiver* de alta tensão utilizado da Panametrics modelo 5058PR (Figura 06) tem os seguintes parâmetros de configuração: *Rate* - 50 Hz; *Damping* - 500 Ω; Pulso elétrico - 100 V; Ganho (*gain*) - 50,2 dB; Filtro: corta alta freqüência - 1,0 MHz e corta baixas freqüências – 300 kHz; fase da onda = 180° (invertida); *vernier* – (-1). O Osciloscópio utilizado é um dos mais precisos no mercado, o Agilent Infiivision DSO7012B 100 MHz 2 Gsa/s (Figura 05) com 256 de *average*; *Trigger* em 2,0 volts; Amostragem durante a subida da onda. As formas de onda salvas para análise dos resultados de todos os ensaios realizados estão no formato Comma-separated values (.CSV) com amplitude de onda em 200 mV e janelas de tempo em 10us (pulso completo incluindo o pulso elétrico original) e 1.0 us (zoom na forma de onda transmitida P, S1 e S2).

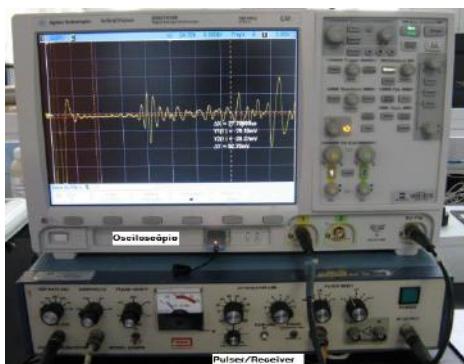


Figura 06. Fotografia em detalhe ao lado mostrando o osciloscópio (acima) e o pulser/receiver (abaixo).

Para os testes comparativos entre a anisotropia das ondas P e a anisotropia das ondas S foram selecionados 6 plugues de rochas sedimentares finamente acamadas ilustradas na figura 07, plugadas no plano de sedimentação, de modo similar ao 3º modelo de Vernik. *et al.* Os litotipos são argilitos, folhelhos ricos em matéria orgânica, siltitos, arenitos finos (Berea e Botucatu) provenientes de bacias sedimentares brasileiras e apenas o Berea proveniente dos Estados Unidos. Todos são plugues horizontais de 1,5 pol de diâmetro, ou seja, tarugos cilíndricos extraídos no mesmo sentido do acamamento sedimentar (paralelo à estratificação) e suas bases foram lixadas de forma a ficarem niveladas paralelamente. Desta forma, as bases e laterais do plugue mostram as linhas de terminação destas superfícies de acamamento sedimentar paralelos ao comprimento dos plugues de rocha.



Figura 07 – Plugues horizontais de rochas sedimentares estratificadas finas utilizadas nos ensaios.

Os plugues de 1,5 pol devem ser revestidos de camisa nitrílica impermeável ao óleo hidráulico utilizado para pressurizar a câmara de pressão da NER e presos aos cabeçotes transmissores e receptores com arames para evitar invasão do óleo do sistema na amostra. Deve-se também posicionar em ambas as bases do plugue 2 discos finos de chumbo para melhor acoplamento no contato com os transdutores e a superfície de contato da amostra, geralmente rugosa, a fim de evitar perdas de sinal mecânico durante a transição transdutor-plugue (Figura 08). Convencionou-se alinhar a costura da camisa nitrílica com a linha do plano de laminação da amostra, ou seja, a linha de costura da camisa sempre vai estar paralela ao plano de laminação. Esta linha está posicionada de forma a estar sempre paralela a uma direção de polarizado da onda S1 e perpendicular a esta linha, num giro de 90° fica a direção de polarização da onda S2, de forma a permitir o mapeamento das duas direções de polarização das ondas cisalhantes S numa mesma medida, através do chaveamento elétrico dos respectivos transdutores piezelétricos: P, S2 e S2 normalmente no mesmo ponto de pressão.

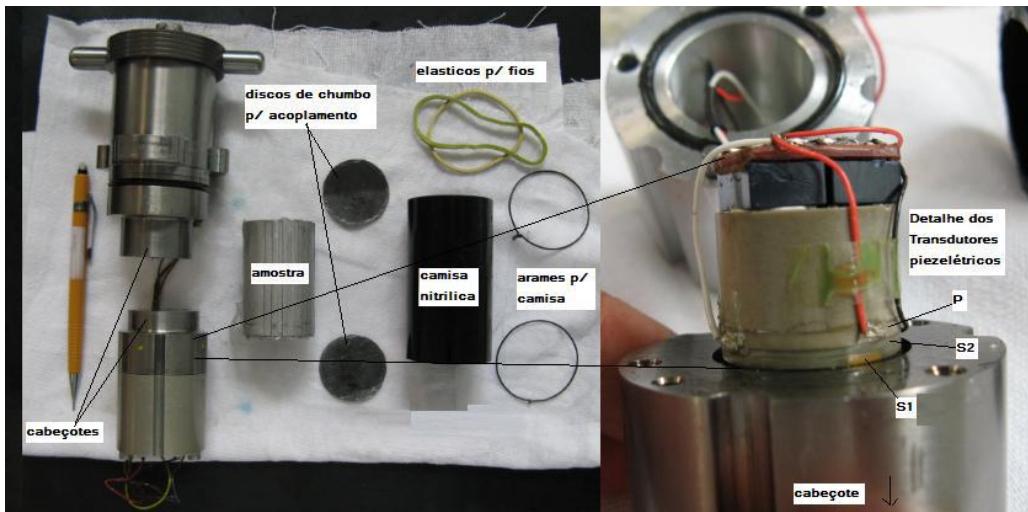


Figura 08 – Cabeçote e detalhe do Sistema de medidas VPVS1S2 da NER.

Para o sistema VELAN a preparação da amostra é mais simples, apenas colocando um acoplante na superfície de contato com os transdutores (transmissor e receptor) de onda P. O acoplante neste caso é graxa de silicone para compensar a superfície curva da amostra e amenizar a perda de sinal com a rugosidade da superfície da amostra. Estes cabeçotes transmissor/receptor são fixados à superfície lateral da amostra por meio de ar comprimido regulado a 5,6 bar (81,22 psi). Alguns ensaios tiveram melhores resultados com uso de morsa de bancada devido à flexibilidade de colocação dos transdutores na superfície lateral dos plugues sem comprometer a qualidade dos ensaios de VELAN. Nestes casos fixam-se as amostras pela base na prensa e apoiadas em uma superfície de papelão, posicionam-se os transdutores na direção de medida de 0° a 360° a cada 30° para mapear a anisotropia (Figura 09).

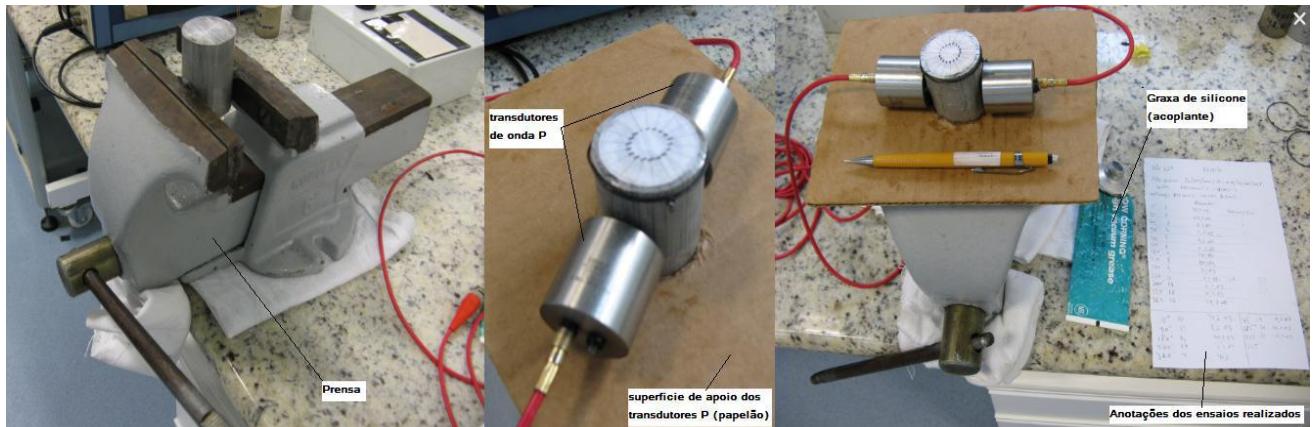


Figura 09 – Uso de prensa mecânica (primeira fotografia) para medidas de VELAN.

Para ambos os métodos deve-se estimar o tempo do sistema para o cálculo das velocidades e vagarosidades das ondas elásticas transmitidas nas amostras, apenas juntando os cabeçotes e anotando o tempo zero, ou seja, o tempo que o pulso elétrico-mecânico leva para percorrer todo o circuito eletrônico e mecânico sem a presença de amostras entre os transdutores.

3 – Resultados

Os dados no formato Comma-Separated Values (.CSV) gerados nos ensaios de laboratório utilizando o VELAN e o Sistema NER de medidas foram previamente formatados no programa Excel antes do processamento no programa MatLab. No Excel, os arquivos no formato .CSV foram editados retirando-se os cabeçalhos e padronizando para estarem todos com 980 amostras (incluindo-se o tempo inicial zero), sendo que cada amostra corresponde ao par (x,y): tempo e amplitude, respectivamente, totalizando 1960 pontos para cada direção medida, que multiplicados por 14 direções, ou seja, de 0° a 360° inclusive, espaçamento de 30°, resultando num volume de 24.440 pontos para cada ensaio!

Os ensaios são realizados de forma comparada entre VELAN (27.440 pontos) e somadas aos ensaios realizados com o Sistema NER (também 27.440 pontos) temos um montante de 54.880 pontos. Para os 6 litotipos mais um do alumínio padrão este valor fica multiplicado por 7 resultando em 384.160 pontos analisados ao longo do ano de 2010 e inicio de 2011. Considerando que outros ensaios de subida e descida da pressão também foram realizados e citando outros testes que foram descartados por problemas de muita atenuação do sinal ou da amostra partir durante os ensaios dificultando a continuidade do ensaio, a quantidade de dados produzidos seria muito superior.

Em seguida os dados na forma de matrizes ($m \times n$), sendo $m = 980$ e $n = 2$, preparadas no Excel foram organizados e processados dentro do programa de cálculo numérico e matrizes MatLab através de *scripts* executáveis pré-programados, resultando em gráficos de curvas visualmente robustos e integrados, de forma similar a um sismograma, com a diferença de ser pontual e que evidencia o efeito da anisotropia acústica radial durante o giro de 360° das amostras testadas em laboratório.

Paralelamente foram calculados em planilhas inteligentes do Excel os valores de velocidades de propagação das ondas P e S (m/s) e suas respectivas vagarosidades (s/m) referentes aos gráficos processados. A vagarosidade bem como a velocidade estão apresentadas na forma de gráficos de curvas do Excel mostrando quantitativamente o grau de dificuldade e da atenuação das ondas elásticas P e S quando se propagam nas diferentes direções da amostra laminada/acamada, ou seja, quando incidem paralelas ao plano das camadas, quando propagam obliquamente a estes planos e quando incidem perpendiculares a estes planos.

É bom lembrar que o que vemos nos gráficos seguintes é o produto resultante das inúmeras interações das ondas elásticas P e S com o meio interno. Dentre tais interações estão: a porosidade, a permeabilidade, a densidade da rocha; o volume dos sólidos contra o volume de poros da rocha; as micro-fraturas, a natureza da cimentação, a natureza da matriz, as combinações mineralógicas, a textura heterogênea, o empacotamento heretogênico, o grau da dia gênese ou metamorfismo da rocha; o tempo de exposição na superfície fora das condições originais de pressão litostática; a temperatura ambiente, a umidade; as ondulações no acamamento sedimentar como estratificações cruzadas, acanaladas, descontinuidades laterais; deformações micrométricas ou milimétricas no volume durante e depois dos ensaios confinantes; o grau de elasticidade e plasticidade da rocha; a natureza do contato entre os grãos do arcabouço tipo pontual, longo, côncavo, convexo, etc; atenuação;

difração; refração pelas bordas; a reflexão de ondas convertidas dentro do plugue: PSP, SPS, PS, SP; multiplas; e etc., os quais são fatores variáveis de uma equação complexa que não estão sendo considerados nesta monografia, por ser um assunto muito mais amplo e complexo, mas apenas o efeito genérico das anisotropias que por si só mostraram-se bem significativos nos modelos análogos apresentados.

Os resultados dos ensaios estão apresentados na seguinte ordem para o alumínio modelo:

Características físicas: Plugue de 1,5"; direção das lâminas – vertical; espessura das placas 2,0 mm; média do comprimento - 59,27 mm; média do diâmetro – 37,97 mm; peso – 180 g; massa específica (μ) – 2,69 g/cm³

3.1.1 - Resultados da anisotropia radial no plugue padrão de alumino laminado (esp. – 2,0 mm) sem acoplante entre as placas (apenas unidas por pressão de contato).

Configuração do sistema antes do ensaio: 1) Câmara da NER. a) Pulser/receiver, modelo 5058R - Panametrics: Rate – 50 Hz; Damping – 500 (Ω); Pulse height – 100 V; Atenuador - 52 dB; Filtros (Mhz): 0,3 HP e 1,0 LP; Fase: invertida (180°); Ganho – 60 dB; Vernier: -1 dB; b) Osciloscópio modelo DSO7012B da Agilent Technologies 100 MHz e 2 Gsa/s: Trigger 2,0 V ; pulso – subida; Amplitude – 500 mV; Janela de Tempo – 5,0 us; Arquivos salvos: no formato .CSV no pendrive; Pressão hidrostática: de 1000 a 5000 psi subida e descida da pressão; em 3000 psi (giro de 360°). Temperatura no laboratório (T) – 22°C; Umidade (UR) - 65%; 2) VELAN. a) Pulser/receiver, modelo 5058R - Panametrics: Rate – 50 Hz; Damping – 500 (Ω); Pulse height – 100 V; Atenuador - 52 dB; Filtros (MHz): 0,3 HP e 1,0 LP; Fase: normal (0°); Ganho – 60 dB; Vernier: -1 dB; b) Osciloscópio modelo DSO7012B da Agilent Technologies 100 MHz e 2 Gsa/s: Trigger 2,0 V ; pulso – subida; Amplitude – 500 mV; Janela de Tempo – 5,0 us; Arquivos salvos: no formato .CSV no pendrive; Pressão: inferior a 50 psi, apenas para acoplamento dos gapes; T = 22°C; UR = 65%.

No Sistema NER de medidas de velocidades os transdutores que emitem e recebem as ondas polarizadas SH estão alinhados com a direção dos planos laminados do alumínio (paralelo - // ; laminação - LAM). Os transdutores que geram ondas SV têm polarização perpendicular a SH e vibram perpendicularmente aos planos de laminação. As ondas elásticas compressionais P viajam verticalmente no plugue na forma de ondas quase planas de uma base para outra base, ou seja, do transmissor para o receptor. Similarmente as ondas cisalhantes SH e SV vibram de um lado a outro do plugue na mesma direção, propagando pelo plugue de uma base para outra, porém com movimentos tangenciais rítmicos em relação à frente de onda. Estes movimentos tendem a movimentar elasticamente as partículas sólidas adjacentes na passagem da onda cisalhante, voltando em seguida ao seu estado de equilíbrio.

O primeiro gráfico feito no MatLab (Figura 10) mostra as formas de onda P, SH e SV com as primeiras chegadas em tempo (em micro segundos - us) das onda na câmara NER com aumento e diminuição da pressão (1000 até 5000psi e depois até 1000psi) na direção de 0°. Em seguida o gráfico de linhas feito no Excel (Figura 11) correspondente, onde foram calculadas suas velocidades pela fórmula: $V = S / T$ (S – comprimento da amostra em metros e T – tempo em segundos) em cada ponto de pressão (psi) referente a estas medidas.

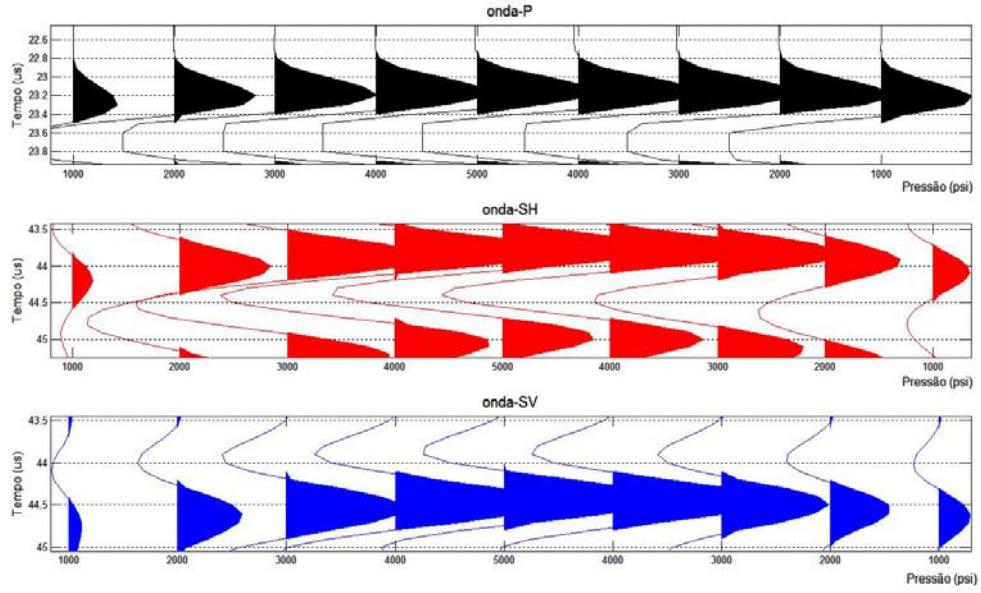


Figura 10 – Primeiras chegadas das ondas P, Sh e Sv.

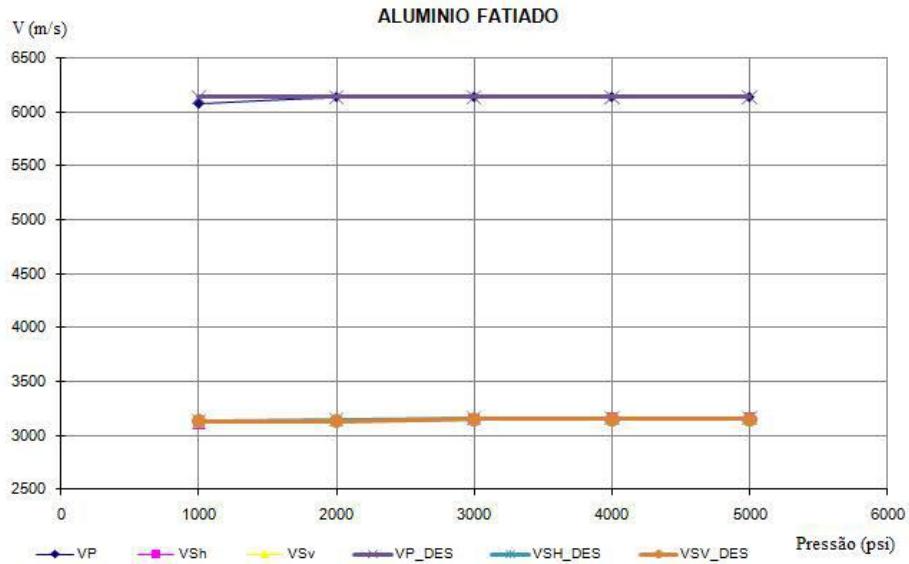


Figura 11 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P, Sh e Sv.

Os gráficos seguintes, feitos no MatLab, mostram o efeito conjunto da anisotropia radial da amostra de alumínio ilustrados em 13 curvas (formadas pelo par: tempo e amplitude) reunidas lado a lado no gráfico e representando o giro de 360° (eixo das abscissas de 0° a 360° com espaçamento de 30°; eixo das ordenadas em microssegundos - us) seguidos de interpretação (Figuras 12 a 17). Em função dos obstáculos planos e verticalizados enfrentados pelas ondas elásticas SH e SV (incidência paralela, inclinada ou perpendicular a laminação) ocorrem variações nos tempos de trânsito destas ondas nas amostras medidas. Estes planos verticalizados (incluindo os acamamentos sedimentares) funcionam como barreiras de atraso, análogos aos planos de falhas e fraturas perfeitas. No caso do alumínio, são interfaces sem acoplante e preenchidas com Filme de PVC e Mel. Nos exemplares rochosos são interfaces sólidas onde ocorrem variações na impedância acústica. As ondas elásticas SH e SV foram medidas com a amostra confinada na câmara NER em 3000psi.

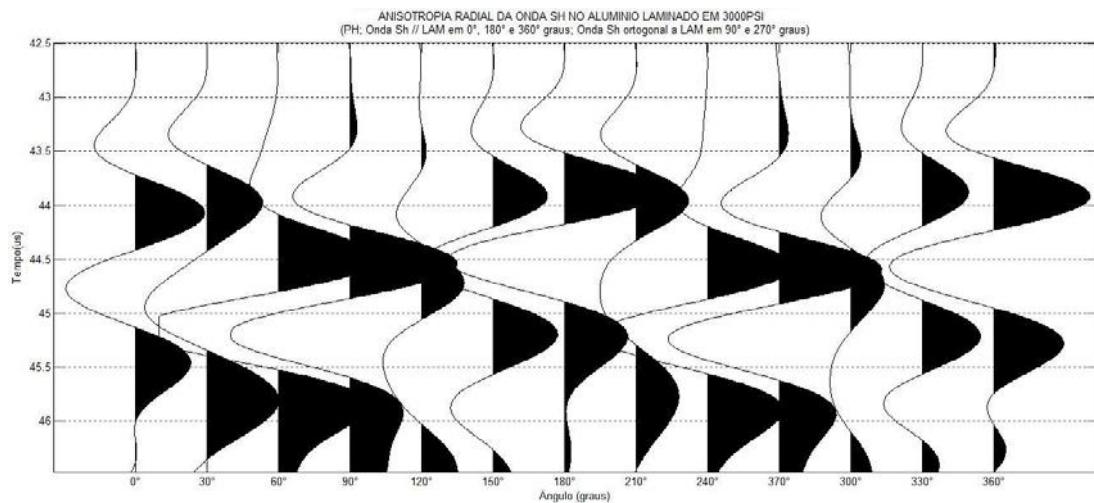


Figura 12 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas Sh.

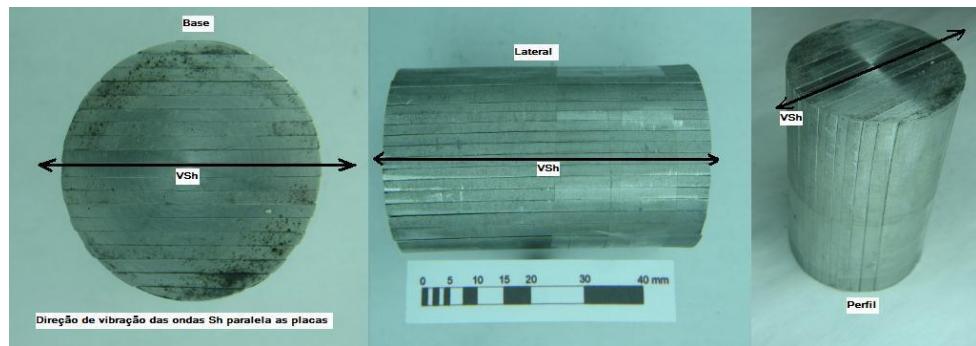


Figura 13– Acima as fotos mostram a direção de polarização da onda Sh no plugue de alumínio.

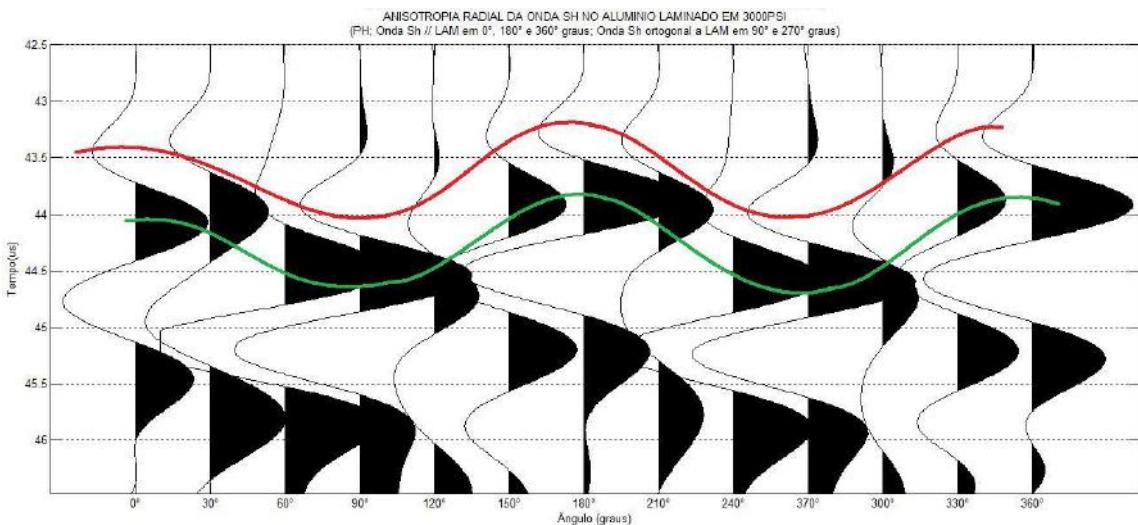


Figura 14 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas Sh interpretado.

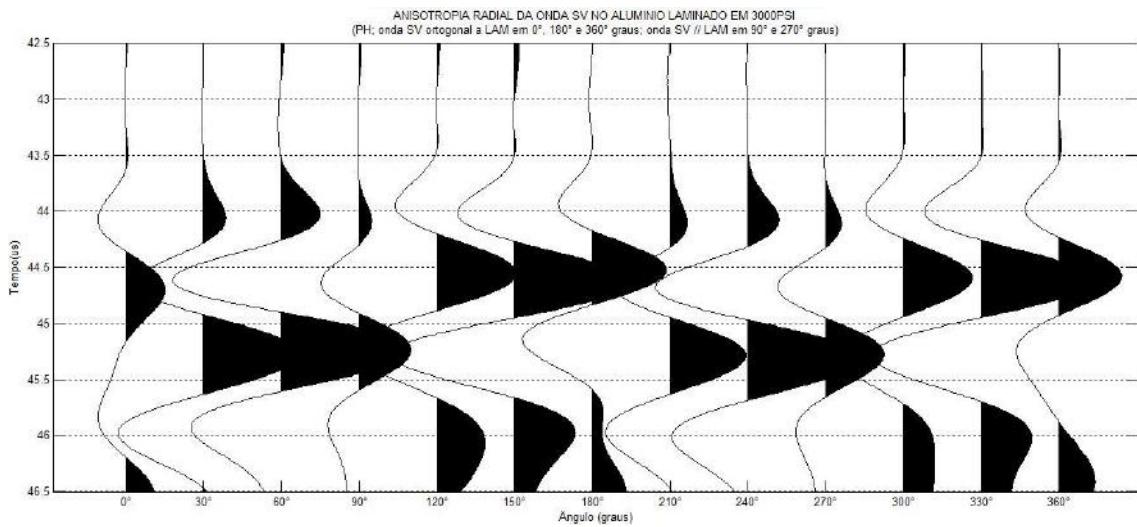


Figura 15 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas Sv.



Figura 16 – Acima as fotos mostram a direção de polarização da onda Sv no plugue de alumínio.

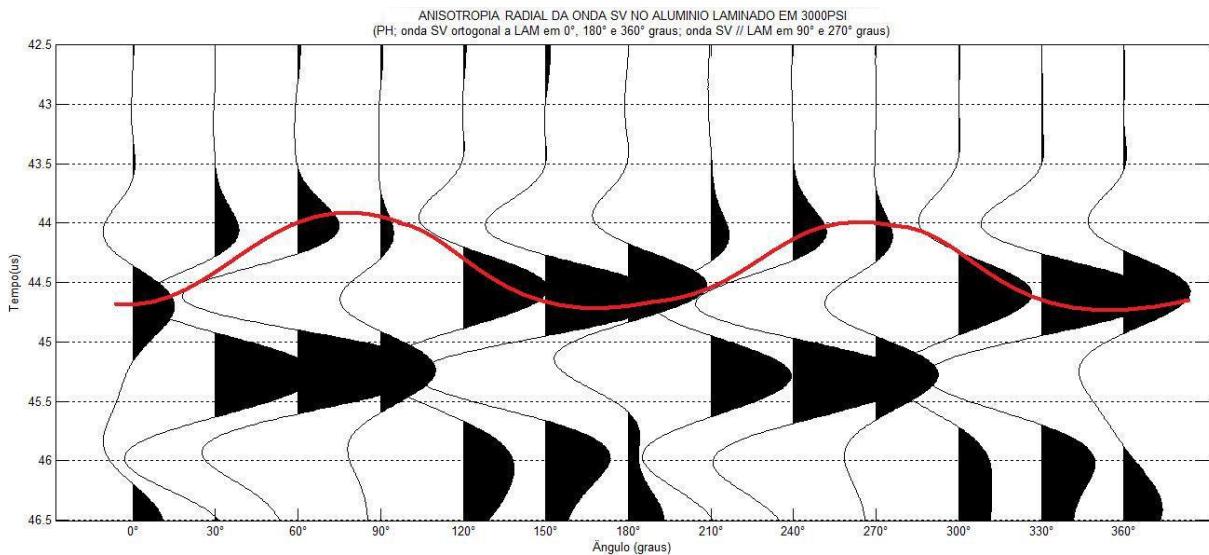


Figura 17 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas Sv interpretado.

Os gráficos interpretados e as imagens dos plugues indicando a direção de polarização da onda Sh e Sv mostram claramente a manifestação da anisotropia após a passagem destas ondas elásticas, ocorrendo um maior atraso no tempo de trânsito (maior tempo) quando tendem a incidir na direção perpendicular às lamações formadas pelas placas de 2,0 mm de espessura, sem acoplante entre suas interfaces. Como as placas são planas e estão bem unidas por pressão de contato, ainda pode existir uma fina película de ar nas interfaces. As pequenas variações nas formas de onda de algumas curvas são imperfeições típicas do acoplamento dos discos maleáveis de chumbo utilizados para corrigir a rugosidade nas bases dos plugues, que vão se moldando progressivamente com a evolução dos ensaios a cada direção medida.

No Excel foram produzidas as curvas de velocidades e vagarosidades construídas após o giro de 360° a partir dos tempos de chegada da onda Sh (ou S1) e do comprimento da amostra (Figura 18). Para o cálculo das vagarosidades utilizou-se o inverso da velocidade: Vaga = 1/V (s/m). Nos próximos ensaios serão apresentados apenas os gráficos com o efeito da anisotropia nas amostras produzido a partir do chaveamento elétrico de transdutores piezelétrico geradores de ondas S1. Tanto os produzidos no MatLab quanto os produzidos no Excel para simplificar. Pois os efeitos produzidos pelas ondas Sv (ou S2) são opostos aos das ondas S1 (Figuras 14 e 17), por terem sido construídos perpendiculares entre si (detalhe da Figura 08).

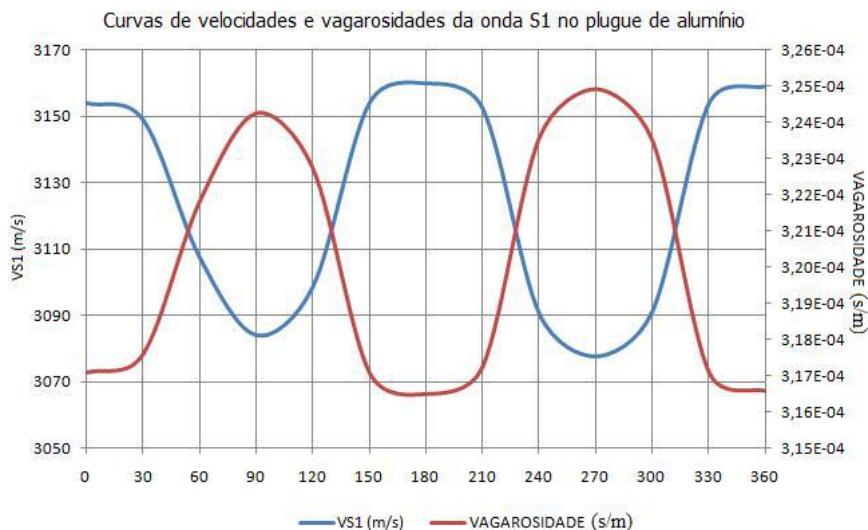


Figura 18 – Curvas de velocidades e vagarosidades da onda S1 no plugue de alumínio sem acoplante entre as placas.

No Sistema VELAN as ondas P foram medidas em sistema não-confinado apenas com pressão dos cabeçotes inferior a 50 psi de ar-comprimido para acoplamento dos transdutores (Figura 09). As placas de alumínio estão unidas apenas pela pressão de contato, tendo distância entre uma placa e outra aproximadamente nula. Da mesma forma que no sistema NER foram medidas 13 direções (0° a 360° a cada 30°) tomando-se os tempos de trânsito das ondas elásticas P no sentido diagonal (medidas na radial) do plugue de alumínio laminado. Os gráficos seguintes mostram o efeito da anisotropia radial da onda P no plugue laminado de alumínio seguido de sua interpretação e o cálculo das velocidades e vagarosidades (Figuras 19 a 21). Neste caso a distância S da fórmula de velocidades e vagarosidade é substituída pelo diâmetro da amostra em metros (m).

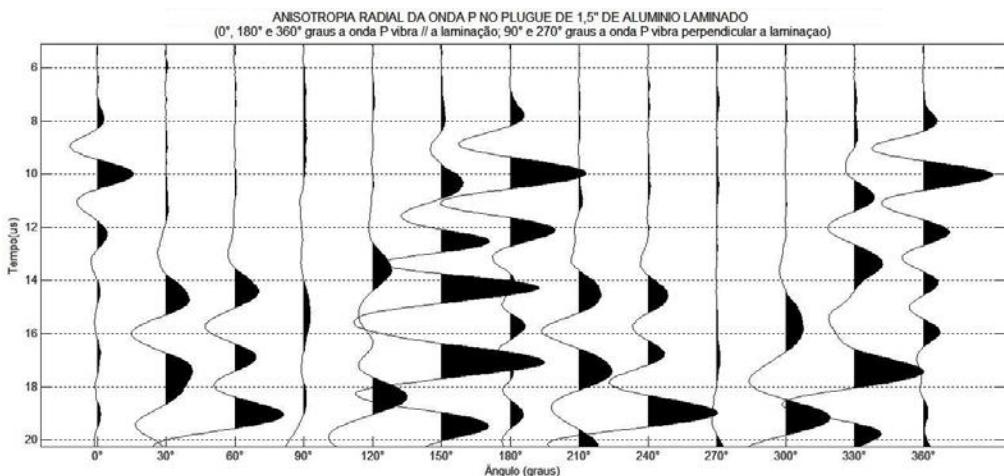


Figura 19 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P no alumínio laminado.

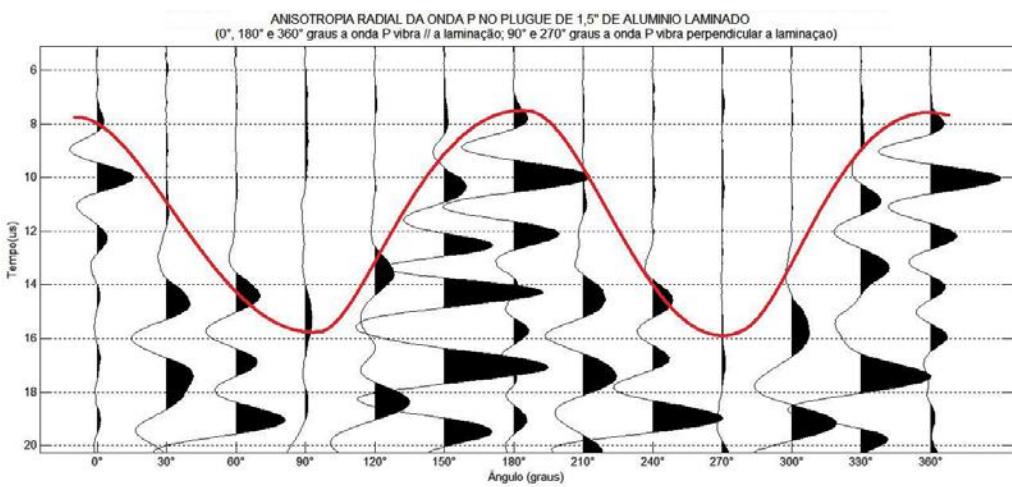


Figura 20 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P interpretado.

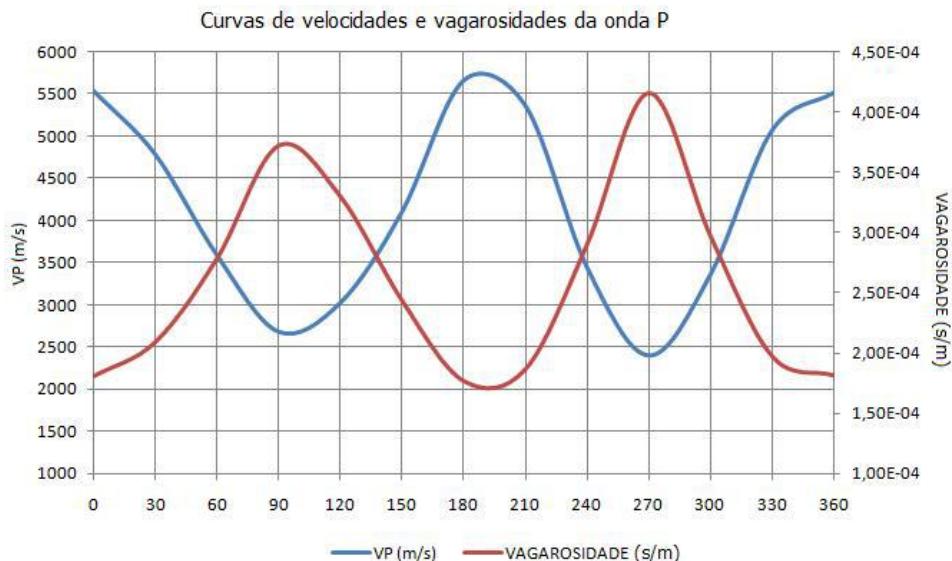


Figura 21 – Curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P no plugue de alumínio sem acoplante entre as placas.

O efeito da anisotropia radial no plugue padrão de alumínio também está manifesto no VELAN, onde é mostrado o maior atraso no tempo da primeira chegada da onda P, após sua propagação na amostra, quando tende a incidir de forma perpendicular a laminação (diferença de cerca de 46% entre os tempos de chegada: mínimo e máximo).

3.1.2 – Resultados das medidas com alumínio fatiado com filme de PVC entre as placas

Parâmetros: 1) Câmara da NER. Configuração do sistema antes do ensaio: a) Pulser/receiver: idem ao anterior; b) Osciloscópio: idem ao anterior; Arquivos salvos: no formato .CSV no pendrive; Pressão hidrostática: 3000 psi (giro de 360°). T = 22°C; UR = 65%; 2) VELAN. Configuração do sistema antes do ensaio: a) Pulser/receiver: idem ao anterior; b) Osciloscópio: idem ao anterior; Arquivos salvos: no formato .CSV no pendrive; T = 22°C; UR = 65%.

Em um segundo ensaio, procurando explorar outros efeitos da anisotropia das ondas P e S no plugue de alumínio laminado, foi colocado entre as placas uma fina película de filme flexível de PVC (cloreto de polivinila ou cloreto de vinil) com 15 micras de espessura, na expectativa de um melhor acoplamento entre as placas. Os resultados estão representados nos gráficos seguintes conforme seqüência anterior (Figuras 22 a 26).

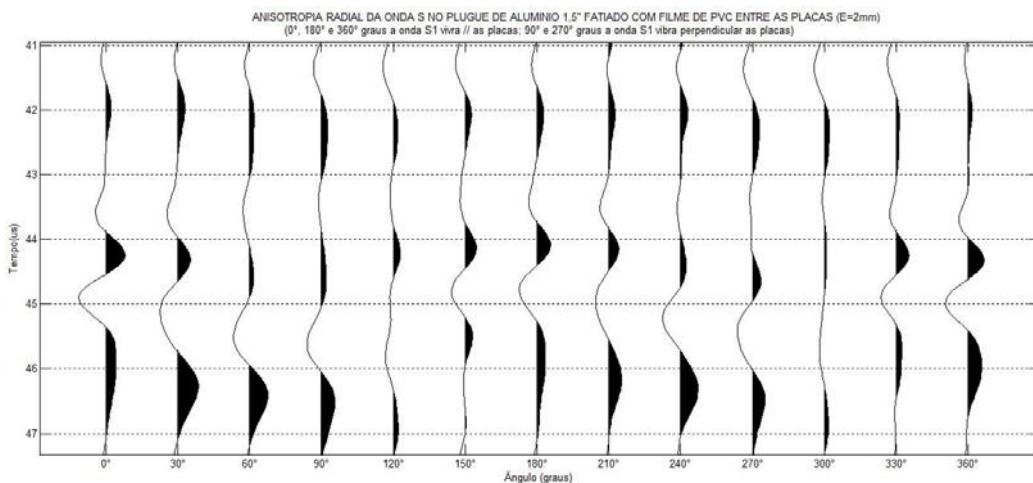


Figura 22 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas S1.

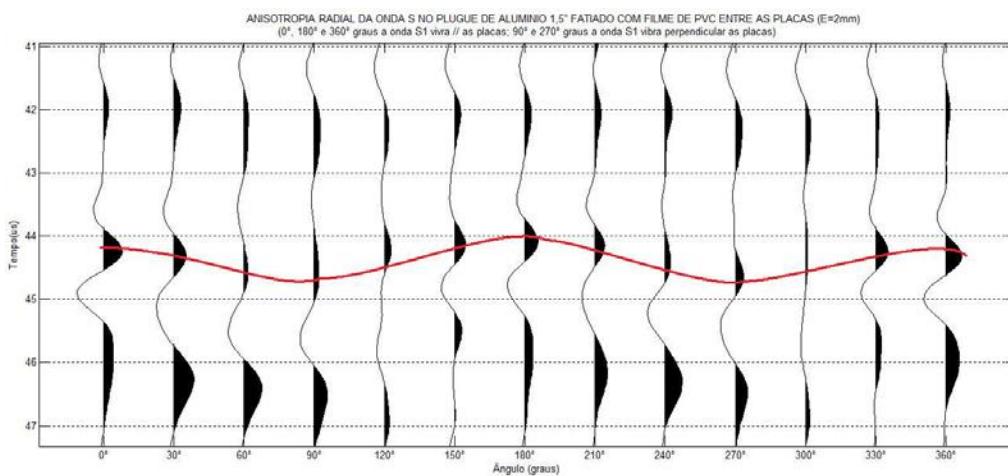


Figura 23 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas S1 interpretado.



Figura 24 – Acima as fotos mostram a colocação do filme de PVC entre as placas do plugue de alumínio.

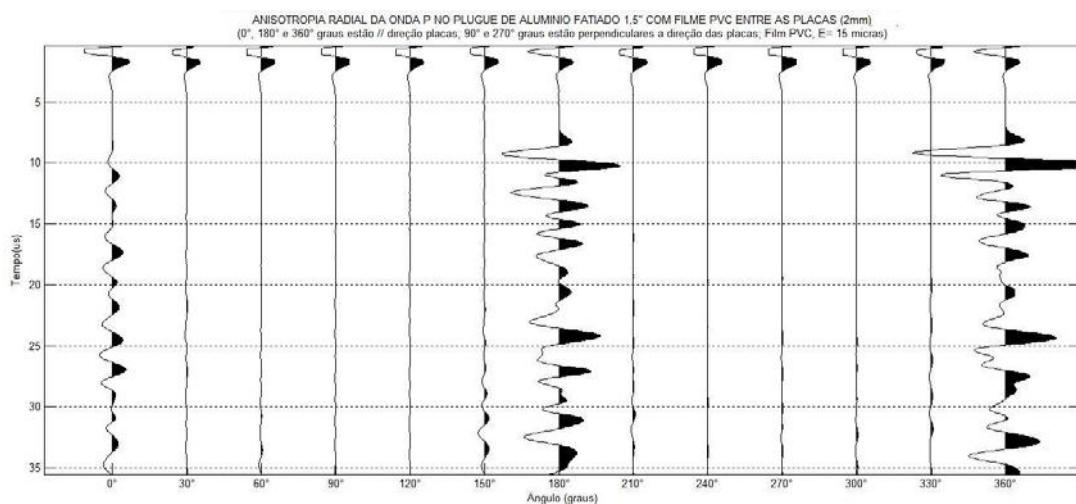


Figura 25 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P.

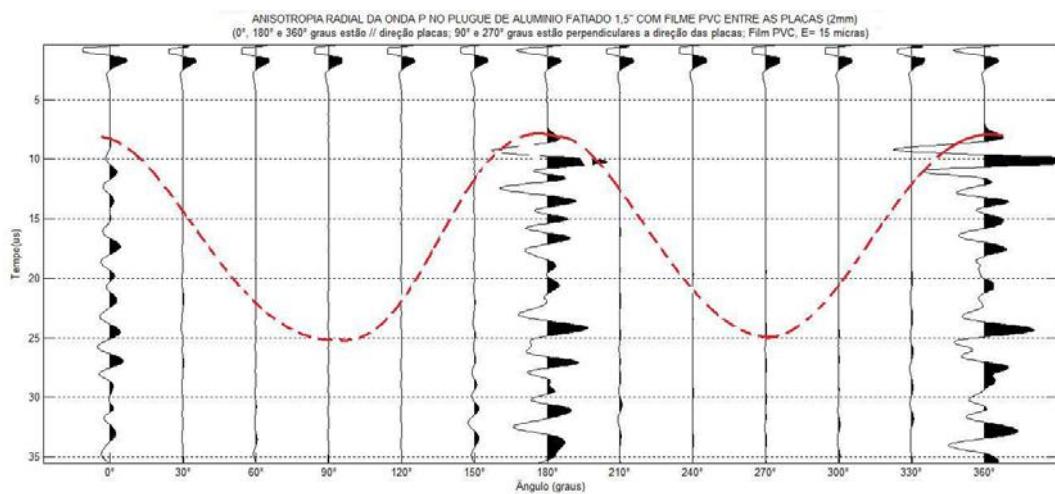


Figura 26 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P interpretado.

Os gráficos gerados mostram maior atenuação das ondas P e S que no primeiro ensaio sem acoplante entre as placas. O gráfico da onda P a atenuação foi muito superior, sumindo praticamente as curvas de tempo e amplitude (inferidas na figura 26). Mesmo sendo utilizado a ferramenta de normalização de funções periódicas, o resultado fica prejudicado por levantar o ruído mascarando ainda mais o gráfico. De qualquer forma com uso de bom senso, nota-se maior atraso da onda P quando perpendicular a laminação (um atraso de cerca de 60% no tempo de trânsito, entre o máximo e mínimo com ganho de sinal no máximo). Abaixo estão os gráficos com as curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P e S deste ensaio (Figura 27).

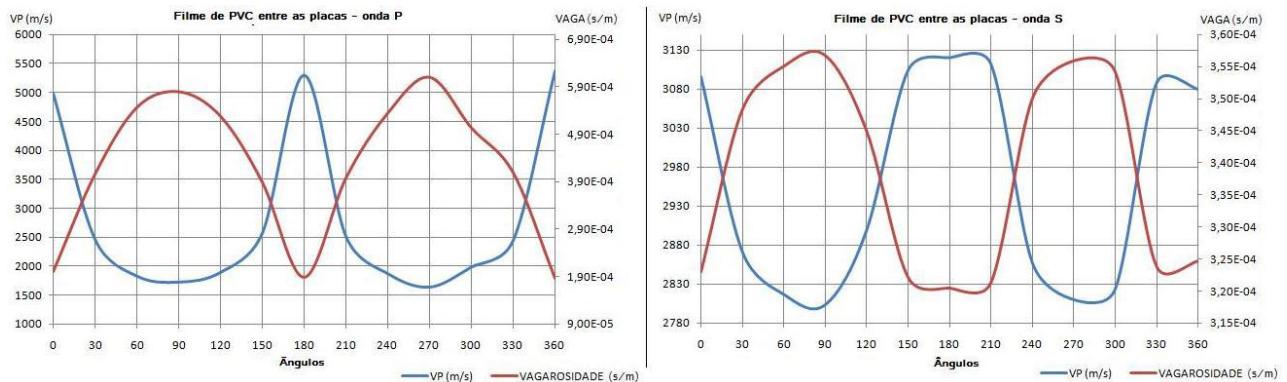


Figura 27 – As curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P e S1.

3.1.3 – Resultados das medidas com alumínio fatiado com melado entre as placas de alumínio

Parâmetros: 1) Câmara da NER. Configuração do sistema antes do ensaio: a) Pulser/receiver: idem ao anterior; b) Osciloscópio: idem ao anterior; Arquivos salvos: no formato .CSV no pendrive; Pressão hidrostática: 3000psi (giro de 360°). T = 22°C; UR = 65%; 2) VELAN. Configuração do sistema antes do ensaio: a) Pulser/receiver: idem ao anterior; b) Osciloscópio: idem ao anterior; Arquivos salvos: no formato .CSV no pendrive; T = 22°C; UR = 65%.

Em um terceiro ensaio realizado com o modelo de alumínio para investigar o efeito da atenuação na sequência de medidas já realizadas (sem acoplante e com filme de PVC entre as placas) foi utilizado um acoplante de mel. Entre as 18 interfaces das placas de 2,0mm de espessura do alumínio foi espalhado uniformemente uma fina película de mel industrial, com viscosidade similar à do petróleo pesado, mas de fácil lavagem com água corrente. A seguir os gráficos da onda S (câmara NER) e onda P (VELAN) produzidos pelo MatLab seguidos de sua interpretação (Figuras 28 a 32).

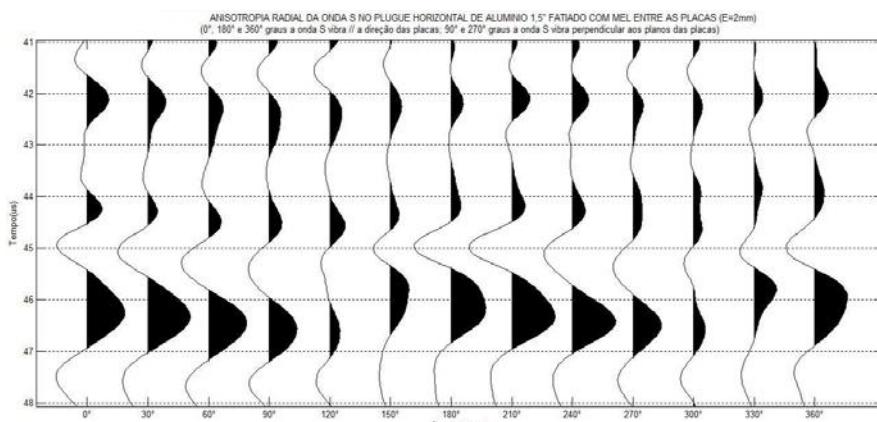


Figura 28 – Ao lado o gráfico de tempos de chegadas das ondas S1.

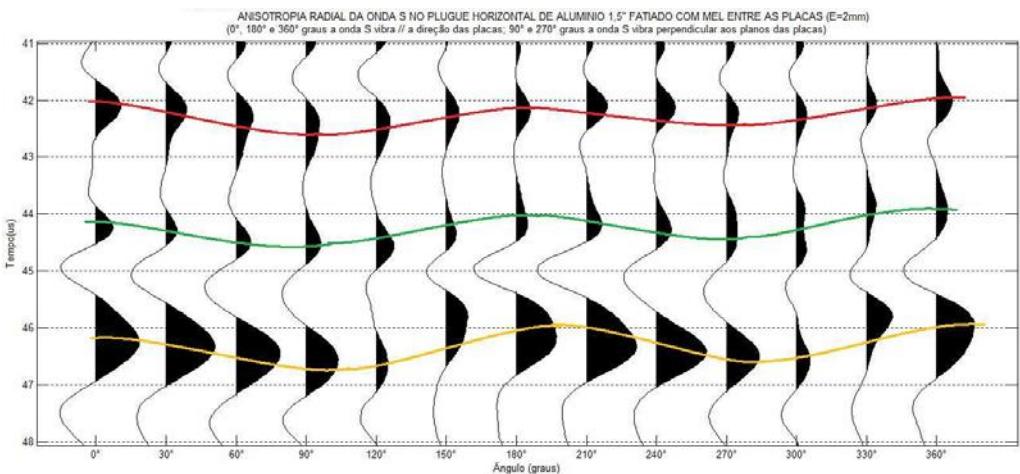


Figura 29 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas S1 interpretado.



Figura 30 – Acima as fotos mostram a colocação do mel entre as placas do plugue de alumínio; a preparação para ensaios de anisotropia da onda P no Sistema Velan e o confinamento da amostra de alumínio para as medidas de anisotropia radial das ondas S1 no sistema NER.

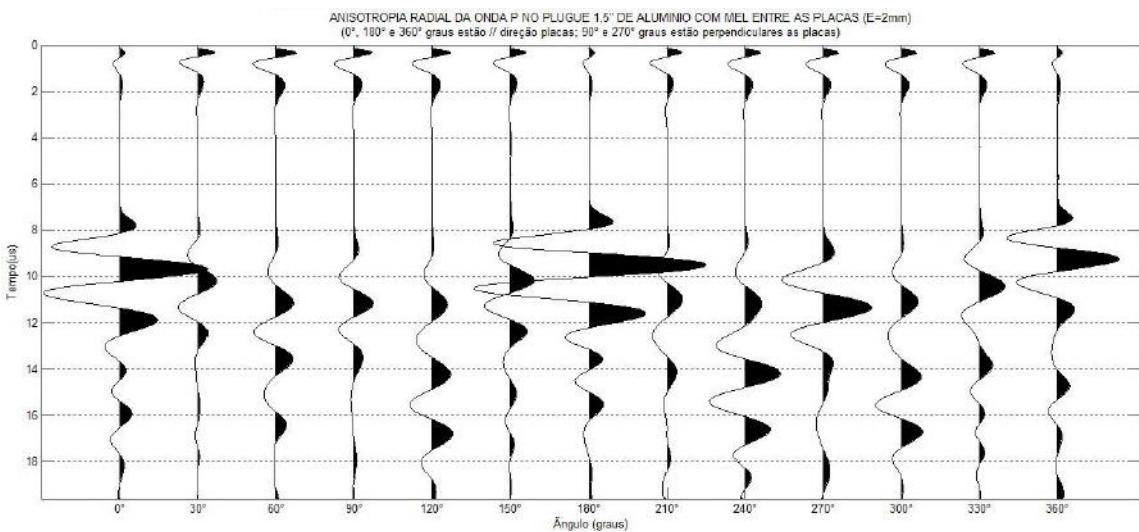


Figura 31 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P.

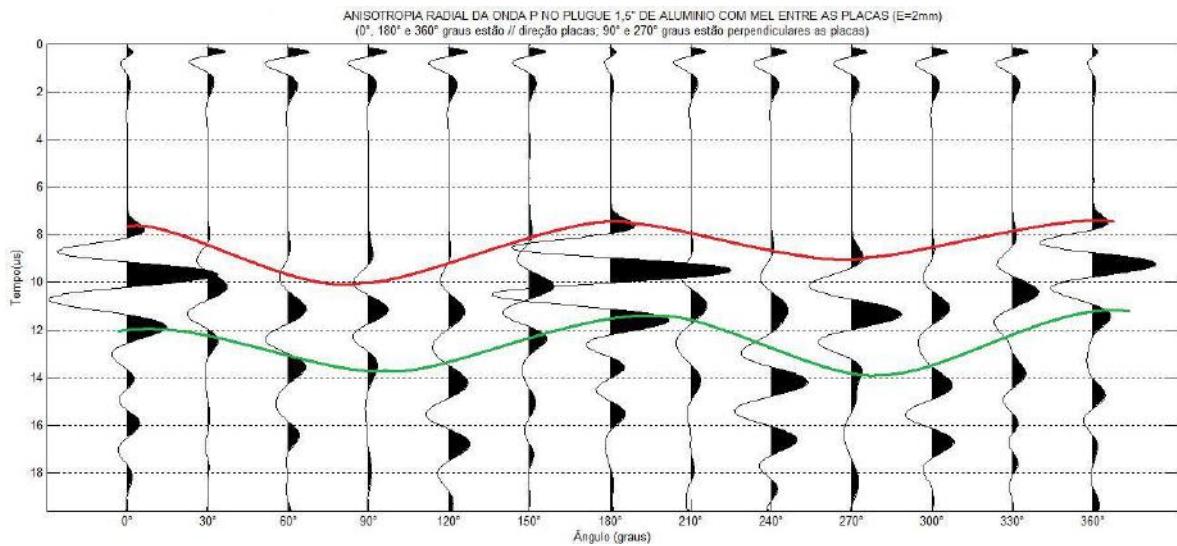


Figura 32 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P interpretado.

Com o espaço entre as placas preenchidas por um bom acoplante o sinal melhorou bastante, diminuindo em cerca de 1% a diferença entre o máximo e mínimo dos tempos de chegada das ondas S1 durante o giro de 360° da amostra. Mais uma vez repete-se o efeito da anisotropia no plugue de alumínio fatiado em função das variações no tempo de trânsito da onda S na direção em que esta incide sobre os obstáculos representados pelas placas de alumínio com mel. Neste experimento houve uma maior diminuição do tempo de trânsito em relação aos experimentos anteriores. Fazendo uma analogia com um meio fraturado preenchido com hidrocarbonetos, a velocidade de propagação das ondas P e S num meio saturado (mel) é maior que em meio seco (placas sem acoplante). O experimento mostra que mesmo aumentando a velocidade das ondas P e S com mel entre as placas o meio continua anisotrópico e seu efeito é visto nos gráficos (Figuras 29 e 32). Os gráficos abaixo de velocidade e vagarosidade das ondas P (VELAN) e ondas S (NER) feitos no Excel sintetizam bem este efeito (Figura 33).

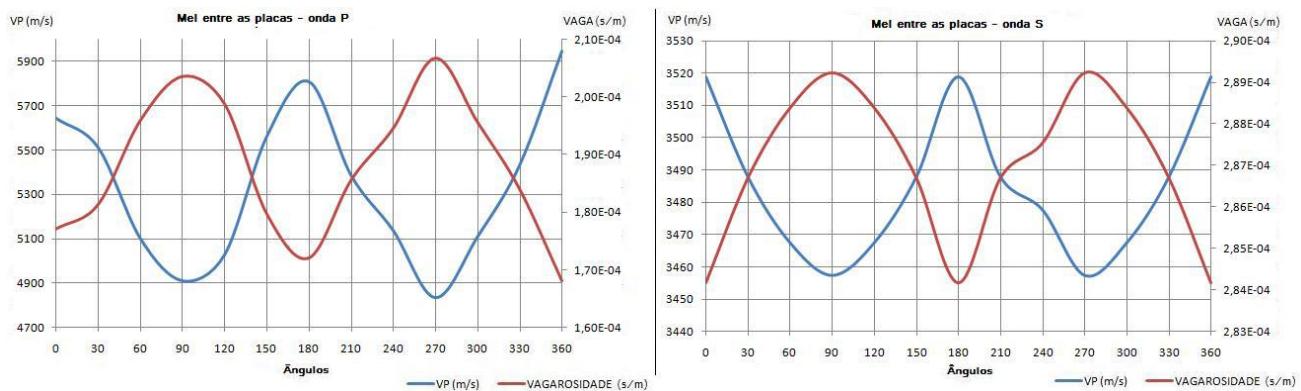


Figura 33 - As curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P e S1.

A anisotropia radial no plugue de alumínio além da análise qualitativa das curvas processadas pelo MatLab podendo ser quantificada através do cálculo de velocidades e vagarosidades (Figuras 18, 21, 27 e 33) permitindo a obtenção das diferenças percentuais entre seus máximos e mínimos: Onda P (sem acoplante – 51,51%; Filme de PVC – 65,37% e Mel – 13%) e onda S (sem acoplante – 2,21%; Filme de PVC – 9,46% e Mel – 1,18%). Logo, vemos que a presença de mel entre as placas

melhorou a propagação das ondas P e S dentro do corpo anisotrópico em comparação ao ar e ao filme de PVC. Mas todos representaram bem a anisotropia radial de ambas as ondas utilizadas.

A partir destas experiências adquiridas com o modelo em alumínio vamos agora aplicar este método em algumas amostras análogas selecionadas, formadas por rochas sedimentares finas, plugadas na direção horizontal (PH), ou seja, paralelas aos planos de acamamento sedimentar, de modo que cada plano de camada venha funcionar como uma barreira de impedância acústica que, analisada nas mesmas condições do modelo anterior, forneça resultados semelhantes.

3.2 – Anisotropia do Arenito Berea

O Berea é um arenito dos Estados Unidos, fino e bem selecionado, de ambiente sedimentar costeiro, composto por areias de quartzo, com laminação visível e que ao longo destes planos de laminação podem ser separados. A escolha deste é em função de ser mundialmente utilizado como padrão para estudos científicos nas universidades e nos ensaios de petrofísica básica de rochas sedimentares na indústria de petróleo, por ser além de tudo, um excelente reservatório. Tem sua composição formada por 93,13% de Silica (SiO_2) e os outros 6,87% formados por alumina (Al_2O_3), óxidos de ferro, magnésio e cálcio; porosidade média de 20% e permeabilidade de 100 a 200 milidarcy (Figura 34).



Figura 34 – Arenito Berea desde a extração ao plugue referência para testes no laboratório de Física de Rochas do CENPES.

As duas últimas imagens da figura 34 mostram o plugue utilizado, cujos parâmetros físicos são: comprimento – 59,20 mm; diâmetro – 37,88 mm; peso – 144,72 g; massa específica (μ) – 2,17 g/cm^3 . Os resultados a seguir estão expressos na forma de curvas de velocidades de propagação das ondas P, Sh (S1) e Sv (S2), incluindo a subida e descida da pressão hidrostática (confinante), partindo de 1000 em 1000 até 5000 psi (Figura 35). Neste caso, a amostra orientada está posicionada na direção onde Sh (S1) coincide com 0° e está paralelo a laminação e Sv (S2) coincide com 90° e está perpendicular a laminação.

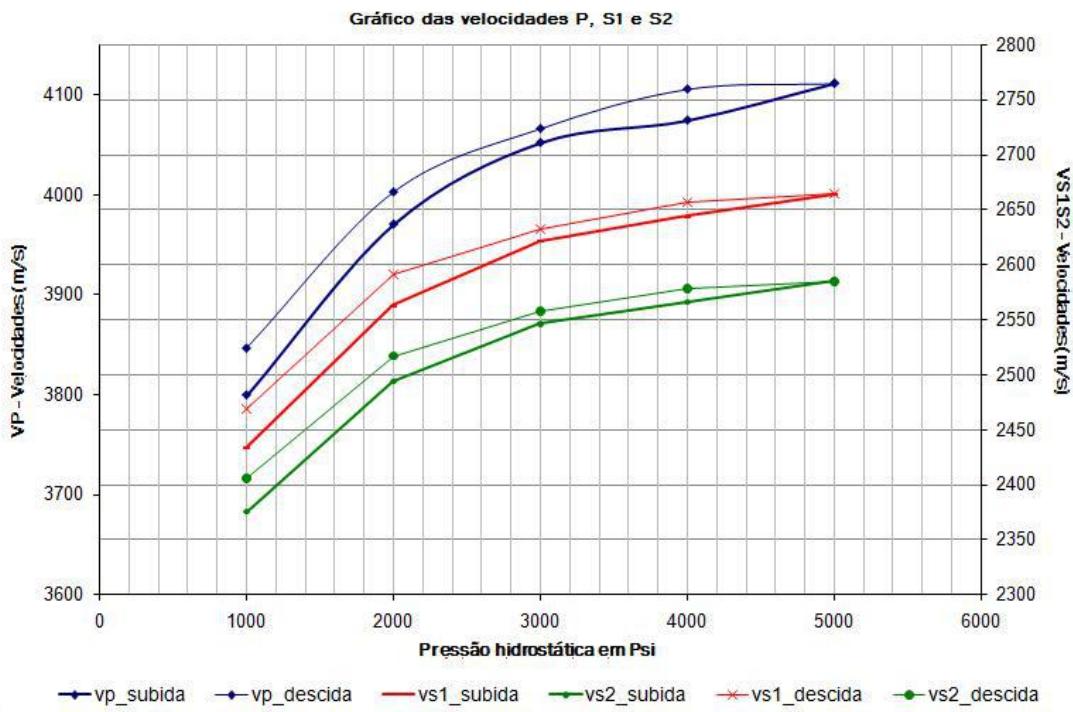


Figura 35 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P, Sh (S1) e Sv (S2).

No gráfico da figura 35 percebe-se o nítido afastamento entre as curvas de velocidades S1 e S2, indicando as diferenças de propagação das ondas elásticas cisalhantes S quando estão paralelas ou perpendiculares à laminação, como foi visto no modelo de alumínio. A onda S1, que corresponde à Sh, vibra paralela ao acamamento sedimentar e tem menor tempo de trânsito na amostra, logo maior é a sua velocidade. De modo oposto, a onda S2, que corresponde à Sv vibra perpendicular a laminação e tem maior atraso porque as partículas nesta direção enfrentam maior resistência para deslocar cisalhando a partícula vizinha a partir do seu estado de inércia enquanto a onda passa. A diferença entre as curvas Sh e Sv é de quase 3%. Os gráficos seguintes (Figura 36 e 37) ilustram o efeito anisotrópico do Arenito Berea através de curvas de tempo e amplitude interpretadas na câmara NER. Logo após outros gráficos de tempos de chegada das ondas P (Figura 38 e 39) ilustram o efeito da anisotropia da amostra via técnica do VELAN.

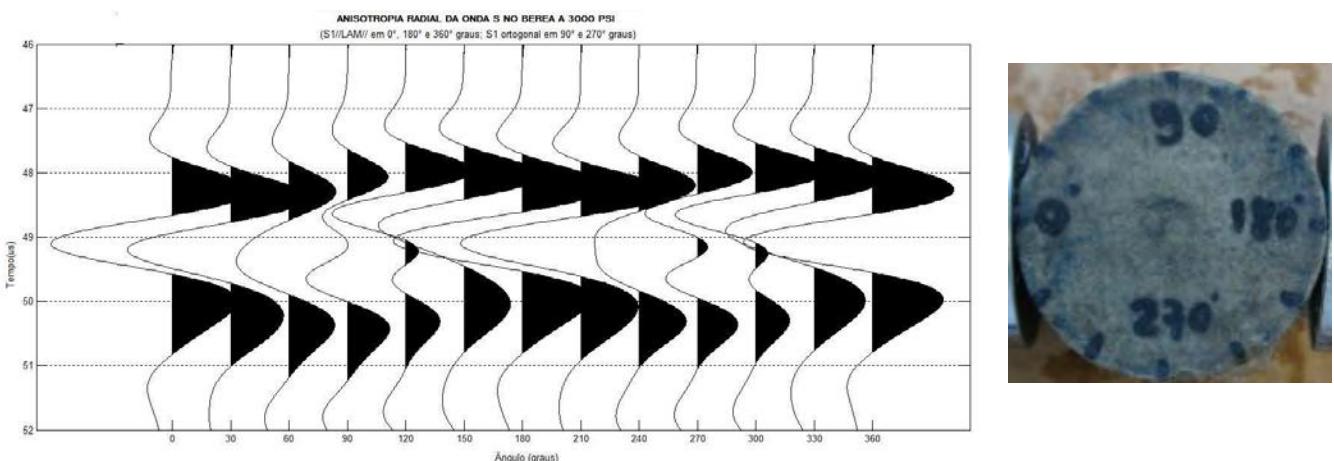


Figura 36 – Acima o gráfico de tempos de chegadas das ondas S1. À direita a fotografia da amostra orientada.

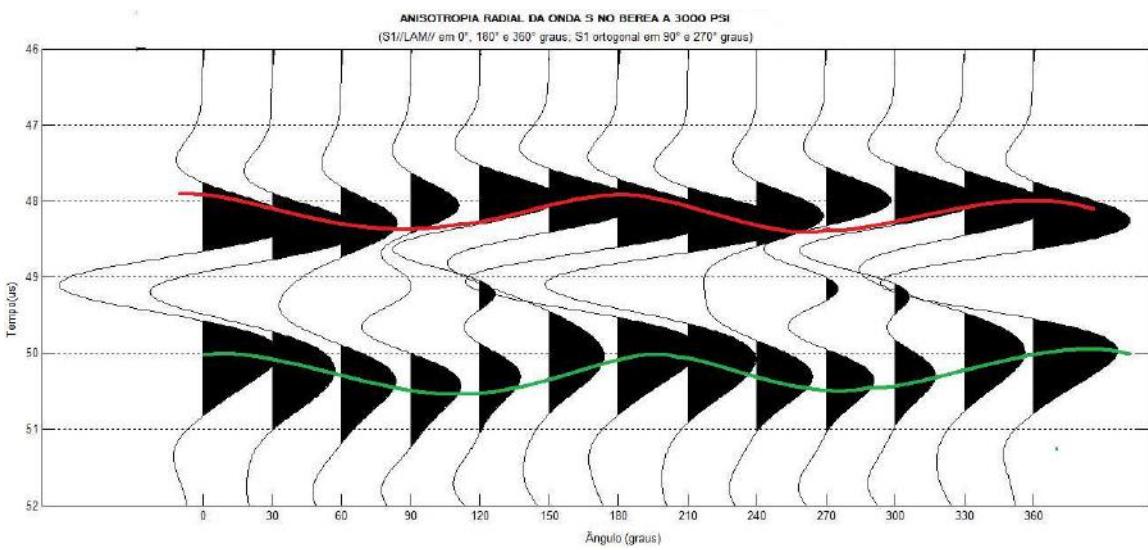


Figura 37 – Acima o gráfico de tempos de chegadas das ondas S1 no arenito Berea interpretado.

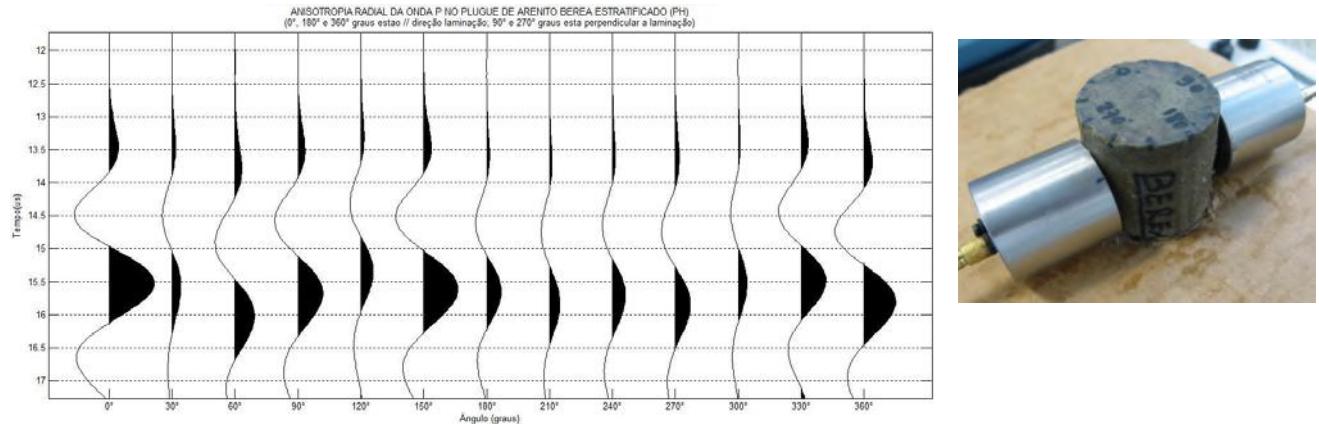


Figura 38 – Acima o gráfico de tempos de chegadas das ondas P. Ao lado a fotografia da amostra no VELAN.

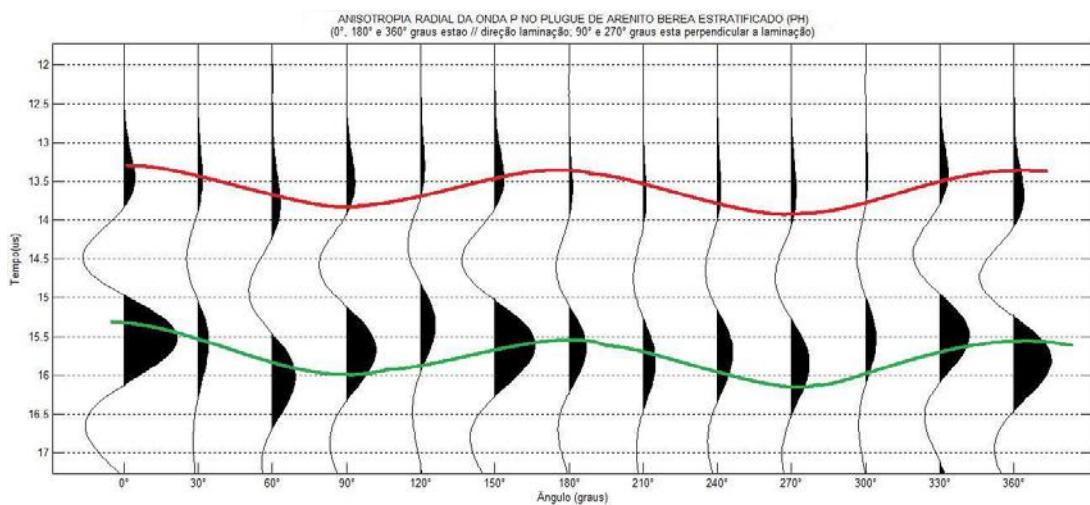


Figura 39 – Acima o gráfico de tempos de chegadas das ondas P no arenito Berea interpretado.

Nos gráficos acima também está ilustrada a anisotropia radial da amostra após a propagação das ondas S1 (NER) e P (VELAN) corroborando os ensaios com o modelo de alumínio fatiado. Percebe-se também nos gráficos, certa tendência de deslocamento das curvas em 90° e 270°. Isto porque os planos de acamamento sedimentar da amostra medida do Arenito Berea não estão perfeitamente paralelos ao plano axial do plugue e sim ligeiramente inclinados, resultando em um deslocamento das curvas, mas sem comprometer seu significado. Abaixo o gráfico de velocidades e vagarosidades das ondas P e S1 na amostra P32H (Figura 40).

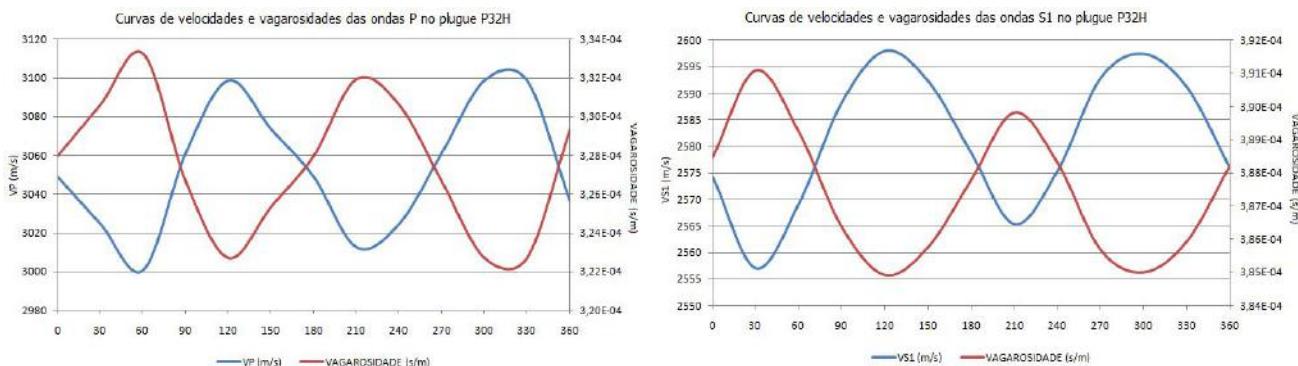


Figura 40 - As curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P e S1.

3.3 – Anisotropia do Argilito Elipsóide (P32H)

O plugue horizontal P32H de comprimento de 52,058 mm provém de um argilito esverdeado com argila expansiva (esmectita) de uma região de selos interceptada por um poço de petróleo, em bacia sedimentar costeira. Após um longo tempo de exposição fora de seu ambiente confinante esta amostra deformou-se adquirindo a forma de um elipsóide, com dois eixos, um maior (EMA - 39,346 mm) e outro menor (EME – 37,922 mm). Juntamente com hidratação da argila formaram-se microfraturas ao longo dos planos de laminação (Figura 41). Como a amostra foi plugada na direção horizontal, ou seja, paralela ao acamamento sedimentar, a 90° do plano sedimentar ficava o eixo de maior tensão na rocha (σ_1) que corresponde ao eixo Z o qual está paralelo ao vetor vertical da aceleração da gravidade (g). Logo, o plano de acamamento sedimentar contém as duas outras direções: σ_3 e σ_2 . A direção de maior relaxamento desta amostra (EMA) ocorreu perpendicularmente ao acamamento sedimentar e paralelamente ao eixo de maior deformação que ficou identificado como 90° e 270° na base da amostra. O eixo menor da amostra (EME), ao longo do plano de laminação ficou identificado como 0°, 180° e 360°. Os gráficos seguintes mostram os resultados da investigação da anisotropia na amostra deformada: curvas de velocidades das ondas P, Sh e Sv durante a subida e descida da pressão até 5000 psi (Figura 42); em um giro completo de 360° da amostra com espaçamento de 30° das ondas P e S1 (Figuras 43 a 47). As características físicas desta amostra são: Peso – 139,88 g; massa específica (μ) – 2,29 g/cm³; Volume da amostra - 61,03 cm³.

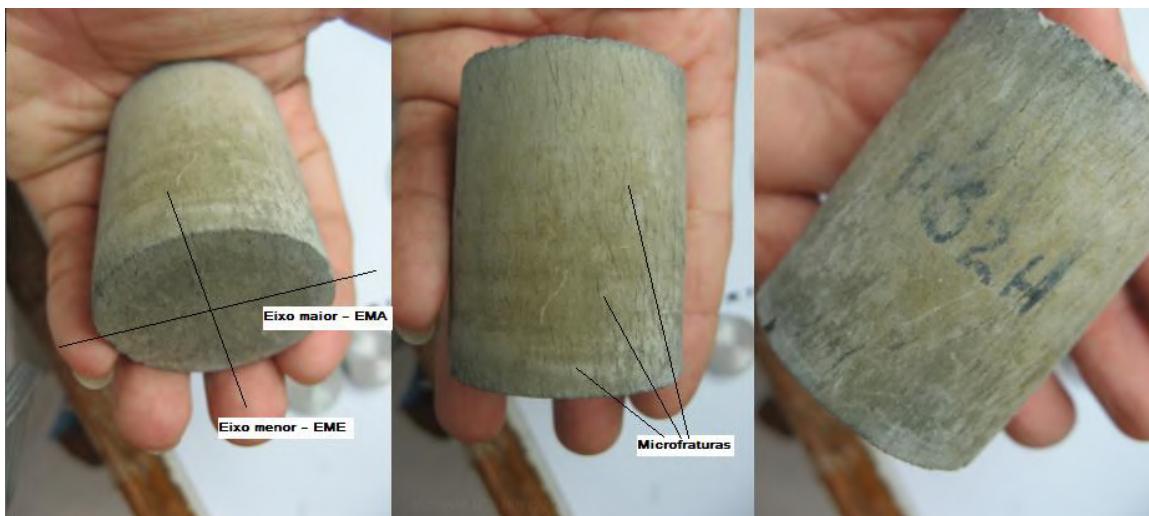


Figura 41 – Plugue horizontal de argilito (P32H) deformado na forma de elipsóide.

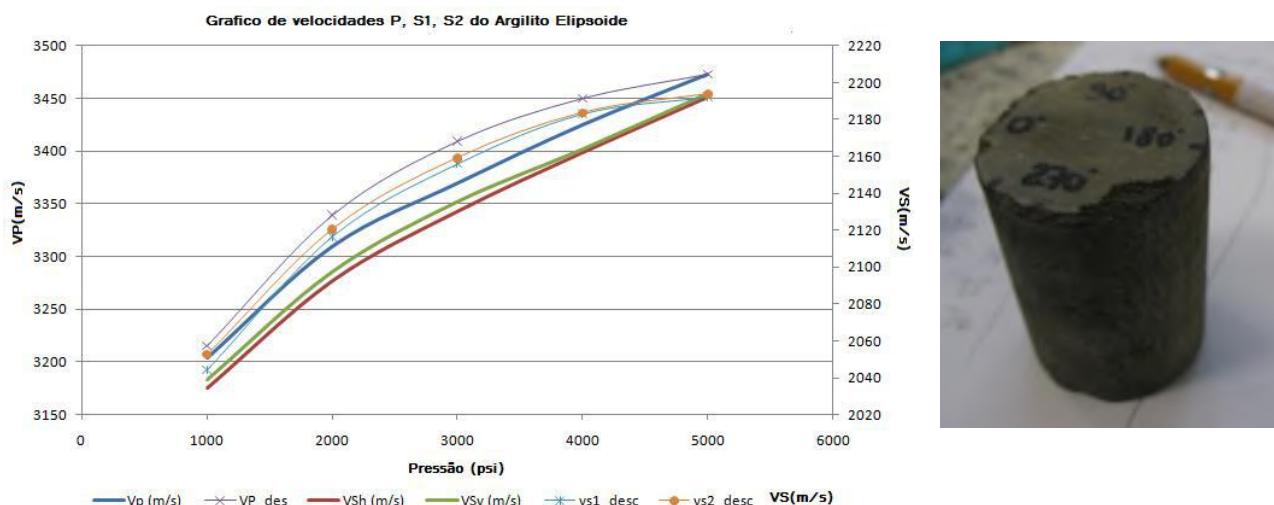


Figura 42 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P, Sh (S1) e Sv (S2) na amostra P32H. Ao lado foto do plugue orientado (P32H).

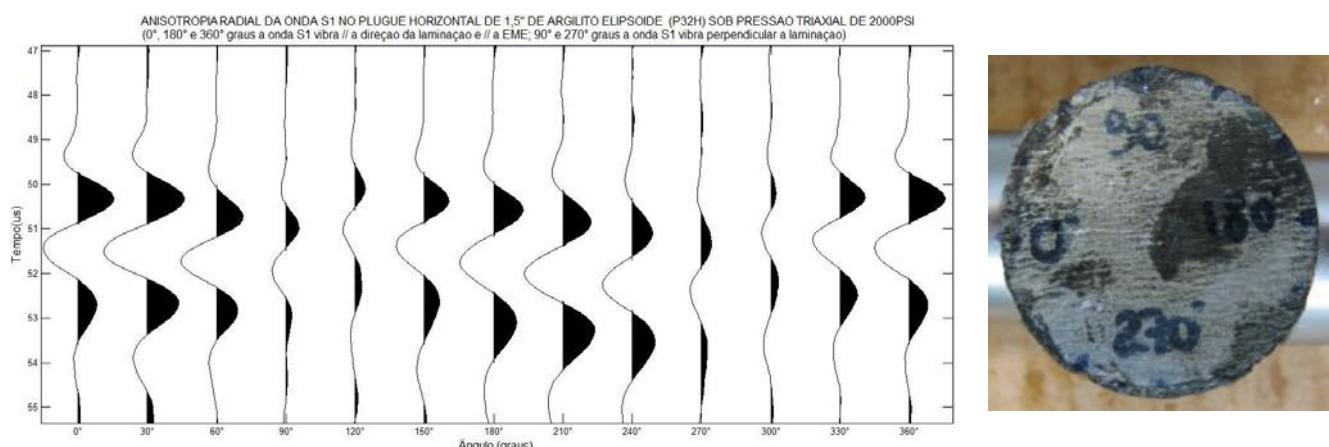


Figura 43 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1. Ao lado foto em detalhe do plugue orientado.

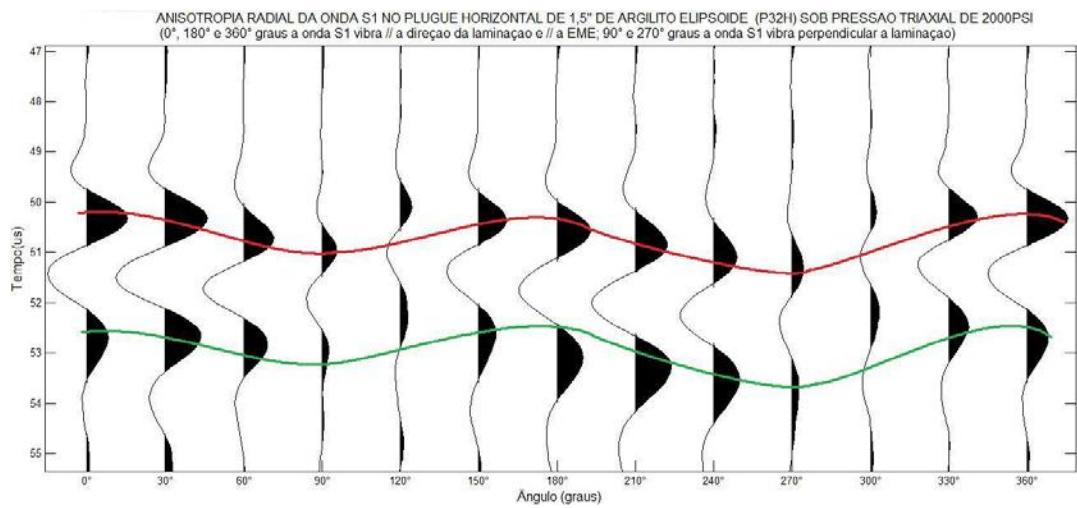


Figura 44 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1 na amostra P32H interpretado.

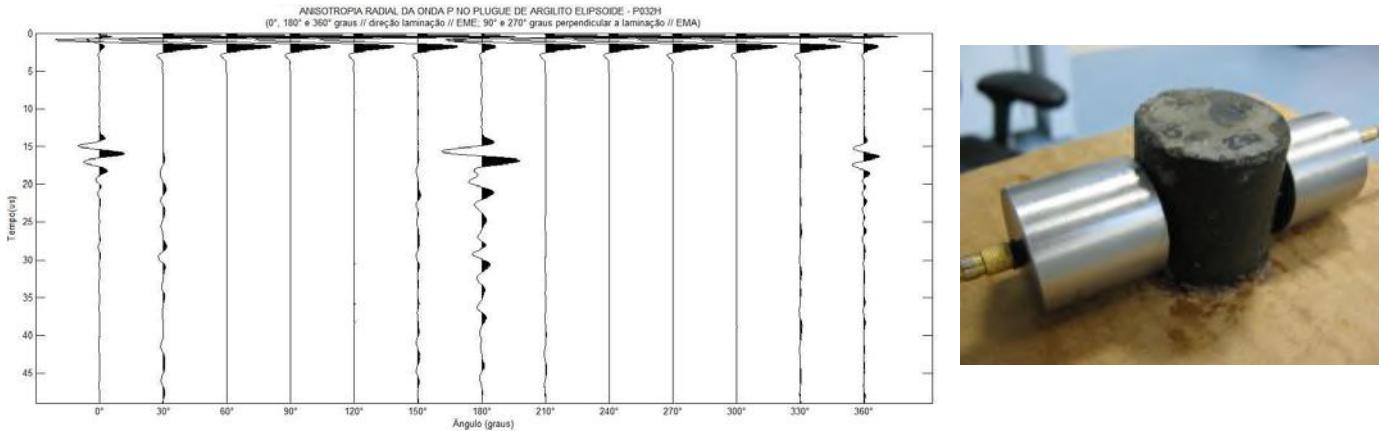


Figura 45 – Acima o gráfico de tempos de chegadas das ondas P. Ao lado a fotografia da amostra no VELAN.

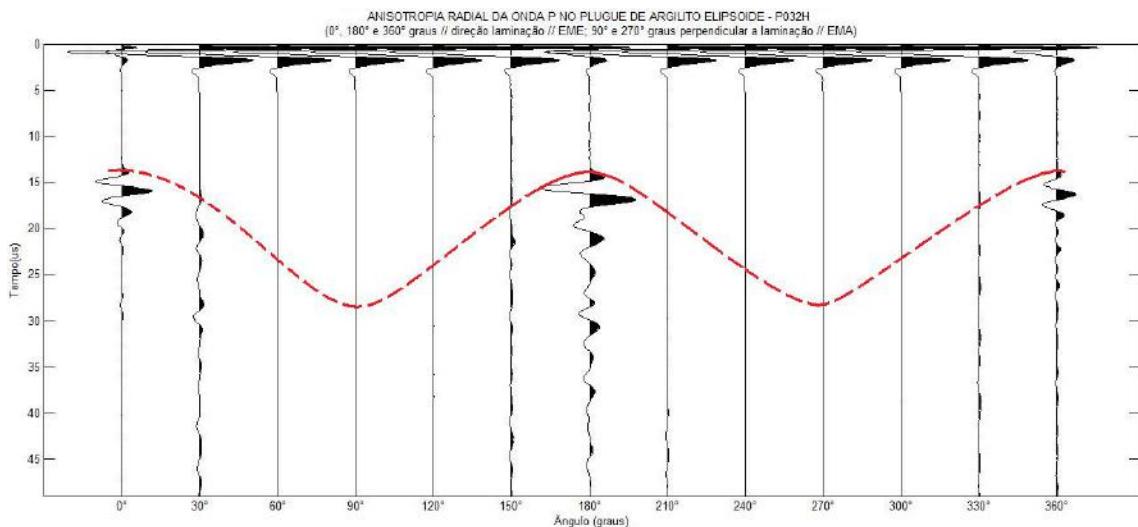


Figura 46 – Gráfico de tempos de chegadas das ondas P na amostra P32H interpretado.

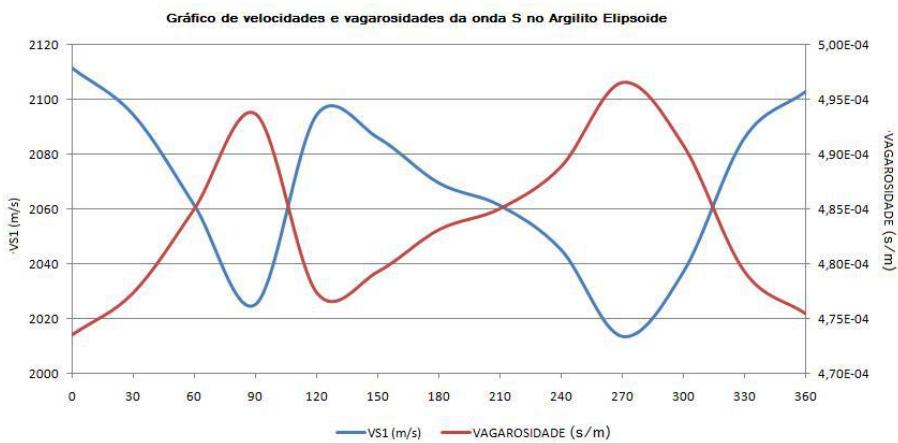


Figura 47 - As curvas de velocidades e vagarosidades das ondas S1.

As variações interpretadas e inferidas das curvas de tempo nos gráficos das medidas NER e VELAN confirmam o efeito da anisotropia radial na amostra P32H através da propagação de ondas S e P, respectivamente, no plugue de argilito. No ensaio com VELAN entre os ângulos de 30° e 90° com a laminação não foi possível visualizar as curvas de tempo devido à alta atenuação da amostra, mesmo aumentando ao máximo o ganho de sinal. Vale salientar que a medida na NER de subida e descida da pressão foi ao final desta seqüência de medidas (VELAN, NER-2000psi e subida e descida pressão). No gráfico de velocidades e vagarosidades das ondas S1 (Figura 47) as curvas têm forma assimétrica por causa de dois fatores principais: microfraturas de relaxamento irregulares e fraturas secundárias (possivelmente mecânicas). Ainda assim, fica evidente a diferença entre os máximos e mínimos em 0°, 90°, 270° e 360° que correspondem a um menor tempo gasto das ondas S1 paralelas a direção de laminação e microfraturas da amostra (0°, 180° e 360°) e maior o tempo gasto pela onda S1 quando incide perpendicular a estes (90° e 270°). Outras amostras similares apresentaram atenuações maiores e com muitas distorções após o processamento dos dados indicando que a técnica ainda pode ser melhorada.

3.4 – Anisotropia do Arenito fino laminado (T04H)

A amostra de arenito fino laminado (Figura 48) é outro bom exemplo testado com alternância de níveis milimétricos de siltito (níveis escuros) e arenitos finos (faixas claras). Este também é um plugue horizontal e suas medidas seguiram a mesma rotina das medidas anteriores. Este é outro exemplar de rocha proveniente de poço petrolífero em ambiente sedimentar costeiro. Tem por parâmetros físicos: Peso – 100 g; comprimento – 40,204 mm; diâmetro – 37,817 mm; massa específica (μ) – 2,21 g/cm³; volume do plugue – 45,16 cm³.

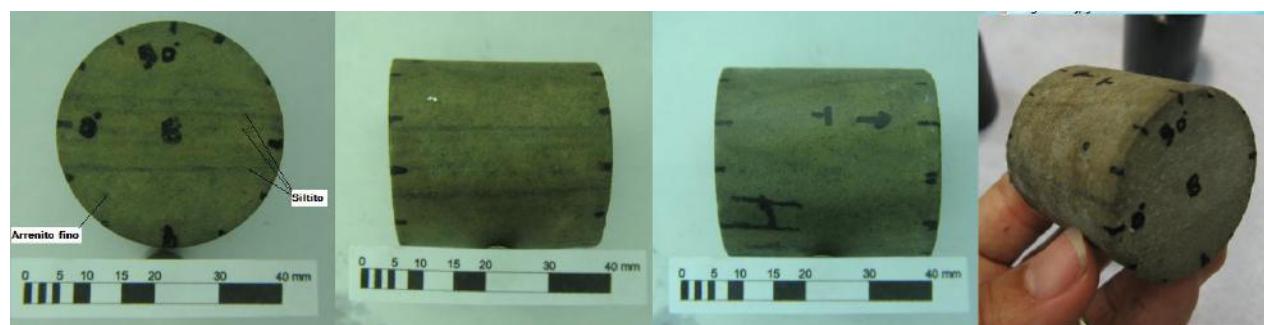


Figura 48 – Arenito fino laminado (T04H) com níveis milimétricos de siltito.

O gráfico seguinte ilustra os resultados dos ensaios de anisotropia da amostra orientada fixa na posição de 0° (paralela ao plano de laminação e da posição do transdutor polarizado S1 ou Sh; a 90° está o S2 ou Sv) para ensaio de subida e descida da pressão (Figura 49). A pequena legenda nos gráficos mostra o percentual de variação entre máximos e mínimos:

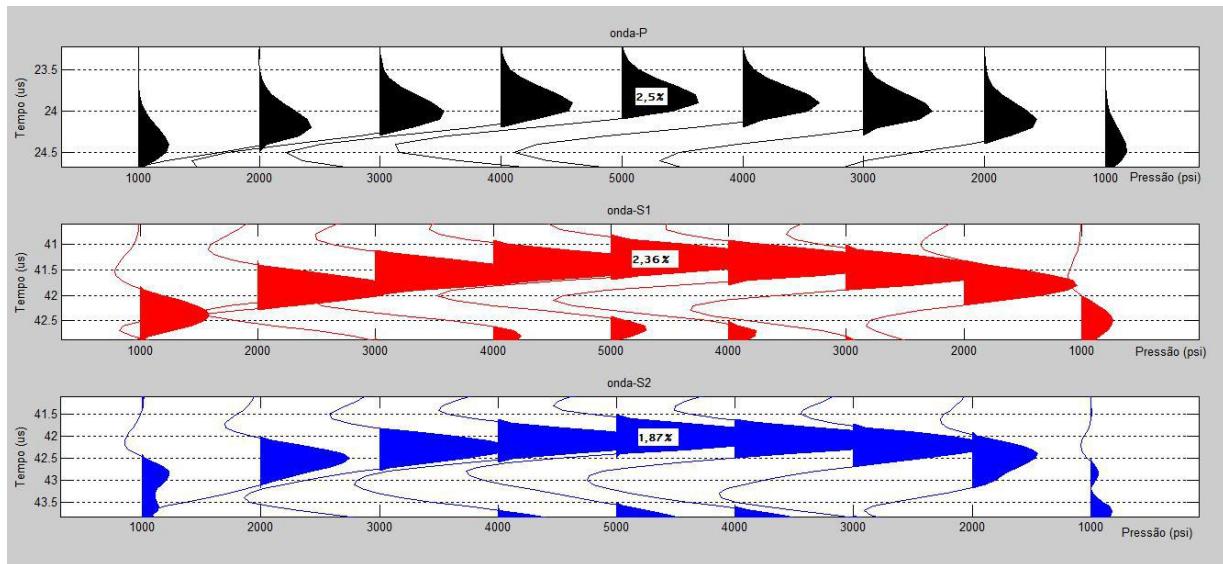


Figura 49 – Gráfico com as primeiras chegadas em tempo das ondas P, Sh e Sv na amostra T04H.

Cada pico colorido representa as primeiras manifestações em tempo (microssegundos - us) dos sinais de cada onda após a propagação na rocha e visualizadas no visor do osciloscópio. Vale ressaltar que estes ensaios de subida e descida da pressão são realizados sempre ao final das medidas VELAN (360°) e NER (360°), pois eleva-se a pressão ao limite da amostra. Em seguida os tempos dos gráficos de anisotropia radial da onda S na câmara NER e onda P do VELAN seguidos de interpretação (Figuras 50 a 53).

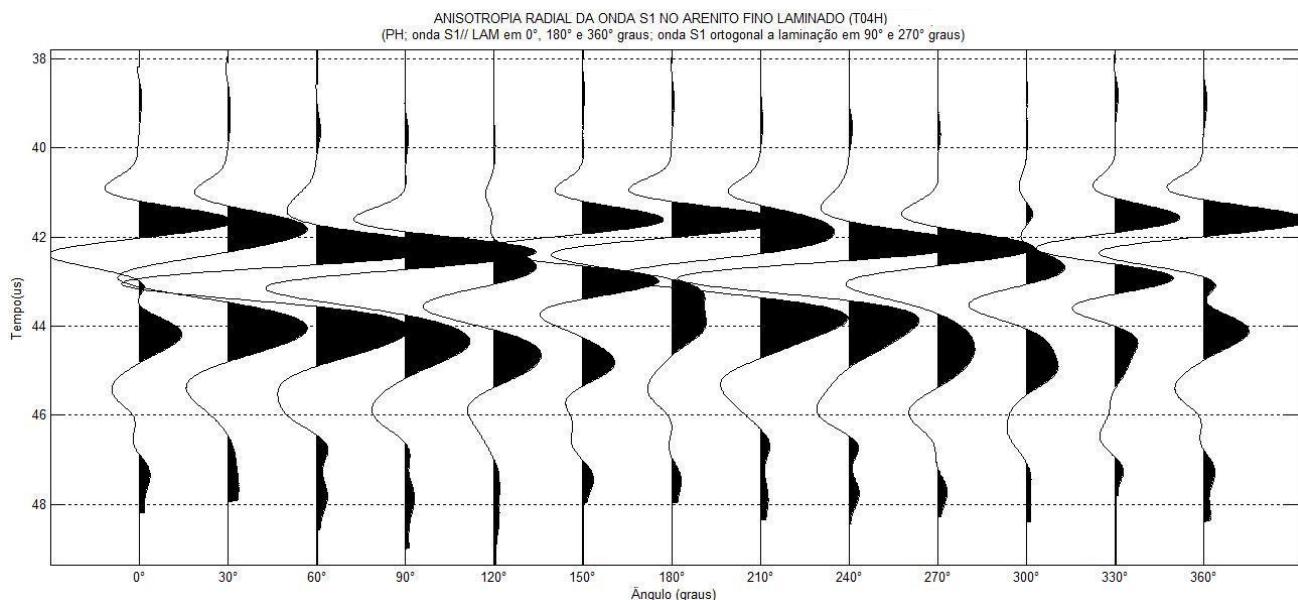


Figura 50 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1 na amostra T04H.

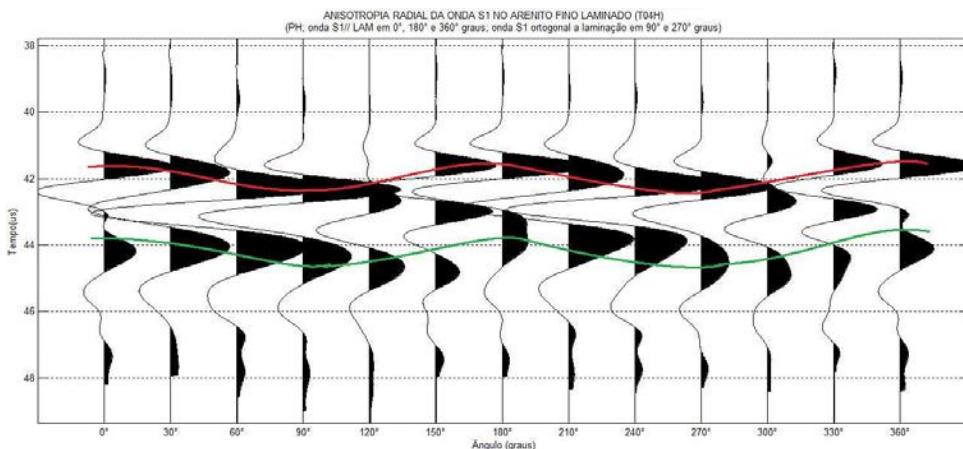


Figura 51 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1 na amostra T04H interpretado. Ao lado foto em detalhe do plugue T04H orientado.

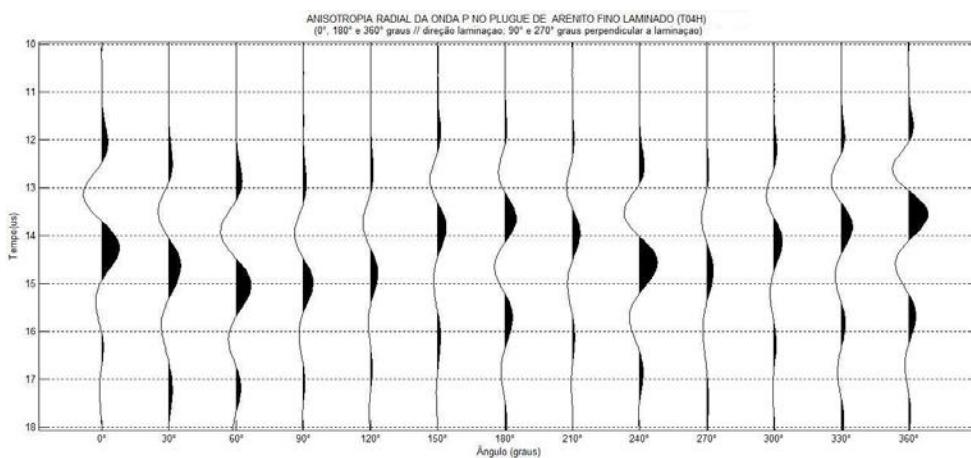


Figura 52 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P na amostra T04H. Ao lado foto detalhe do plugue T04H no VELAN.

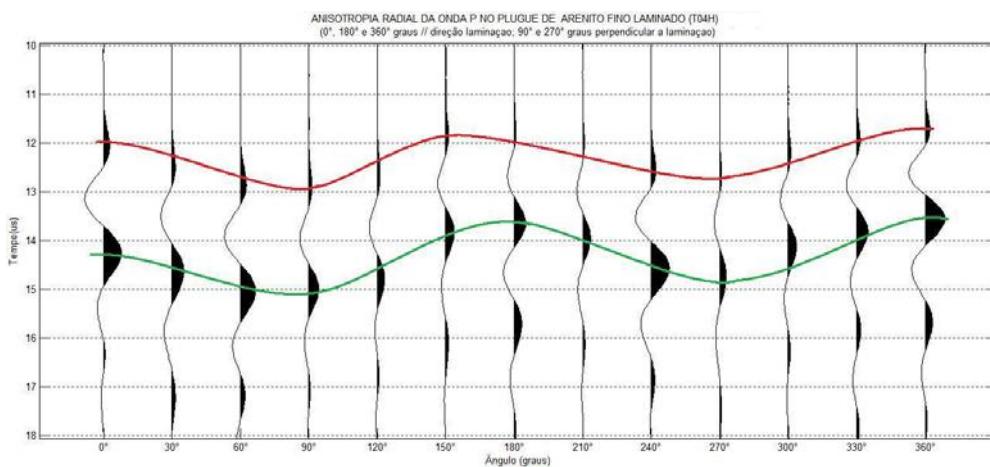


Figura 53 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P na amostra T04H interpretado. Ao lado foto afastada do plugue T04H durante ensaio no Sistema VELAN de medidas de anisotropia.

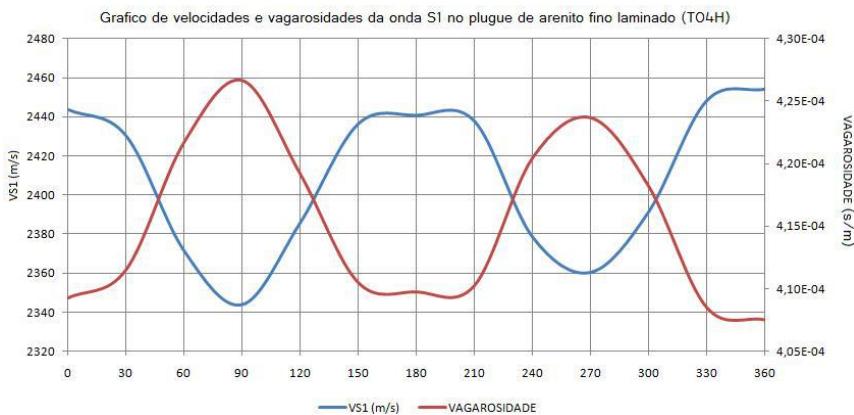


Figura 54 – Acima as curvas de velocidades e vagarosidades das ondas S1.

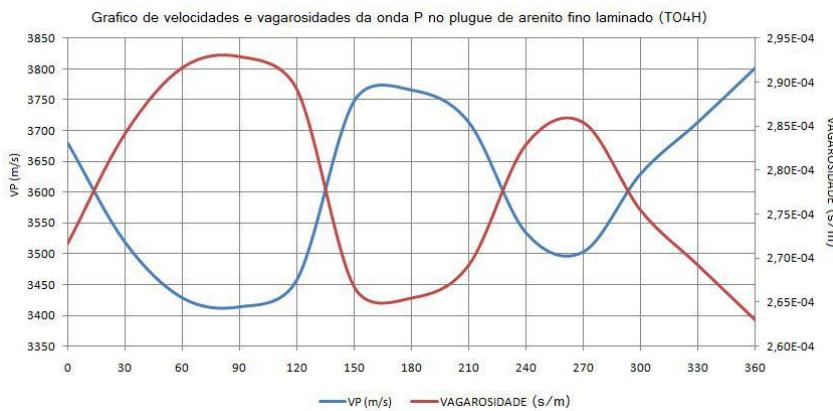


Figura 55 – Acima as curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P.

A anisotropia sísmica radial também se mostra evidente nesta amostra, comprovando mais uma vez a eficácia do método a partir do modelo ideal de alumínio.

3.5 – Anisotropia do Folhelho orgânico da Formação Irati (DOL3)

Outra variação interessante de rocha sedimentar fina selecionada para o estudo foi o folhelho pirobetuminoso, obtido a partir de um bloco estratificado coletado dentro da mina de extração de “xisto betuminoso” da Formação Irati na bacia sedimentar do Paraná, mais especificamente na cidade de São Mateus do Sul no interior do Paraná (UN-SIX). Esta amostra está localizada imediatamente acima do 2º nível de minério, rico em matéria orgânica e dolomita (Figura 56).



Figura 56 – Plugue de folhelho extraído de um bloco de rocha coletado na mineração de xisto da UN-SIX.

Na figura 54 ao lado temos as curvas de velocidades e vagarosidades da onda S na câmara NER com pressão de 3000psi após giro de 360° da amostra. Quando está paralelo a laminação (0°, 180° e 360°) o tempo de propagação da onda S é menor (menor vagarosidade) quando perpendicular a laminação (90° e 270°) o tempo é maior (maior vagarosidade).

Na figura 55 ao lado temos as curvas de velocidades e vagarosidades da onda P no VELAN após giro de 360° da amostra. Quando está paralelo a laminação (0°, 180° e 360°) o tempo de propagação da onda P é menor (menor vagarosidade) quando perpendicular a laminação (90° e 270°) o tempo é maior (maior vagarosidade).

A amostra tem os seguintes parâmetros físicos: peso – 158,56 g; comprimento – 54,54 mm; diâmetro – 38,34 mm; massa específica (μ) – 2,52 g/cm³; Volume da rocha – 62,96 cm³. A seguir os gráficos de velocidades P, Sh e Sv (Figura 57) após subida e descida da pressão (idem aos anteriores).

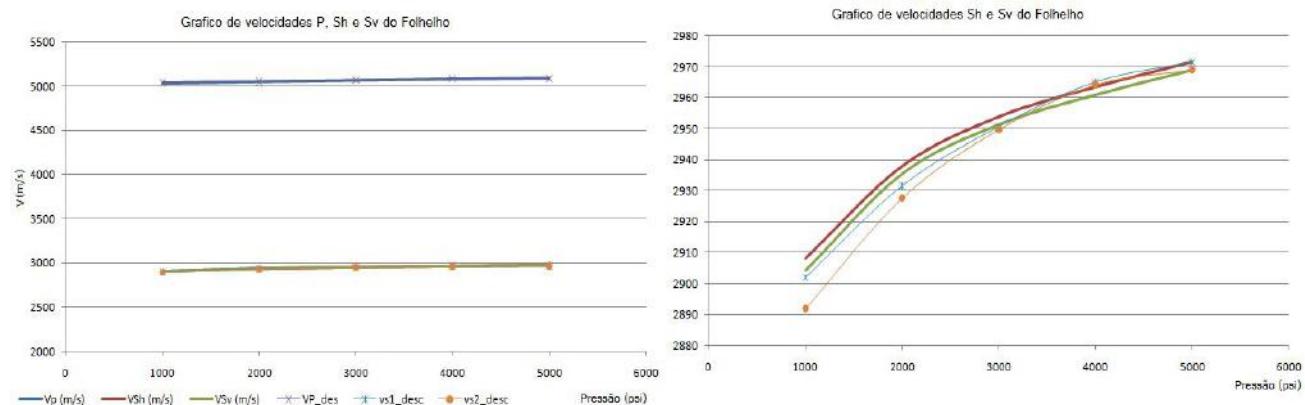


Figura 57 – Acima os gráficos com as curvas de velocidades das ondas P, S1 e S2 (lado esquerdo) e detalhe das curvas com as ondas Sh (S1) e Sv (S2) (lado direito) no folhelho Iriti.

Com Sh e Sv calibrados com o plugue padrão de alumínio laminado é possível perceber a pequena diferença entre as ondas Sh e Sv confirmando a anisotropia presente na amostra medida, onde a velocidade da onda Sh vibrando paralela ao acamamento é sutilmente maior (menor que 0,1%) que a onda Sv vibrando perpendicular a laminação.

Os gráficos seguintes mostram a anisotropia acústica radial da amostra na câmara NER e no VELAN e suas interpretações (Figuras 58 a 61).

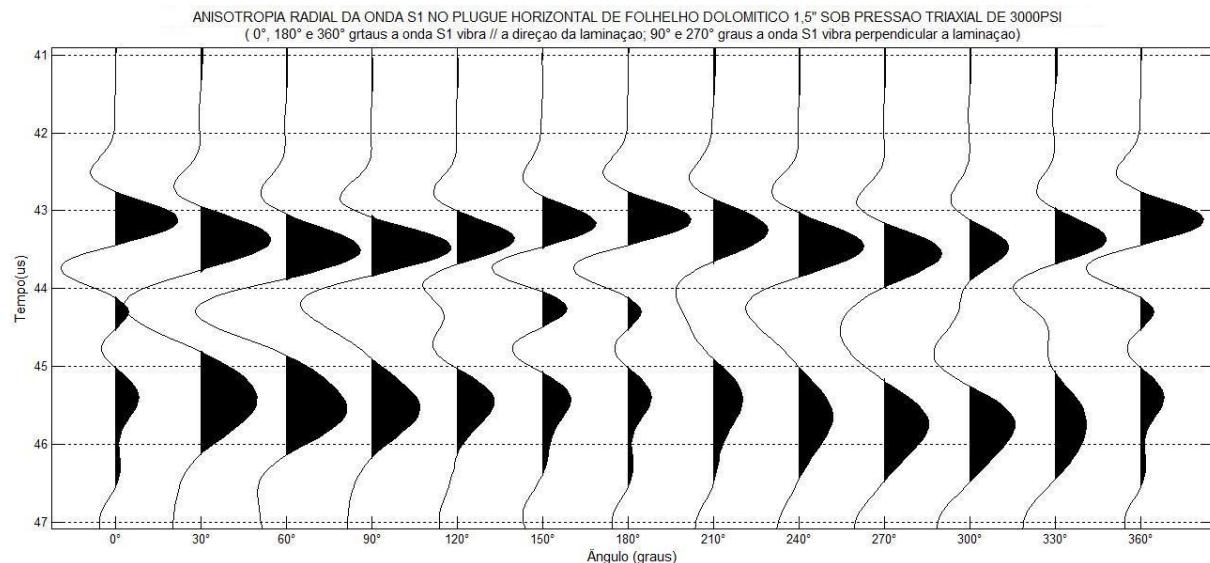


Figura 58 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1 no folhelho Iriti.

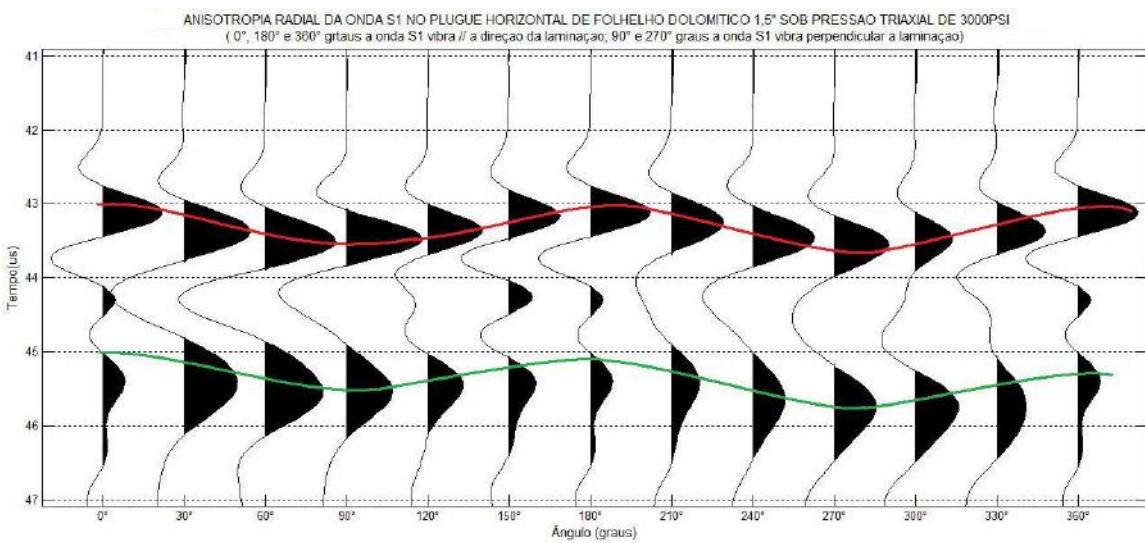


Figura 59 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas S1 no folhelho Irati interpretado.

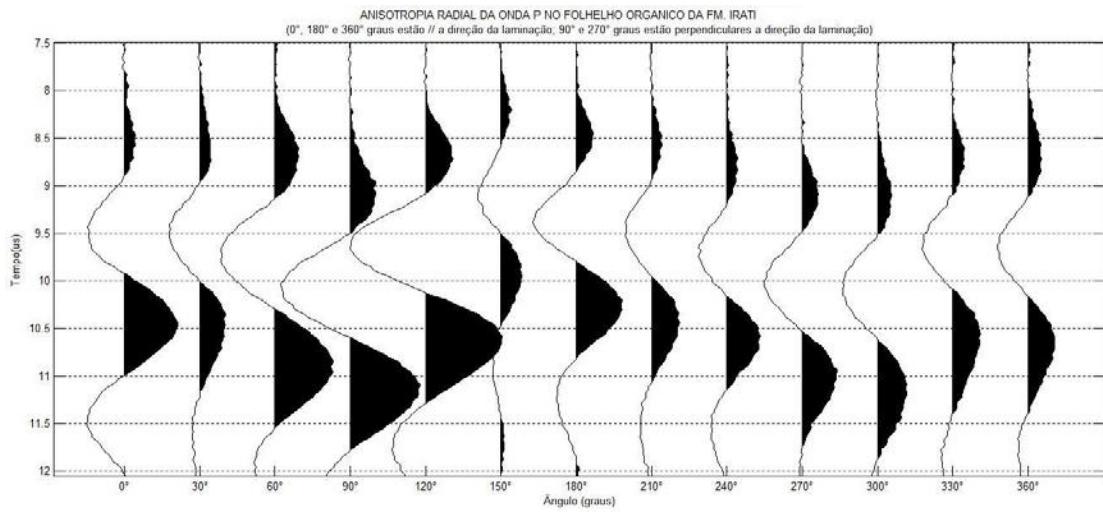


Figura 60 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P no folhelho Irati.

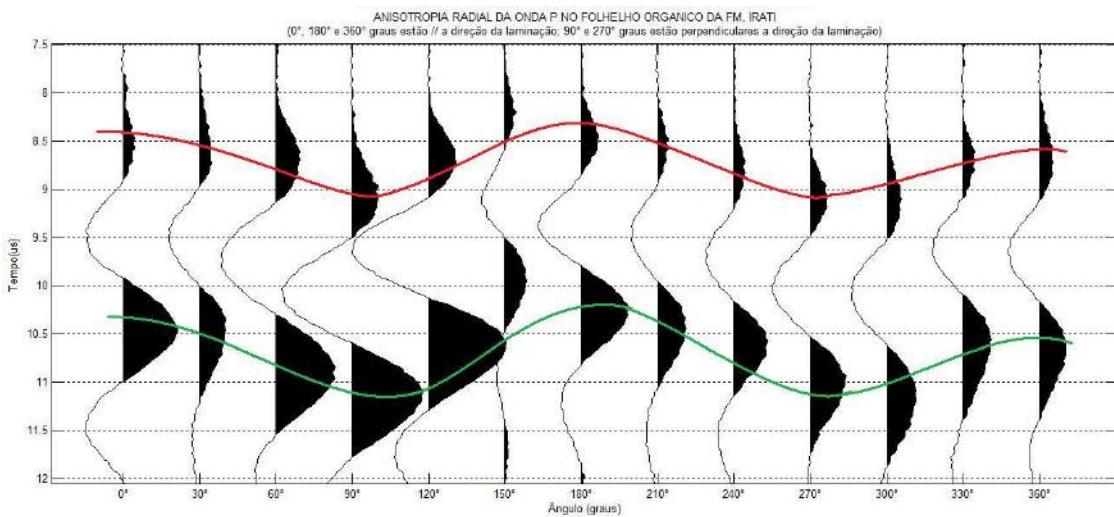


Figura 61 – Gráfico com as curvas de velocidades das ondas P no folhelho Irati interpretado.

O efeito da anisotropia na amostra é bem marcado após a propagação de ondas elásticas P e S ao longo do giro de 360° do plugue em torno de seu eixo central.

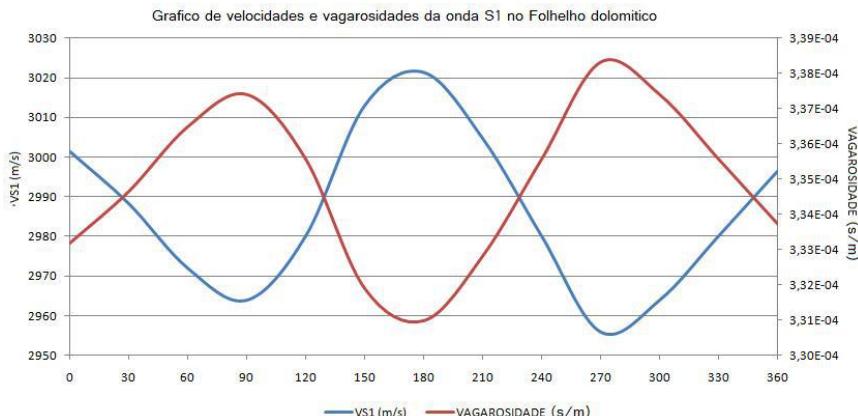


Figura 62 – Acima as curvas de velocidades e vagarosidades das ondas S1.

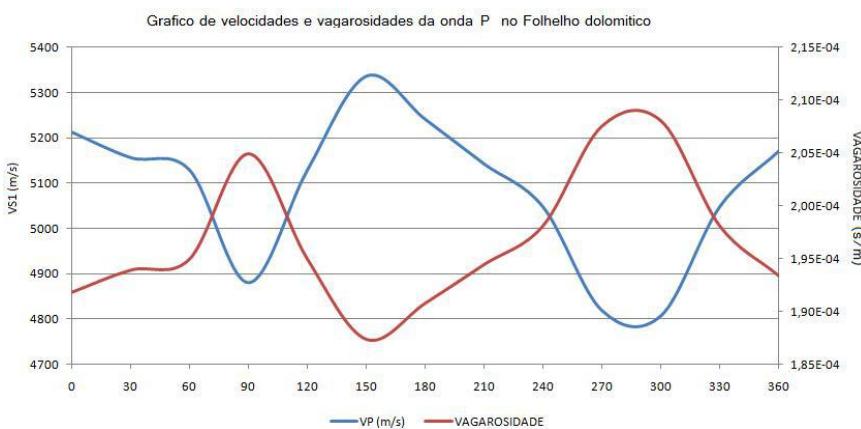


Figura 63 – Acima as curvas de velocidades e vagarosidades das ondas P.

A assimetria das curvas de Velan é causada pelas imperfeições na superfície lateral da amostra durante a plugagem (retirada do cilindro do bloco de rocha) e pelo acoplamento dos transdutores melados de graxa de silicone. Mas mesmo assim, o efeito da anisotropia fica evidenciado.

Na figura 62 ao lado temos as curvas de velocidades e vagarosidades da onda S na câmara NER com pressão de 3000psi após giro de 360° da amostra. Quando está paralelo a laminação (0°, 180° e 360°) o tempo de propagação da onda S é menor (menor vagarosidade) quando perpendicular a laminação (90° e 270°) o tempo é maior (maior vagarosidade).

Na figura 63 ao lado temos as curvas de velocidades e vagarosidades da onda P no VELAN após giro de 360° da amostra. Quando está paralelo a laminação (0°, 180° e 360°) o tempo de propagação da onda P é menor (menor vagarosidade) quando perpendicular a laminação (90° e 270°) o tempo é maior (maior vagarosidade).

3.6 – Anisotropia do Arenito Botucatu

Uma última série de ensaios válidos (entre outros que não deram certo), com outra rocha sedimentar fina selecionada para este estudo, foi realizada com o Arenito Botucatu. Ele é formado por arenito fino quartzoso bem selecionado, com estratificação plano paralela e cruzada de baixo ângulo, de ambiente eólico, extraído da Fm. Botucatu da bacia sedimentar do Paraná em São Paulo. A partir de um bloco desta rocha foram plugadas duas amostras horizontais: uma grande de 4" e outra pequena de 1,5". A amostra grande tinha como objetivo ser um referencial para as medidas realizadas no VELAN. A amostra de 1,5" foi para a câmara NER de medidas de velocidades. No VELAN normalmente são medidas amostras maiores, os chamados testemunhos de rocha, cujo diâmetro se situa no entorno de 4" (Figura 64).

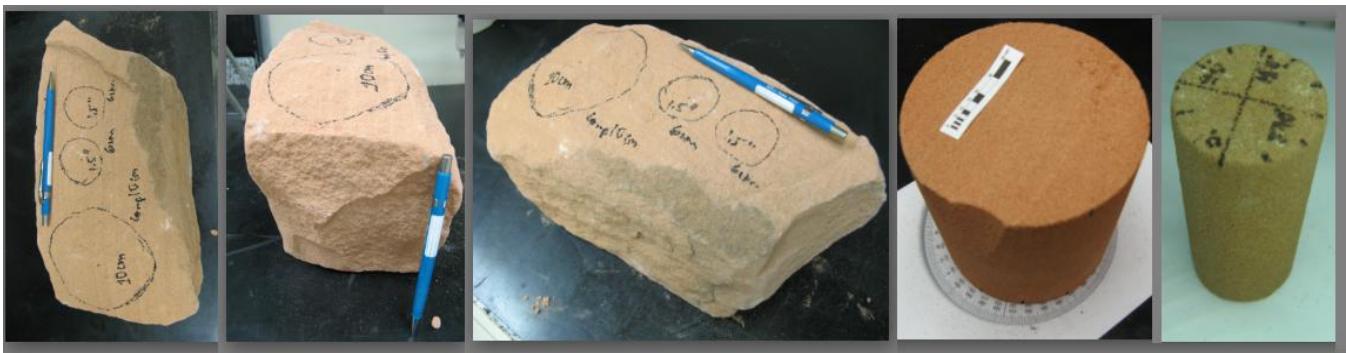


Figura 64 – Plugues de 4” e 1,5” retirados de boco de arenito Botucatu.

Os parâmetros físicos dos plugues extraídos do bloco são: 1) Tarugo de 4”. Peso – 1520 g; Comprimento – 104,90 mm; diâmetro – 100 mm; massa específica (μ) – 1,82 g/cm³; volume da amostra – 785,40 cm³; 2) Plugue de 1,5”. Peso – 117,52 g; comprimento – 60,652 mm; diâmetro – 37,05 mm; massa específica (μ) – 1,80 g/cm³; volume da amostra – 65,40 cm³;

A figura 65 abaixo ilustra o gráfico de velocidades das ondas P, Sh e Sv subindo e descendo a pressão confinante até 5000psi (idem aos anteriores). Nota-se uma sutil diferença entre as velocidades entre as ondas Sh (mais rápida) e Sv (mais lenta) o que corresponde maior velocidade Sh paralela ao acamamento sedimentar e menor velocidade Sv perpendicular ao acamamento sedimentar do Botucatu.

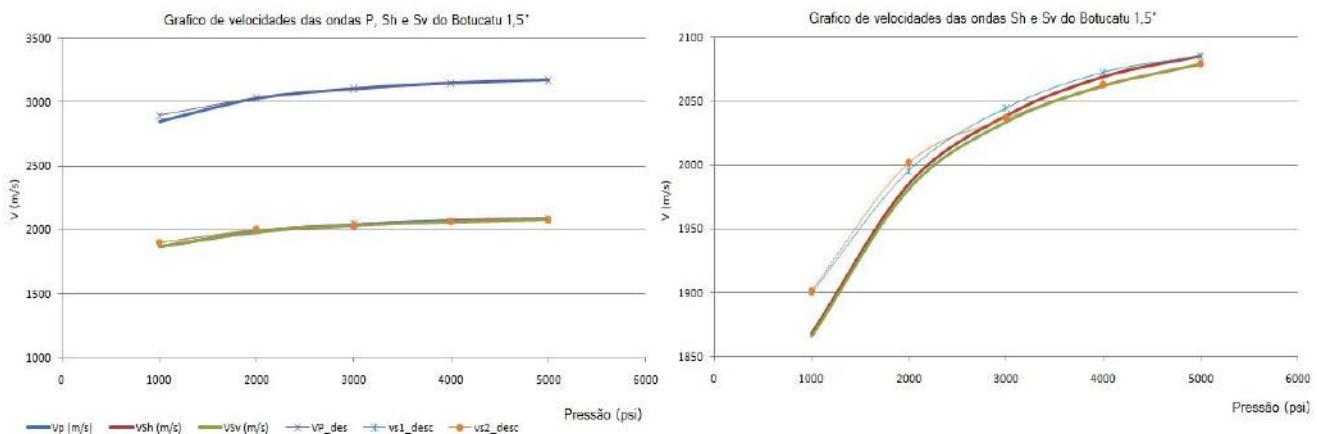


Figura 65 – Acima os gráficos com as curvas de velocidades das ondas P, S1 e S2 (lado esquerdo) e detalhe das curvas com as ondas Sh (S1) e Sv (S2) (lado direito).

No ensaio de VELAN foi utilizado exclusivamente o plugue de 4” por ser um cilindro de maior comprimento (100mm) e maior superfície lateral para posicionar os transdutores de 1,5”. Foram medidas três diferentes alturas (topo, meio e base) e depois calculados as velocidades e vagarosidade a partir da leitura dos tempos de transito no osciloscópio (Figura 66).

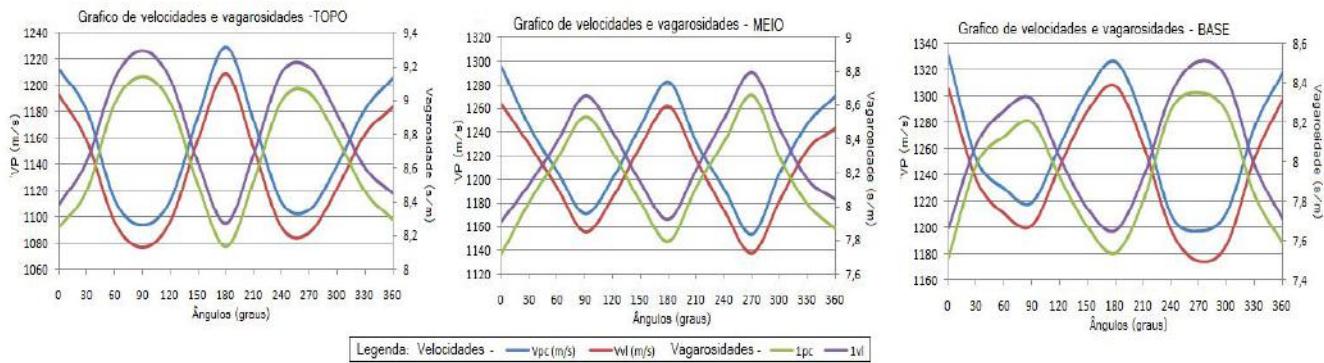


Figura 66 – Curvas de velocidades e vagarosidades no TOPO, MEIO e BASE do tarugo de 4”.

Estes ensaios (Figura 66) mostram a consistência do método de VELAN, tendo em vista a repetição do ensaio em alturas diferentes da amostra orientada. Os gráficos acima mostram o registro das primeiras chegadas da onda P em tempo (microssegundos), sendo o primeiro pico – 1pc e primeiro vale após o pico – 1vl e conhecendo-se a distância percorrida pela onda – diâmetro de 100 mm, calculam-se as velocidades pela formula: $V = S/T$ e as vagarosidades por: $Vaga = 1 / V$. na direção de 0° , 180° e 360° os transdutores da onda P estão alinhados paralelamente aos planos de laminação e nas direções 90° e 270° a onda P vibra perpendicular a laminação. Nos ângulos intermediários a onda P incide na diagonal em relação a estes planos. A figura 67 mostra o plugue de 4” sendo medido no VELAN.

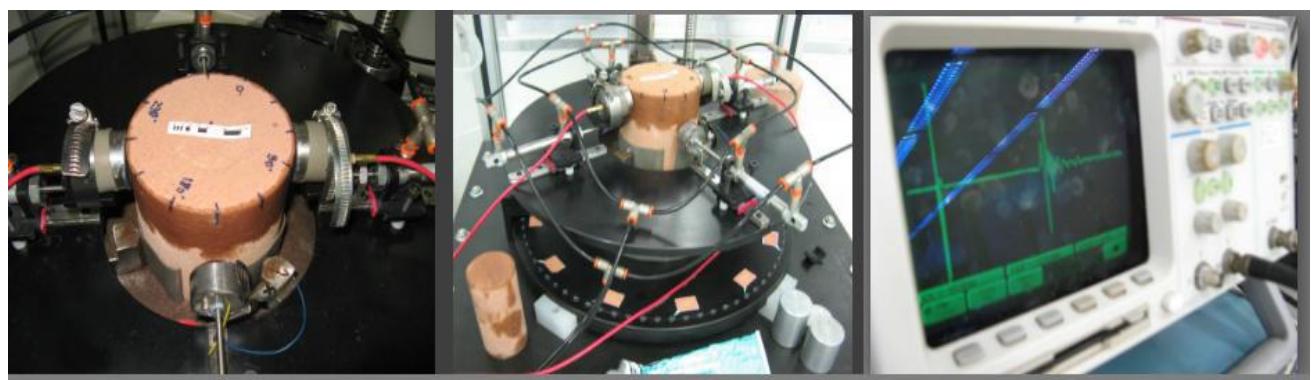


Figura 67 – Plugue de 4” do Botucatu no Sistema de medidas de velocidades anisotrópicas – VELAN.

O plugue de 1,5" medido na câmara NER em pressão confinante de 3000psi apresentou os seguintes resultados gráficos produzidos no MatLab e seguidos de interpretação (Figuras 68 a 69).

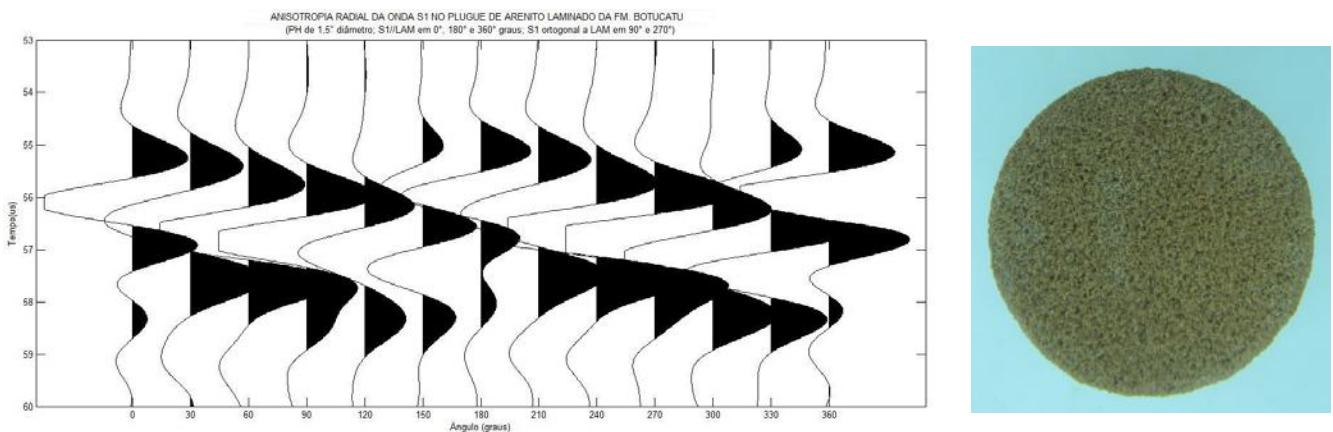


Figura 68 – Acima as curvas de velocidades das ondas S1. Ao lado foto detalhe do arenito Botucatu.

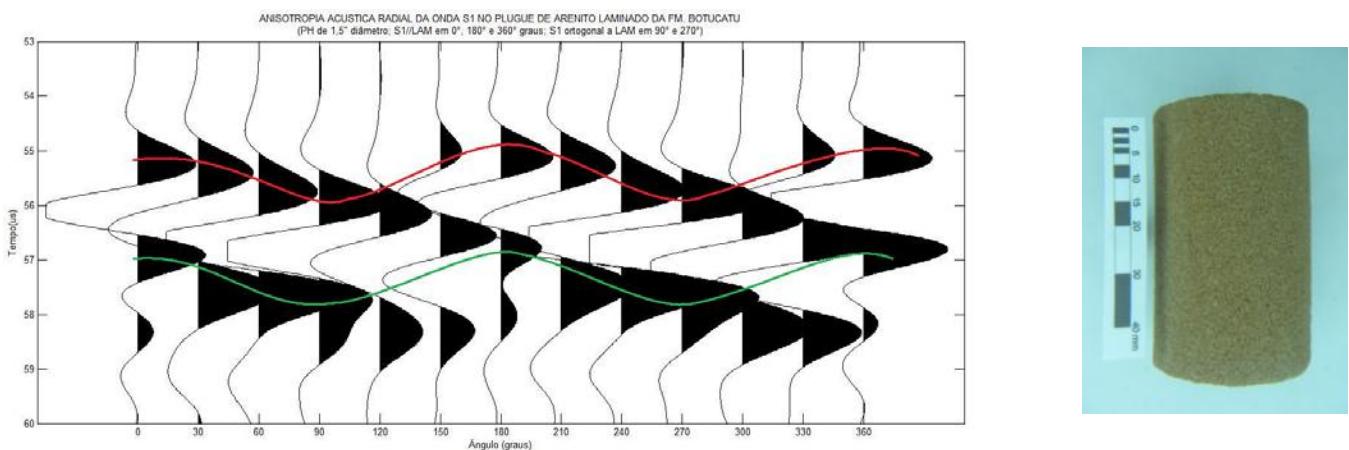


Figura 69 – Acima as curvas de velocidades das ondas S1 interpretado. Ao lado foto do arenito Botucatu.

A sinuosidade das curvas de tempo com amplitudes normalizadas mostram como nos outros casos anteriores mais uma vez a diferença entre os primeiros tempos de chegada da onda S1 (picos pretos e vales brancos) que coincidem em direção com as curvas de vagarosidades dos gráficos da onda P comprovando a interferência direta dos planos de acamamento sedimentar nos atrasos angulares vistos ao longo de todos os ensaios apresentados aqui nesta monografia.

4 – Conclusão

Os ensaios aqui apresentados refletem um anseio pessoal de se investigar os fenômenos produzidos pelas ondas elásticas - S polarizadas e comparar com os efeitos dela resultantes após sua propagação em amostras laminadas e orientadas com as ondas elásticas - P na mesma direção. É evidente que são ondas sísmicas de naturezas diferentes: uma é cisalhante (onda S) e a outra é compressiva (onda P). Mas os resultados comprovam que no estudo da anisotropia radial de amostras orientadas ambas as ondas, sob condições controladas, produzem resultados comparáveis.

A vagarosidade representa a dificuldade em tempo de trânsito que as ondas P e S enfrentam para percorrer a amostra anisotrópica. Dos ensaios pode-se concluir que a maior vagarosidade é proporcional ao maior ângulo de incidência das ondas P e S sobre os planos de laminação, ou seja, quando estas ondas tendem a vibrar na direção perpendicular aos planos de estratificação, laminação e microfraturas paralelas.

As variações na assimetria das curvas de velocidade e vagarosidade estão diretamente relacionadas ao acoplamento dos transdutores (emissor e receptor) nas bases (onda S) e nas superfícies laterais (onda P) dos plugues. No caso da câmara NER, a deformação nos discos de chumbo e as imperfeições dos plugues medidos têm suas parcelas de interferência nos resultados, mesmo tendo o máximo de controle. No Velan o acoplante formado por graxa de silicone também se molda com a pressão lateral dos transdutores, além das imperfeições naturais da superfície dos plugues. Mas são fatores naturais inerentes de todos os ensaios realizados no laboratório de Física de Rochas.

Os dados processadas no MatLab e apresentados sob forma de curvas reunidas lado a lado, como um sismograma, ajudam a destacar as sinuosidades produzidas pela anisotropia radial de cada amostra orientada após a propagação das ondas elásticas P e S em um giro de 360° em torno de seu eixo. Os planos de laminação são identificados pelos atrasos e avanços no tempo de trânsito das ondas tanto no modelo físico construído como nos exemplares de rochas sedimentares finas laminadas com diferentes impedâncias.

O Matlab foi uma ferramenta utilizada muito poderosa que abreviou o tempo gasto para desenhar gráficos e entender o comportamento da anisotropia comparada entre os 2 métodos distintos: P e S, sintetizando o numerosos conjunto de dados gerados pelos ensaios em laboratório.

No exemplar medido de folhelho orgânico (DOL3) mesmo que a amostra aparente ser isotrópica e compacta, existe uma anisotropia incipiente que pode ser detectada através da aplicação destes métodos P ou S na amostra orientada.

Um ponto bastante positivo destes ensaios é que agora o laboratório de Física de Rochas tem um padrão confiável para calibrar os transdutores piezelétricos polarizados S1 e S2 (Sh e SV respectivamente) que estão montados perpendiculares entre si, junto com a onda P, nos cabeçotes da NER (Fig.07). Pois com o plugue laminado devidamente orientado entre os cabeçotes, através do chaveamento e conhecendo-se a velocidade do alumínio, verificam-se as diferenças entre as velocidades das ondas Sh e Sv pelo tempo de trânsito em cada direção como foi revelado neste

ensaio do alumínio com as placas unidas por pressão de 3000 psi, apenas com ar realizando acoplamento.

Este estudo comprova a viabilidade de investigações mais elaboradas (artigos científicos, mestrado, doutorado) onde devem ser levados em conta todos os fatores que determinam a natureza destes resultados inclusive as distorções de anisotropia (peso da mineralogia, porosidade, permeabilidade, densidade das microfraturas, descontinuidades, umidade, deformação da amostra, atenuação, densidade dos grãos, densidade da rocha, ângulo de incidência das ondas, espalhamentos, refração, ondas convertidas, etc e etc.)

Estes resultados confirmam a eficácia do uso dos sistemas de velocidades ultrasônicas em laboratório para estudos com análogos anisotrópicos através de amostras anisotrópicas representativas.

Agradeço a paciência e ajuda indispensável dos geofísicos e técnicos do laboratório de Física de Rochas e a gerência de Geofísica do Cenpes, que tornaram este estudo interessante e prazeroso, apesar de trabalhoso, mas cujos resultados alcançaram os objetivos iniciais e podem servir de base para novas investigações científicas do tema.

5 - Referências bibliográficas

¹-Vernik, L., and Nur, A., 1990, Ultrasonic velocity and anisotropy of hydrocarbon source rocks, GEOPHYSICS, VOL. 57. NO. 5 (MAY 1992); P. 727-735, 13 FIGS., 3 TABLES

²-Vernik, L. e Liu, X. 1997. Velocity anisotropy in shales: a petrophysical study. *Geophysics*, 62, no 2, pp. 521-532.

Livros, apostilas e artigos consultados:

- Barton, Nick. Livro: Rock Quality Seismic velocity, Attenuation and Anisotropy. Capítulo I, páginas de 3 a 172
- Carcione, J.M (1999). A model for seismic velocity and attenuation in petroleum source rocks. GEOPHYSICS, VOL. 65, NO. 4 (JULY–AUGUST 2000); P. 1080–1092, 15 FIGS., 1 TABLE.
- Conceição, prof. Jadir (*in memoriam*) (UFRJ). Notas de aula do Métodos Físicos Aplicados a Geociências.
- Fernandes. C.E de M. Livro: Fundamentos de Prospecção Geofísica. Capítulo I - Prospecção Sísmica, páginas 15 a 77.
- Ferrucio, profa. Paula (UFRJ). Notas de aula da Cursos de Geofísica e Perfilagem Geofísica de poços.
- Girão, prof. Geraldo (Hydrolog, 2004). Apostila de Perfilagem Geofísica.
- Nur, Amos e Wang Zhijing (Zee). Livro: Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir Rocks, Volume 3. Capítulo 2 – Anisotropy, fractures and shale properties. Páginas 111 a 238.
- Sayers, C.M. (2005). Seismic anisotropy of shales. *Geophysical Prospecting*, 2005, 53, 667-676.
- Sato, K (UFBA). Apostila do Curso de Geofísica.
- Thomas. José Eduardo. Livro: Fundamentos da Engenharia do Petróleo. Autor: Capítulo 3. Métodos Sísmicos. Páginas de 29 a 49.
- Vernik, L and Landis, C (1996). Elastic Anisotropy of Source Rocks: Implications for Hydrocarbon Generation and Primary Migration. AAPG Bulletin, V. 80, No. 4 (April 1996), P. 531–544.
- Vernik, L. (1994). Hydrocarbon-generation-induced microcracking of source rocks. GEOPHYSICS, VOL. 59, NO. 4 (APRIL 1994); P. 555-563, 8 FIGS., 1 TABLE.

Sites visitados da internet:

- <http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html> em 08/11/2010
- <http://www.bereasandstonecores.com/> em 15/06/2010.