



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG**

**ANISOTROPIA CRUSTAL NA REGIÃO DE PORTO DOS GAÚCHOS –  
MT, BRASIL**

**Davi Araújo Quaresma Lemos**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO N° 048**

Orientador: George Sand Leão Araújo de França

**Brasília - DF**

**2013**

**DAVI ARAÚJO QUARESMA LEMOS**

**Anisotropia crustal na região de Porto dos Gaúchos – MT, Brasil**

**Dissertação apresentada ao Instituto de  
Geociências da Universidade de  
Brasília para obtenção do título de  
Mestre em Geociências Aplicadas.**

**Área de Concentração:  
Geociências Aplicadas**

**Orientador: Prof. Dr.  
George Sand Leão Araújo de França**

**Brasília – DF**

**2013**

Nome: LEMOS, Davi A.

Título: Anisotropia Crustal em Porto dos Gaúchos – MT

Dissertação Apresentado ao Instituto de  
Geociências da Universidade de Brasília  
Para a obtenção do título Mestre em  
Geociências Aplicadas

Aprovado em:

Banca Examinadora:

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_ Instituição: \_\_\_\_\_

Julgamento: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

## Sumário

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vi
Abstract .....	vii
Lista de Figuras .....	viii
Lista de Tabelas .....	x
Lista de Abreviações e Siglas.....	xi
Introdução .....	1
Contexto da Pesquisa.....	1
Fonte de Dados .....	3
Anisotropia .....	4
Resumo do Artigo .....	7
Artigo .....	8
Abstract.....	8
Introdução.....	9
Arranjo Geológico e Tectônico.....	10
Dados.....	12
Análise da Onda de Cisalhamento.....	15
Resultados .....	22
Discussões e Conclusão.....	28
Conclusões .....	29
Referências Bibliográficas.....	32
ANEXO 1 .....	38
ANEXO 2 .....	41
Estação JAKB:.....	41

Estação PDRB .....	74
Estação FSJB .....	82

## Agradecimentos

Registro minha gratidão às várias pessoas que contribuíram com esse trabalho. Em primeiro lugar ao Prof. Dr. George Sand Araújo de França, meu orientador, pelo aprendizado, confiança, apoio e dedicação. À CAPES pela bolsa de pesquisa e a todo *staff técnico* do SIS/UnB, particularmente àquelas pessoas que me ajudaram na obtenção dos dados e nas informações necessárias para a análise, Diogo Farrapo e Iago Guilherme Santos.

Aos meus familiares que torceram pelo meu sucesso e também deram a sua contribuição: a minha mãe Mônica Araújo pelos dias de ajuda na revisão dessa dissertação, ao meu pai Geraldo Quaresma, pelas palavras de apoio e motivação, à minha tia Ângela Araújo, que revisou o texto da dissertação, mesmo não sendo sua área de atuação.

Finalmente, aos meus amigos pelo apoio e motivação, principalmente o geólogo Guilherme Ferreira, pelas imagens dos mapas e das rosetas, e Gilberto Espínola, pela tradução do artigo de português para inglês.

## Resumo

LEMOS, D. A. **Anisotropia crustal em Porto dos Gaúchos – MT, Brasil.** 2013.

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

Nessa dissertação são apresentados dados de onda de cisalhamento registrados por uma rede sismográfica com três estações de três componentes dispostas em uma área com 12 km de diâmetro, nas proximidades de Porto dos Gaúchos (11°31'S, 57°24'O) no centro norte do estado do Mato Grosso. As estações ficaram operantes entre março de 2005 e julho de 2005 e uma delas continua em operação até a presente data. Essa rede tinha o objetivo de gravar as contínuas réplicas após o abalo principal de março de 2005. Foram feitas rotações de acordo com o azimute do evento à estação e à polarização nas ondas de cisalhamento, na tentativa de detectar a divisão da onda, e em caso positivo, identificar o tempo de atraso da onda  $S_{lenta}$  e a direção de polarização da onda  $S_{rápida}$ . O padrão da direção de polarização mostrado é consistente com a direção da foliação Pré-cambriana observada na área. Essa interpretação é baseada no fato de que a direção da onda  $S_{rápida}$  concorda com a direção noroeste – sudeste da foliação Pré-cambriana. Essa conclusão está de acordo com do Nascimento et al.(2002, 2004), e tem importantes implicações na interpretação de observações da divisão de onda de cisalhamento feitas em rochas cristalinas na crosta, pois outros autores afirmam que essa divisão resulta dos efeitos das fraturas cheias de fluidos alinhadas ao esforço (anisotropia de dilatação extensiva - EDA). EDA é a assinatura do campo de esforço atual na região. Existe uma evidência com base no trabalho de Barros (2010), de que o máximo esforço compressional atualmente atuante na região tem direção E-W, sendo possível concluir que os dados obtidos estão em conflito com a interpretação da anisotropia em termos da EDA.

Palavras-chave: sismicidade, anisotropia crustal, foliação Pré-cambriana.

## Abstract

LEMOS, D. A. **Crustal anisotropy in Porto dos Gaúchos – MT, Brazil..** 2013.

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

In this dissertation we present splitting shear-wave data recorded at a three-component five-stations seismograph network distributed in a 12 km aperture, which operated from March 2005 to July 2005 near Porto dos Gaúchos (11°31'S, 57°24'W) - Brazil, to record the continued aftershocks activity after the main shock in March 2005, which had magnitude 5.0  $m_b$ . The pattern of polarization directions shown is consistent with the trend of Precambrian foliation observed in the field. This interpretation is based on the fact that the direction of the fastest splitting S wave agrees with the northwest-southeast trending Precambrian fabric. This conclusion, in accordance to those taken by do Nascimento *et al* (2002, 2004), has important implications for the interpretation of splitting shear-wave observations made in crustal crystalline rocks. Others authors have asserted that splitting shear-wave normally results from the effects of stress-aligned fluid-filled cracks (extensive dilatancy anisotropy or EDA). EDA is, by contrast, a signature of the present-day stress field in the region. There is strong evidence that in present-day maximum compressional stress is E-W direction. We therefore conclude that our present data are in conflict with an interpretation in terms of EDA.

Keywords: Seismicity, crustal anisotropy, Precambrian fabric.



## Lista de Figuras

- Figura 1: Mapa com a Sismicidade Brasileira, onde cada círculo representa um evento com magnitude indicada na legenda. O quadrado azul mostra a região de estudo.....2
- Figura 2: Divisão da onda de cisalhamento na região anisotrópica. Uma onda cisalhante ao entrar na região anisotrópica se divide em duas ondas com polarizações perpendiculares entre si e com velocidades diferentes. Fonte: Modificada de Wüstefeld et al, 2008 .....4
- Figura 3: Sismicidade Regional de 1980 a 1997, magnitudes > 3.5 em círculos. Fonte dos eventos. Boletim sísmico Brasileiro (UnB, USP, UFRN, etc.). Estrela é o epicentro do maior evento ocorrido no País em 1955. Triângulos são estações sismográficas em operação desde a década de 80. Os mecanismos focais mostrados nessa figura, foram obtidos por Mendiguren and Richter, 1978 para o evento de 1955, e para os eventos de 1998 e 2005 por Barros et al., 2011. Bacias sedimentares estão em cinza. Linhas escuras contínuas e tracejadas são os limites das principais províncias, e linhas cinza claras são os lineamentos (CPRM, 2001). O quadrado indica a cidade de Porto dos Gaúchos. PrB é bacia do Paraná, PnB é bacia do Parnaíba (Figura retirada de Barros et al., 2011)..... 11
- Figura 4: Principais unidades estruturais da Bacia dos Parecis (Redesenhada a partir de Braga e Siqueira, 1996 e Bahia et al., 2007 por Barros et al., 2011)..... 11
- Figura 5: Mapa com as estações e epicentros dos eventos utilizados nesse trabalho..... 14
- Figura 6: Componentes Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical do Evento de 25 de Abril de 2005, com magnitude  $0,1m_D$ ..... 16
- Figura 7: As duas componente horizontais rotacionadas para a direção radial e transversal (de acordo com o azimute) ..... 17
- Figura 8: Movimento de Partícula da onda no novo sistema de coordenadas radial e transversal. .... 18
- Figura 9: Componentes horizontais rotacionadas para a direção de polarização

das ondas S rápida e lenta. As marcas ISU0 no primeiro sismograma denota a chegada da onda S rápida, e no segundo sismograma a chegada da S lenta.....	19
Figura 10: Diagrama mostrando a direção do movimento de partículas (seta fina) e a segunda onda S dividida (seta grossa).....	20
Figura 11: Diagrama de roseta com a polarização da onda S dividida das estações (a) JAKB, (b) PDRB e (c) FSJB. Nas rosetas são apresentados a quantidade de dados analisados. ....	24
Figura 12: Diagrama de roseta da (a) direção de polarização da onda S dividida considerando as três estações, pras quais o valor mediano é 322° e (b) direção do lineamento na região, obtidos a partir do mapa dos lineamentos geográficos da região, de Barros (2010). A unidade das rosetas é dado em porcentagem (%) do dados. ....	27
Figura 13: (a) Mapa com os lineamentos topográficos na área de estudo e (b) diagrama de roseta dos lineamentos, onde a unidade é a porcentagem dos lineamentos. ....	30

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1:</b> Informação sobre as estações da Rede de Porto dos Gaúchos operante entre 27 de março e 11 de julho de 2005. ....	3
<b>Tabela 2:</b> Dados dos eventos .....	12
<b>Tabela 3:</b> Resumo Estatístico da Divisão de Onda de Cisalhamento. ....	25
<b>Tabela 4:</b> Resumo Estatístico do Lineamento Topográfico. ....	27

## Lista de Abreviações e Siglas

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico  
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
EDA – Extensive Dilatancy Anisotropy  
erh – Erro horizontal  
erz – Erro vertical  
FBON – Estação da Rede de Porto dos Gaúchos  
FSJB – Estação da Rede de Porto dos Gaúchos  
 $i_c$  – Ângulo crítico  
IG – Instituto de Geociências  
JAKB – Estação da Rede de Porto dos Gaúchos  
 $m_D$  – Magnitude de distância  
OLAB – Estação da Rede de Porto dos Gaúchos  
P – Onda sísmica compressional  
PDRB – Estação da Rede de Porto dos Gaúchos  
PGJUA – Base de Dados Porto dos Gaúchos e Juara  
Rms – Root mean square  
S – Onda sísmica Cisalhante  
 $S_H$  – Esforço compressional horizontal  
SIS – Observatório Sismológico  
SKKS – Onda Sísmica cisalhante que refratou no núcleo externo.  
SKS – Onda Sísmica cisalhante que refletiu no núcleo externo.  
UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
UnB – Universidade de Brasília  
USP – Universidade de São Paulo  
UTC - Universal Time Coordinated  
 $V_P$  – Velocidade da onda P  
 $V_S$  – Velocidade da onda S  
ZSPG – Zona Sísmica de Porto dos Gaúchos

# Introdução

## Contexto da Pesquisa

Essa dissertação é apresentada na forma de artigo, e tem como objetivo fazer a análise da anisotropia sísmica crustal na Zona Sísmica de Porto dos Gaúchos, que se encontra no centro-norte da Bacia dos Parecis, em Mato Grosso, afim de detectar a existência da anisotropia e caso exista, definir uma possível causa. Esse volume está dividido em três capítulos: Introdução, artigo (submetido) e conclusão. No capítulo 1 é apresentado o tema da dissertação, com explicações sobre a anisotropia e a atividade sísmica no local; no capítulo 2 é apresentado o artigo onde se faz uma análise da anisotropia crustal na região; no capítulo 3 são apresentadas a discussão sobre o tema abordado e as considerações finais.

A Zona Sísmica de Porto dos Gaúchos foi escolhida devido ao seu histórico sísmico, no qual consta o terremoto de maior magnitude já registrado no Brasil, com 6,2  $m_b$  de magnitude em 1955, além de outros terremotos medianos, com magnitude maior ou igual a 5,0  $m_b$ . A Figura 1 mostra o mapa da sismicidade brasileira indicando com o quadrado azul a região de Porto dos Gaúchos. Devido à sua constante atividade sísmica, foram instaladas duas redes sismográficas na área: a primeira operando com 10 estações entre 1998 e 2002 e a outra com cinco estações, operando de março a julho de 2005 (Barros, 2010). Diversos autores já trabalharam na área. Dentre eles podemos citar Nakayoshi e Marza, 2005; Nakayoshi, 2005; Barros, 2010 e Barros, 2011 que apresentaram resultados sobre parâmetros de fonte de cada enxame sísmico.

Existe uma grande dificuldade de se explicar a sismicidade intraplaca, e para isso é utilizado um modelo de zonas de fraqueza, definindo que sismos intraplaca ocorrem em profundidades crustais e quase sempre por reativação de zonas de fraquezas pré-existentes, em resposta a um campo de esforços ambiente, adequadamente orientado em relação à fonte sismogênica. Estas zonas de fraqueza variam enormemente e podem ser identificadas por uma combinação de investigações geofísicas, geológicas e sísmicas. Talwani (1989) fez uma boa síntese sobre os métodos de identificação de zonas de fraquezas. Nakayoshi e Marza

(2005) e Barros (2010) mostram que a tensão horizontal máxima possui direção E-W, consistente com a direção de esforços esperados a partir de modelos teóricos.

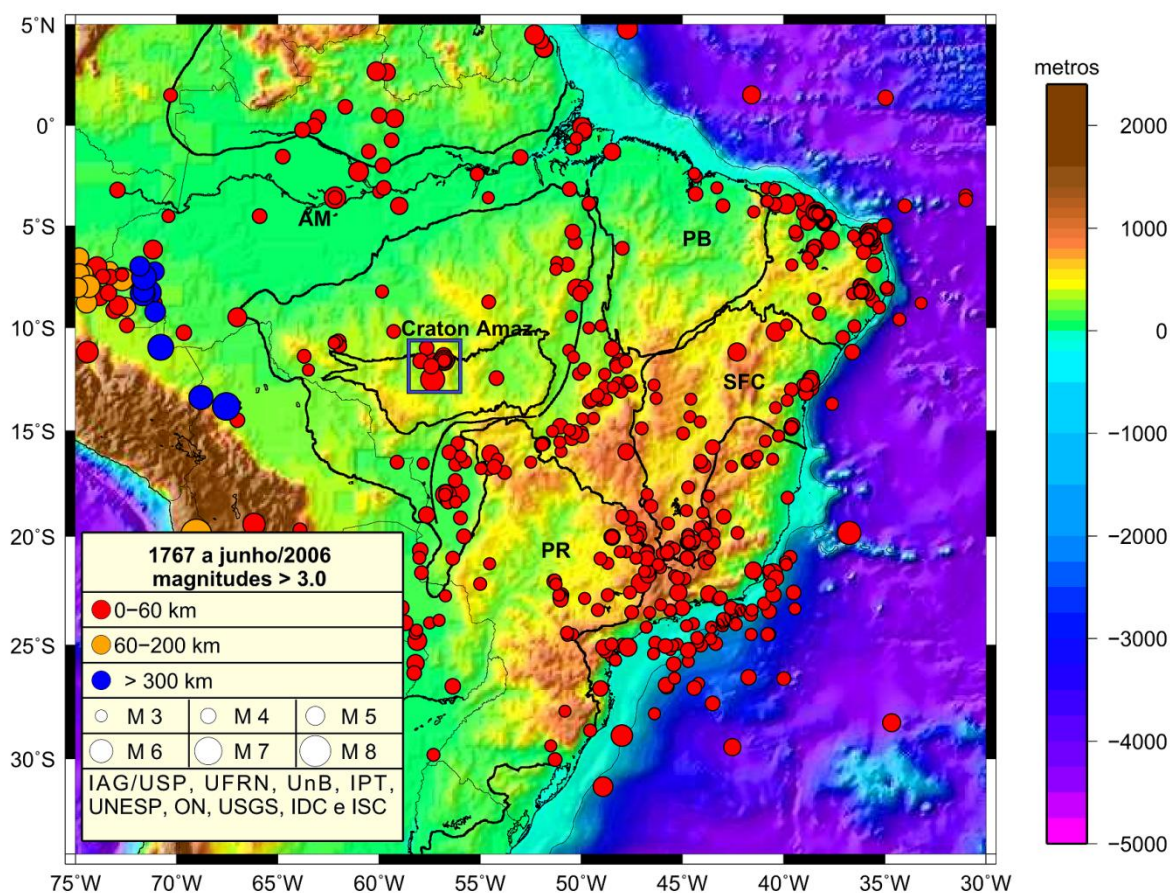


Figura 1: Mapa com a Sismicidade Brasileira, onde cada círculo representa um evento com magnitude indicada na legenda. O quadrado azul mostra a região de estudo.

Porém, como não existem trabalhos sobre a anisotropia crustal nessa área, este estudo poderá ajudar a definir uma possível causa para a sismicidade local e apresentar características da evolução crustal na região. De acordo com Musumeci et al (2005) quando uma onda de cisalhamento (fase S) passa por uma região anisotrópica, ela pode se dividir em duas ondas viajando com velocidades diferentes ( $S_{rápida}$  e  $S_{lenta}$ ) e com polarizações aproximadamente ortogonais. Esse fenômeno é definido como divisão de onda de cisalhamento e é bem semelhante ao fenômeno da birrefringência da luz. A birrefringência se refere a um efeito da refração da luz, que muda de direção em velocidade ao passar para um meio diferente (com índice de refração diferente). No caso da birrefringência, essa onda é dividida em duas ondas polarizadas com velocidades diferentes, no caso da luz, gerando duas imagens refrata. Ele pode ser observado frequentemente na porção superior da

crosta, em qualquer tipo de rocha (Crampin e Chastin, 2003). Bem semelhante à crosta, esse fenômeno é também comumente observado no manto litosférico, entretanto as ondas de cisalhamento que sofrem a divisão são as SKS e SKKS, que são fases da onda S que, durante seu percurso, passam pelo núcleo externo. A fase SKS refrata no núcleo externo, propagando em seu interior, e a onda SKKS reflete em sua superfície. Essas fases são utilizadas para o manto superior, pois seu ângulo de incidência nas estações é favorável para a observação da divisão da onda.

### Fonte de Dados

A principal fonte de dados é a Base de Dados de Porto dos Gaúchos (PGJUA), armazenados no Observatório Sismológico da Universidade de Brasília (SIS - UnB). Essa fonte contém dados de cinco estações sismográficas (PDRB, JAKB, FSJB, FBON e OLAB) instaladas e operantes entre 27 de março e 11 de julho de 2005, cobrindo uma área com diâmetro de aproximadamente 12 km, que foram instaladas devido ao evento que ocorreu em 23 de março de 2005, com magnitude 5.0  $m_b$  na ZSPG.

A tabela 1, modificada do trabalho de Barros (2010), contém informações das estações da rede de porto dos gaúchos que operou nesse período.

**Tabela 1:** Informação sobre as estações da Rede de Porto dos Gaúchos operante entre 27 de março e 11 de julho de 2005.

<b>Estação</b>	<b>Latitude (S)</b>	<b>Longitude (W)</b>	<b>Altitude (m)</b>	<b>Geologia</b>
FBON	11°36,00'	56°48,90'	332	Sedimento
FSJB	11°34,50'	56°42,53'	356	Sedimento
JAKB	11°36,60'	56°46,86'	339	Sedimento
OLAB	11°37,63'	56°43,60'	305	Sedimento
PDRB	11°36,73'	56°43,78'	337	Afloramento

Foram registrados 44 eventos em cada estação, no ano de 2005, totalizando 176 dados, com exceção da estação PDRB, cujos dados foram registrados somente em 2010, para os quais  $rms < 0,05$  s,  $erh < 0,5$  km e  $erz < 1,0$  km. A estação PDRB continuou operando após este período (Barros, 2010).

Foram analisados 70 sismos locais, dentre os 176 dados registrados, nas

cinco estações, dos quais somente 23 tiveram resultados satisfatórios devido à qualidade dos dados, a razão sinal-ruído e/ou a detecção da divisão da onda de cisalhamento, em três estações (PDRB, JAKB e FSJB). As estações FBON e OLAB foram descartadas devido ao excesso de gap e a uma baixa razão sinal-ruído.

### Anisotropia

A anisotropia do manto litosférico é obtida realizando-se a análise de fases SKS e SKKS de telessismos (Vecsey et al, 2007) e a da crosta utilizando a onda S (Crampin & Lovell, 1991). As fases S (S, SKS e SKKS) ao se propagarem num meio anisotrópico sofrem uma divisão semelhante ao fenômeno da birrefringência da ótica. De acordo com Musumeci *et al.* (2005), quando uma onda cisalhante entra em uma região anisotrópica, ela se divide em duas ondas viajando com velocidades diferentes ( $S_{rápida}$  e  $S_{lenta}$ ), e com polarização aproximadamente ortogonal. Nessa divisão, as ondas recebem o nome de  $S_{lenta}$  e  $S_{rápida}$  e estão polarizadas em direções ortogonais, como mostrado na Figura 2 a seguir. Os parâmetros principais para esse estudo são a polarização da onda  $S_{rápida}$  e a diferença temporal da chegada dessas fases.

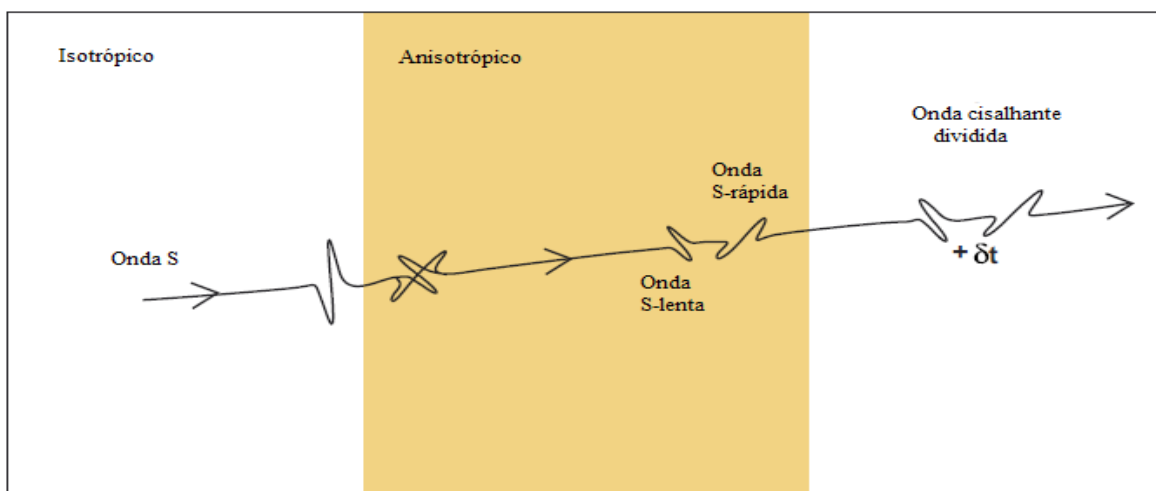


Figura 2: Divisão da onda de cisalhamento na região anisotrópica. Uma onda cisalhante ao entrar na região anisotrópica se divide em duas ondas com polarizações perpendiculares entre si e com velocidades diferentes. Fonte: Modificada de Wüstefeld et al, 2008

Na Crosta existem vários fatores que podem estar correlacionados com a anisotropia, tais como: alinhamento de minerais, litologias, esforços, direção de



fraturas etc. No caso do manto litosférico esse fator é principalmente o alinhamento de cristais de olivina. Para o estudo geral da anisotropia é necessário considerar que a direção que minimiza a componente transversal (T) de registro é a direção de polarização mais rápida e a diferença do tempo das fases S ( $S_{\text{rápida}}$  e  $S_{\text{lenta}}$ ) é a medida do grau de anisotropia do meio. O primeiro trabalho aplicado no Brasil foi realizado por James e Assumpção (1996) que mostrou concordância entre a direção de polarização e a tendência das feições geológicas regionais. E estudos crustais foram realizados por Takeya, 1992 e França, 1999, mostrando efeitos crustais no Nordeste do Brasil.

A anisotropia, analogamente ao fenômeno da birrefringência da luz, é constituída pela polarização de ondas, nesse caso, de ondas sísmicas. No caso da birrefringência da luz, o mineral analisado possui eixos de polarização orientados, em sua maioria, aproximadamente perpendiculares. Cada eixo possui uma propriedade elástica distinta, ou seja, um índice de refração diferente, o que gera duas ondas polarizadas ortogonais com velocidades diferentes, gerando, ao final do processo, uma imagem duplicada (James e Assumpção, 1996).

A maioria dos modelos sismológicos assume que a Terra é isotrópica: a velocidade da onda não varia de acordo com a direção de propagação, para facilitar os cálculos e a criação de modelos de velocidade e tempos de percurso. No entanto, grande parte dos materiais comuns (minerais, por exemplo) é considerada anisotrópica, graças a uma propriedade elástica que varia com sua orientação.

Sempre houve relutância em se utilizar a característica anisotrópica da Terra, pois os cálculos anisotrópicos requerem uma grande complexidade computacional, além da complexidade em se fazer várias inversões de dados para as diferentes constantes elásticas, ou mesmo para definir se existe ou não a presença de anisotropia na região estudada (Shearer, 2009).

Muitos fatores contribuem para a anisotropia crustal (Kern, 1993; Siegesmund *et al.*, 1991; Godfrey *et al.*, 2000), incluindo a orientação preferencial do retículo dos cristais de minerais, rachaduras orientadas e finas camadas de diferentes litologias. Para explicar a divisão de onda sísmica, Crampin *et al.* (1984b) sugerem que a principal fonte de anisotropia sísmica na crosta é a orientação preferencial de micro-fendas verticais preenchidas de líquidos, alinhadas em uma direção de acordo com o campo de esforço local (EDA – *extensive dilatancy*

*anisotropy*). Em particular, para ondas dentro de um cone de trajetórias com ângulos de incidência menores que  $35^\circ$ , pode-se observar que a orientação da polarização da onda  $S_{rápida}$  é aproximadamente paralela à direção do máximo esforço compressional, e a diferença de tempo entre as ondas  $S_{lenta}$  e  $S_{rápida}$  é controlada pela distribuição das densidades e pela razão aparente (razão entre a espessura e o diâmetro) da fenda.

A teoria EDA é realmente atrativa para alguns sismólogos porque ela sugere que rachadura, fraturas e espaços porosos vão se alinhar, preferencialmente, ao campo de esforços. A distribuição de tais rachaduras e fraturas alinhadas produz uma simetria hexagonal com um eixo de simetria horizontal. Mais recentemente foi mostrado que quando a quantidade de um fluido de poro na falha sismicamente ativa é suficientemente elevada, as polarizações das ondas de cisalhamento giram em  $90^\circ$  e se tornam aproximadamente paralelas ao esforço mínimo horizontal (Zatsepin and Crampin, 1997; Crampin and Zatsepin, 1997; Crampin *et al.*, 2002; Crampin, 2004. apud do Nascimento *et al.*, 2004). Para se obter o resultado final, foi necessário considerar a hipótese EDA para se determinar uma possível causa para a anisotropia local.

Mas EDA não é a única teoria a respeito da anisotropia crustal. Recentemente, alguns autores brasileiros, como do Nascimento *et al.* (2002, 2004), mostraram casos onde a polarização da onda cisalhante é aproximadamente perpendicular ao esforço máximo horizontal, considerando a alternativa possível de que a anisotropia das ondas cisalhantes vem da foliação Pré-cambriana, assim como nos dados observados nesse estudo.

Ao realizar uma correlação da direção da polarização da onda cisalhante dividida com a direção do campo de esforços, que de acordo com Barros (2010) possui direção E-W, e com os lineamentos da foliação Pré-cambriana, que tem direção preferencial NW-SE, foi possível perceber que a direção preferencial das polarizações é semelhante à dos lineamentos na área, que nesse caso está de acordo com a foliação Pré-cambriana.

## Resumo do Artigo

Anisotropia crustal na Zona Sísmica de Porto dos Gaúchos, na intraplaca brasileira.

*Submetido, em inglês, em Março de 2013, à Revista Brasileira de Geofísica, mas apresentado em português para facilitar a leitura.*

Nesse artigo é abordado o tema anisotropia crustal na Zona Sísmica de Porto dos Gaúchos (ZSPG) localizada na porção centro-norte do Mato Grosso e leste de Rondônia que pertence à Bacia dos Parecis, bacia Pré-cambriana, que se tornou uma das regiões sísmicas mais importantes do país, devido à sua sismicidade recorrente e ao terremoto que ocorreu em 1955 na Serra do Tombador, o maior terremoto já registrado no Brasil.

Analisando a polarização da onda S dividida, autores como Crampin and Chastin, 2003 e Musumeci et al., 2005, demonstram que a direção mediana da polarização da onda S dividida é alinhada paralelamente ao campo de esforços, caracterizado por fraturas e poros alinhados na mesma direção. Este não foi, porém, o resultado observado na análise dos dados apresentado neste artigo. Verificamos que a direção mediana da polarização da onda S é paralela ao lineamento geológico, que possui orientação diferente da do campo de esforço máximo na área de estudo. Do Nascimento *et al.*, 2004 mostram que existem regiões no Brasil onde a anisotropia é caracterizada pela foliação pré-cambriana, que pode ser detectada caso a polarização mediana da onda S dividida for paralela à direção dos lineamentos na área, como mostram os dados da ZSPG analisados nesse artigo.

Nesse trabalho foi possível concluir que a anisotropia crustal é devida aos lineamentos da foliação Pré-cambriana, pois tanto a polarização das ondas de cisalhamento divididas como os lineamentos estão orientados na direção NW-SE, direção que não condiz com o campo de esforços que, de acordo com Barros *et al.*, 2011, possui direção E-W, não consistente com a teoria EDA de Crampin *et al.*, 1984.

## Artigo

### **Anisotropia crustal na Zona Sísmica de Porto dos Gaúchos, na intraplaca brasileira.**

Davi A. Lemos ([davi.fisunb@gmail.com](mailto:davi.fisunb@gmail.com))<sup>1</sup>

George S. França ([georgesand@unb.br](mailto:georgesand@unb.br))<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, BR.

#### **Abstract**

This paper focus on the issue of crustal anisotropy in the Seismic Zone of Porto dos Gauchos (ZSPG) - Brazil, which is located in the north central portion of the State of Mato Grosso and in the east of the State of Rondônia. This area belongs to the Parecis Basin, which is a Precambrian Basin and became one of the Brazilian most important seismic basin, due to its recurring seismicity and the 1955's earthquake that occurred in the Sierra Tombador, the largest earthquake ever recorded in the country.

Analyzing the polarization of the divided S wave, authors as Crampin and Chastin (2003) and Musumeci et al. (2005) show that the polarization median direction of the divided S wave is aligned parallel to the stress field, characterized by fractures and pores aligned in the same direction. This was not, however, the result observed in the data analysis presented in this article. We found that the median direction of the polarization of the S wave is parallel to the geological lineament, which has different orientation compared to the maximum stress field in the studied area. Birth et al. (2004) show that there are regions in Brazil where the anisotropy is characterized by Precambrian foliation, which can be detected if the median polarization of the divided S wave is parallel to the direction of lineaments in the area, as shown by the ZSPG data analyzed in this article.

The conclusion is that the anisotropy is due to crustal lineaments of Precambrian foliation, since both the polarization of the divided shear waves and the lineaments are oriented in NW-SE directions, which does not match the stress field as, according to Barros et al. (2011), this field has EW direction which is not consistent with the EDA theory of Crampin et al. (1984).

Keywords: seismology, seismic anisotropy, Precambrian fabric, Porto dos Gaúchos, crustal anisotropy.

### **Introdução**

A Zona Sísmica de Porto dos Gaúchos (ZSPG) no estado do Mato Grosso é uma das mais ativas do país, com o maior tremor já registrado no Brasil, com magnitude 6,2  $m_b$ , em 1955. Por estar sendo constantemente monitorada, na ocorrência de enxames sísmicos, tais como os de março de 1998 e de março de 2005, o Observatório Sismológico instalou redes sismográficas locais para o maior detalhamento destas atividades, entre 1998 e 2002, contendo 10 estações e em 2005, contendo cinco estações. Após 2005, a rede foi desativada, ficando operante apenas a estação PDRB. Há diversos trabalhos sobre essa atividade, podemos destacar os de Nakayoshi 2005, Nakayoshi & Marza, 2005, Barros 2010, Barros, 2011, que apresentaram resultados sobre parâmetros de fonte de cada enxame sísmico. De acordo com Nakayoshi & Marza, 2005, a região onde se encontra a ZSPG possui estruturas que são zonas de fraqueza pré-existentes que estão sendo reativadas devido aos esforços tectônicos regionais atuais, na direção E-W. Barros, 2010, comprova que a tensão horizontal máxima possui a mesma direção E-W, consistente com a direção dos esforços esperados a partir de modelos teóricos.

Entretanto, não existe trabalho de anisotropia crustal na área, que possa contribuir para o entendimento da atividade sísmica ou da evolução crustal. A anisotropia crustal é detectada observando-se a onda S (Crampin & Lovell, 1991). As fases S (S, SKS e SKKS) ao se propagarem num meio anisotrópico sofrem uma divisão semelhante ao fenômeno da birrefringência da ótica. A onda S se divide em duas ondas polarizadas em direções ortogonais e com velocidades diferentes,

gerando um tempo de atraso na chegada das duas novas ondas ao receptor (Musumeci *et al.*, 2005). As ondas recebem o nome de  $S_{lenta}$  e  $S_{rápida}$  devido à diferença de velocidade e o tempo de atraso.

Esse trabalho tem como objetivo detectar a divisão da onda S dos eventos detectados pelas estações PDRB, JAKB e FSJB e mensurar a polarização e o tempo de atraso resultante da divisão da onda de cisalhamento. Se possível, correlacionar a polarização mensurada com os sistemas de esforço da região ou qualquer outra característica física ou geológica.

### **Arranjo Geológico e Tectônico**

A zona sísmica de Porto dos Gaúchos (ZSPG) no estado do Mato Grosso e leste de Rondônia, na bacia Pareci, que, junto com as bacias Amazônica e do Paraná definem um conjunto de bacias Paleozóicas Brasileiras intracratônicas adjacentes à depressão Subandina.

De acordo com Barros *et al.*, 2011, a área em estudo inclui o embasamento Pré-cambriano do cráton Amazônico, composto principalmente por rochas graníticas/gnáissicas, e terrenos Fanerozóicos com rochas sedimentares da bacia Parecis. O embasamento Pré-cambriano do Cráton Amazônico pertence à província geocronológica do Rio Negro-Juruena, com uma importante característica, o graben Caiabis da era Mesoproterozóica, que se encontra parcialmente sob a Bacia dos Parecis.

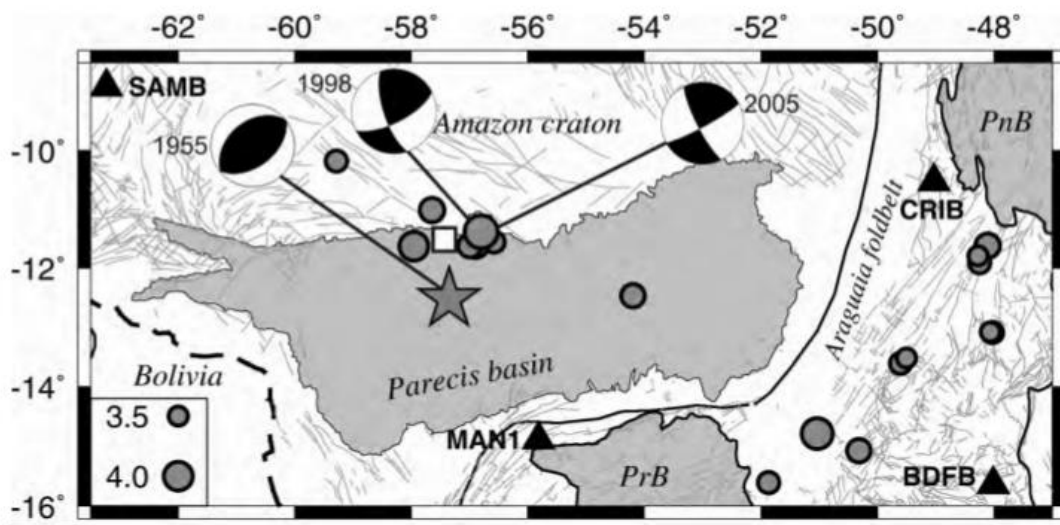


Figura 3: Sismicidade Regional de 1980 a 1997, magnitudes > 3.5 em círculos. Fonte dos eventos. Boletim sísmico Brasileiro (UnB, USP, UFRN, etc.). Estrela é o epicentro do maior evento ocorrido no País em 1955. Triângulos são estações sismográficas em operação desde a década de 80. Os mecanismos focais mostrados nessa figura, foram obtidos por Mendiguren and Richter, 1978 para o evento de 1955, e para os eventos de 1998 e 2005 por Barros et al., 2011. Bacias sedimentares estão em cinza. Linhas escuras contínuas e tracejadas são os limites das principais províncias, e linhas cinza claras são os lineamentos (CPRM, 2001). O quadrado indica a cidade de Porto dos Gaúchos. PrB é bacia do Paraná, PnB é bacia do Parnaíba (Figura retirada de Barros et al., 2011).

A Bacia dos Parecis é uma bacia intracratônica que começou como um bacia de abatimento na era Paleozóica. A coluna estratigráfica da bacia Parecis inclui unidades Paleozóicas, Mesozóicas e Cenozóicas, distribuídas em três sub-bacias

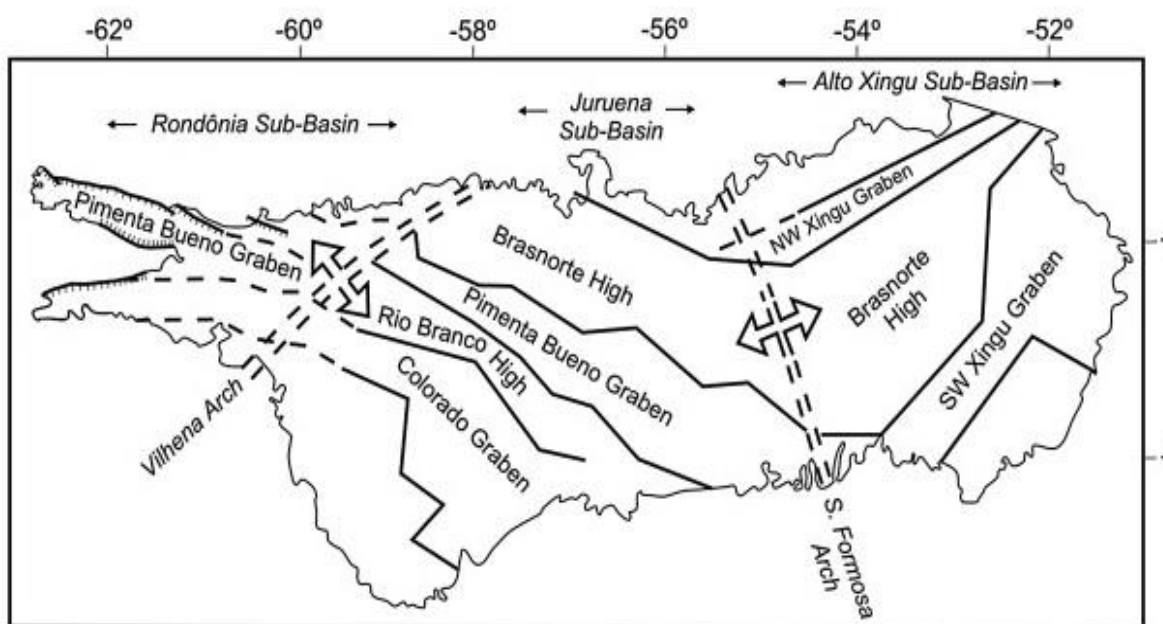


Figura 4: Principais unidades estruturais da Bacia dos Parecis (Redesenhada a partir de Braga e Siqueira, 1996 e Bahia et al., 2007 por Barros et al., 2011)

separadas por arcos estruturais. Dois arcos paleogeográficos cruzam a bacia: Arco Vilhena a Oeste e Arco Serra Formosa, ao Leste, separando as sub-bacias (de Oeste pra Leste) de Rondônia (Paleozóica), Juruena (Mesozóica) e Xingu (Cenozóica) de acordo com Siqueira e Teixeira, 1993, como mostrado na Figura 4.

## Dados

Barros *et al.*, (2010) identificaram cerca de 3.300 eventos da atividade sísmica de 2005, entre os quais somente 44 eventos foram registrados pelas estações da rede sismográfica. Os 44 eventos têm, em sua totalidade, rms < 0,05 s,  $r_h < 0,5$  km e  $r_z < 1,0$  km. Os dados analisados neste artigo, desse período, foram registrados em quatro estações (JAKB, FSJB, FBON e OLAB). Essa rede operou entre 27 de março a 11 de julho de 2005, cobrindo uma área de aproximadamente 12 km, quando foi desativada e permaneceu em operação somente a estação PDRB. Os dados da estação PDRB analisados nesse trabalho foram registrados nos anos de 2009 e 2010. Foram analisados cerca de 70 eventos, dentre os quais somente 17 foram utilizados neste trabalho, porque foram usados somente os dados com razão sinal-ruído que possibilita a visualização clara da divisão da onda de cisalhamento. As estações FBON e OLAB não foram utilizadas por apresentarem uma baixa razão sinal-ruído, e um alto índice de gap (falhas nos sinais e interrupções na gravação dos dados). A Tabela 2 e a Figura 5 mostram as estações e os epicentros utilizados neste estudo.

Tabela 2: Dados dos eventos

No	Data	Hora Origem	Epicentro		Mag.	Profundidade	Estação/dist.
	jjj/aaaa	(UTC)	Lat. (°)	Long. (°)	$m_D$	km	/km
1	115/2005	03:57:00,71	-11,5955	-56,7398	0,1	0,5	JAKB/ 4,77 FSJB/ 4,05
2	115/2005	10:23:56,48	-11,5965	-56,7388	0,1	0,7	JAKB/ 4,83 FSJB/ 2,61
3	116/2005	16:57:48,99	-11,588	-56,7823	0,9	0,9	JAKB/ 2,43



4	119/2005	01:43:00,27	-11,595	-56,7375	0,3	1,9	JAKB/ 5,02
5	119/2005	14:06:30,12	-11,5912	-56,7348	0,1	0,2	JAKB/ 5,44 FSJB/ 3,33
6	119/2005	14:17:41,18	-11,5882	-56,7437	1,1	0,3	JAKB/ 4,73
7	121/2005	10:08:48,84	-11,5947	-56,7398	0,7	0,7	JAKB/ 4,80
8	124/2005	15:47:50,83	-11,6005	-56,7683	1,1	0,0	JAKB/ 1,74 FSJB/ 5,04
9	127/2005	01:33:49,92	-11,6037	-56,728	0,3	1,3	JAKB/ 5,81
10	127/2005	23:33:34,68	-11,5952	-56,7408	0,2	1,1	JAKB/ 4,67
11	128/2005	07:25:21,18	-11,6015	-56,7232	1,8	1,2	JAKB/ 6,37 FSJB/ 3,31
12	132/2005	01:03:43,10	-11,5955	-56,7503	1,4	0,3	JAKB/ 3,71
13	141/2005	23:59:03,68	-11,5902	-56,7325	1,1	0,7	JAKB/ 5,72
14	13/2010	02:06:52,70	-11,62	-56,7	2,9	5**	PDRB/ 3,386
15	17/2010	22:38:16,60	-11,62	-56,7	2,6	5**	PDRB/ 3,386
16	32/2010	17:06:59,80	-11,62	-56,7	2,1	5**	PDRB/ 3,386
17	61/2010	01:46:36,90	-11,62	-56,7	2,5	5**	PDRB/ 3,386

---

*\*A data é dada em dias julianos (jjj) e a Hora Origem é mostrada na hora do meridiano 0. \*\*Profundidade pré-determinada. Modificada de Barros, 2010.*

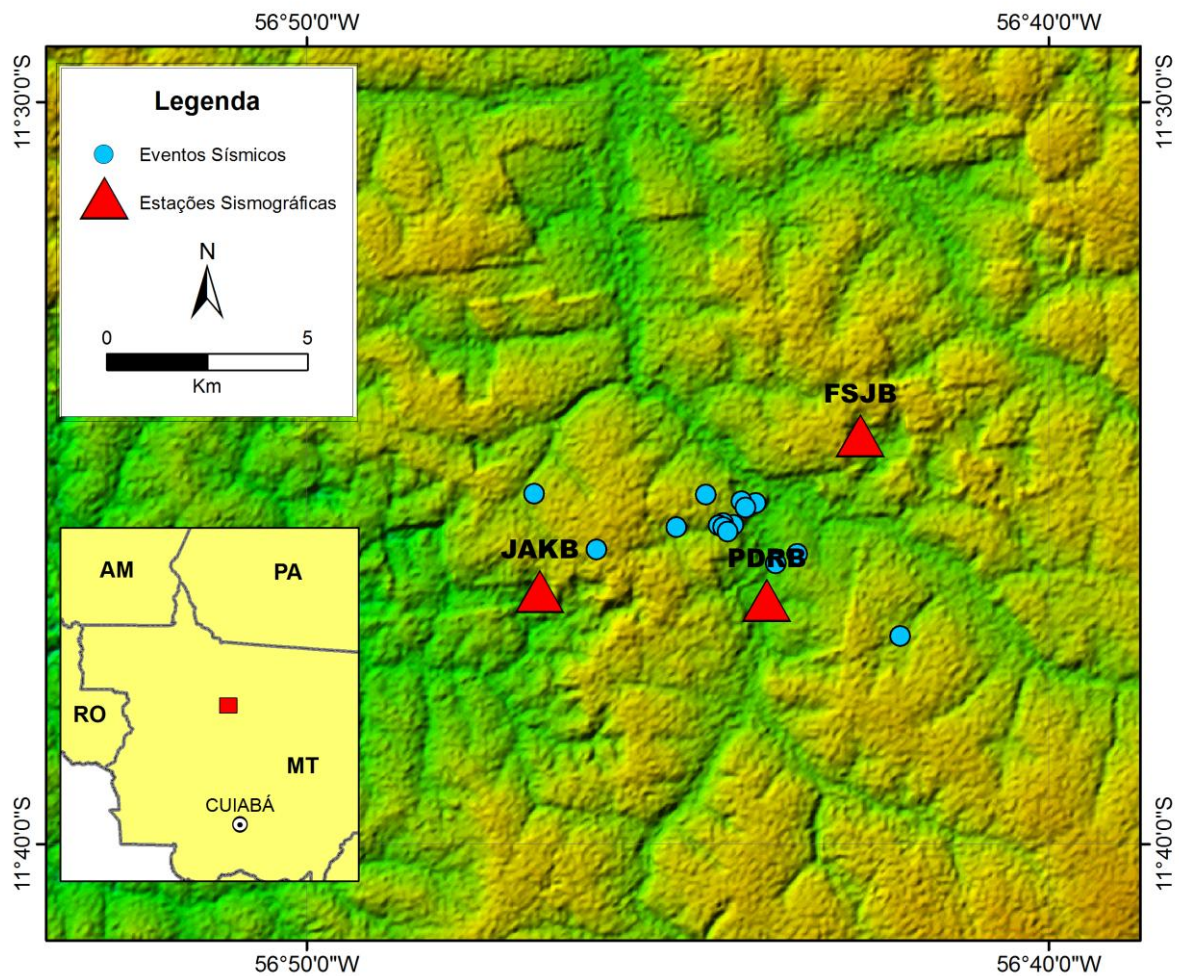


Figura 5: Mapa com as estações e epicentros dos eventos utilizados nesse trabalho.

Cada estação sismográfica possuía um sismômetro triaxial *Guralp, CMG-40T* (30s – 50 Hz) e o registrador tipo *Quanterra*, modelo 4120, com a frequência de amostragem de 20 amostras por segundo (gravação contínua) e 100 amostras por segundo (gravação por *trigger*). Em abril de 2008, os dados passaram a ser gravados a 100 amostras por segundo e o registrador *Quanterra* foi substituído por um registrador do tipo *DM-24*, da *Guralp* (Barros, 2010).

## **Análise da Onda de Cisalhamento**

A divisão da onda cisalhante em sismogramas, em geral, não é de fácil visualização. A chegada da onda S sofre efeitos de atenuação, espalhamento e de estruturas de velocidade próximas à superfície. Somado a isso, ainda pode sofrer interferências e conversões na superfície e levar a uma interpretação errada na conversão S-P, confundindo com o primeiro par de ondas cisalhantes divididas, especialmente valores inferiores ao ângulo crítico  $i_c = \sin^{-1}(V_S/V_P)$ , que no caso dos eventos de Porto dos Gaúchos  $i_c = 23,6^\circ$  (Nutti, 1961; Evans, 1984).

Para fazer a análise da divisão da onda de cisalhamento de um evento, como o apresentado na Figura 6, as componentes horizontais foram rotacionadas para as direções radial e transversal, ortogonais entre si, respeitando o ângulo de incidência da onda. Na Figura 7 temos um exemplo, referente à estação FSJB, em que o azimute é de  $55,98^\circ$ . O azimute é uma medida angular que define a direção de propagação do raio, a partir da fonte até a estação. Na Figura 8 é apresentado o movimento de partícula das componentes no sistema de coordenadas radial e transversal, de onde foi tirada o ângulo de polarização. As componentes horizontais são rotacionadas novamente, de acordo com a direção da polarização da primeira onda S e na sua direção normal.

A direção de polarização da onda eletromagnética é a direção do vetor campo magnético, ao qual a maioria dos detectores de radiação eletromagnética é sensível. Uma luz não polarizada ao passar por uma placa polarizadora se transforma em luz polarizada. No plano da placa existe uma direção característica que é a direção de polarização. Apenas as componentes vetoriais paralelas à direção de polarização da placa são transmitidas.

Com o novo conjunto de coordenadas é possível observar, no primeiro sismograma, a primeira onda cisalhante dividida, e no segundo sismograma, a segunda onda cisalhante dividida, como mostra a Figura 9.

Os eventos são mostrados junto com o diagrama de polarização para facilitar a detecção das ondas cisalhantes rápida e lenta, que foram detectadas manualmente nos sismogramas. A direção de polarização da primeira onda dividida que chega no plano horizontal é a onda cisalhante dividida “rápida”, e pode ser

observada no diagrama de polarização das componentes horizontais (que contém a maior parte da energia da onda cisalhante), mostrado na Figura 10. De acordo com do Nascimento *et al.*, 2004, para ondas de cisalhamento com incidência quase vertical, o diagrama com o movimento de partículas feito imediatamente após o início da onda de cisalhamento rápida dividida é geralmente suficientemente linear para que o sentido de polarização possa ser identificado. Geralmente, a chegada da segunda onda S dividida é caracterizada por uma mudança abrupta no movimento de partículas.

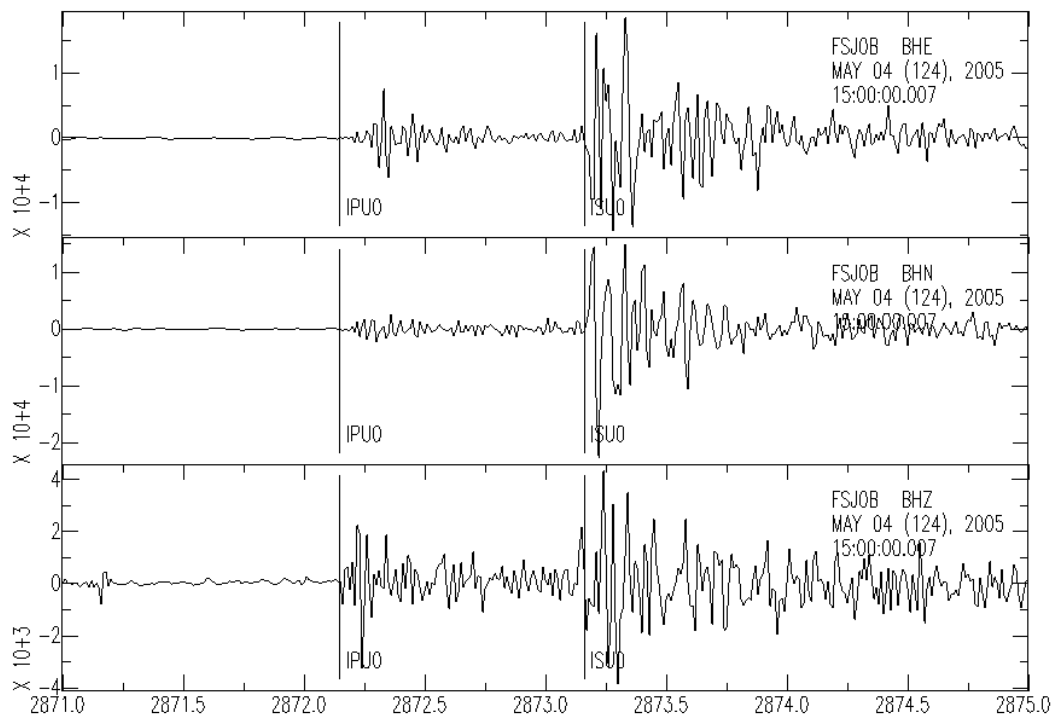


Figura 6: Componentes Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical do Evento de 25 de Abril de 2005, com magnitude 0,1 $m_D$ .

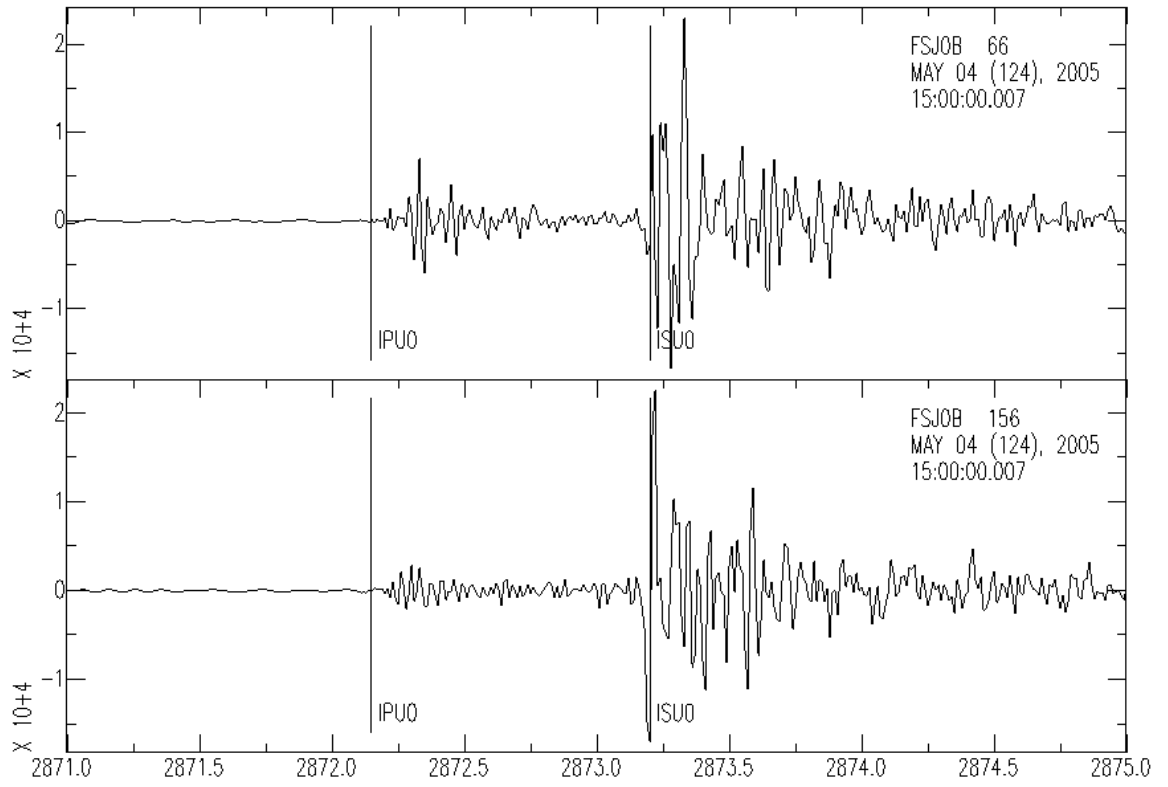


Figura 7: As duas componente horizontais rotacionadas para a direção radial e transversal (de acordo com o azimute)

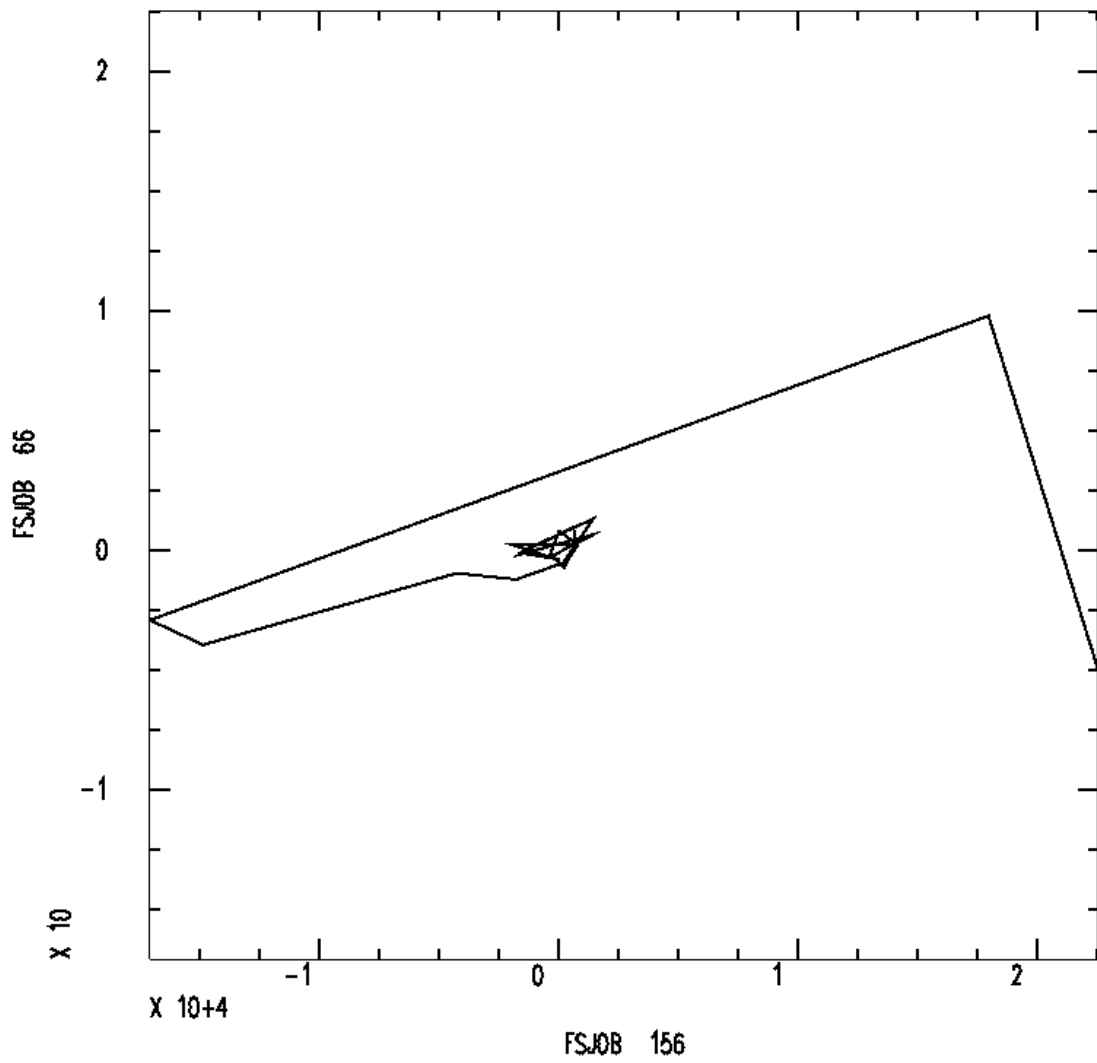


Figura 8: Movimento de Partícula da onda no novo sistema de coordenadas radial e transversal.

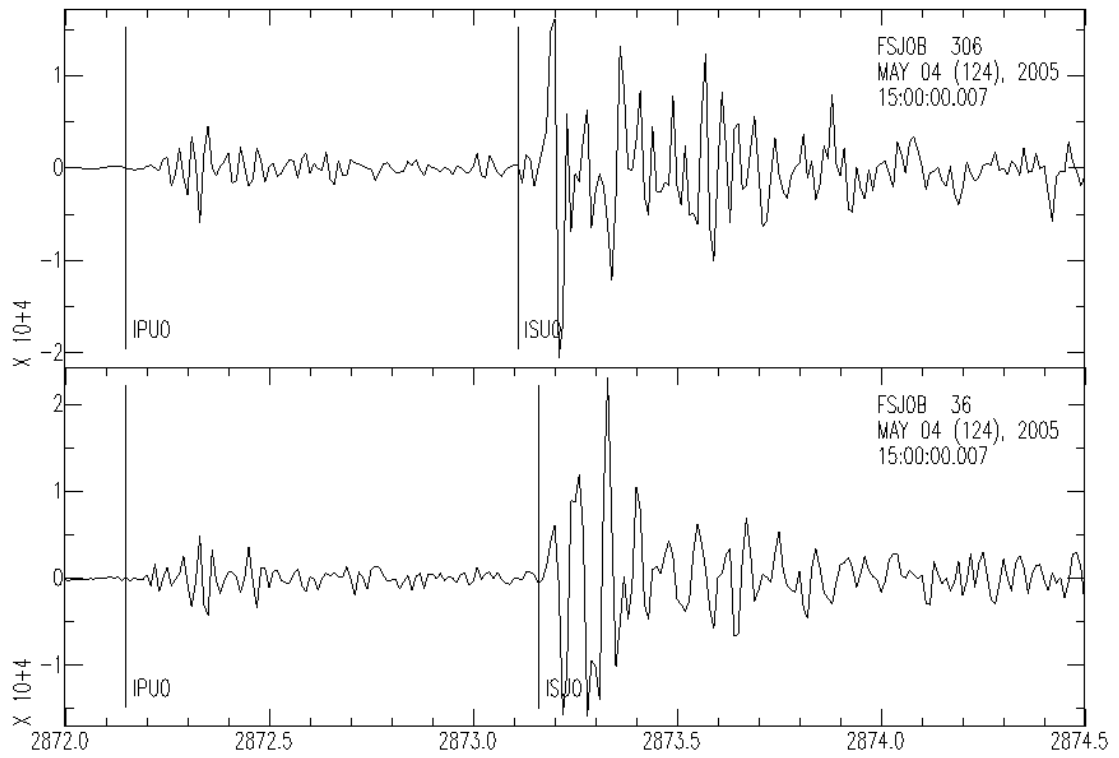


Figura 9: Componentes horizontais rotacionadas para a direção de polarização das ondas S rápida e lenta. As marcas ISU0 denota a chegada das ondas S rápida e S lenta, respectivamente.

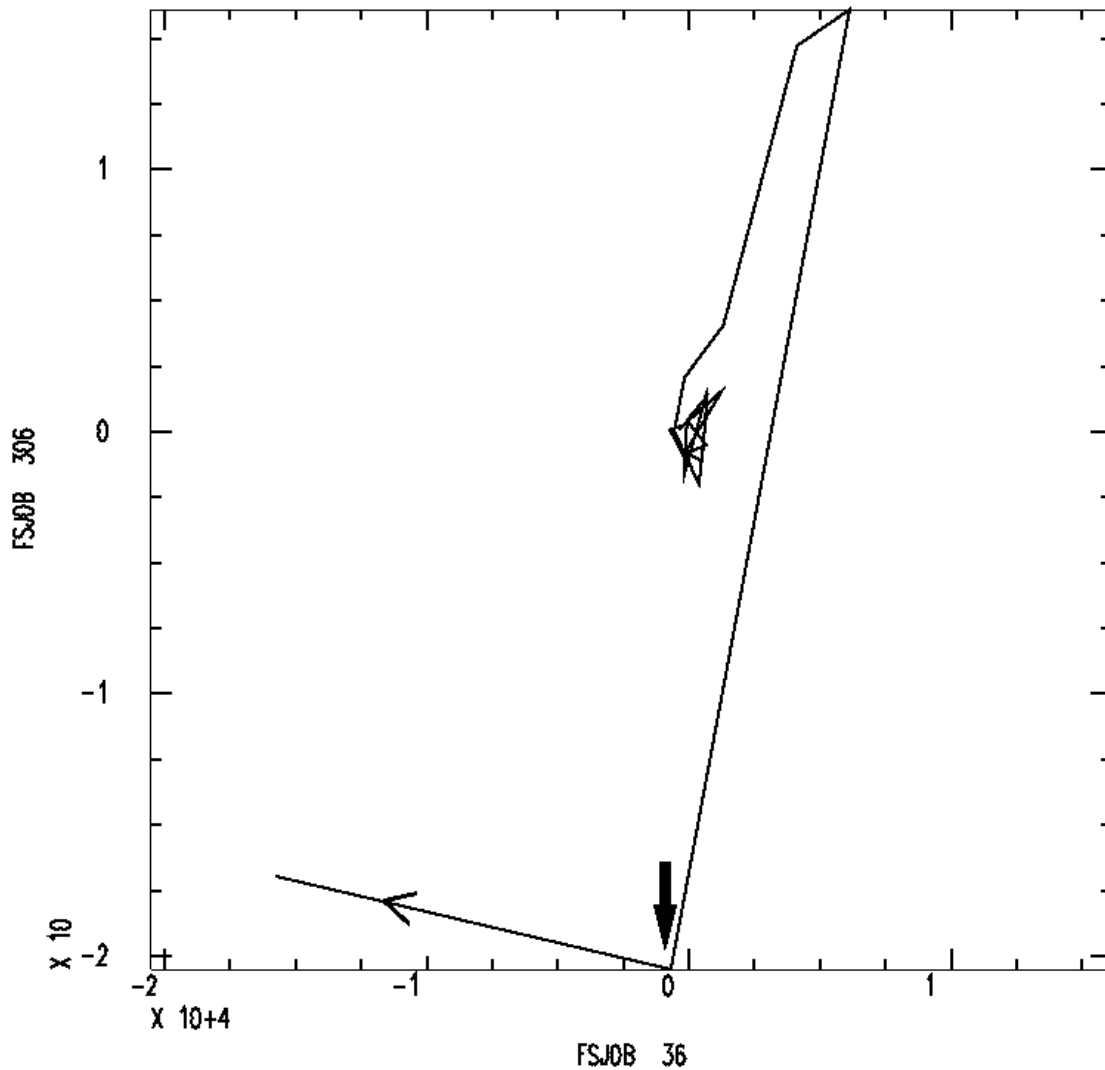


Figura 10: Diagrama mostrando a direção do movimento de partículas (seta fina) e a segunda onda S dividida (seta grossa)

Para se fazer uma análise estatística da distribuição da polarização da onda  $S_{\text{rápida}}$  dividida é necessário determinar algumas medidas estatísticas. Uma maneira simples de análise desses dados é realizar uma distribuição não paramétrica, devido à quantidade dos dados. Uma distribuição não paramétrica é uma análise estatística utilizada quando existe uma amostragem pequena e/ou não se possui uma distribuição normal dos dados.

Nesta análise foram calculadas as medidas de intervalo (range), mediana e



distância interquartil (do Nascimento *et al.*, 2004). O intervalo é a variação entre o maior e o menor valor apresentado, representando a variação dos dados de acordo com a mediana. A mediana é o meio da distribuição: metade dos valores está acima da mediana e metade está abaixo. A distância interquartil é a medida do espalhamento, ou seja, o intervalo, medido a partir da mediana, que atinge 50% dos dados, onde 25% dos valores estão acima da mediana e 25% estão abaixo.

A mediana, o intervalo e a distância interquartil da distribuição da polarização da onda S dividida mais rápida, para todas as estações, é 322,25°, 152° e 67° respectivamente. Esse resultado mostra que a polarização da onda cisalhante rápida é dispersa, entretanto mostra também que metade dos dados está em direção NW-SE. Somente a estação JAKB mostra três orientações superiores a 110°, sendo responsável pelo grande valor do alcance da distribuição de polarização da onda cisalhante rápida. Para as estações JAKB e FSJB (> 5 medidas) não encontramos nenhuma correlação entre a direção de polarização e o *backazimuth* do raio ou do seu ângulo emergente. Essa não correlação é um fator que favorece a conclusão de que as observações são realmente divisões da onda cisalhante.

O tempo de atraso é mais difícil de ser detectado que a polarização por causa da chegada da segunda onda S, que é mais complicada de se observar e depende diretamente da qualidade dos sismogramas gravados, bem como da inspeção visual de cada sismograma para tentar encontrar o tempo de atraso da segunda onda S dividida. A variação do tempo de atraso nas três estações foi de 0,01 a 0,03s, onde a mediana e a distância interquartil foram de 0,01s e 0,01s. Esse pequeno valor de distância interquartil é devido aos sismogramas serem registrados em 100 amostras por segundo, e de não termos uma boa resolução para os valores de tempo de atrasos.

Não foi possível estabelecer uma relação clara entre o tempo de atraso e o azimute do evento à estação. Além disso, a polarização da onda  $S_{rápida}$  dividida não depende da medida do tempo de atraso. Suportada pela interpretação de do Nascimento *et al.*, 2004, em termos da divisão da onda de cisalhamento, pode-se sugerir a ausência de fatores complicantes, como múltiplas camadas anisotrópicas, devido à não correlação entre esses parâmetros. Também não foi possível observar o aumento do tempo de atraso com a distância do caminho percorrido pela onda.

Podemos, assim, concluir que a anisotropia é próxima à superfície, na região acima dos eventos sísmicos mais rasos.

## Resultados

A Figura 11 mostra as orientações das medidas da polarização da onda cisalhante rápida dividida para as estações JAKB, PDRB e FSJB. Na maioria dos casos, a divisão da onda cisalhante foi facilmente identificada.

Crampin & Lovell, 1991 afirmam que a anisotropia de dilatação extensiva (EDA), caracterizada por fraturas preenchidas com líquidos e poros alinhados paralelamente ao campo de esforço, é mais comumente observada em regiões tectonicamente ativas. Porém, Barros *et al.*, 2011 mostram que o esforço máximo horizontal na região de Porto dos Gaúchos possui a orientação E-W, o que torna a teoria da EDA inconsistente com a orientação encontrada nas estações. Do Nascimento *et al.*, (2002, 2004) mostram que outra possível causa da anisotropia crustal, a foliação pré-cambriana, ocorre quando a polarização da onda  $S_{rápida}$  é paralela ao lineamento topográfico.

Na teoria EDA, os poros e microfraturas saturados por fluidos são expostos a um gradiente de pressão, onde os poros alinhados perpendicularmente à direção do esforço horizontal máximo ( $S_H$ ) são cada vez mais comprimidos, forçando o escoamento de fluido para os poros paralelos à  $S_H$ . Este processo continua até atingir uma configuração geométrica tridimensional, onde em média há muito mais poros alinhados paralelamente à  $S_H$  do que perpendicularmente. Este alinhamento gera um sistema geométrico hexagonal, ou isotropia azimutal, em que as velocidades das ondas sísmicas dependem tanto da direção de propagação, quanto da direção de polarização.

A interpretação da anisotropia em termos do lineamento pré-cambriano é suportada por modelos de efeito em toda a crosta, na medida da divisão da onda SKS em telessismos (Barruol and Mainprice, 1993), que mostram uma forte relação entre a orientação da foliação das rochas na crosta e o tempo de atraso observado. Esses autores observaram que o tempo de atraso máximo é observado quando a onda se propaga paralelamente à orientação do plano de foliação e quando a polarização da onda  $S_{rápida}$  também é paralela ao lineamento, ou seja, a divisão é

menor quando a onda se propaga na direção normal ao lineamento.

De acordo com do Nascimento *et al.*, 2002, é muito difícil estabelecer uma correlação entre a orientação geométrica da foliação e o tempo de atraso, pois seria necessário correlacionar também a direção do raio de entrada relativa à foliação, para poder observar qualquer relação. Entretanto, a correlação entre esses dois fatores, com o conjunto de dados utilizados, não foi feita devido a pouca quantidade de informações. Além disso, é sabido que as ondas de cisalhamento podem sofrer interferências e conversões de uma superfície livre e pode conduzir a uma interpretação incorreta da conversão da onda S para onda P, como sendo o primeiro par de ondas de cisalhamento divididas, especialmente acima do ângulo crítico,  $i_c = \sin^{-1}(V_s/V_p)$  (Nutti, 1961 e Evans, 1984).

Os diagramas de roseta da polarização das ondas de cisalhamento rápidas (Figura 11) mostram em todas as estações que prevalece a direção de polarização NNW-SSW. Entretanto, é possível observar um espalhamento na direção NE no diagrama da estação JAKB e que esse espalhamento pode ser resultante de uma estrutura complexa próxima ao receptor (por exemplo, uma estrutura bem próxima à superfície orientada em uma direção específica, como uma falha ou uma fratura) que não pode ser facilmente modelada (Zhang and Schwartz, 1994).

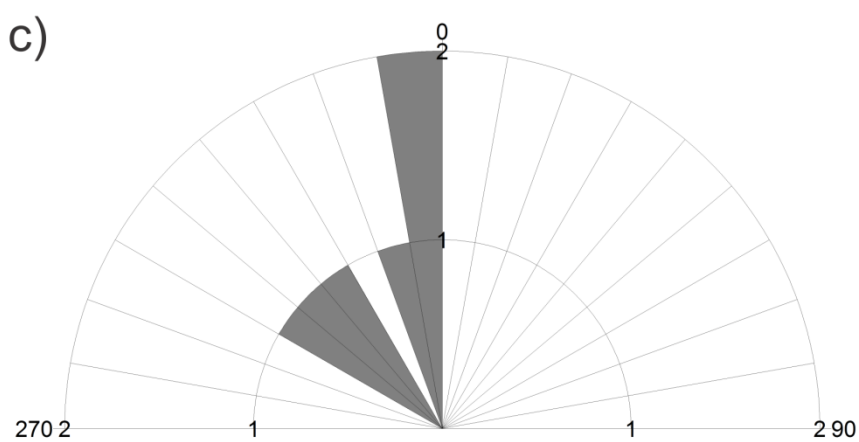
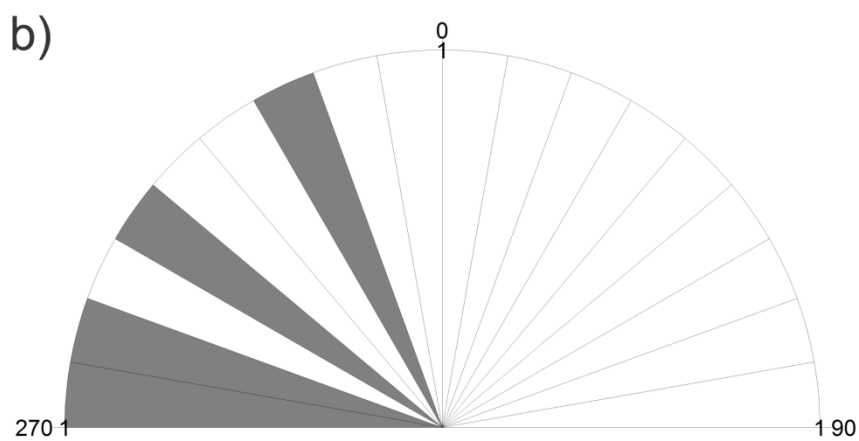
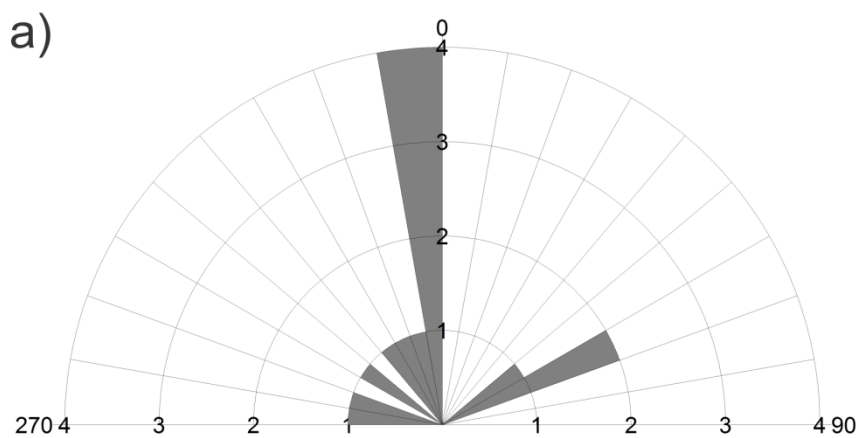


Figura 11: Diagrama de roseta com a polarização da onda S dividida das estações (a) JAKB, (b) PDRB e (c) FSJB. Nas rosetas é apresentada a quantidade de dados analisados.

Após a análise completa dos dados é possível determinar os parâmetros da divisão de onda de cisalhamento, como mostrado na Tabela 3. Esses parâmetros são a Polarização Mediana, que indica a direção média da polarização de cada estação. O tempo de atraso máximo e mínimo mostra a existência da anisotropia sísmica no local, com atraso no intervalo indicado. A distância interquartil representa um espalhamento dos dados, como já descrito anteriormente. Não foi feita a análise estatística da estação PDRB devido à baixa quantidade de observações (menor que cinco), o que poderia gerar um erro muito acentuado. As medidas da polarização mediana de cada dado, da estação PDRB, estão mostradas entre parênteses na tabela.

**Tabela 3:** Resumo Estatístico da Divisão de Onda de Cisalhamento.

<b>Estação</b>	<b>Polarização Mediana*</b> °	<b>Tempo de atraso máx/mín</b> s	<b>Distância Interquartil</b> °	<b>Número de Observações</b>
JAKB	348,96	0,03/0,01	52	13
FSJB	333,65	0,02/0,01	37,9	6
PDRB	(306,60, 289,14, 333,14, 272,14)	0,02/0,01		4

Um modelo de velocidade 1D da região foi realizado por Barros e Caixeta (2003), determinando  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  (Velocidades da onda P no sedimento e no embasamento, respectivamente) e K (razão  $V_p/V_s$ ). Os parâmetros do modelo ( $\alpha_1$ , K e  $\alpha_2$ ) foram variados por tentativa e erro de modo que os tempos de percurso dos dois tiros fossem o mais consistente possível e a dispersão nos tempos de trânsito fosse reduzido. O melhor modelo foi encontrado para ser: H = 0,3Km,  $\alpha_1 = 3,0$  Km/s,  $\alpha_2 = 6,1$  Km/s, K = 2,5. Com essas informações é possível determinas as velocidades da onda S no sedimento e no embasamento ( $\beta_1 = 1,20$  Km/s,  $\beta_2 = 2,44$  Km/s).

Os dados de tempo de atraso obtidos por do Nascimento et al (2004) possui uma variação entre 0,004s e 0,03s, para a Região da barragem de Açú, no nordeste

brasileiro. É possível perceber que apesar da distância entre as regiões, existem valores próximos para o tempo de atraso.

A Figura 12 mostra a comparação entre a direção de polarização das ondas S divididas e a direção do lineamento. É possível perceber que existe uma orientação norte-sul a noroeste – sudeste da polarização da onda S dividida (Figura 12a), porém ainda existe um grande índice de espalhamento nos dados, que pode ter sido causado pela baixa qualidade dos dados e pela dificuldade na detecção da divisão da onda. Na Figura 12b, também é possível ver uma tendência noroeste – sudeste, e como mostrado na tabela 4, a direção mediana é de  $344^\circ$ . Essa direção é suportada por Barros, 2010, o qual mostra que a orientação dos lineamentos possui predominância na direção NW-SE.

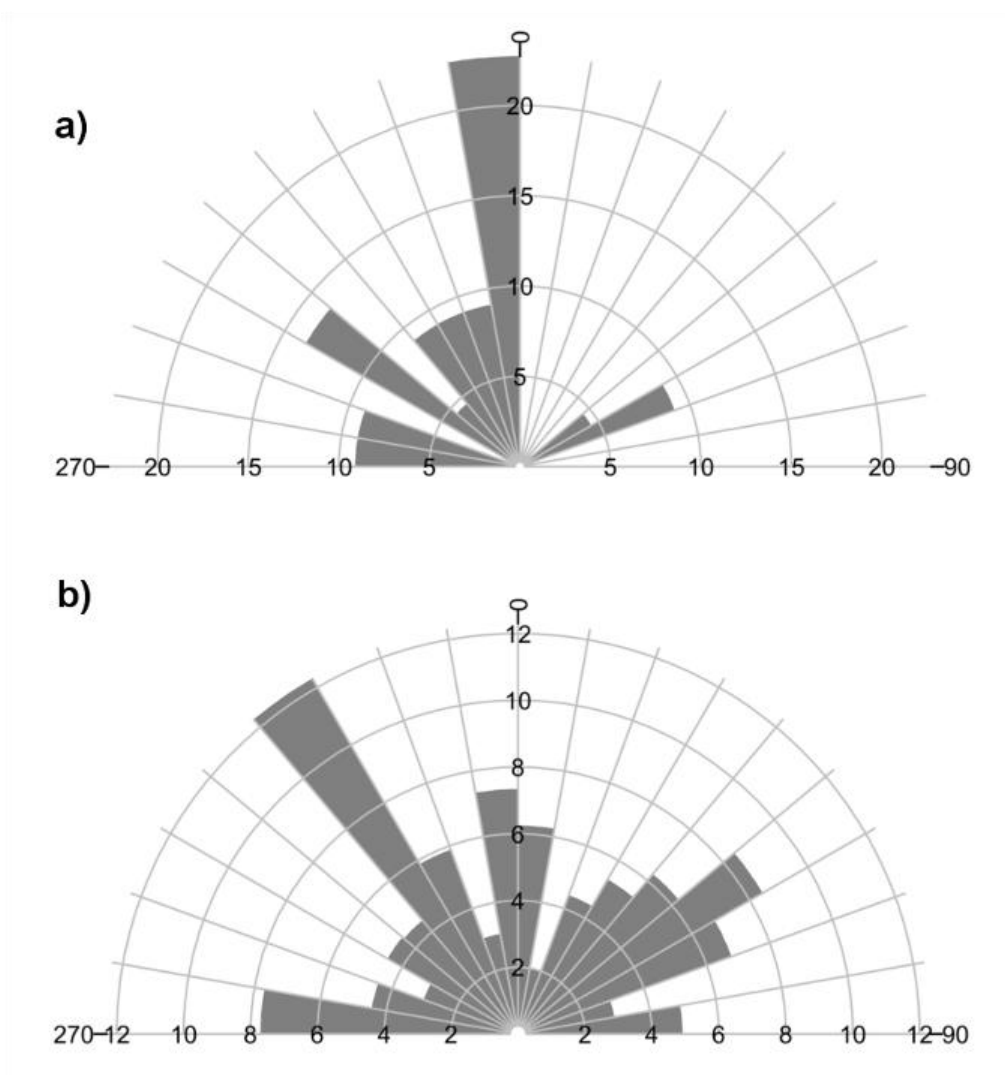


Figura 12: Diagrama de roseta da (a) direção de polarização da onda S dividida considerando as três estações, pras quais o valor mediano é  $322^\circ$  e (b) direção do lineamento na região, obtidos a partir do mapa dos lineamentos geográficos da região, de Barros (2010). A unidade das rosetas é dado em porcentagem (%) do dados.

**Tabela 4:** Resumo Estatístico do Lineamento Topográfico.

Método de Cálculo	Comprimento
População	242
Porcentagem Máxima	12,3%
Porcentagem da Média	5,6%
Desvio Padrão	2,4%
Vetor médio	$344,02^\circ$

## Discussões e Conclusão

A consistência das direções de polarização da onda S dividida observadas nas três estações pode ter sido comprometida devido à qualidade dos dados, difícil detecção e ao excesso de gap nos sismogramas. Porém, ainda é possível perceber que a polarização predominante possui direção noroeste – sudeste nas três estações. Se a anisotropia observada fosse causada pela EDA, podia se esperar uma direção leste-oeste para a polarização da onda  $S_{rápida}$ . Assim, nesse trabalho podemos mostrar que a anisotropia é consistente com a estrutura tectônica (foliação, lineamentos) da região, e não com a anisotropia de fraturas preenchidas de líquidos alinhadas ao esforço (do Nascimento *et al.*, 2002).

Nos trabalhos de do Nascimento *et al.* (2002, 2004) realizado no nordeste brasileiro na região de João Câmara – RN e na área da barragem de Açú – RN, eles concluem que a causa da anisotropia na região é a foliação Pré-cambriana, divergindo do trabalho de Crampin *et al.* (1984), que apresenta uma hipótese baseada em fraturas preenchidos por fluidos alinhados ao esforço máximo compressional, conhecida como anisotropia de dilatância extensiva (EDA). Esse estudo reforça que o controle da anisotropia crustal, na zona sísmica de Porto dos Gaúchos, se deve à estrutura tectônica da região intraplaca, mesmo ocorrendo em uma província distinta da do trabalho de do Nascimento *et al.* (2002; 2004)

Podemos concluir que a hipótese EDA de Crampin *et al.* (1984), como observado por diversos autores (Zhang and Schwartz, 1994; Glendhill, 1991; Brocher and Christensen, 1990; Menke *et al.*, 1994; Bernard *et al.*, 1997) não é capaz de explicar todos os exemplos de anisotropia crustal. E que nessa região, a tensão máxima horizontal possui diferença de cerca  $75^\circ$  em relação às estruturas geológicas, provendo uma diferença considerável entre as duas hipóteses (foliação Pré-cambriana e EDA).



## Conclusões

Aqui são discutidos os resultados obtidos no estudo da anisotropia crustal na Região de Porto dos Gaúchos, além da relação entre a direção de polarização das ondas S divididas e os diferentes mecanismos para se definir a causa desse efeito.

Apesar da medição da polarização das ondas S divididas poder ter sido comprometida devido à qualidade dos dados e a uma baixa razão sinal-ruído, ainda assim foi possível perceber que existe uma tendência da direção de polarização das ondas S divididas ser na direção noroeste – sudeste nas três estações analisadas. A anisotropia mais comumente observada em regiões tectonicamente ativas é a de dilatação extensiva (EDA), que é caracterizada por fraturas preenchidas com líquidos e poros alinhados paralelamente ao campo de esforço. Portanto, nesses casos, a direção da polarização das ondas S divididas é paralela ao esforço máximo compressional.

De acordo com Barros *et al.*, 2011 a direção do esforço máximo compressional na região de Porto dos Gaúchos é E-W, o que torna a teoria EDA inconsistente com os dados observados nesse estudo, onde foi possível mostrar que a anisotropia é consistente com a estrutura tectônica (foliação, lineamentos) da região, e não com a anisotropia de fraturas preenchidas de fluidos alinhadas ao esforço. Esse resultado é semelhante ao resultado encontrado por Nascimento *et al.* (2002, 2004) nos trabalhos realizados em João Câmara – RN e na barragem de Açú - RN.

Na Figura 13 é apresentado o mapa dos lineamentos na região e a roseta da direção dos lineamentos. Da tabela 3 foram utilizadas as informações para comparar com a polarização das ondas cisalhantes divididas das estações estudadas. É possível perceber que os lineamentos estão orientados preferencialmente na direção NW-SE, o que está de acordo com as informações obtidas por Barros, 2010.

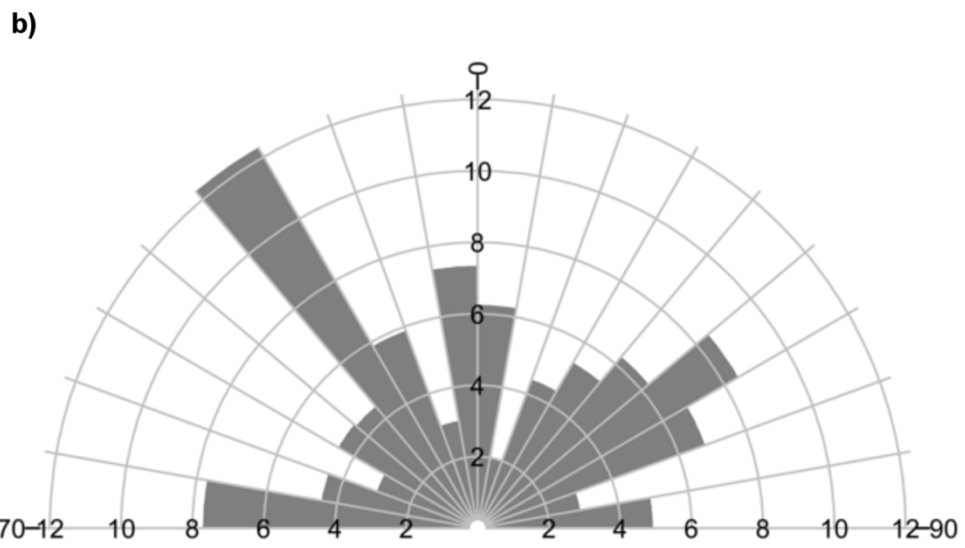
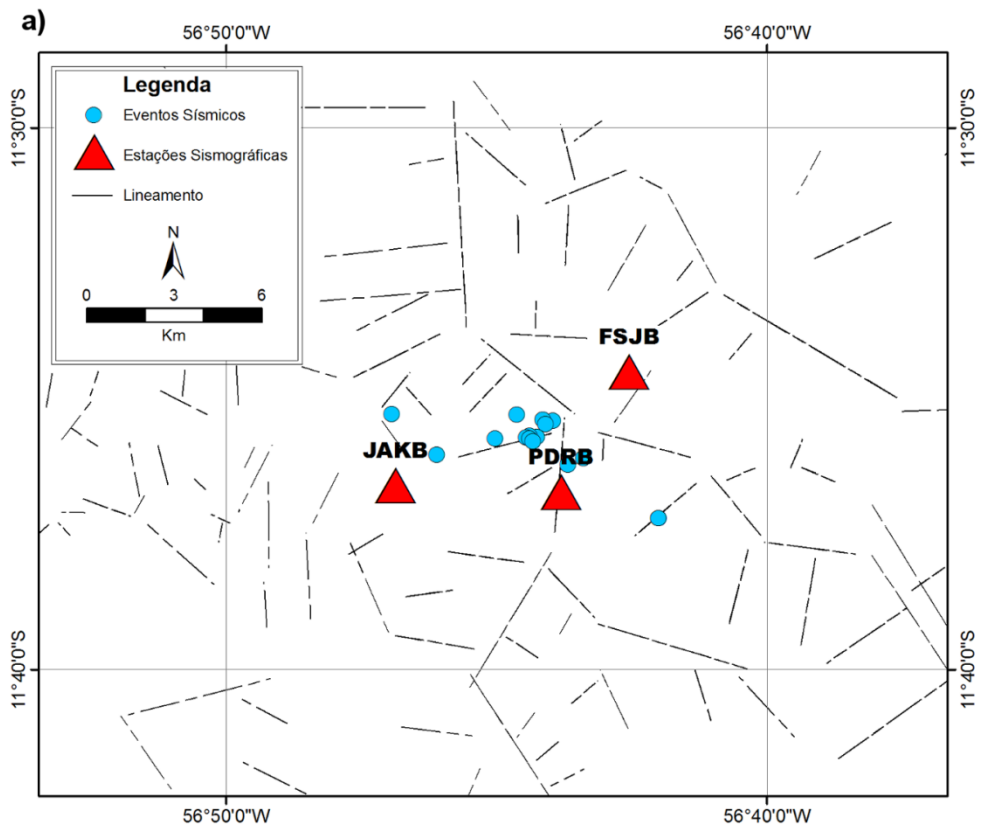


Figura 13: (a) Mapa com os lineamentos topográficos na área de estudo e (b) diagrama de roseta dos lineamentos, onde a unidade é a porcentagem dos lineamentos.

Considerando os objetivos propostos na introdução desse trabalho, foi possível detectar a anisotropia crustal, na região de Porto dos Gaúchos - MT, através da divisão da onda de cisalhamento e da mensuração dos tempos de atraso da onda  $S_{lenta}$  em relação à onda  $S_{rápida}$ .

Através das hipóteses propostas por do Nascimento et al. (2002, 2004) e por Crampin et al. (1984) e comparando estas com os dados obtidos nesse trabalho, é possível inferir que a possível causa para a anisotropia crustal na região seja a foliação pré-cambriana, pois a direção mediana de polarização das ondas  $S_{rápida}$  nas estações tem direção preferencial semelhante à direção preferencial dos lineamentos na região.

Após comprovar a existência da anisotropia e sua possível causa, é possível atribuir tal resultado à sismologia local, podendo definir, então, uma possível causa para a sismicidade da região, que provém da formação geológica local, e não da presença de fluidos no interior das rochas.

## Referências Bibliográficas

Bahia, RBC, MA. Martins-Neto, , MSC. Barbosa, AJ Pedreira. *Análise da evolução tectonossedimentar da Bacia dos Parecis através de métodos potenciais*, Rev. Bras. Geociências 37(4), 10 p., 2007

Barros, L. V. *Sismicidade, esforços tectônicos e estrutura crustal da zona sísmica de Porto dos Gaúchos/MT*, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências – IG, Universidade de Brasília, 178 pp, 2010

Barros, L. V., M. Assumpção, R. Quintero, e V. M. Ferreira. *Coda wave attenuation in the Parecis basin, Amazon craton – Brazil: sensitivity to basement depths*, Journal of Seismology. 24 pp. 2011.

Barruol, G. and Mainprice, D. *A quantitative evaluation of the contribution of crustal rocks to the shear wave splitting of teleseismic SKS waves*, Phys. Earth planet, Inter., 78, 20 pp.1993.

Bernard, P., Chouliaras, G., Tzanis, A., Briole, M. B. P., Telis, J., Stavrakakis, G. And Makropoulos, K. *Evidence for shallow and pervasive seismic anisotropy in the Wellington region, New Zealand*, Geophys. Res. Lett., 24, 4 pp. 1997.

Bormann P. *New Manual of Seismological Observatory Practice*. GeoForschungsZentrum Postdam. 2002.

Bowman J. R., Ando M. *Shear wave splitting in the upper mantle wedge above Tonga subduction zone*. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society 88, 25941. 1997.

Braga LFS, LP Siqueira, *Three dimensional grav-ity modelling of the basement topography beneath Parecis Basin, Brazil, constrained by spectral estimates of depth to magnetic sources*. In: CONNEXPO/ARPEL, Latin American Petroleum Congress, 5, Atas, p. 8, 1996

Brocher, T. M., and Christensen, N. I. *Seismic anisotropy due to preferred mineral orientation observed in the shallow crust in southern Alaska*, *Geology*, 18, 4 pp. 1990.

Crampin, S. *An introduction to wave propagation in anisotropic media*, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 76, 12 pp. 1984.

Crampin, S., *Comment on "Local shear wave observations in João Câmara, NE Brazil" by A. F. do Nascimento, R. G. Pearce, e M. K. Takeya*, *J. Geophys. Res.*, 109, B02313, doi:10.1029/2003JB002681, 2004a

Crampin, S. and Chastin, S. *A review of shear wave splitting in the crack-critical crust*. *Geophys. J. Int.*, 155, 20 pp. 2003.

Crampin, S., and Lovell, J. H. *A decade of shear-wave splitting in the earth's crust: What does it mean? What use can we make of it? And what should we do next?*, *Geophys. J. Int.*, 107, 387. 21 pp. 1991.

Crampin, S., SV Zatpesin, *Changes of strain before earthquakes: the possibility of routine monitoring of both long-term and short-term precursors*. *Journal of Physics of the Earth*, 45, 1-26. 1997.

Crampin, S., Evans, R. and Atkinson, B. K. *Earthquake prediction: A new physical basis*, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 76, 10 pp. 1984.

Crampin, S., T. Volti, S. Chastin, A. Gudmundsson, R. Stefansson, *Indication of high pore-fluid pressures in a seismically-active fault zone*, Geophys. J. Int., 151, F1-F5, 2002

do Nascimento, A. F., Bezerra, F. H. R. and Takeya, M. K. *Ductile Precambrian fabric control of seismic anisotropy in the Açú dam area, northeastern Brazil*, J. Geophys. Res., 109(B10311), doi: 10.1029/2004JB003120. 10pp. 2004.

do Nascimento, A. F., Pearce, R. G. and Takeya, M. K. *Local shear-wave observations in João Câmara, northeastern Brazil*, J. Geophys. Res., 107(B10), 2232 doi: 10.1029/2001JB000560. 9pp. 2002.

Evans, R. *Effects of the free surface on shear wave trains*, Geophys. J. R. Astron. Soc., 76, 8 pp. 1984.

França G. *Estudo Sísmico do Açude Tucunduba, Senador Sá, Ce.* Dissertação de Mestrado, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 92 pp, 1999.

Glendhill, K. R. *Evidence for shallow and pervasive seismic anisotropy in the Wellington region, New Zealand*, J. Geophys. Res., 96, 14 pp. 1991.

Godfrey TE, SH Kim, M Chavira, DW RuV, RS Warren, JW Gray, RH Jensen, *Quantitative mRNA expression analysis from -Wxed, paraYn-embedded tissues using 5' nuclease quantitative reverse transcription-polymerase chain reaction.* J Mol Diagn 2(2):84–91, 2000

James, D. E. e Assumpção, M. *Tectonic implications of S-wave anisotropy beneath*

*SE Brazil. Geophys.J.Int.*126, 11 pp. 1996

Kern H, *P and S-wave anisotropy and shear wave splitting at pressures and temperature in possible mantle rock and their relation to the rock fabric.* *Phys Earth Planet Int* 78:245–256, 1993

Mendiguren, J. A. and Richter, F. M. *On the origin of compressional intraplate stress in South America,* *Phys. Earth Planet Inter.* v.16, 9 pp. 1978

Menke, W., Brandsdottir, B., Jakobsdottir S., and Stefansson R. *Seismic anisotropy in the crust at the mid-Atlantic plate boundary in the south-west Iceland,* *Geophys. J. Int.*, 119, 8 pp. 1994

Musumeci, C., Patanè, D. Scarfi, L. and Gresta, S. *Stress directions and shear-wave anisotropy: observations from local Earthquakes in Southeastern Sicily, Italy,* *Bull.Seismol. Soc. Am.*, 95, 4, 16 pp, 2005.

Nakayoshi, T. & Marza, V. I. 2005. *Focal mechanism of March 10, 1998 mainshock, Porto dos Gaúchos, MT, Brazil,* 9º Congresso Internacional da SBGf, Salvador/BA, Brazilian Geophysical Society, SBGF389. 4 pp. 2005.

Nakayoshi, T. *Caracterização sísmo-tectônica da área de Porto dos Gaúchos, Mato Grosso, Brasil,* Dissertação de mestrado, Instituto de Geologia – IG, Universidade de Brasília, 86 pp. 2005.

Nutti, O. W. *The effect of the Earth's surface on the S-wave particle motion,* *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 51, 10 pp. 1961

Shearer, P.M. *Introduction to Seismology*. Scripps Institution of Oceanography. University of California, San Diego, Cambridge University Press, 27 pp. 2009

Siegesmund, S., M. Fritzsche, and G. Braun, *Reflectivity caused by texture-induced anisotropy in mylonites*, in *Continental Lithosphere: Deep Seismic Reflections*, R. Meissner et al (Editors), Geodynamics Series 22, American Geophysical Union, 21-29, 1991

Silver P., Chan W. *Shear Wave Splitting and Sub continental Mantle Deformation*, Journal of Geophysical Research, Vol 96, No B10, 16 pp. 1991.

Siqueira, L. P. and Teixeira, L. B. *Bacia dos Parecis: nova fronteira exploratória da Petrobrás*, 3° Congresso Internacional da SBGf, Rio de Janeiro, Brazilian Geophysical Society, 1, 6 pp. 1993.

Takeya, M. K. *High precision studies of an intraplate waerthquake sequence in northeast Brazil*, unpublished Ph.D. Thesis, Univ. Of Edinburgh, Edinburgh. 228 p. 1992.

Talwani, P., *Characteristic Features of Intraplate Earthquakes and the Models Proposed to Explain Them*. In: Gregersen , S., Basham, P.W.(Eds.), *earthquakes at North- Atlantic Passive Margins : Neotectonic and Post-Glacial Rebound*. NATO ASI Ser. C, Mathematic and Physical Sciences, pp: 563-579, 1989

Tapley W. C. & Tull, J. E. 1991. SAC – Seismic Analysis Code. USER MANUAL, Livermore National Laboratory, 413 pp.

Vecsey, L., Plomerova J., Kozlovkaya, E., Babuska, V. *Shear wave splitting as a diagnostic of variable anisotropic structure of the upper mantle beneath central*



*Fennoscandia*, Tectonophysics 438 (1-4), 21 pp. 2007.

Wüstefeld, A., Bokelmann, G., Zaroli, C., Barruol, G. *SplitLab: A shear-wave splitting environment in Matlab*. Computers & Geosciences, No. 34, 14 pp. 2008.

Zatsepin, SV, S. Crampin, *Modelling the compliance of crustal rock: I - response of shear-wave splitting to differential stress*. Geophysical Journal International, 129, 477-494, 1997

Zhang, Z. and Schwartz, S. Y. *Seismic anisotropy in the shallow crust of the Loma Prieta segment of the San Andreas fault system*, J. Geophys. Res., 99, 11 p. 1994.

## ANEXO 1

Propriedades hipocentrais do eventos registrados em 2005. Tabela modificada de Barros (2010).

Data	Origin	Lat S	Long W	Depth	Mag	No	Gap	Dmin	Rms	Erh	Erz
50425	03 57 00.71	11 35.73	56 44.39	0.5	0.1	7	133	2.2	0.03	1.0	1.4
50425	10 23 56.48	11 35.79	56 44.33	0.7	0.1	6	130	4.8	0.01	1.12	1.4
50426	15 48 19.47	11 35.97	56 46.49	0.4	0.5	8	117	1.3	0.08	1.1	1.7
50426	16 57 48.99	11 35.28	56 43.94	0.9	1.0	8	146	2.9	0.02	1.1	8.7
50427	14 57 30.38	11 35.74	56 43.77	2.1	0.6	9	123	1.8	0.02	1.0	2.7
50429	0143 00.27	11 35.70	56 44.25	1.9	0.3	9	132	2.1	0.04	0.9	3.3
50429	11 35 32.41	11 35.28	56 44.18	0.6	0.4	8	149	3.3	0.02	0.9	1.2
50429	11 35 43.44	11 35.22	56 44.10	1.6	0.6	8	151	3.1	0.02	1.1	4.0
50429	13 10 02.01	11 35.38	56 44.14	0.2	1.8	10	144	2.6	0.05	0.8	1.1
50429	14 03 22.33	11 35.36	56 44.18	0.4	0.4	9	145	2.6	0.05	0.8	1.3
50429	14 06 30.12	11 35.47	56 44.09	0.2	0.1	7	170	2.4	0.04	1.0	1.5
50429	14 17 41.18	11 35.29	56 44.62	0.3	1.1	10	153	3.1	0.04	0.8	1.1
50430	20 52 04.69	11 36.23	56 46.42	0.2	0.6	8	129	1.0	0.02	1.7	1.4
50430	23 04 37.24	11 36.07	56 44.09	3.1	1.7	8	116	4.0	0.03	1.0	2.9
50501	04 45 01.42	11 36.76	56 47.07	1.6	0.7	7	226	0.5	0.03	1.8	1.4

Data	Origin	Lat S	Long W	Depth	Mag	No	Gap	Dmin	Rms	Erh	Erz
50501	10 08 48.84	11 35.68	56 44.39	0.7	0.7	8	135	4.0	0.02	0.91	5.3
50501	17 19 07.56	11 36.58	56 46.21	1.3	0.2	7	175	1.2	0.03	1.8	2.8
50502	05 44 49.38	11 36.30	56 46.41	1.1	1.2	7	137	1.0	0.03	1.9	5.1
50502	10 10 31.05	11 36.10	56 43.66	3.2	0.4	8	127	3.6	0.03	1.1	2.8
50503	11 54 21.56	11 35.61	56 44.41	0.4	1.8	8	171	2.4	0.03	0.9	1.3
50503	11 58 36.75	11 36.27	56 43.57	2.4	0.3	8	133	0.9	0.03	1.0	1.4
50504	15 47 50.83	11 36.03	56 46.10	0.0	1.1	8	121	1.7	0.01	1.0	1.0
50507	01 33 49.92	11 36.22	56 43.68	1.3	0.3	8	130	1.0	0.03	0.9	1.4
50507	10 04 32.32	11 35.22	56 43.73	0.3	1.3	8	172	2.6	0.04	1.0	1.3
50507	10 14 21.53	11 35.28	56 43.77	0.3	1.7	8	171	2.7	0.04	1.0	1.3
50507	12 50 56.60	11 35.38	56 43.43	0.2	1.3	8	155	2.6	0.03	1.0	1.3
50507	14 03 26.37	11 35.20	56 43.77	0.3	2.2	8	175	2.6	0.04	1.0	1.3
50507	21 50 57.83	11 36.24	56 46.47	0.1	2.9	10	107	1.0	0.03	1.1	1.0
50507	23 33 34.68	11 35.71	56 44.45	1.1	0.2	9	134	2.2	0.05	0.9	5.7
50508	03 19 59.09	11 36.25	56 46.56	0.4	1.5	8	206	0.8	0.04	1.9	7.6
50508	03 20 34.82	11 36.27	56 46.56	0.7	0.5	7	205	0.8	0.02	2.0	3.6
50508	07 25 21.18	11 36.09	56 43.39	1.2	1.8	8	139	1.4	0.02	0.9	1.8

<b>Data</b>	<b>Origin</b>	<b>Lat S</b>	<b>Long W</b>	<b>Depth</b>	<b>Mag</b>	<b>No</b>	<b>Gap</b>	<b>Dmin</b>	<b>Rms</b>	<b>Erh</b>	<b>Erz</b>
50509	06 54 30.85	11 36.31	56 46.45	0.2	0.4	8	190	0.9	0.03	5.1	4.7
50509	11 09 16.50	11 35.62	56 44.00	0.2	0.6	6	161	2.1	0.02	1.1	1.7
50509	14 14 27.22	11 36.47	56 46.52	1.0	1.1	7	153	0.7	0.03	1.9	2.6
50509	19 17 52.50	11 36.25	56 46.43	0.1	1.1	9	107	1.0	0.03	1.1	1.0
50509	19 46 18.59	11 36.24	56 46.45	0.2	1.4	10	107	1.0	0.02	1.1	0.9
50509	19 46 51.07	11 36.36	56 46.50	0.8	1.1	9	110	0.8	0.03	1.2	2.2
50510	14 48 26.18	11 36.37	56 46.54	0.2	0.4	6	137	0.7	0.02	3.0	2.0
50510	15 27 27.84	11 35.55	56 43.76	0.3	1.6	9	130	2.2	0.03	0.8	1.2
50512	01 03 43.10	11 35.41	56 43.95	0.3	1.4	8	170	2.5	0.04	1.0	1.3
50512	15 34 51.90	11 35.78	56 45.04	0.3	1.7	10	135	2.9	0.03	0.8	1.1
50521	22 14 44.38	11 36.05	56 43.55	1.1	1.4	8	133	1.3	0.02	0.9	1.8
50521	23 59 03.68	11 35.73	56 45.02	0.7	1.1	7	179	2.9	0.01	1.2	13.1

## ANEXO 2

Aqui são apresentadas as imagens das análises de cada evento com resultado positivo para a anisotropia em 2005. A sequência de imagens de cada evento é apresentado na seguinte sequência: a) Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical, b) Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal, c) Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, d) Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento e e) Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização.

### Estação JAKB:

- Evento de 25/04/2005 na hora 03:57: 00,71

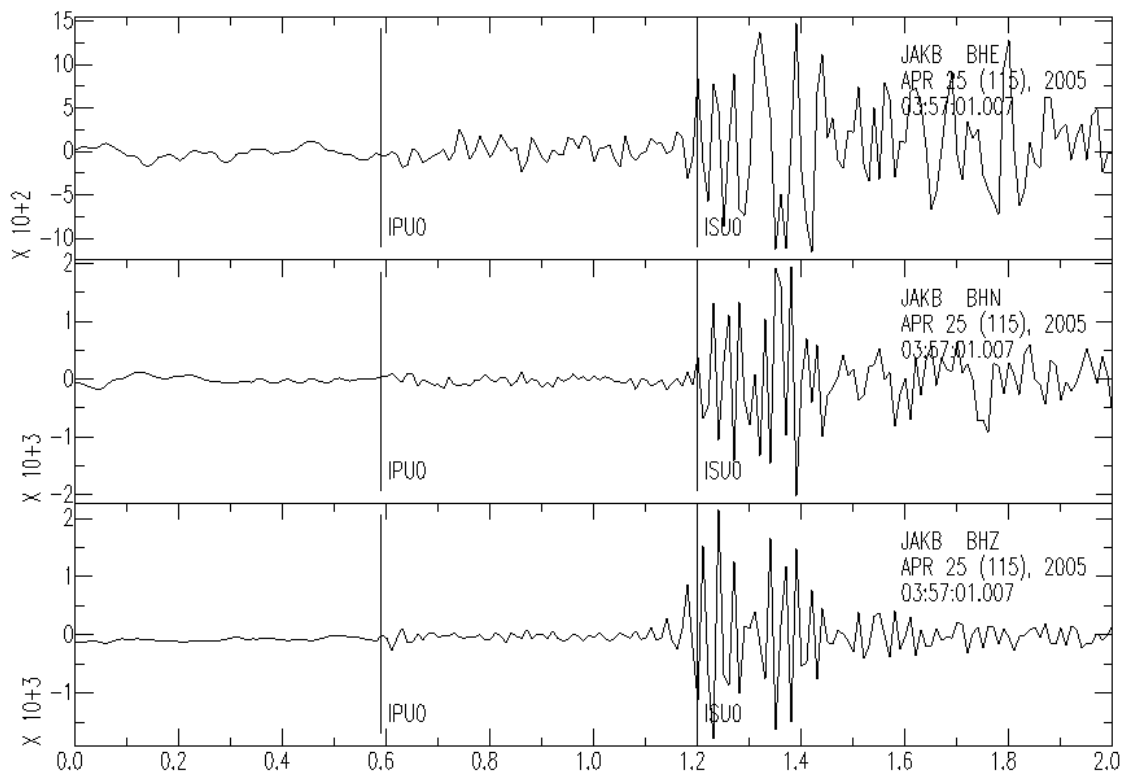


Imagem 1: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

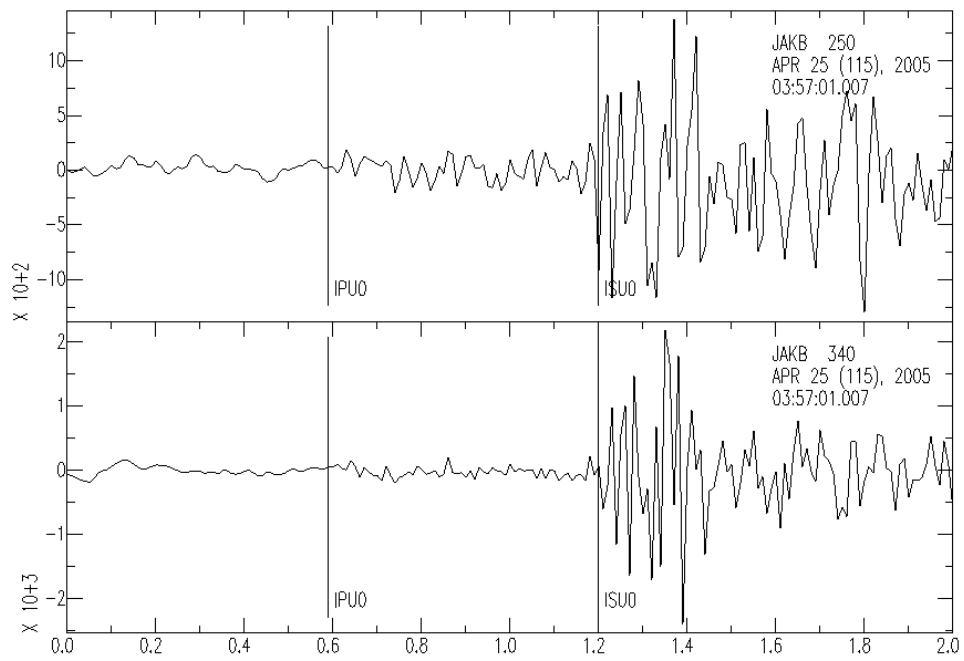


Imagem 2: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

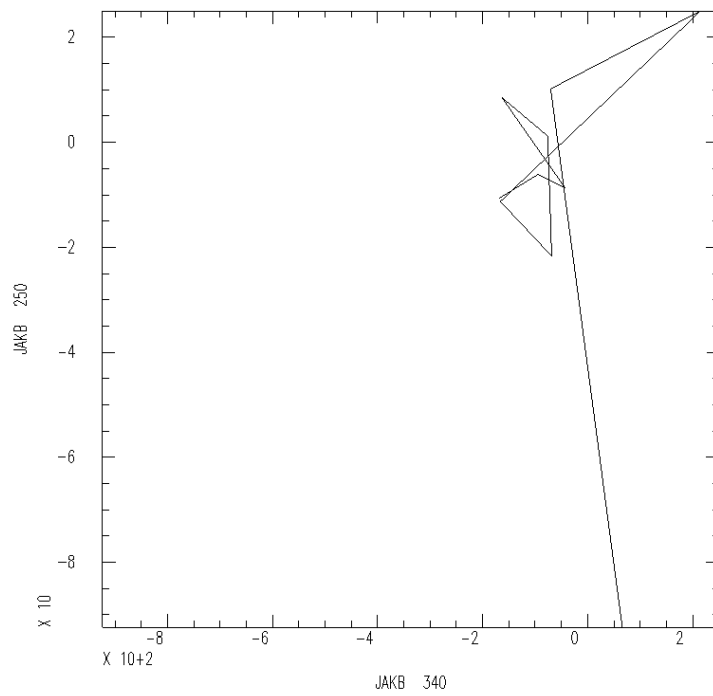


Imagem 3: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 268°.

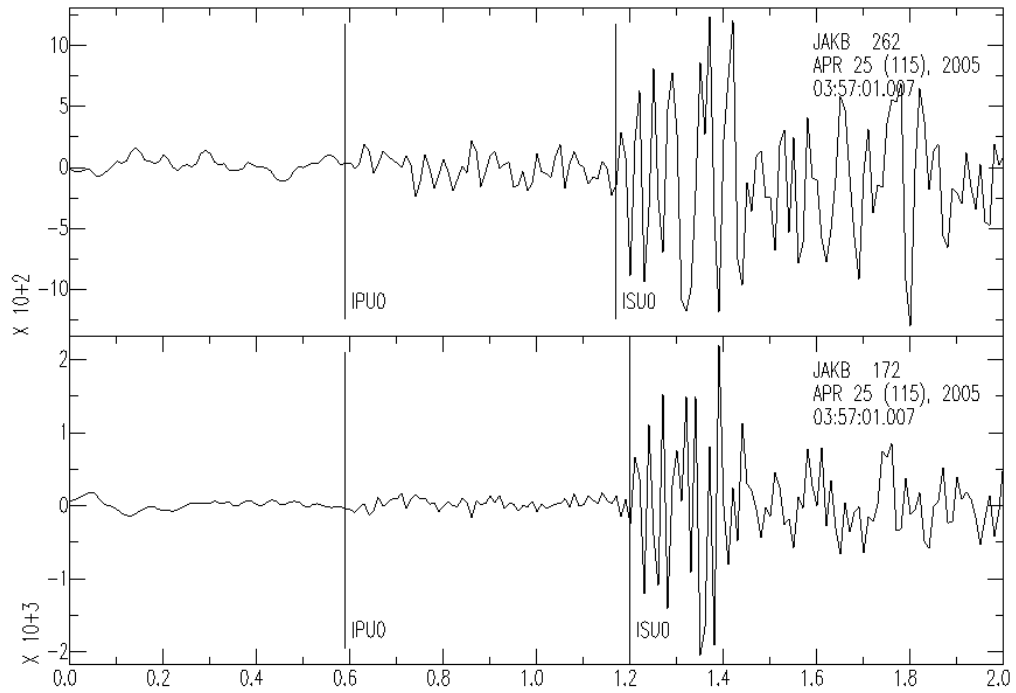


Imagem 4: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,03s.

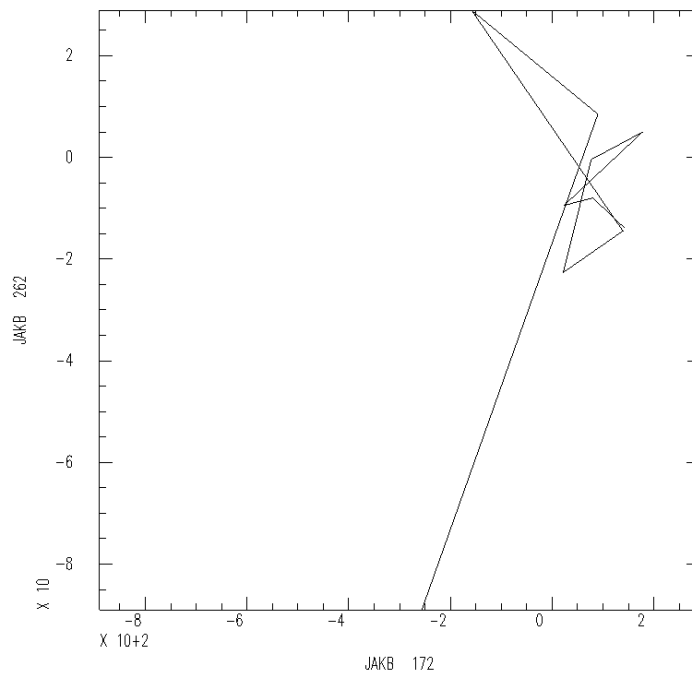


Imagem 5: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 25/04/2004 na hora 10:23:56,48

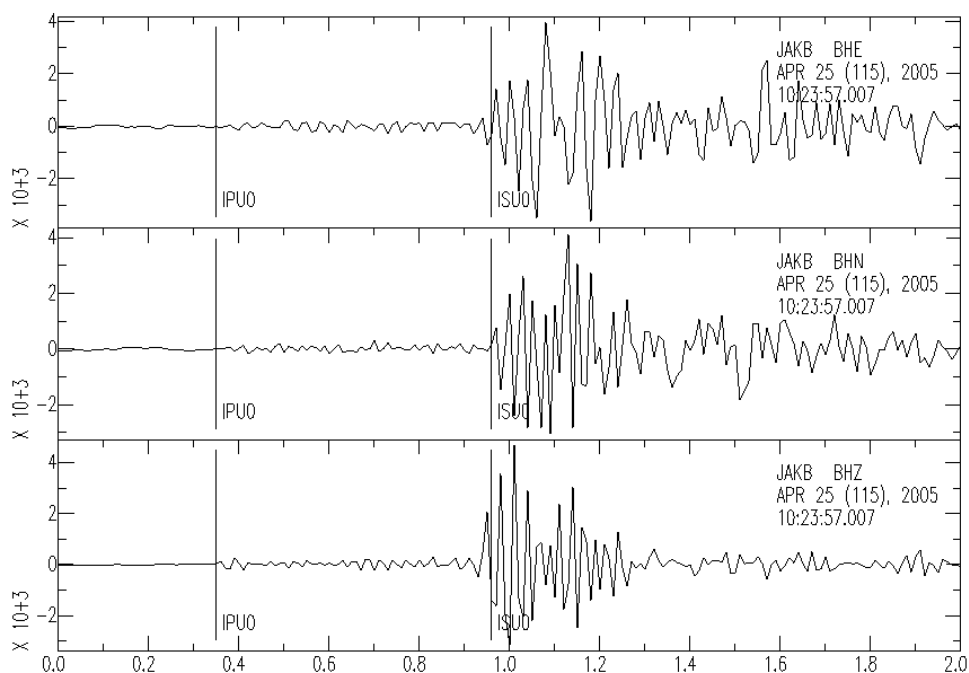


Imagem 6: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

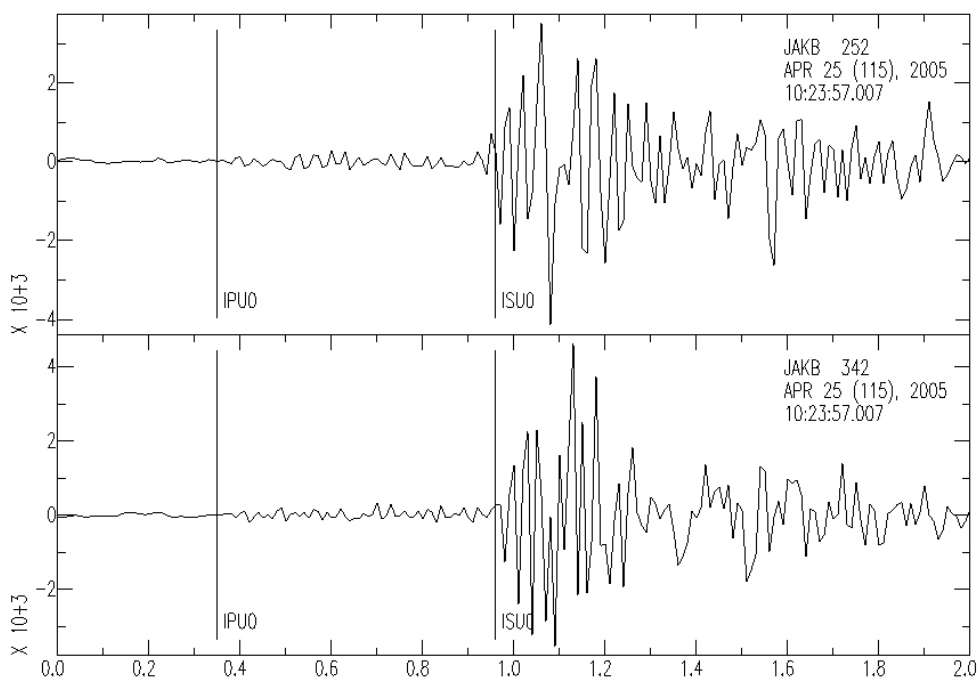


Imagem 7: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal



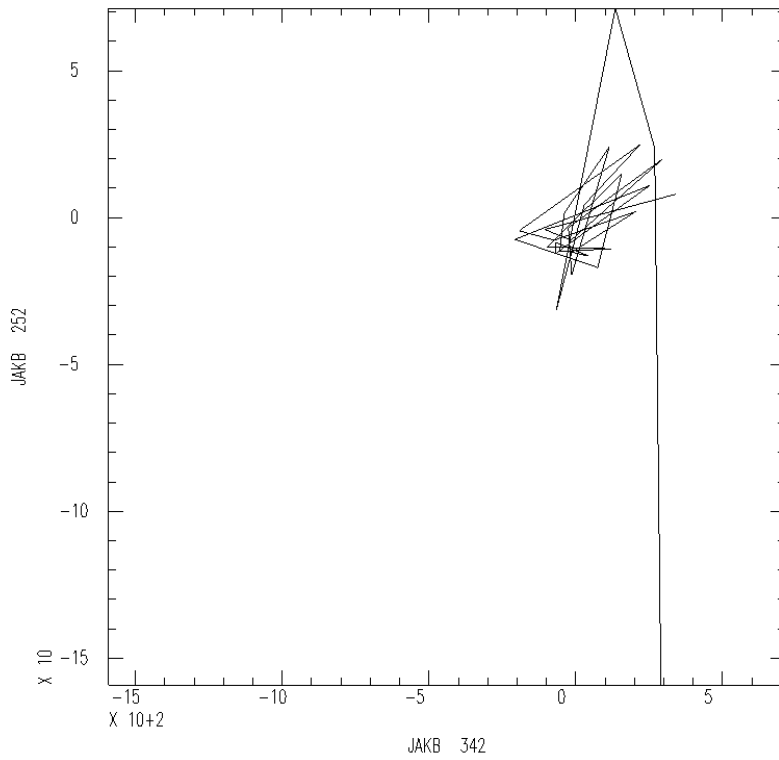


Imagem 8: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 177°.

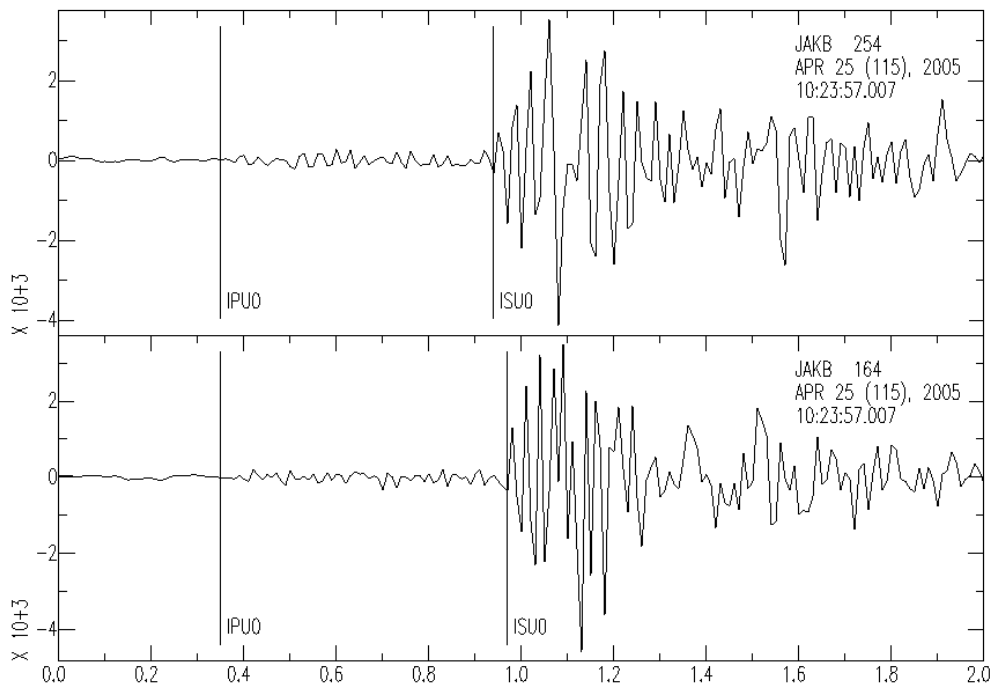


Imagem 9: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com

tempo de atraso 0,01s.

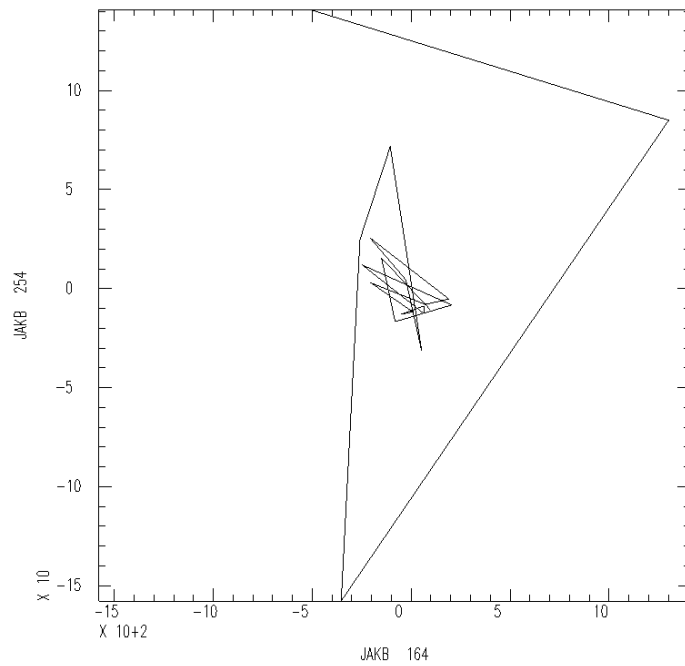


Imagem 10: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 26/04/2005 na hora 16:57:48,99

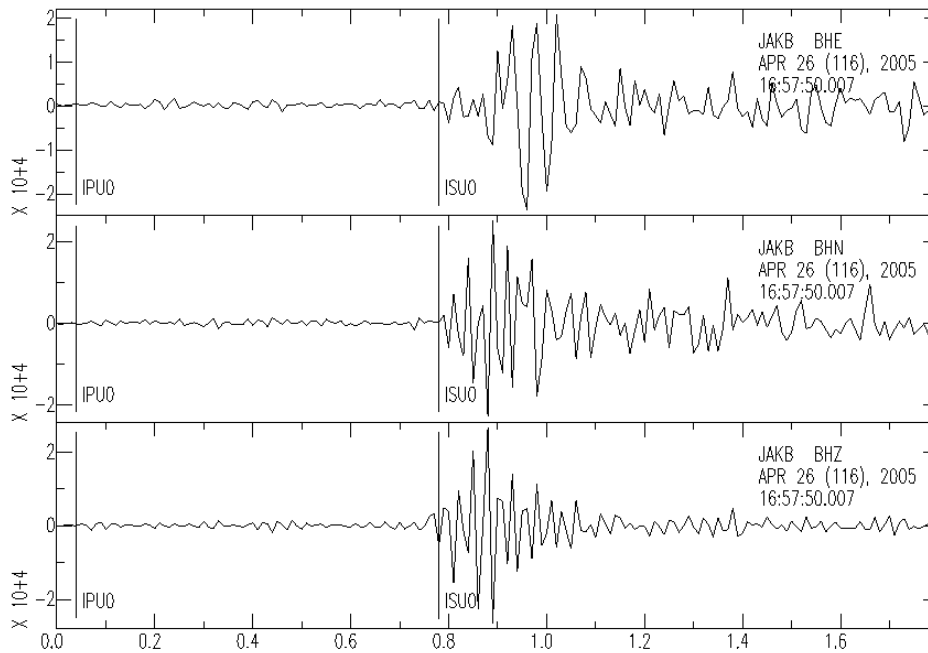


Imagem 11: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

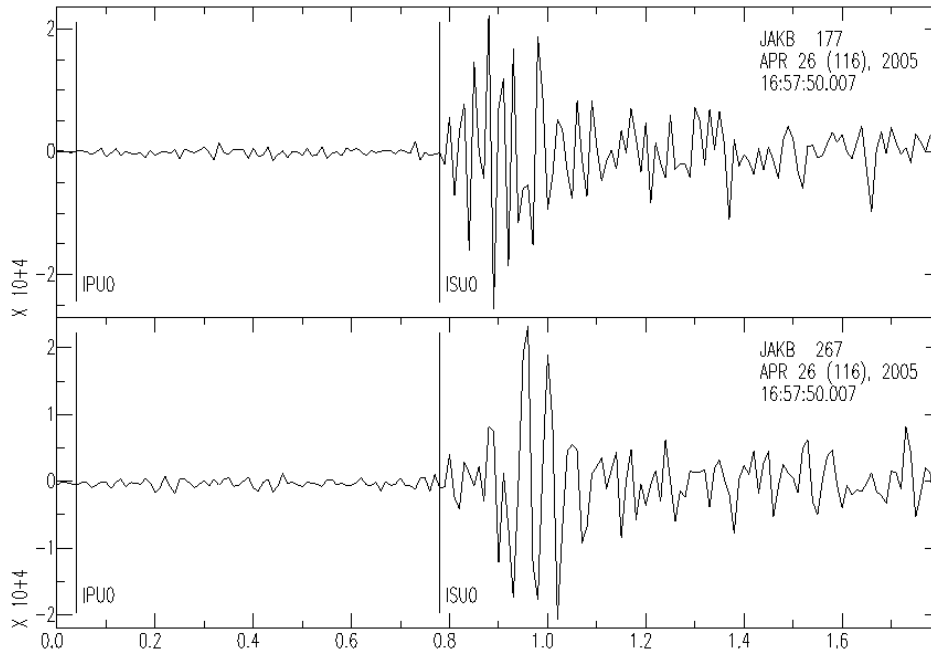


Imagem 12: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

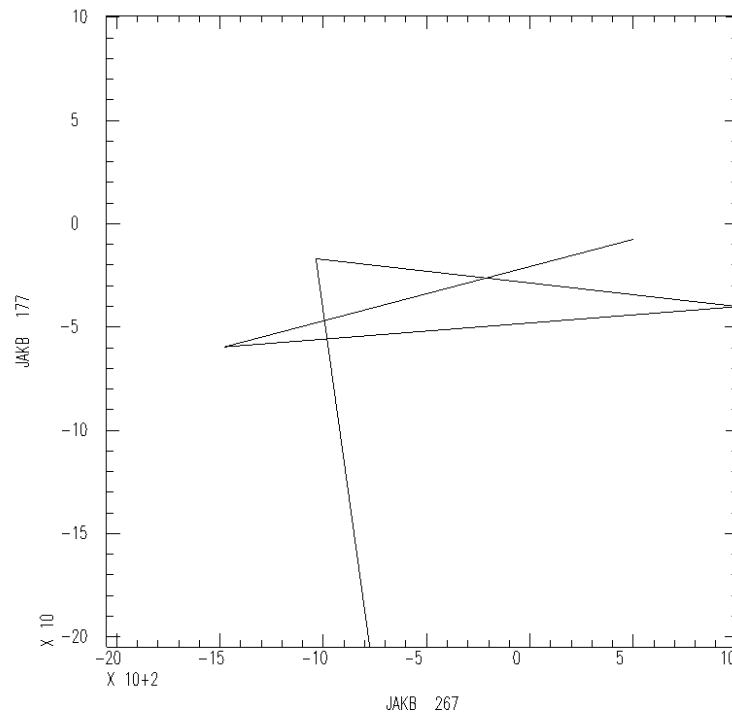


Imagem 13: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 172,26°.

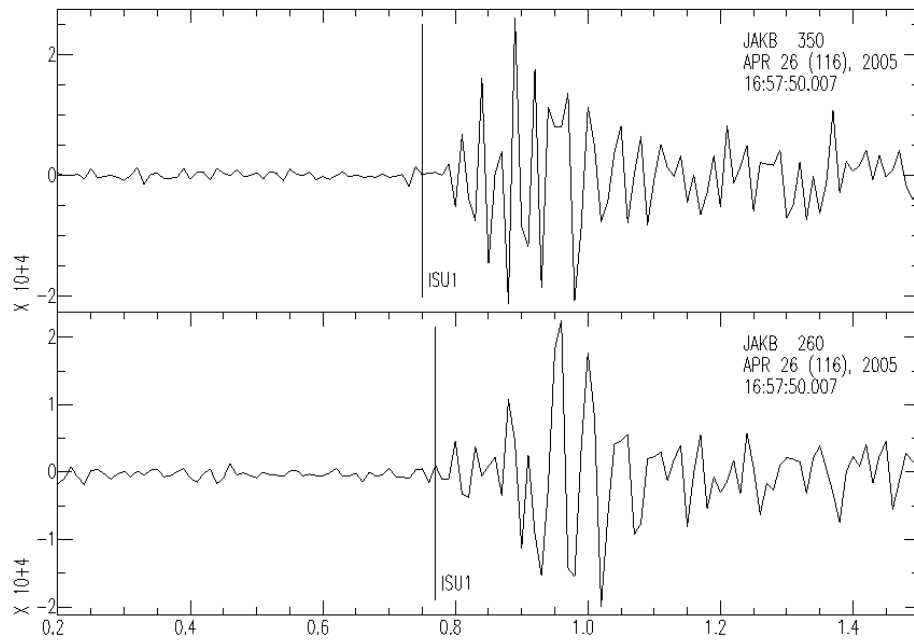


Imagem 14: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

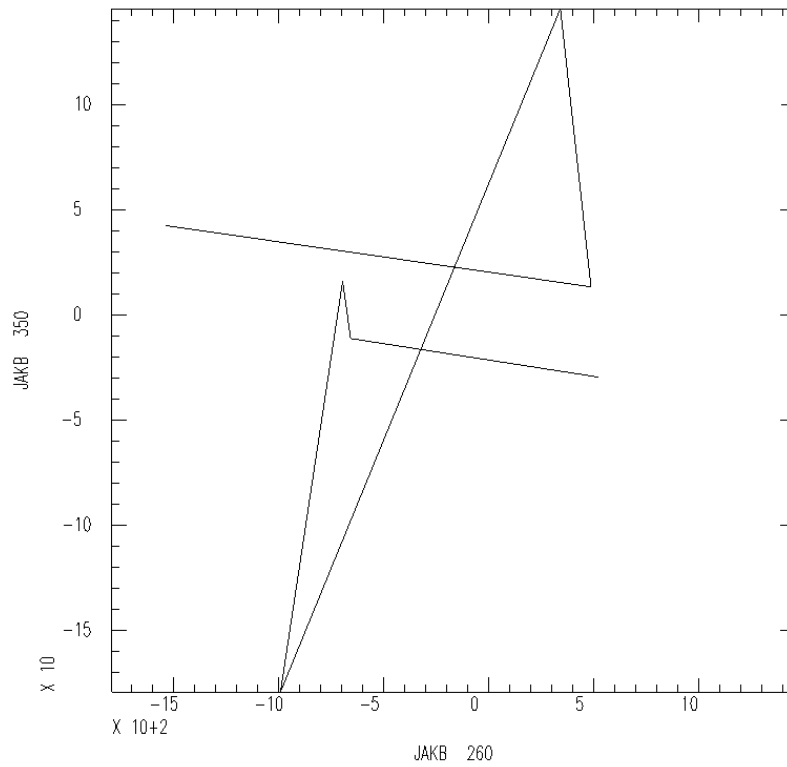


Imagem 15: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 29/04/2005 na hora 01:43:00,27

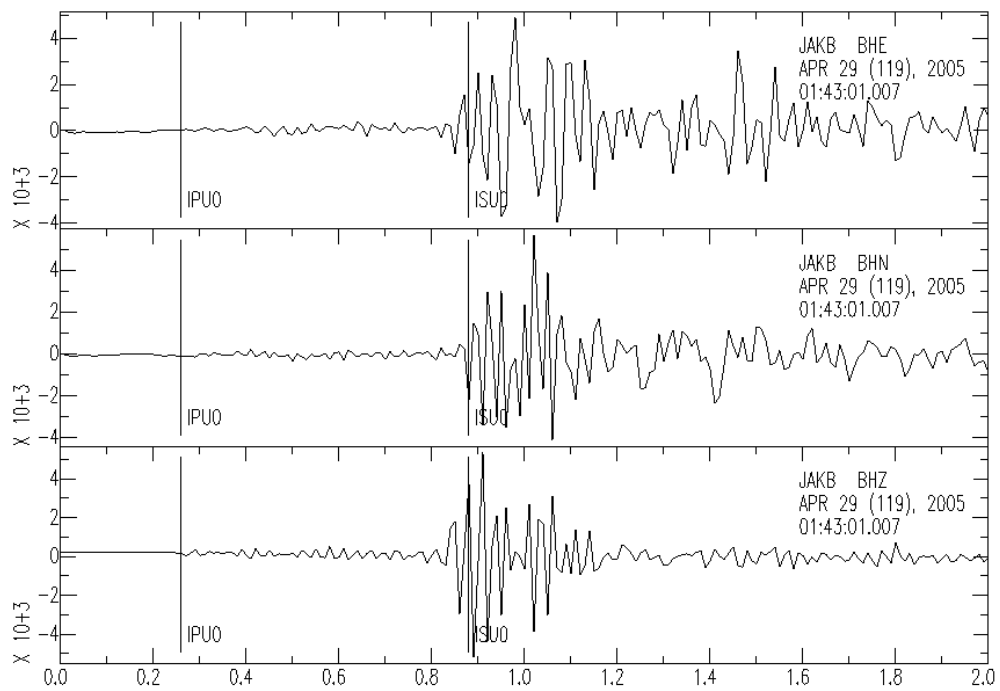


Imagem 16: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

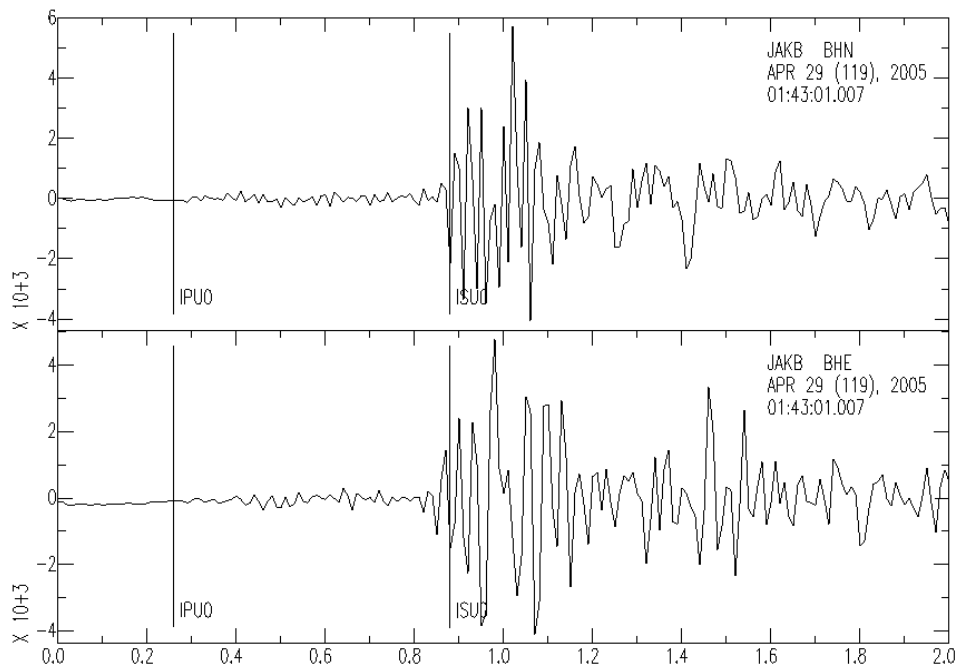


Imagem 17: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

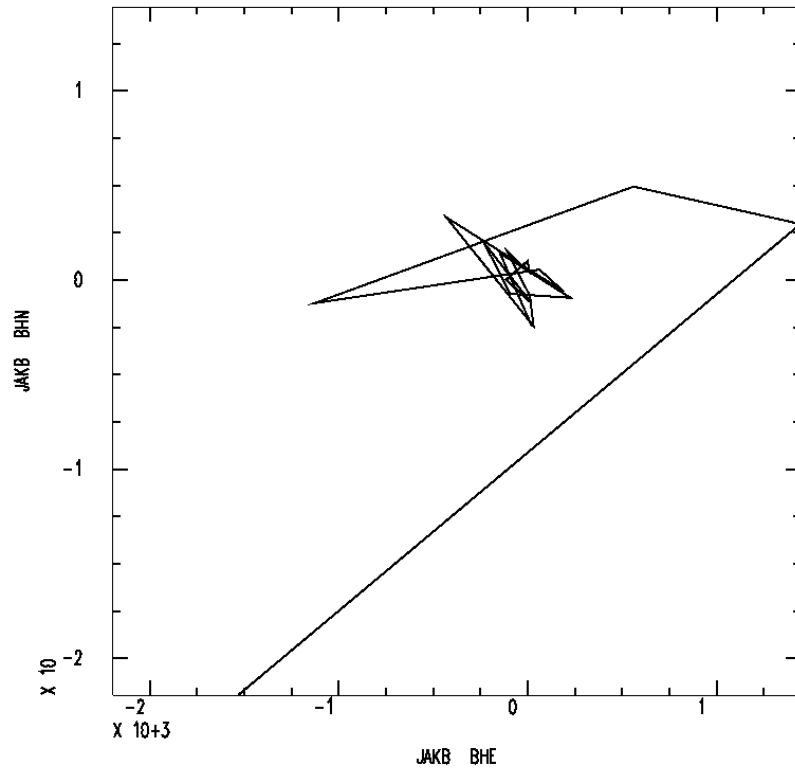


Imagem 18: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 235,55°.

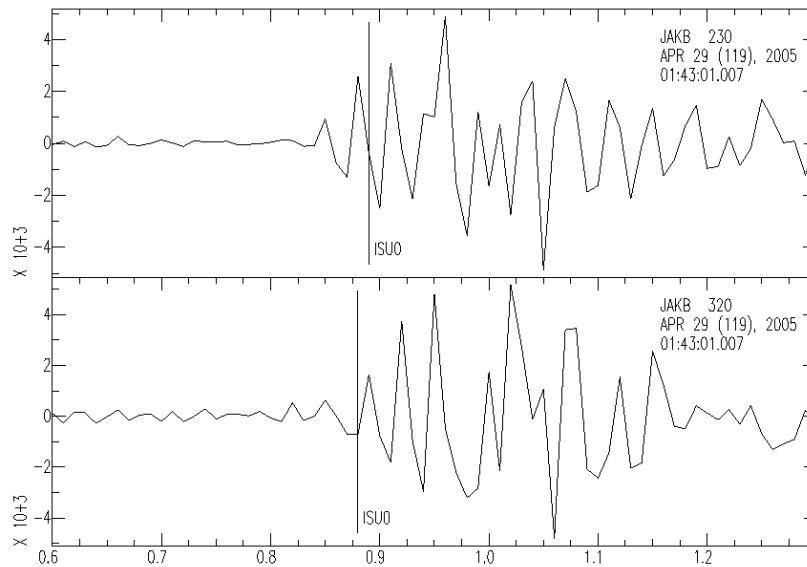


Imagem 19: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,02s.

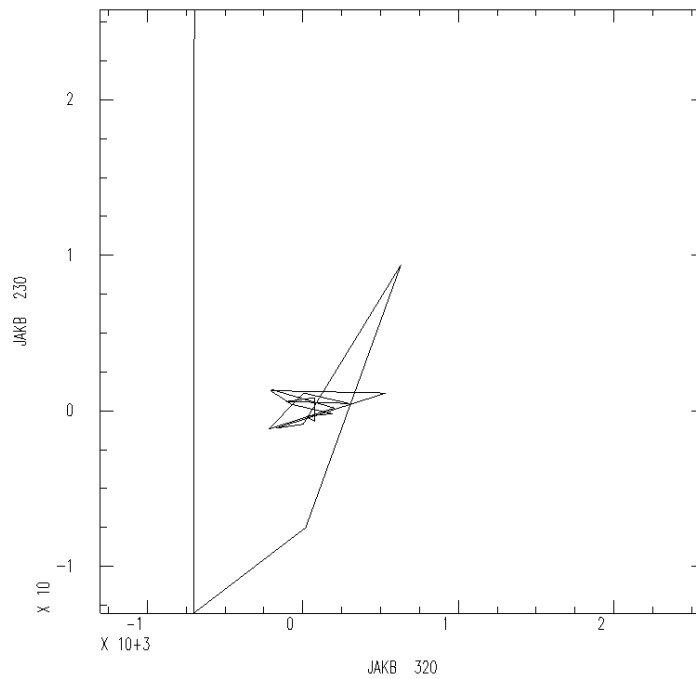


Imagem 20: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 29/04/2005 na hora 14:06:30,12

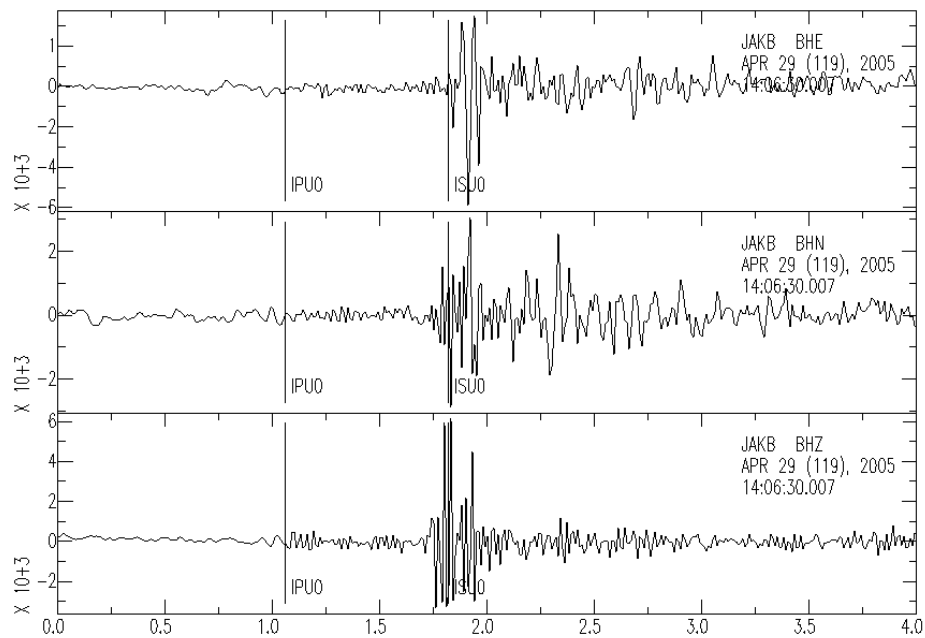


Imagem 21: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

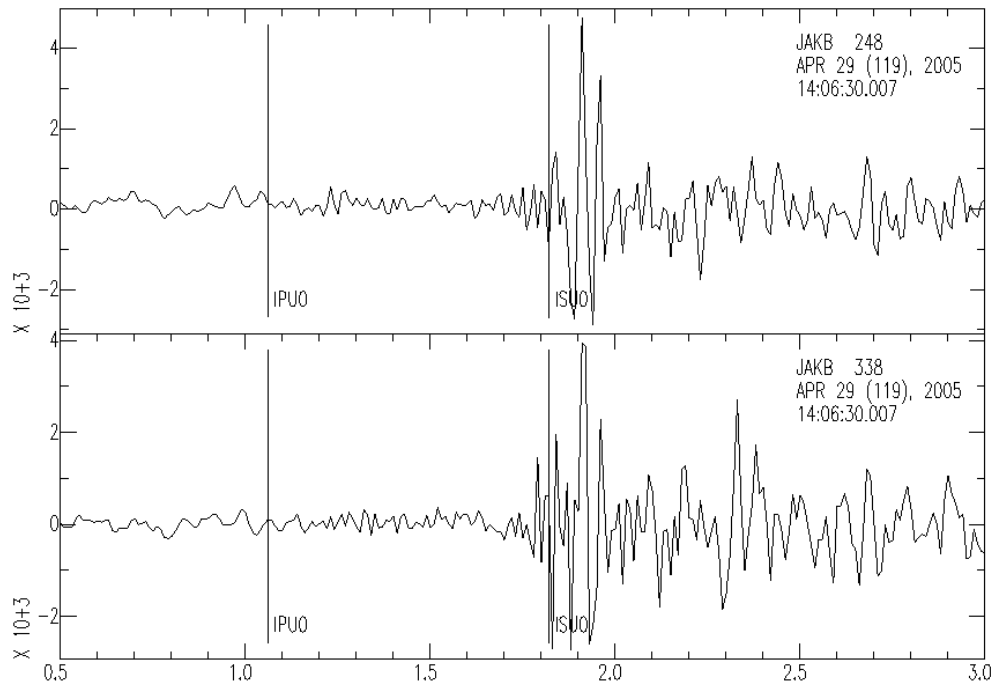


Imagem 22: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

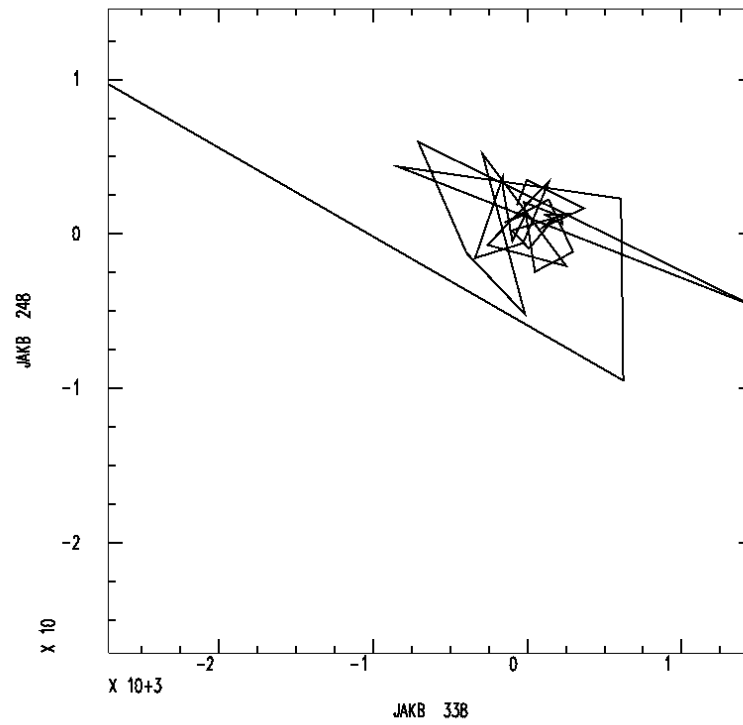


Imagem 23: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 349.97°.



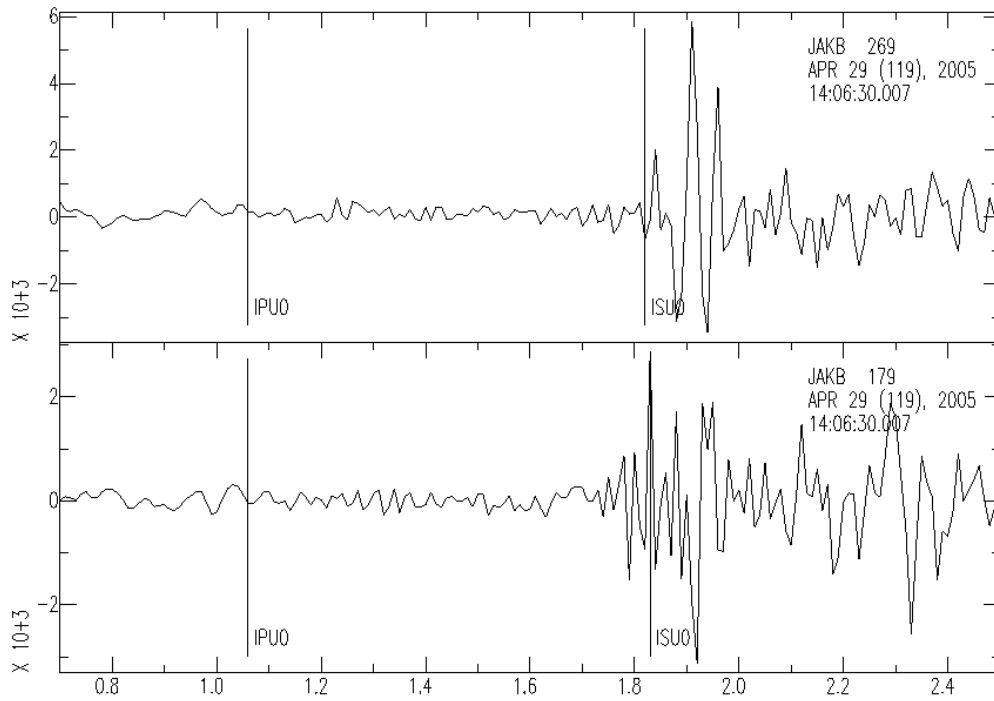


Imagem 24: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,02s

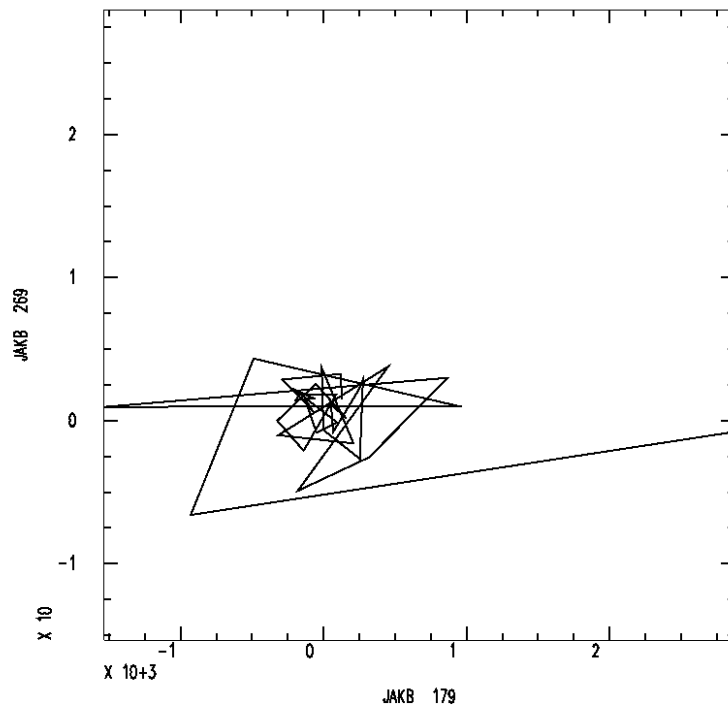


Imagem 25: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 29/04/2005 na hora 14:17:41,18

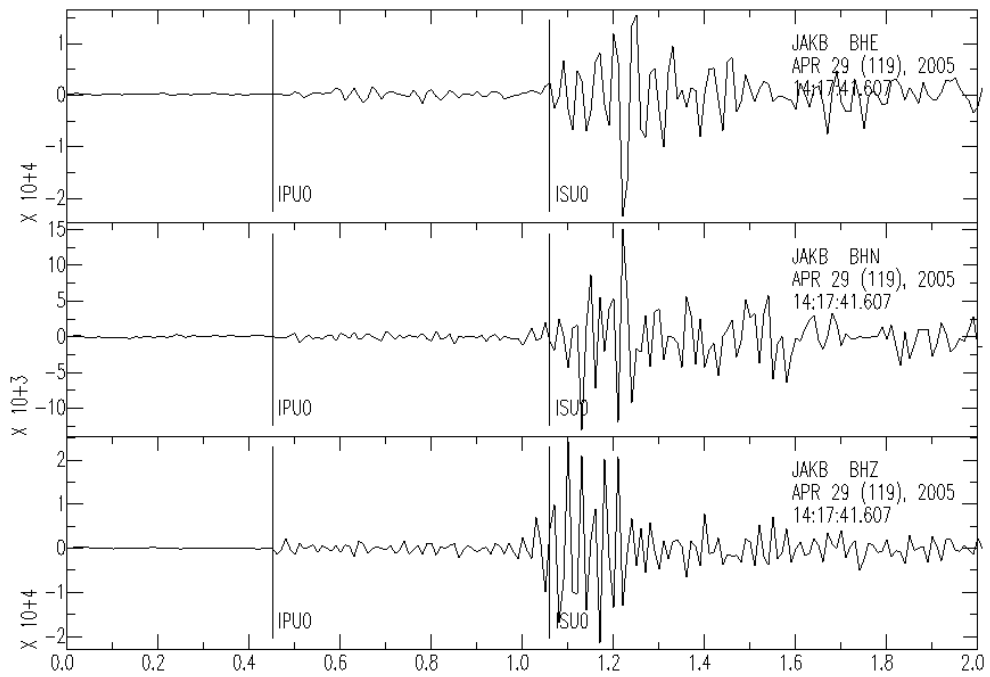


Imagem 26: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

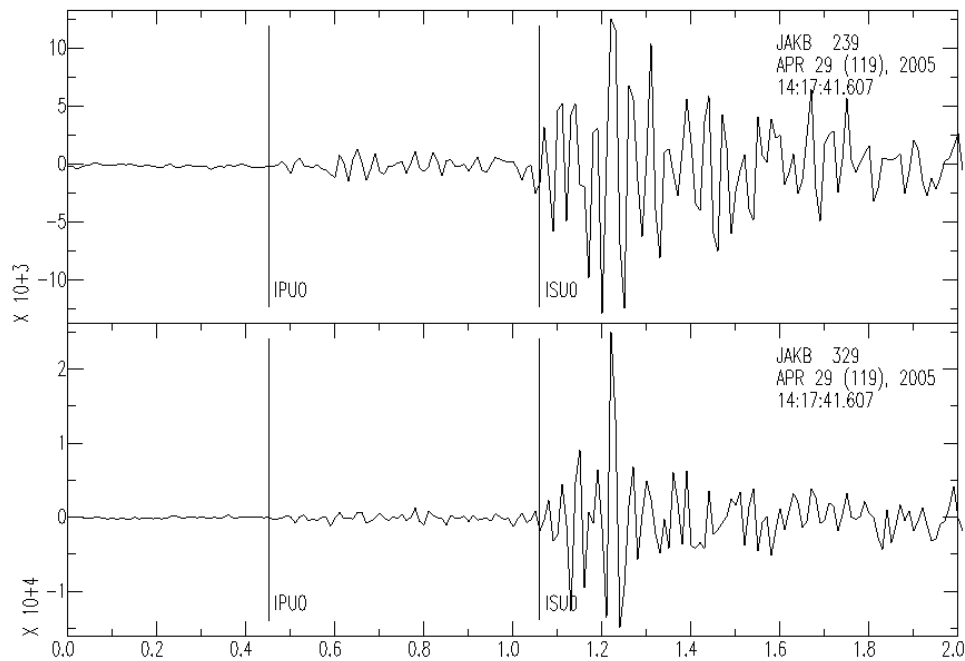


Imagem 27: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

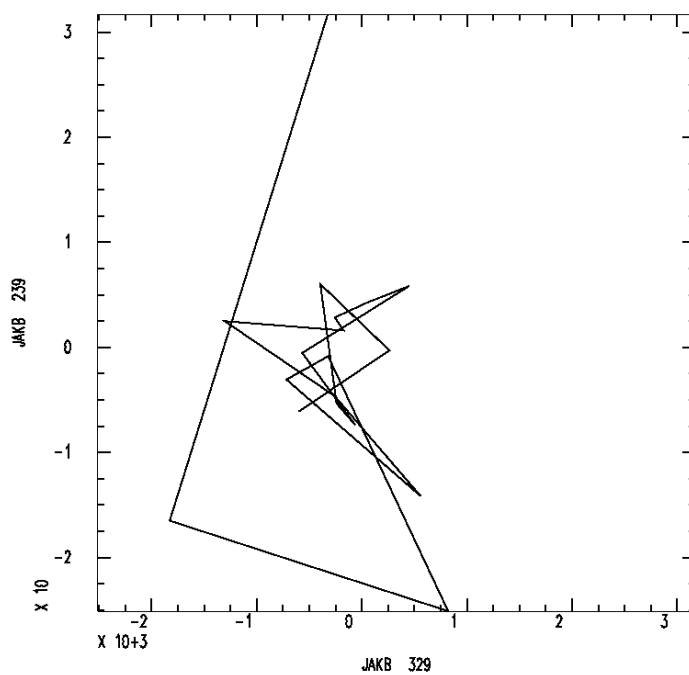


Imagem 28: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 41°.

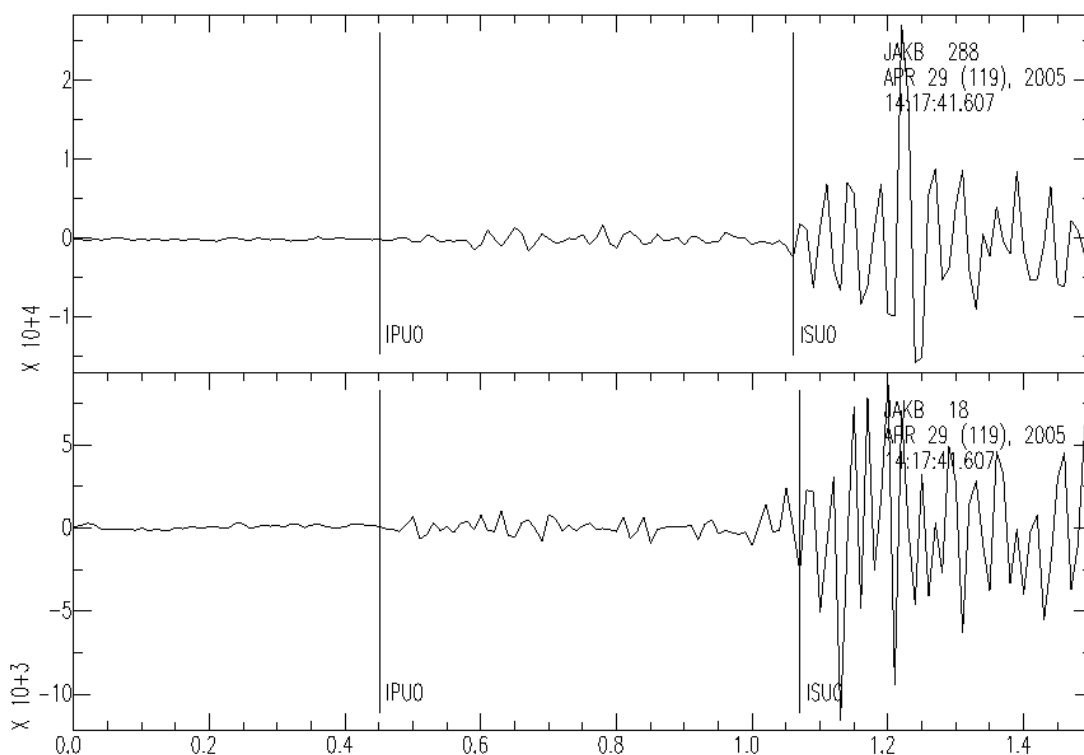


Imagem 29: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

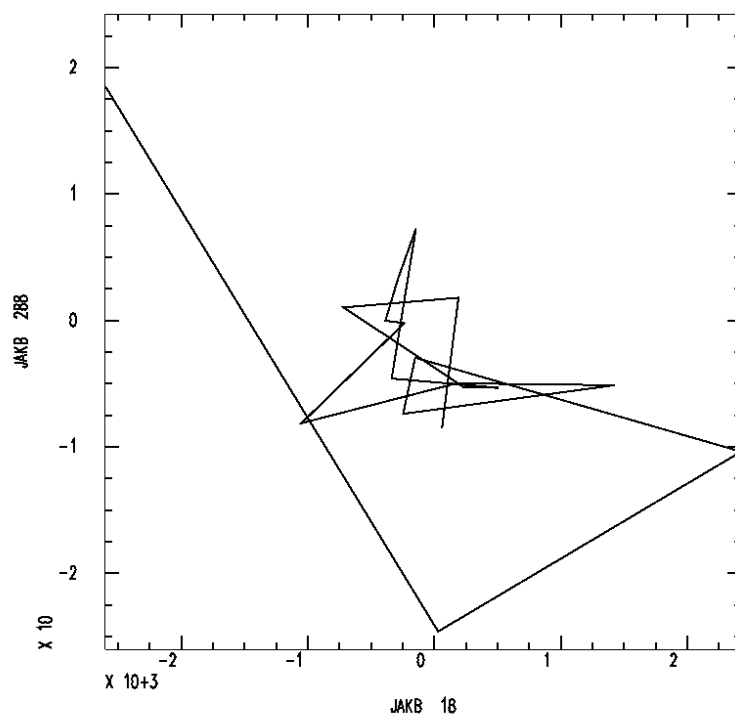


Imagem 30: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 01/05/2005 na hora 10:08:48,84

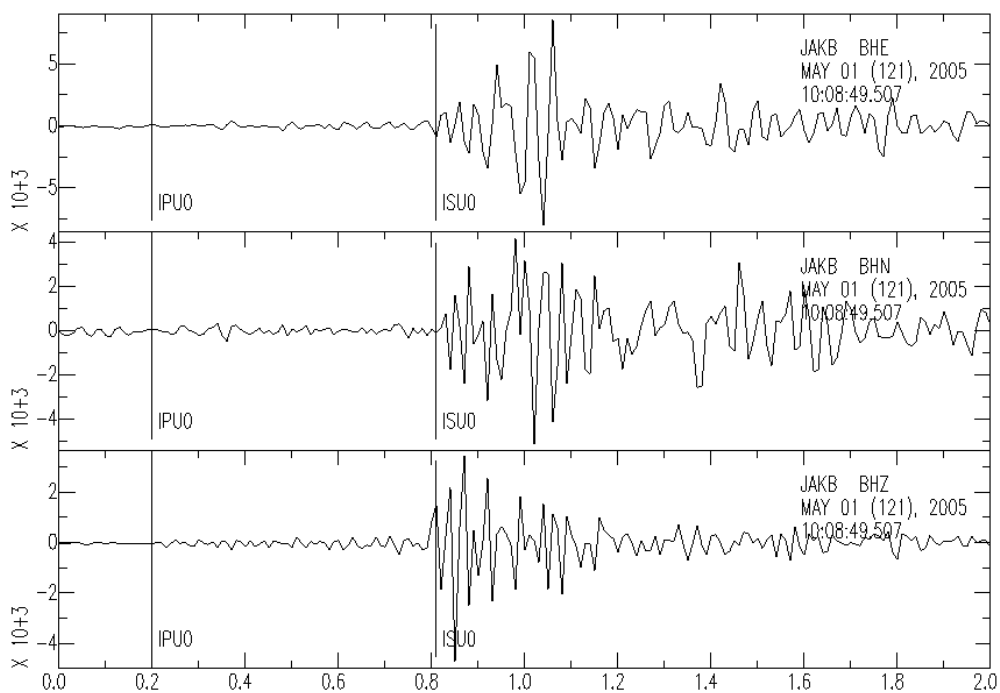


Imagem 31: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

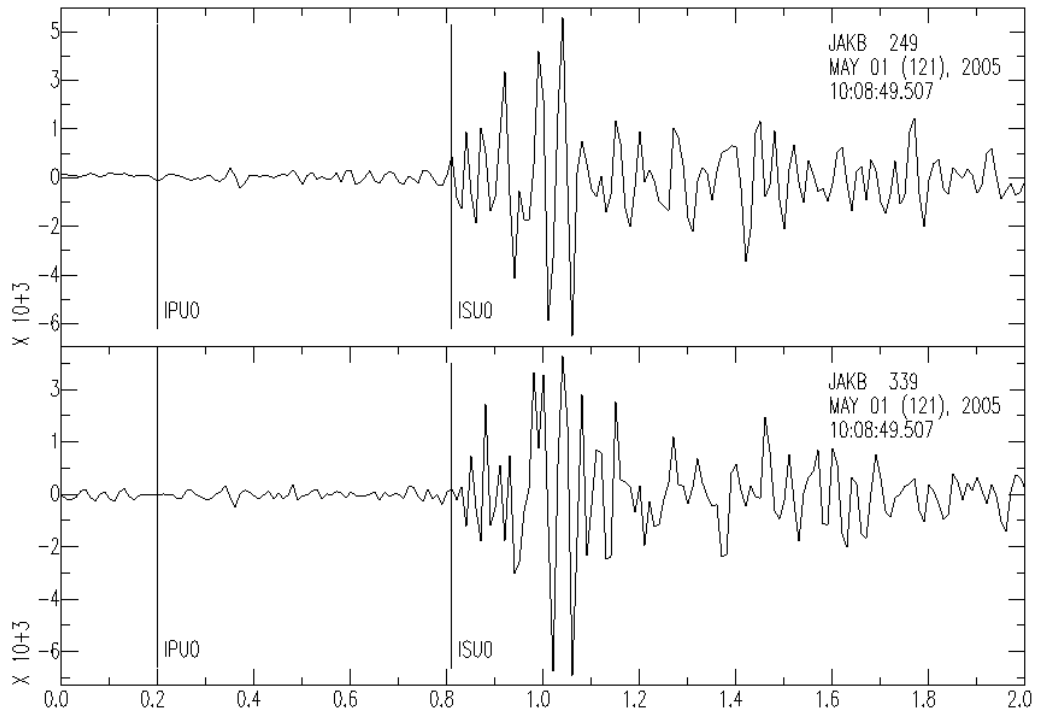


Imagem 32: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

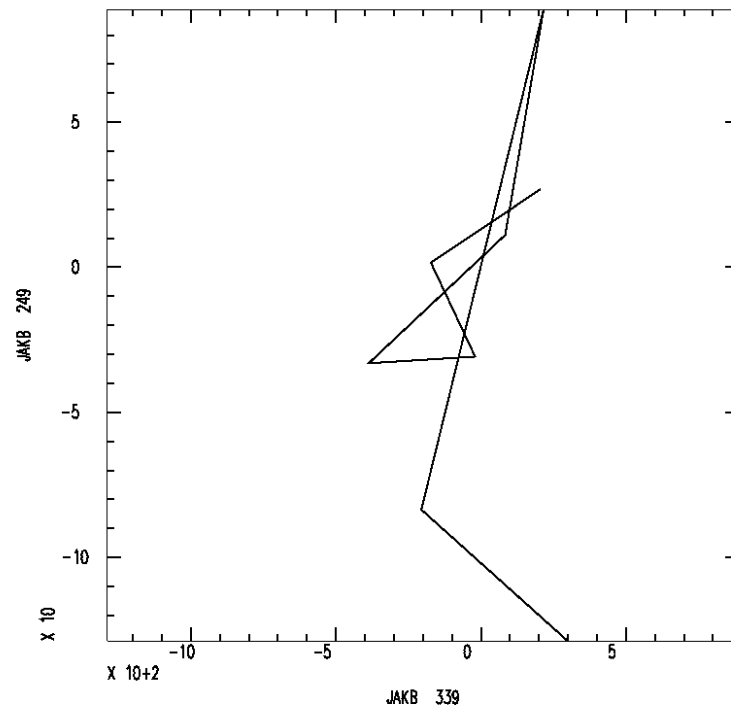


Imagem 33: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 105°.

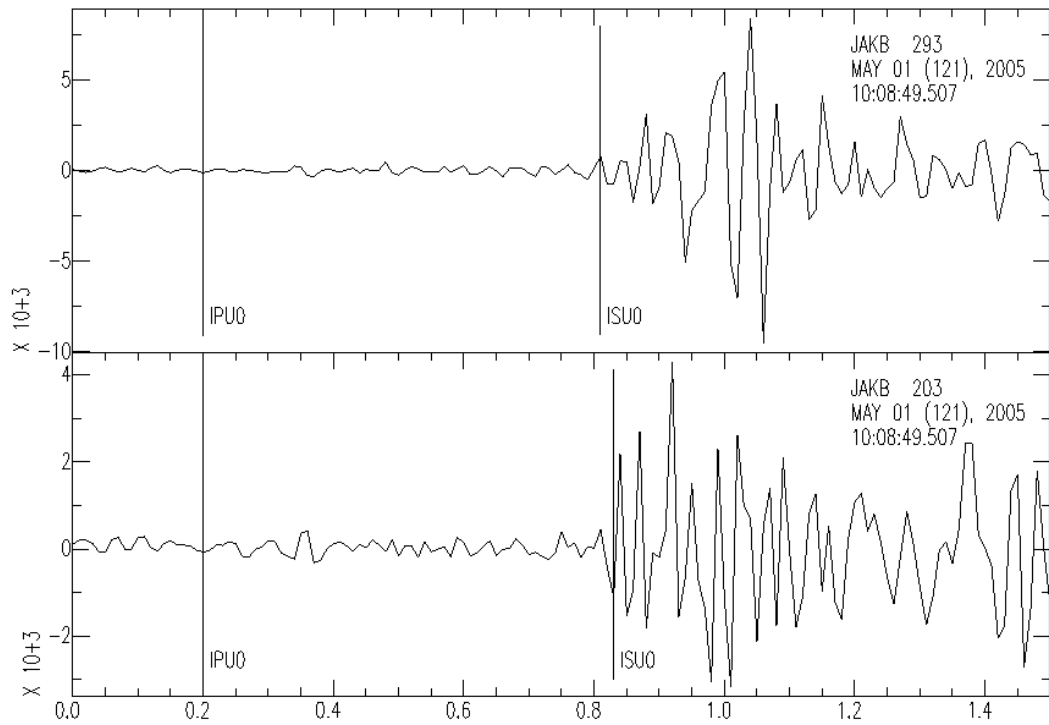


Imagem 34: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,02s

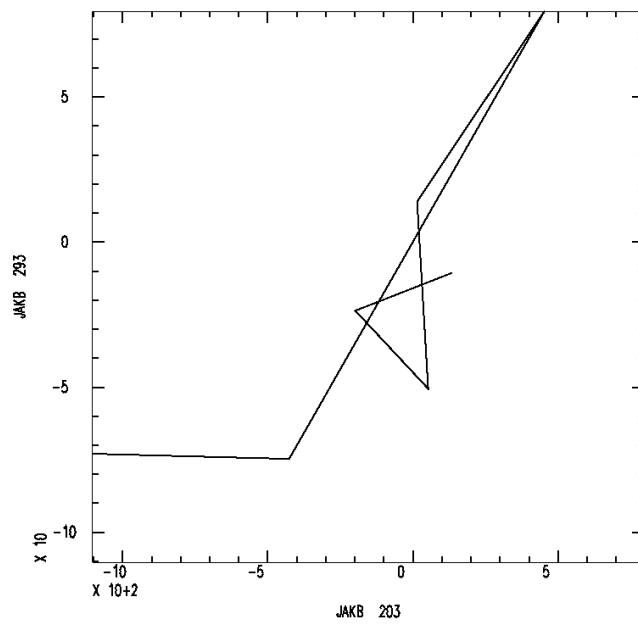


Imagem 35: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 04/05/2005 na hora 15:47:50,83

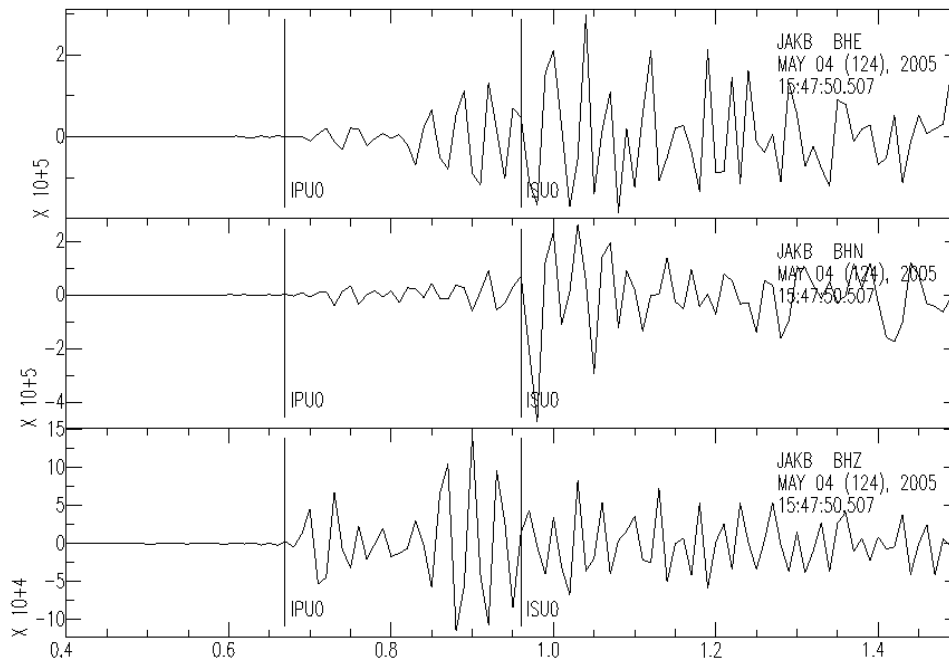


Imagem 36: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

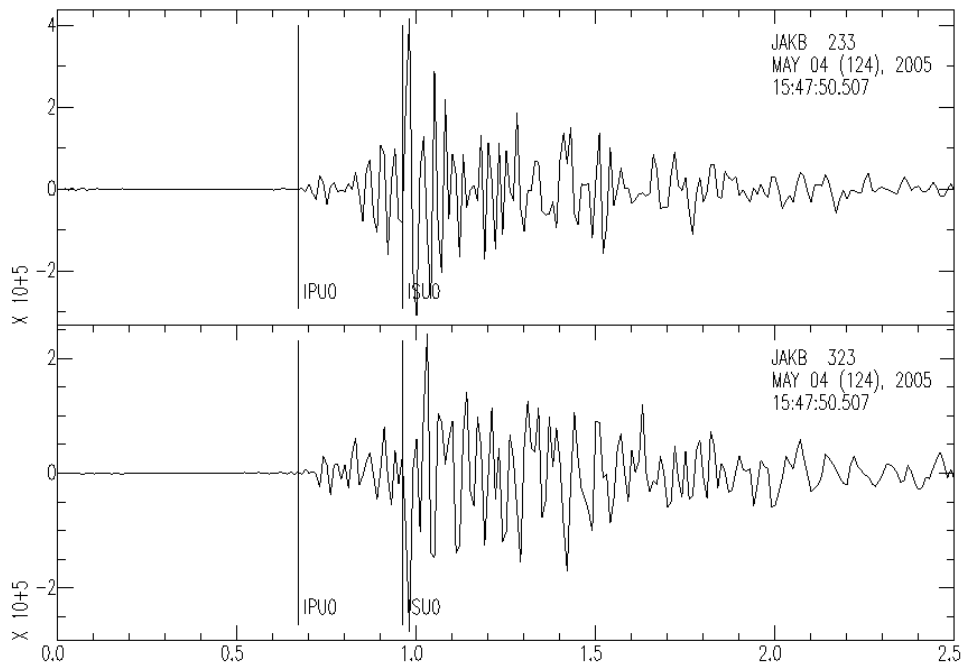


Imagem 37: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

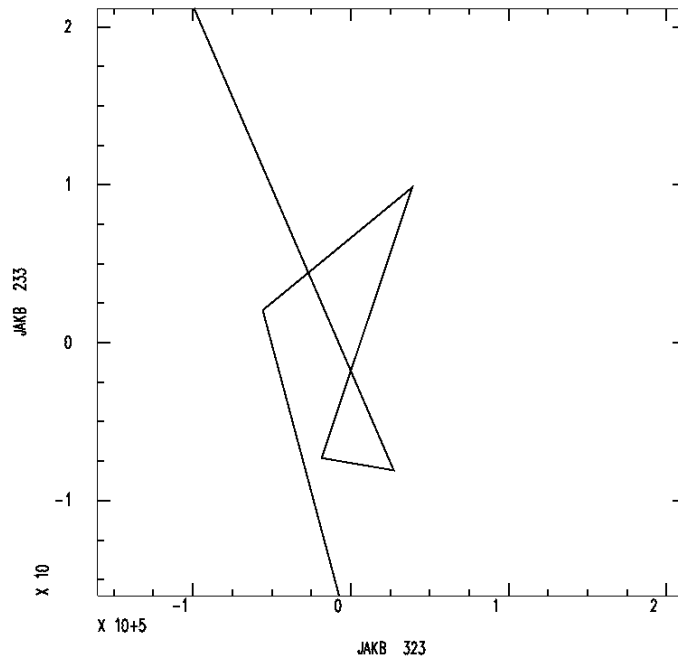


Imagem 38: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 168,88°.

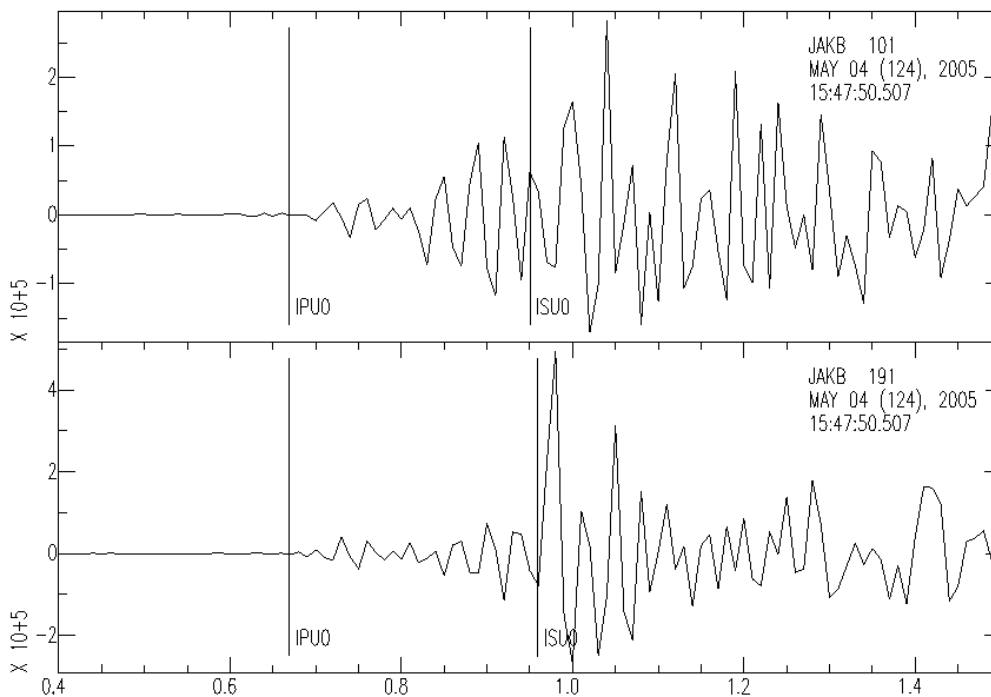


Imagem 39: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,02s



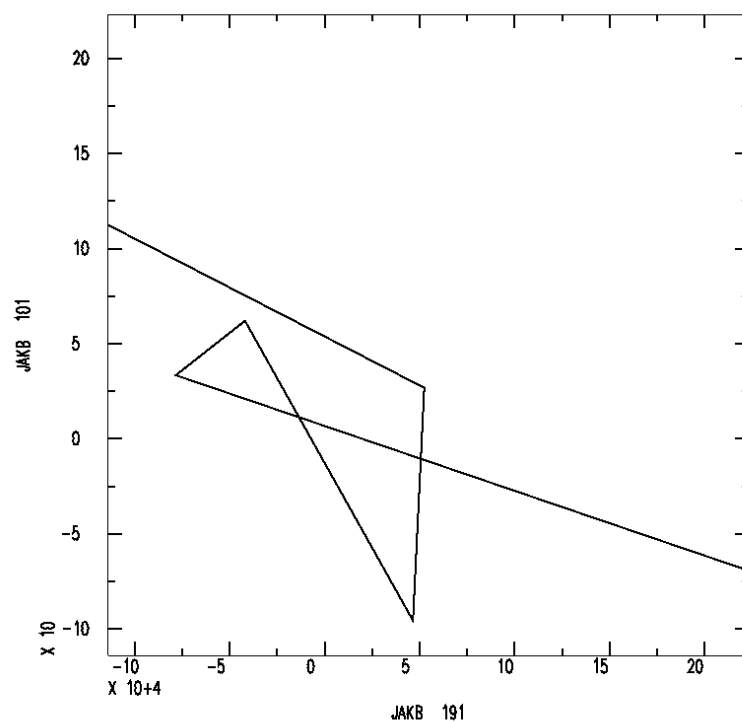


Imagem 40: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 07/07/2005 na hora 01:33:49,92

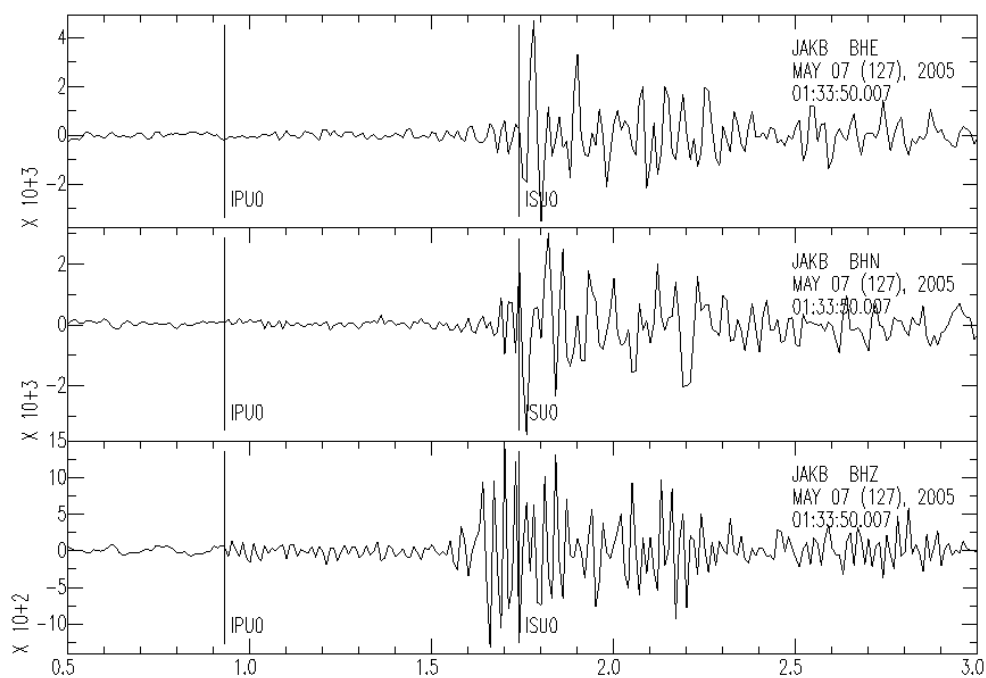


Imagem 41: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

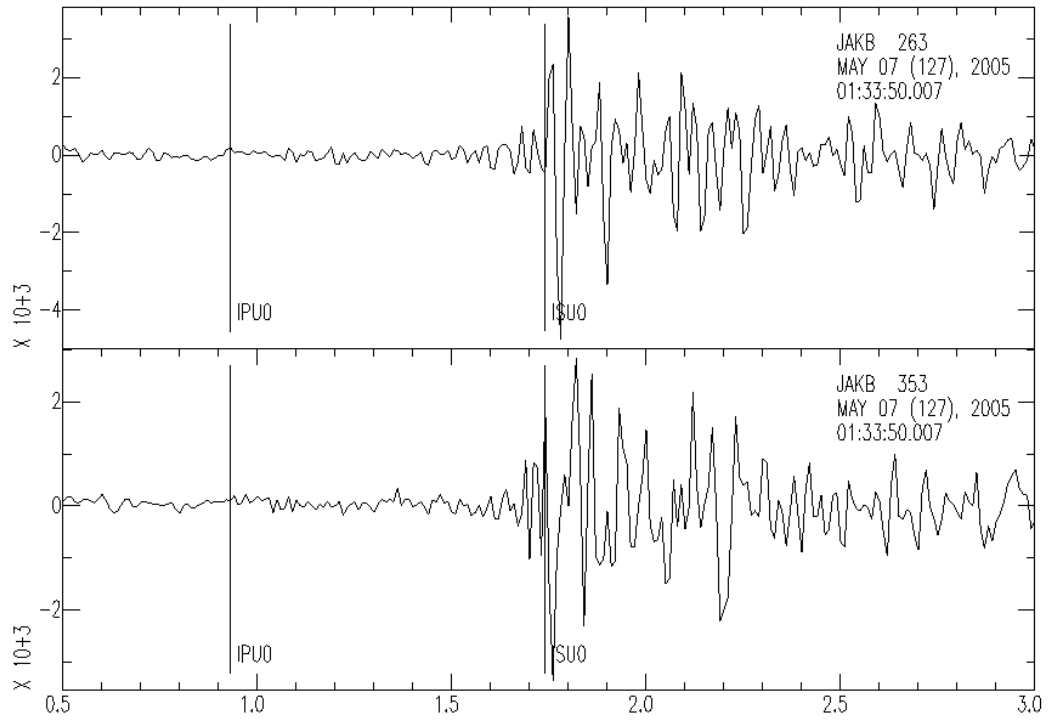


Imagem 42: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

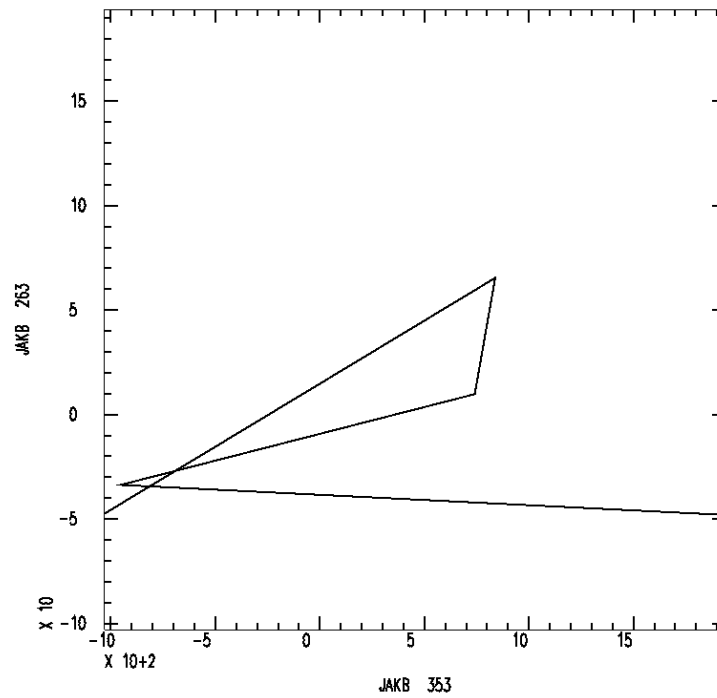


Imagem 43: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 208,05°.

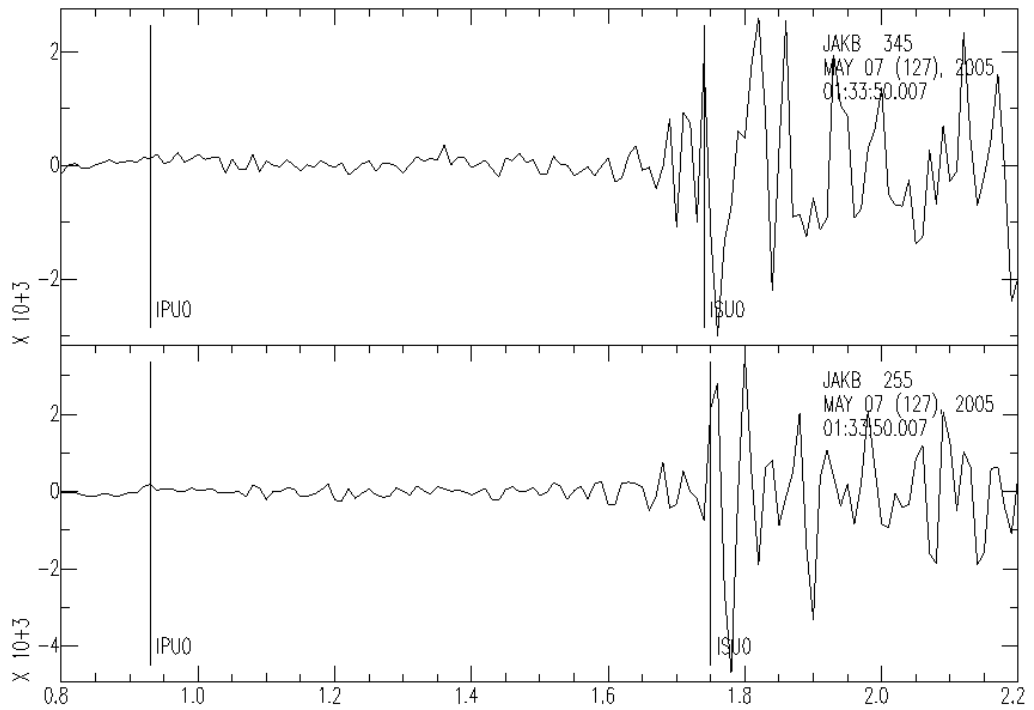


Imagem 44: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

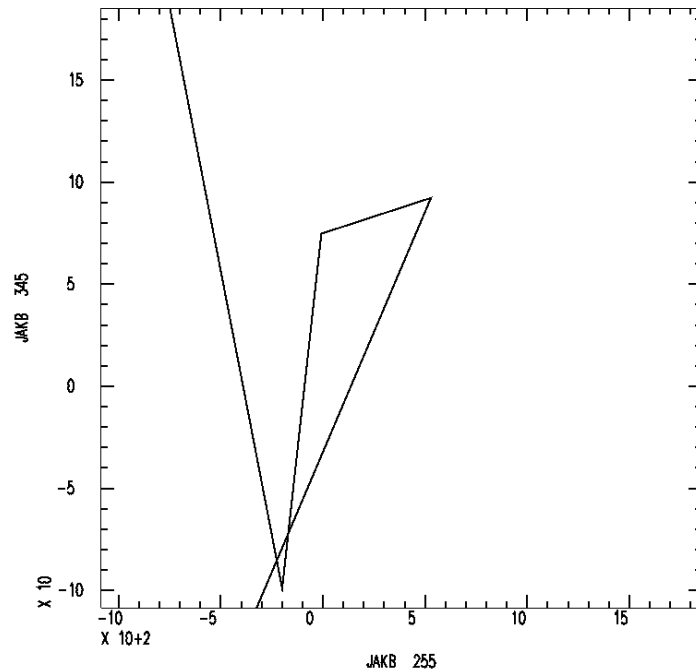


Imagem 45: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 07/05/2005 na hora 23:33:34,68

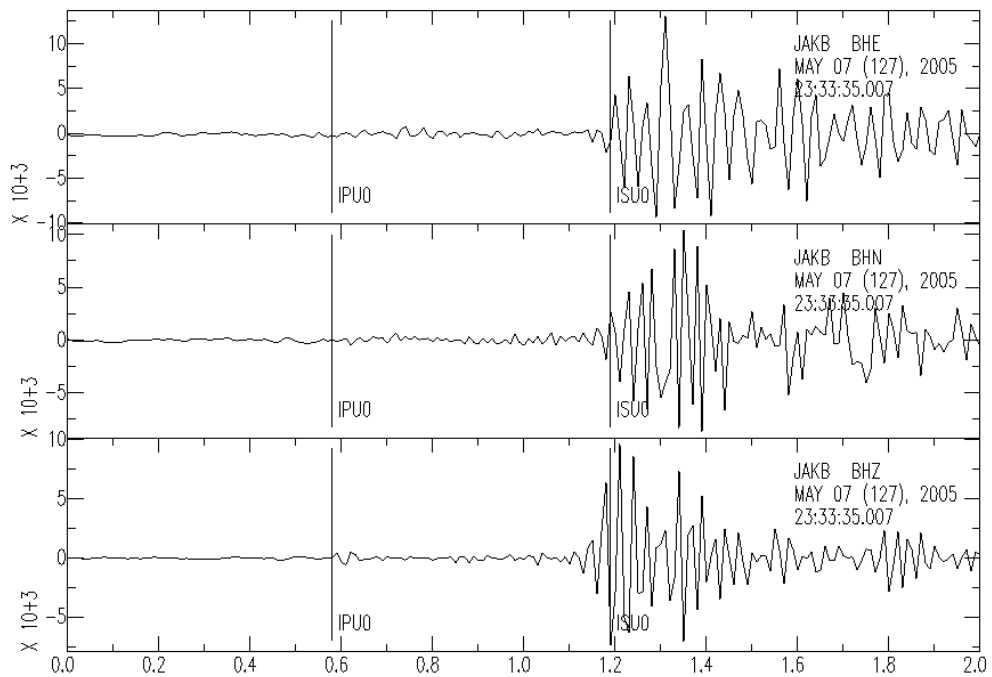


Imagem 46: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

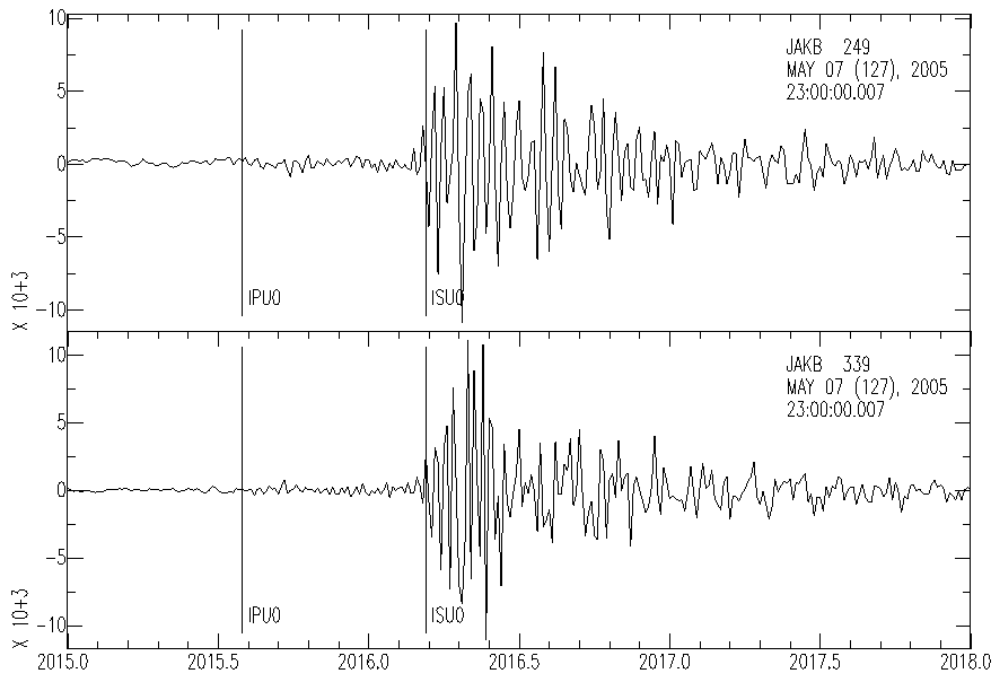


Imagem 47: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

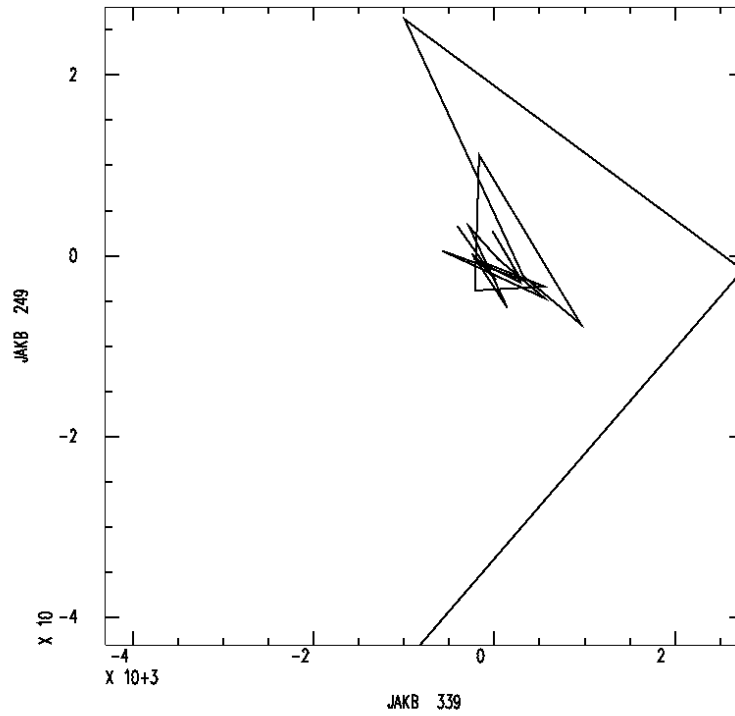


Imagem 48: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 93,55°.

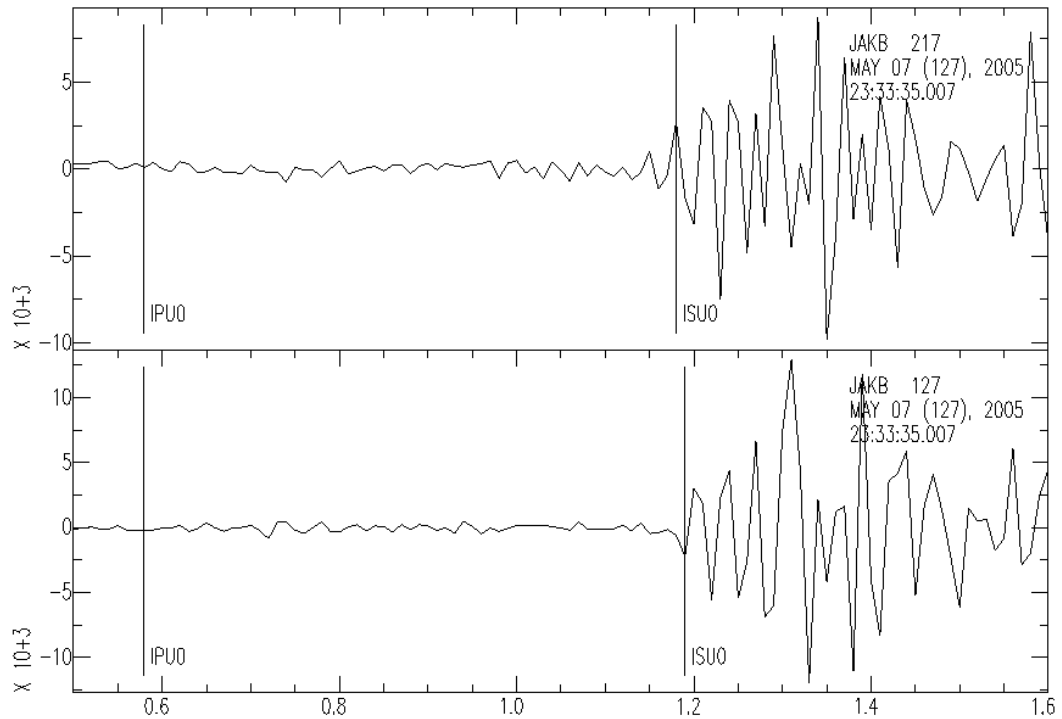


Imagem 49: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento,

com tempo de atraso 0,02s

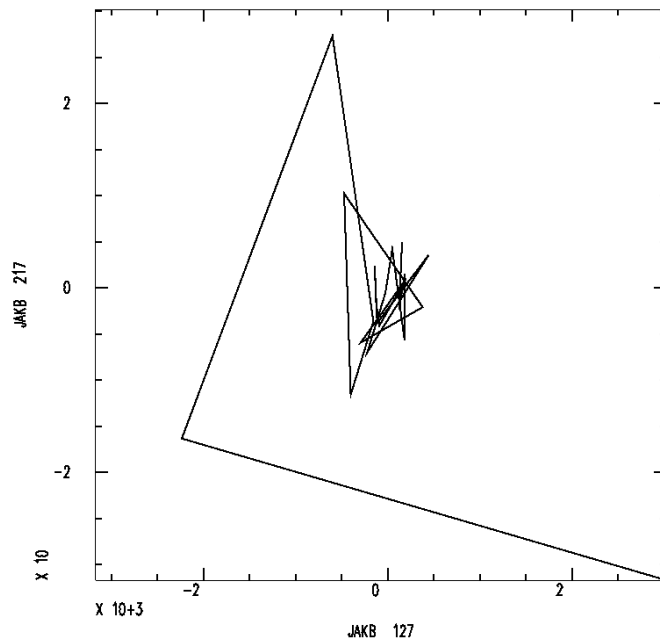


Imagem 50: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 08/05/2005 na hora 07:25:21,18

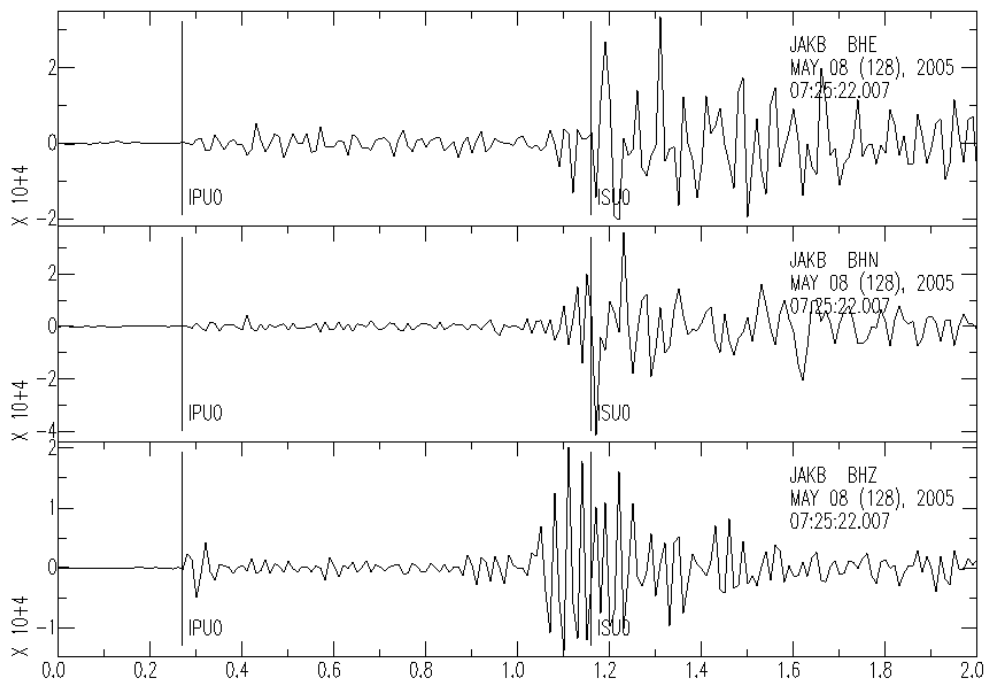


Imagem 51: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

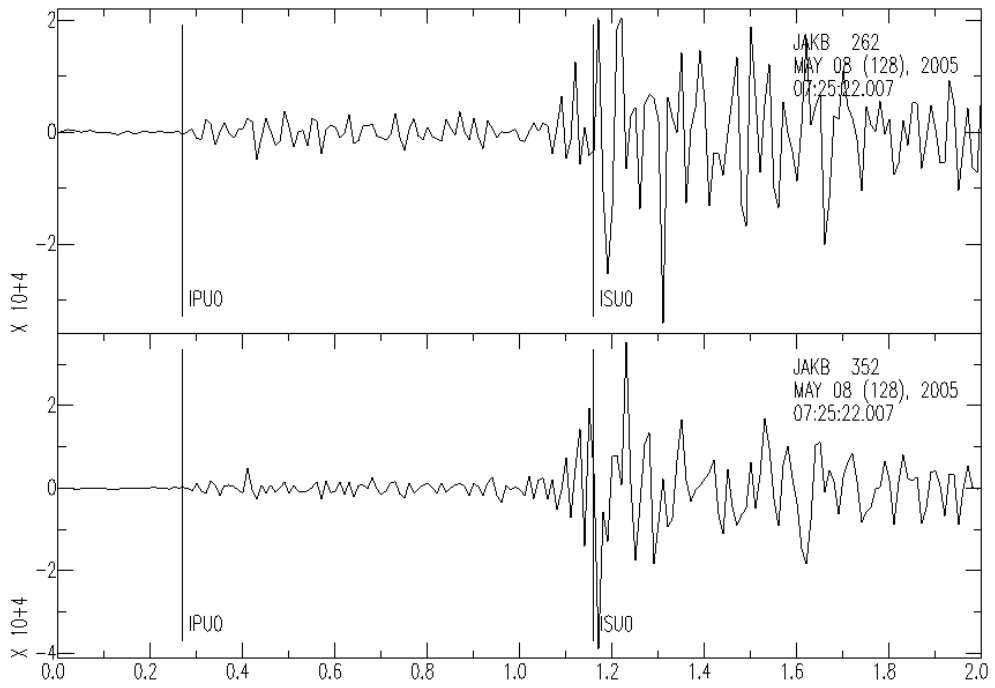


Imagem 52: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

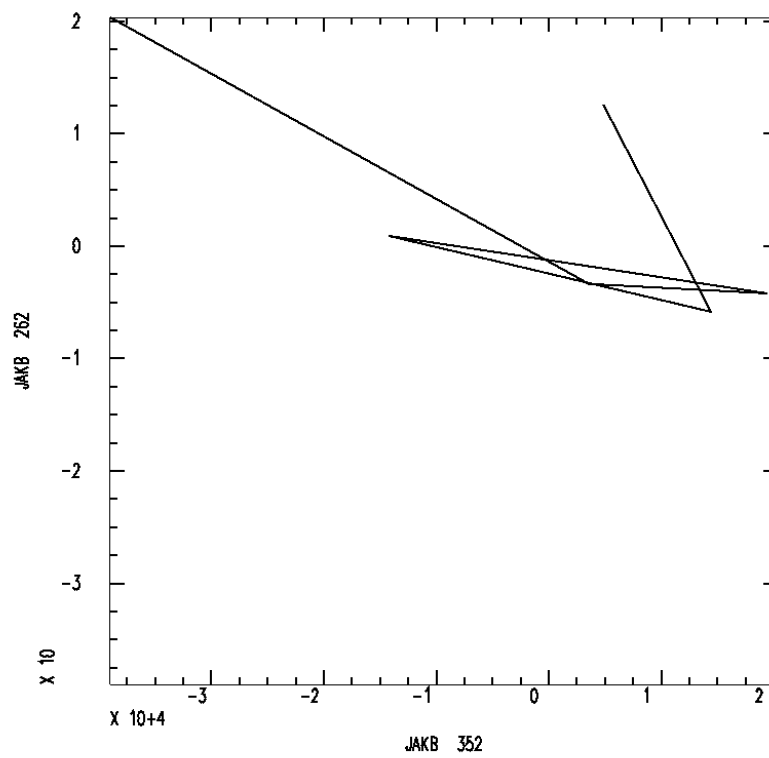


Imagem 53: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 79,05°.

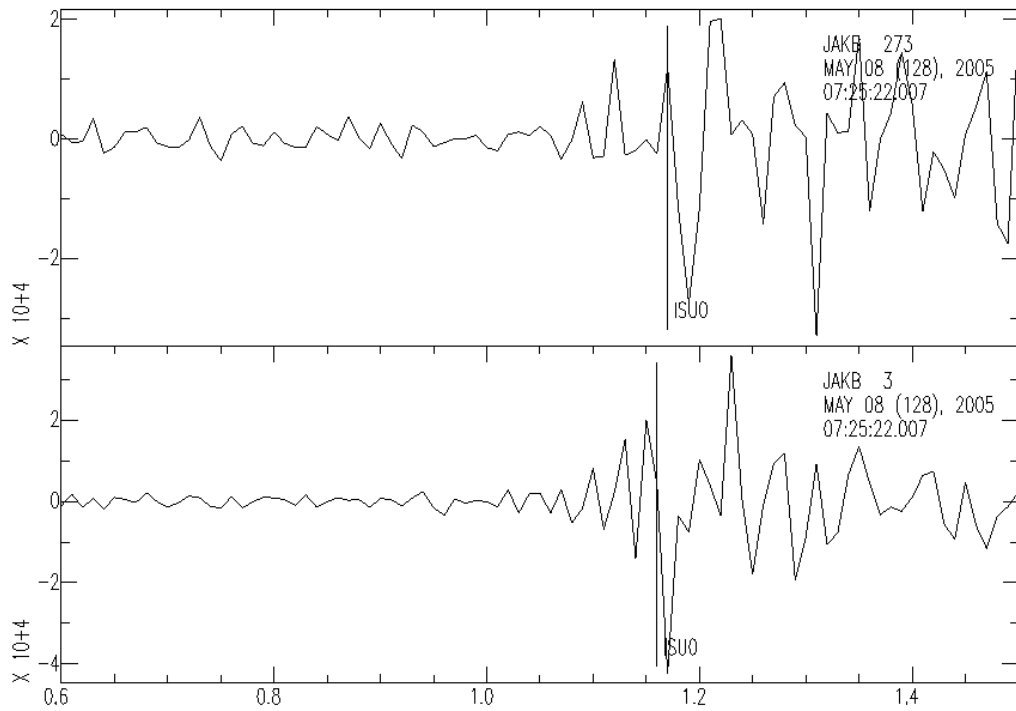


Imagem 54: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,02s

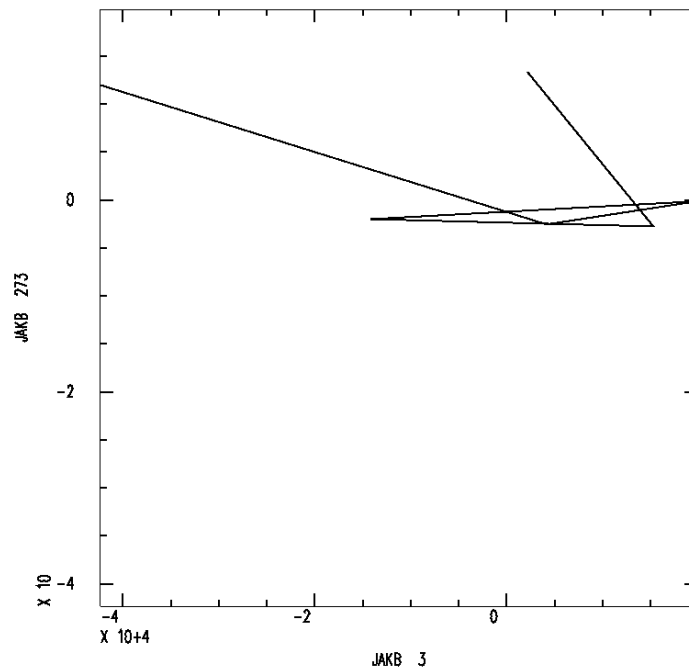


Imagem 55: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização



- Evento de 12/05/2005 na hora 01:03:43,10

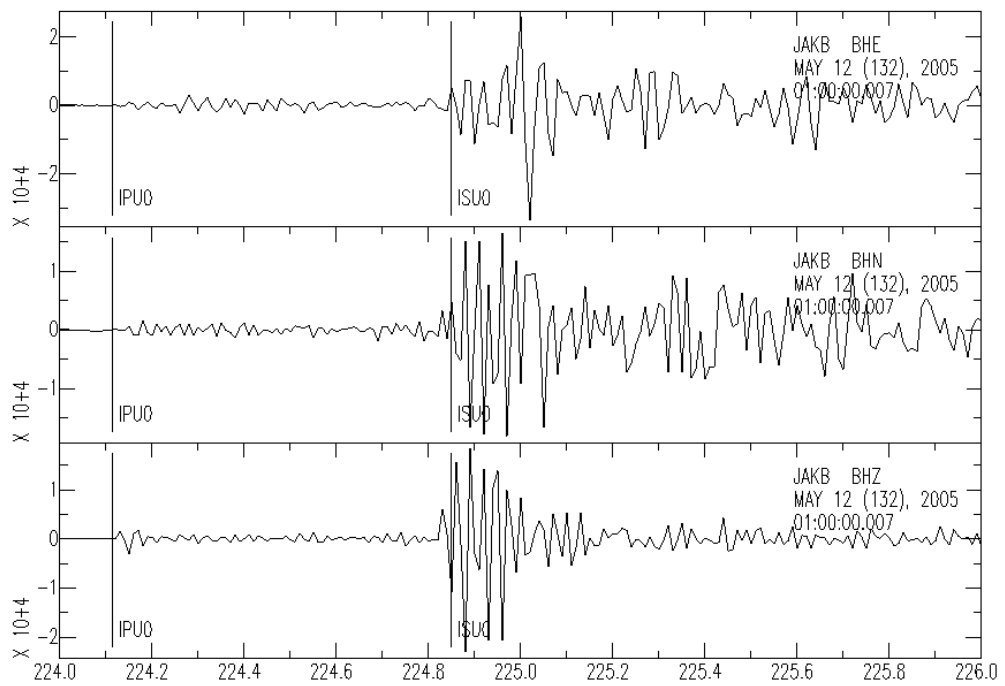


Imagem 56: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

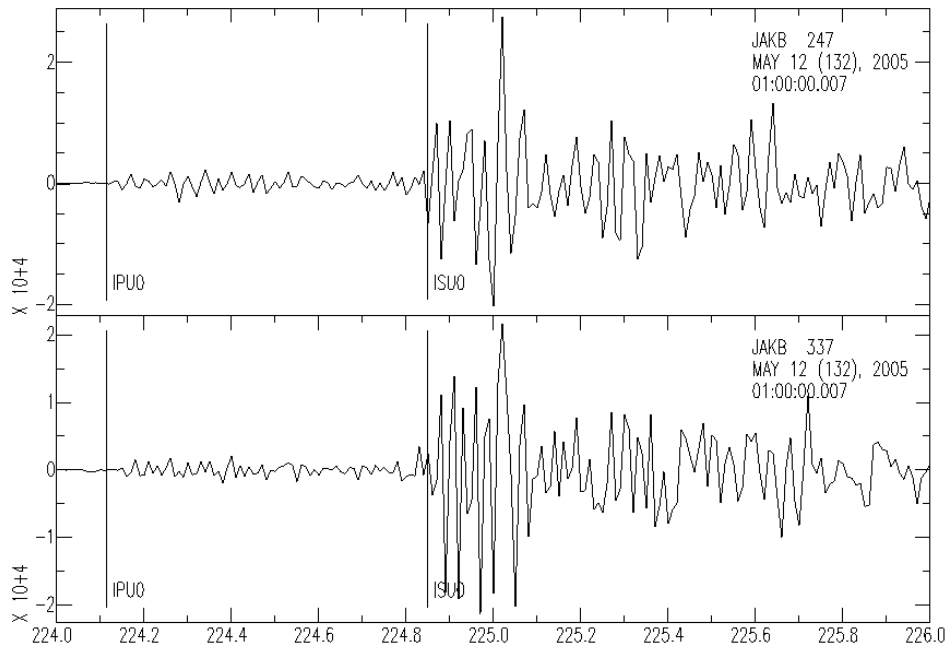


Imagem 57: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

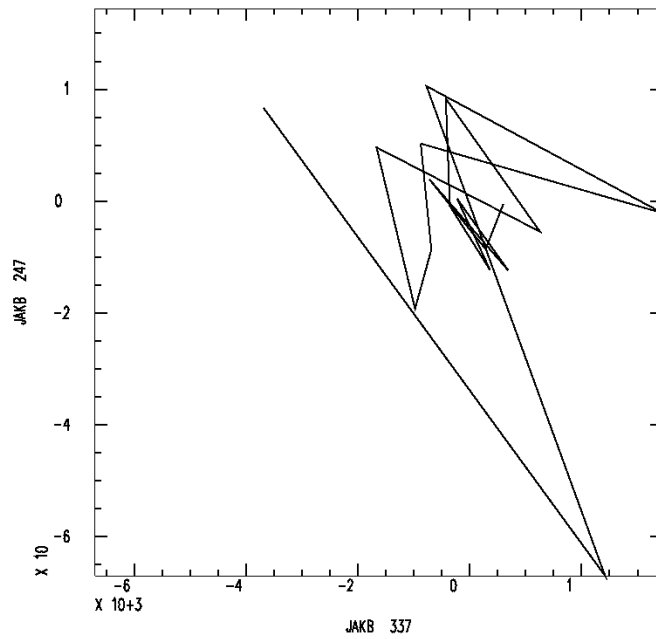


Imagem 58: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 105,55°.

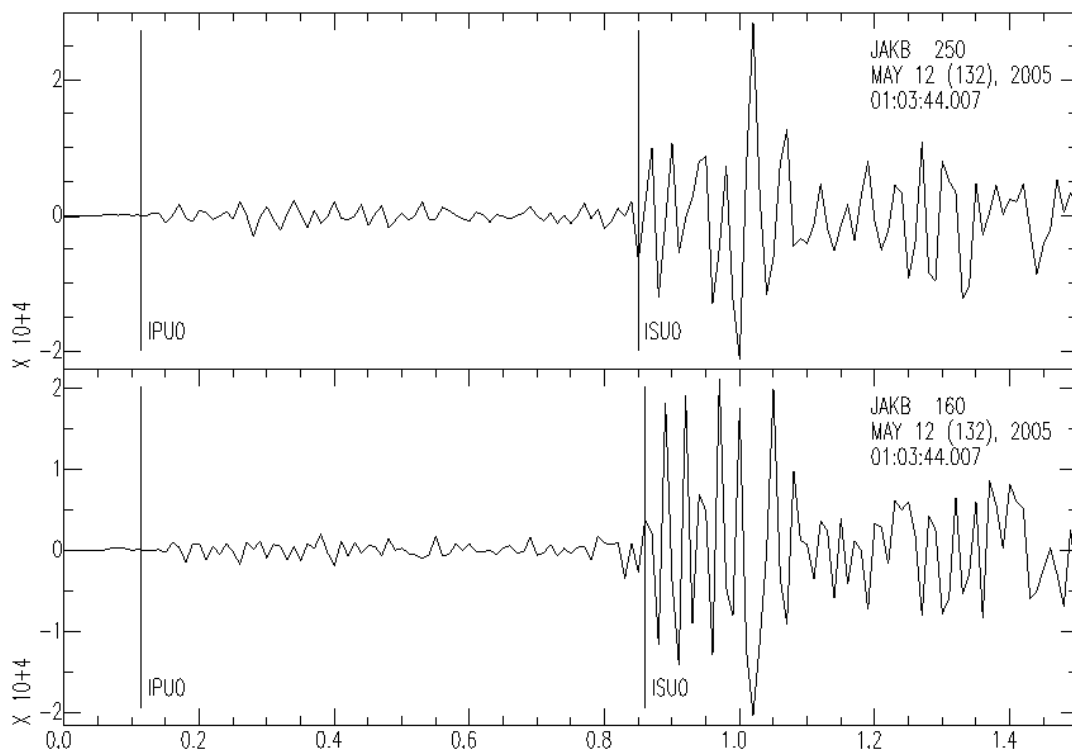


Imagem 59: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,02s

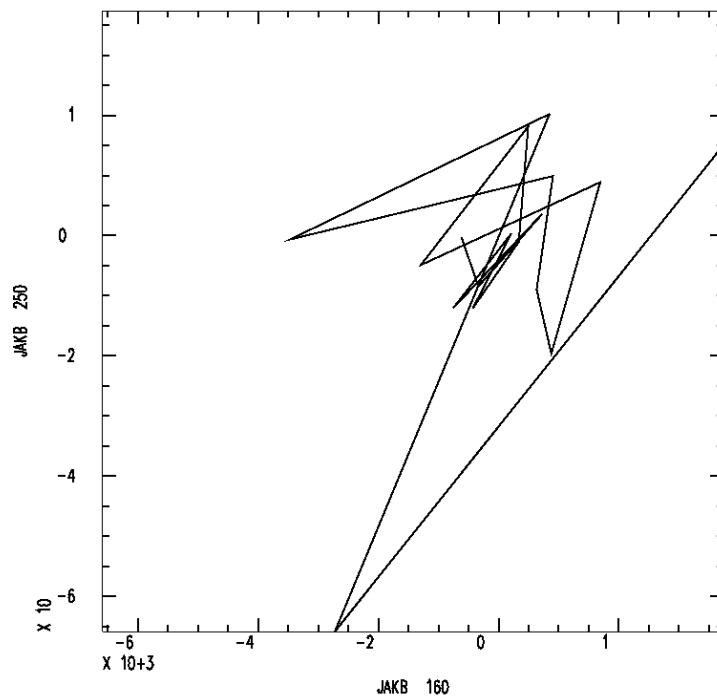


Imagem 60: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 21/05/2005 na hora 23:59:03,68

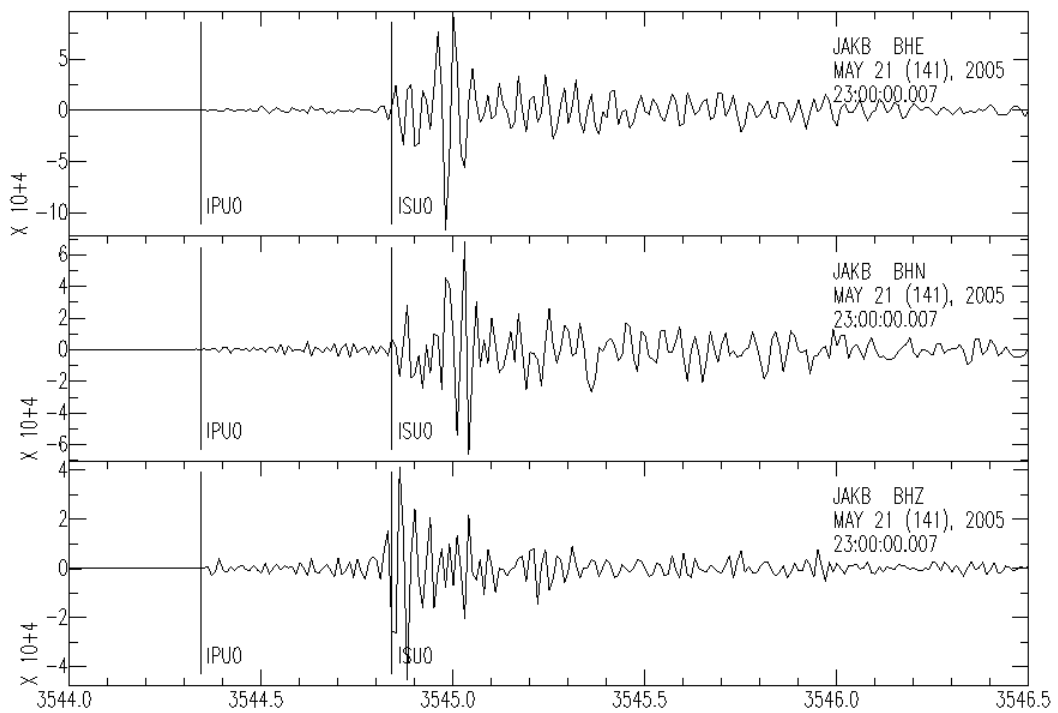


Imagem 61: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

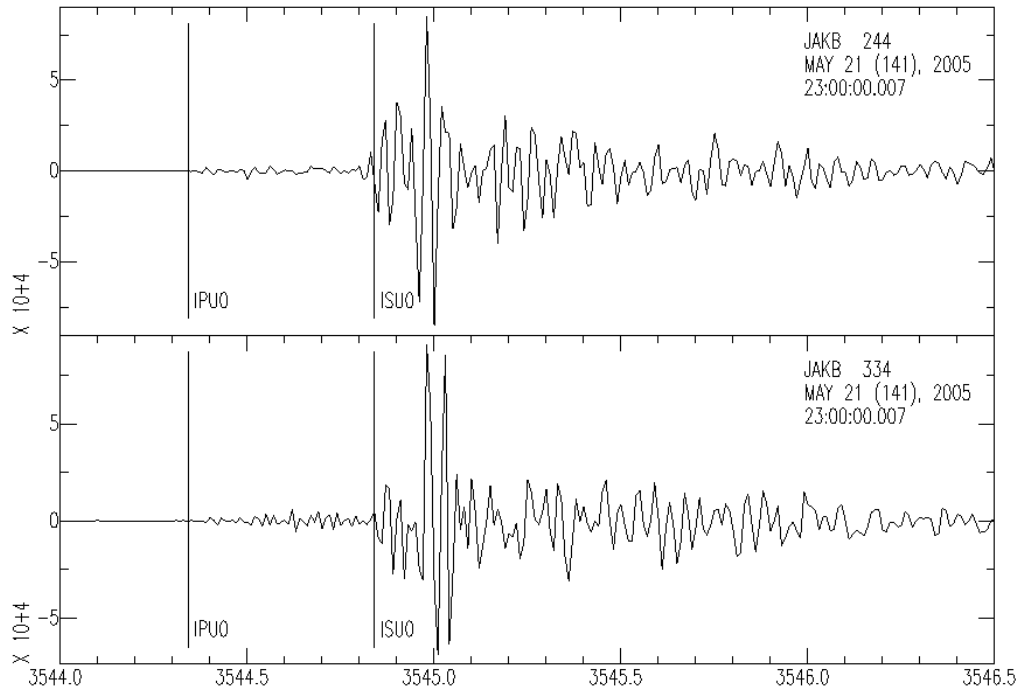


Imagem 62: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

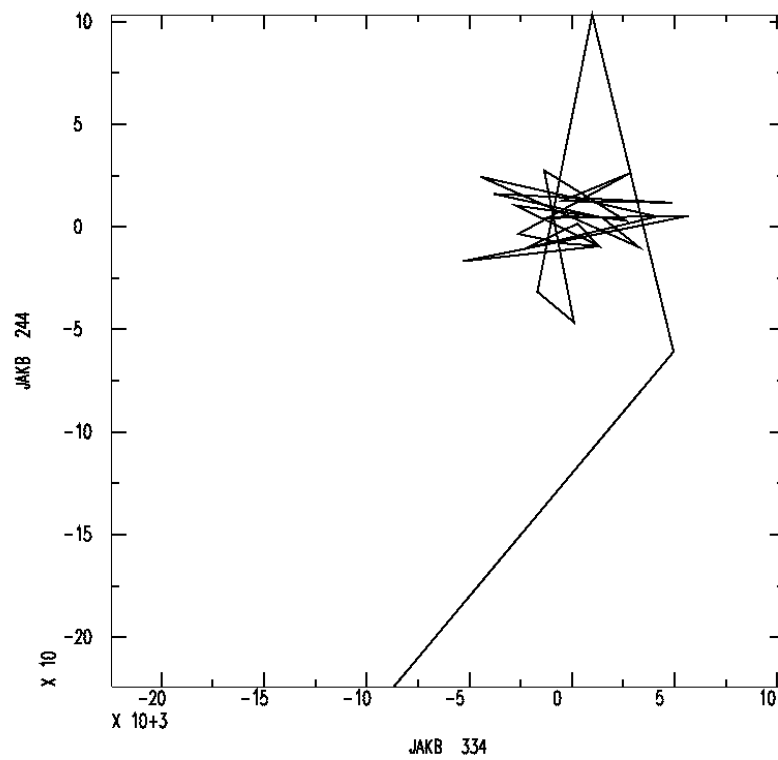


Imagem 63: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 270°.

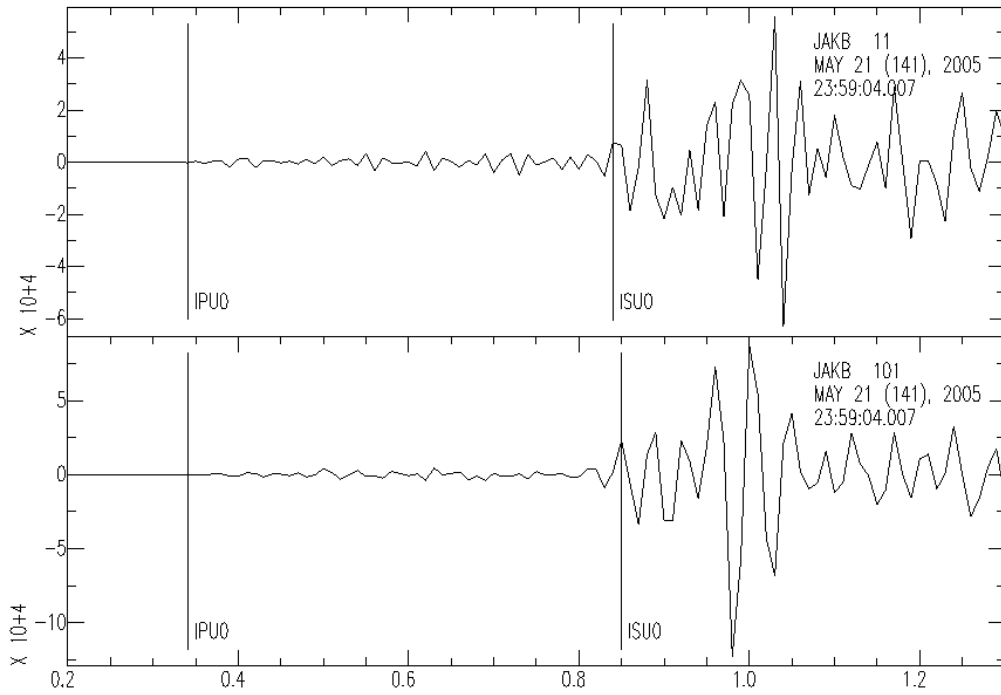


Imagem 64: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,02s

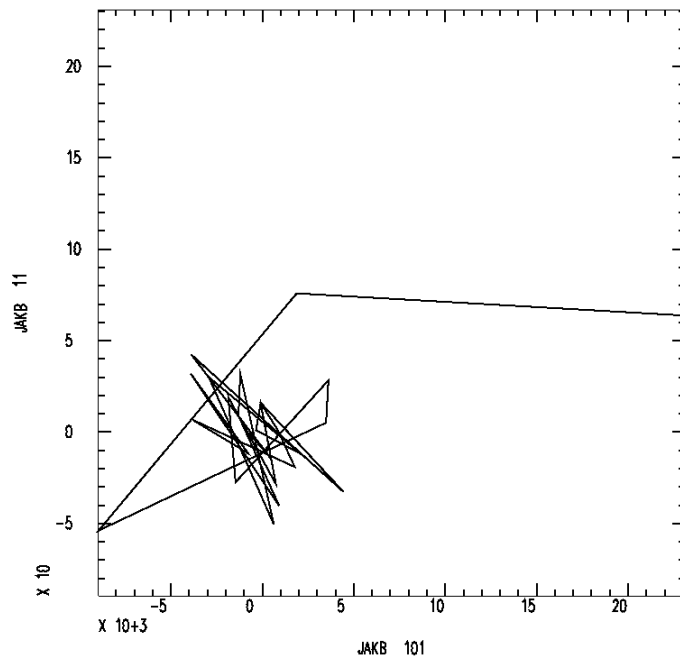


Imagem 65: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

## Estação PDRB

- Evento de 13/01/2010 na hora 02:06:52,00

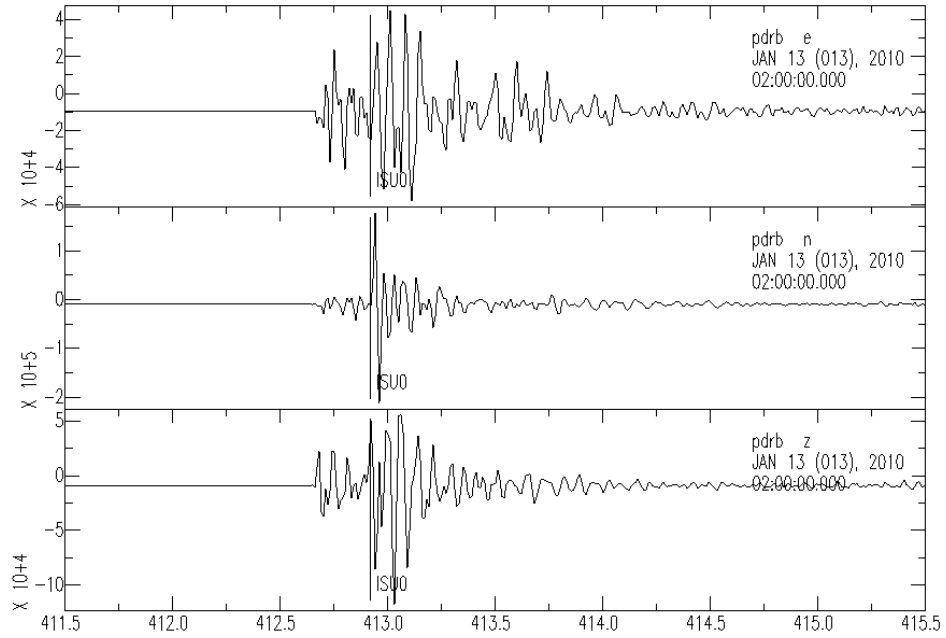


Imagem 66: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

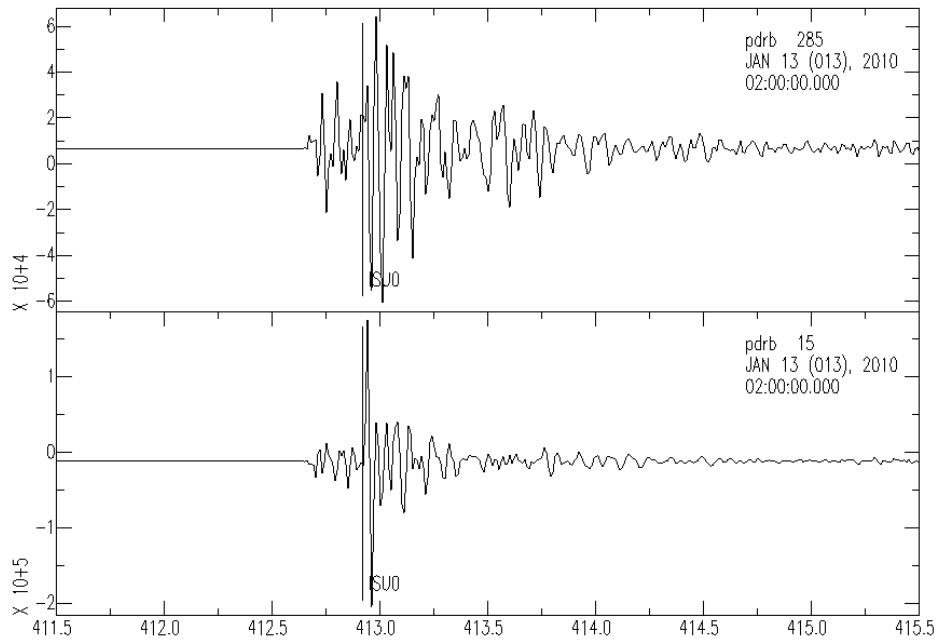


Imagem 67: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

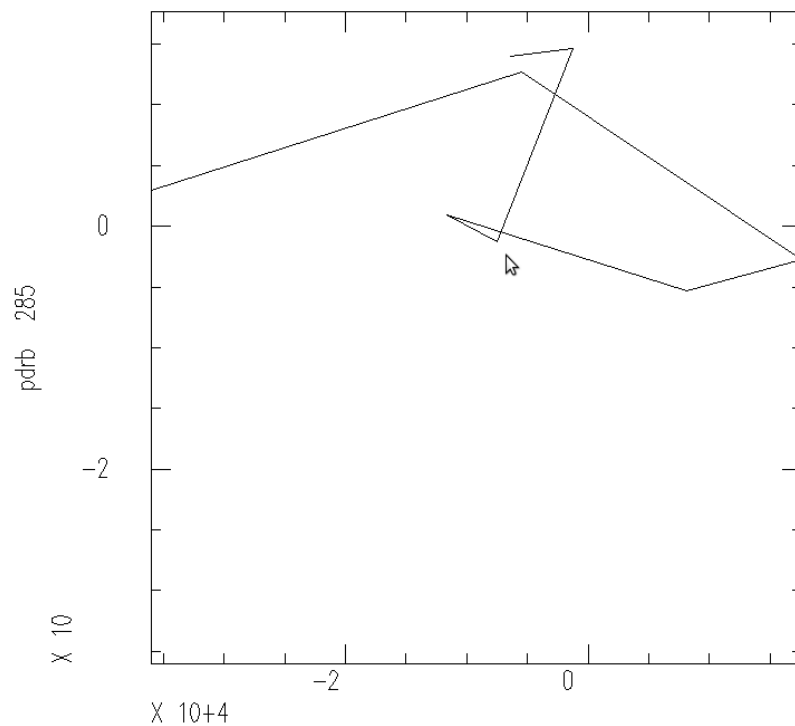


Imagem 68: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 21,46°.

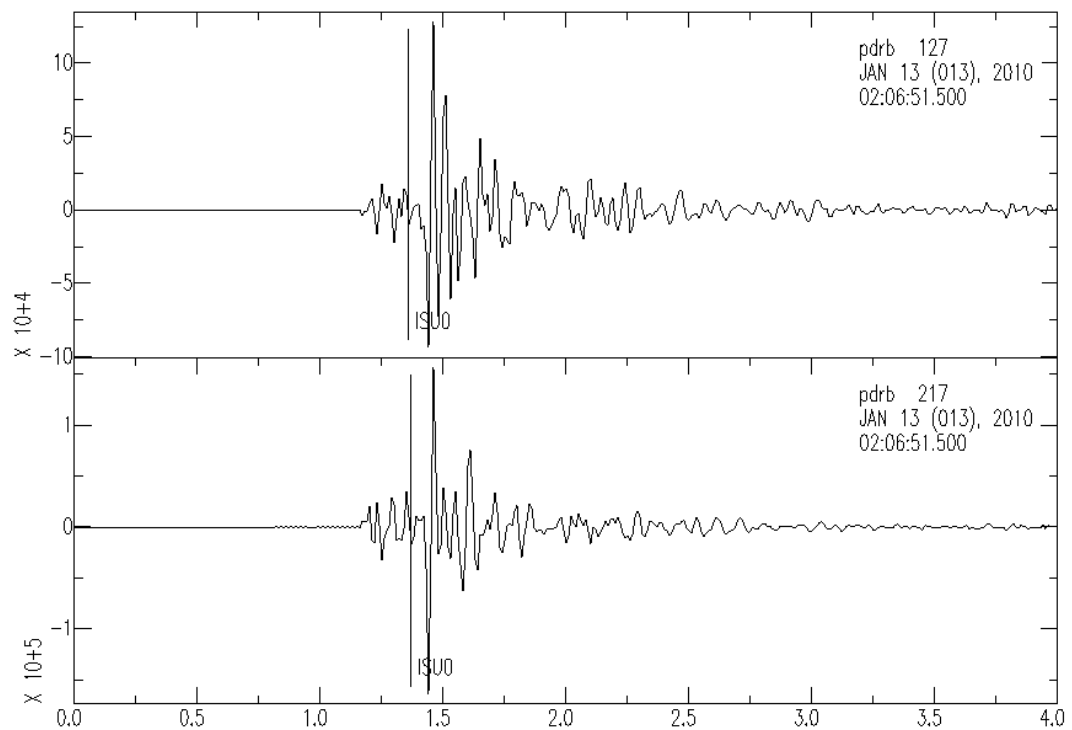


Imagem 69: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

- Evento de 17/01/2010 na hora 22:38:14,00

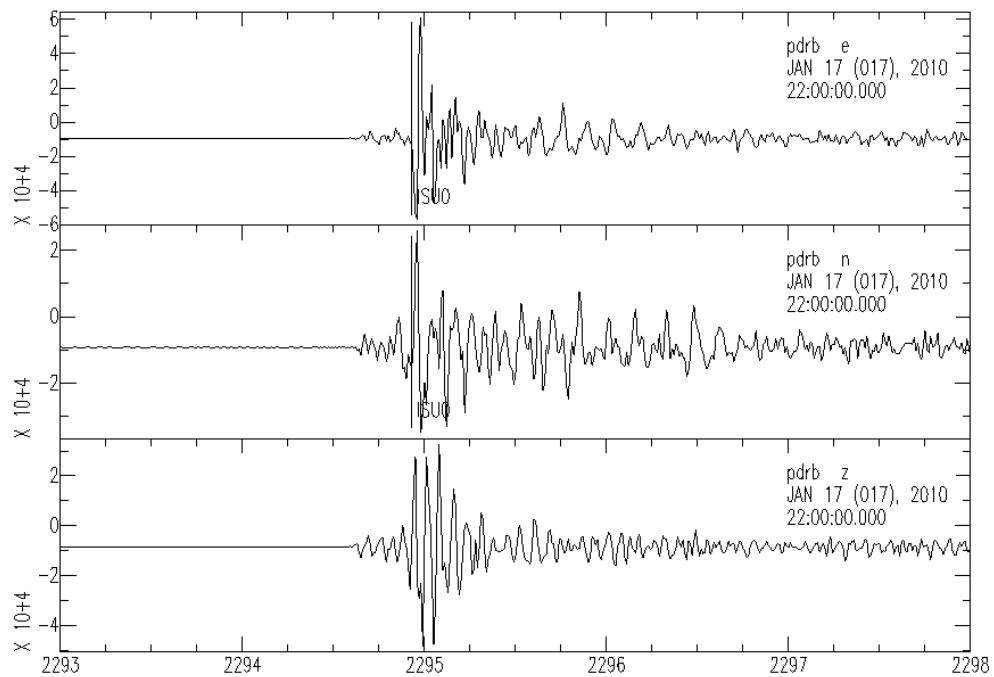


Imagem 70: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

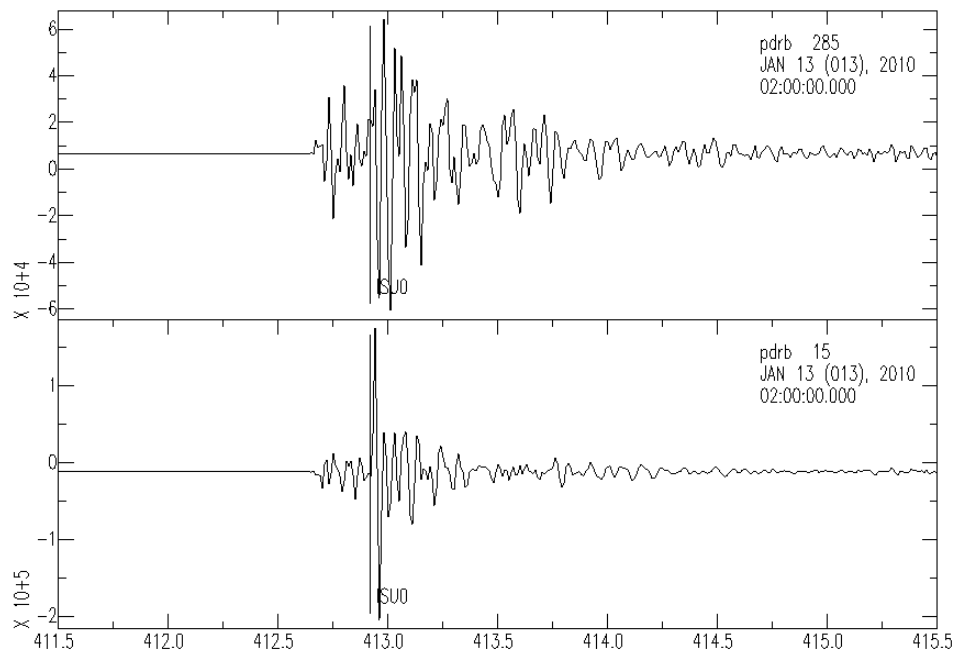


Imagem 71: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal



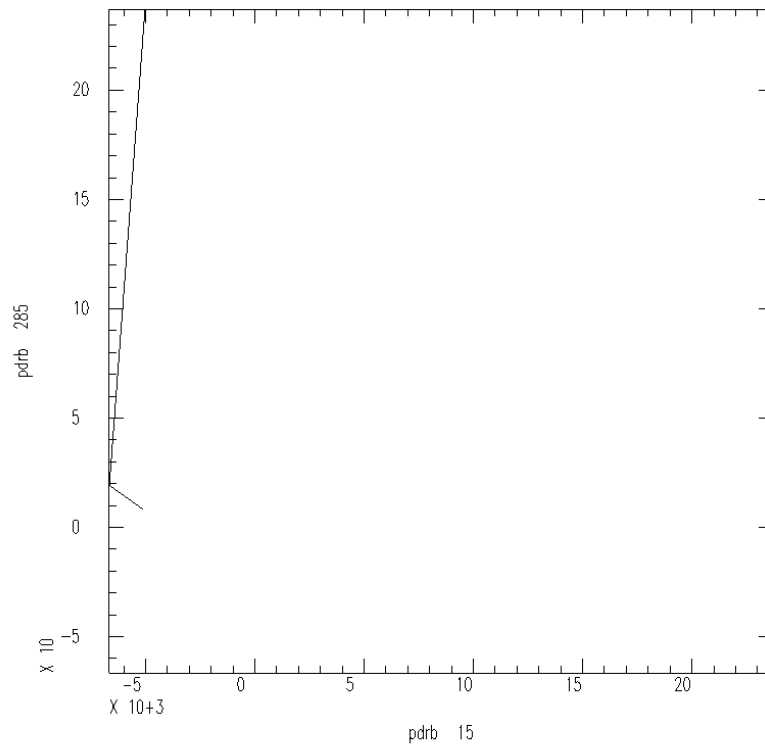


Imagem 72: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 4°.

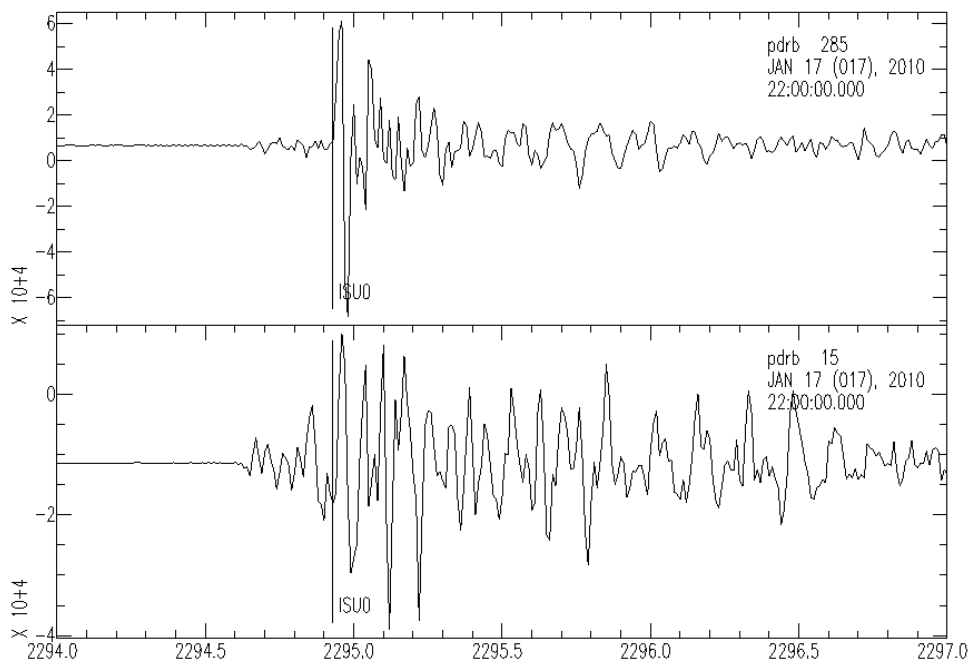


Imagem 73: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

- Evento de 01/02/2010 na hora 17:06:59,00

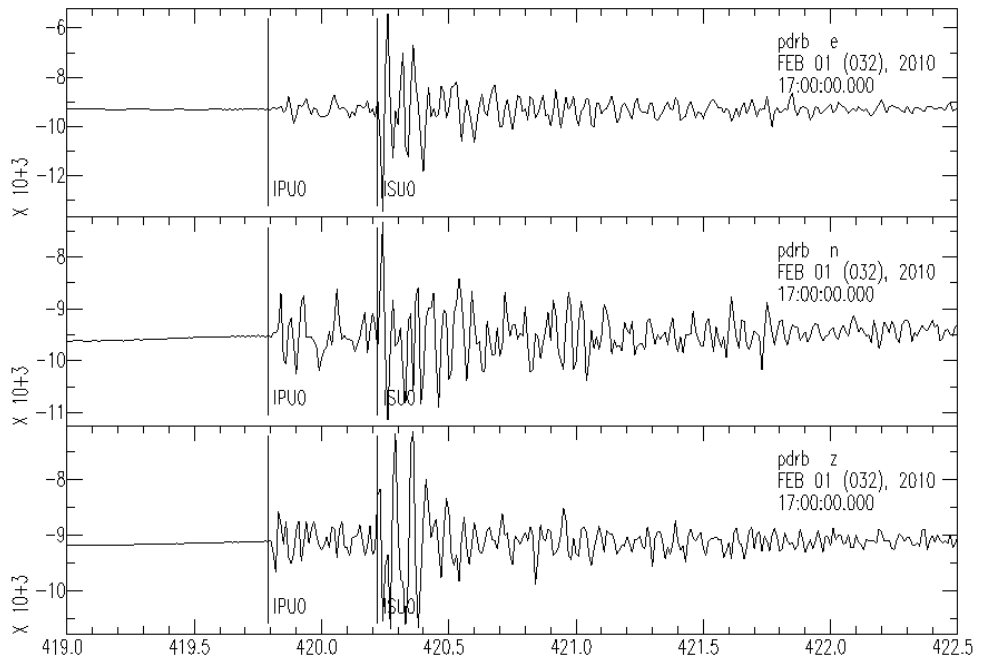


Imagem 74: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

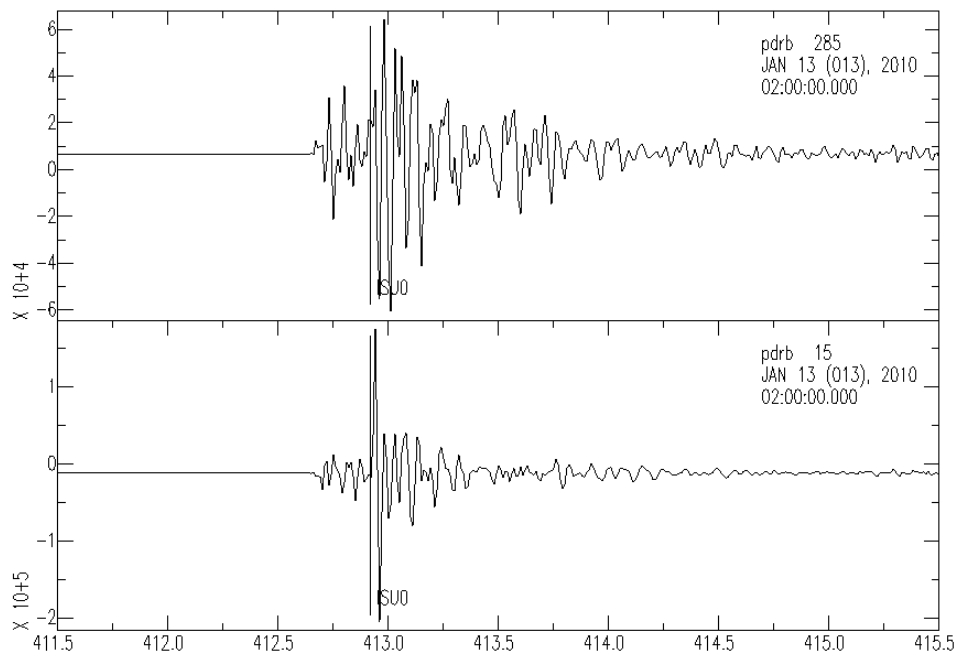


Imagem 75: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

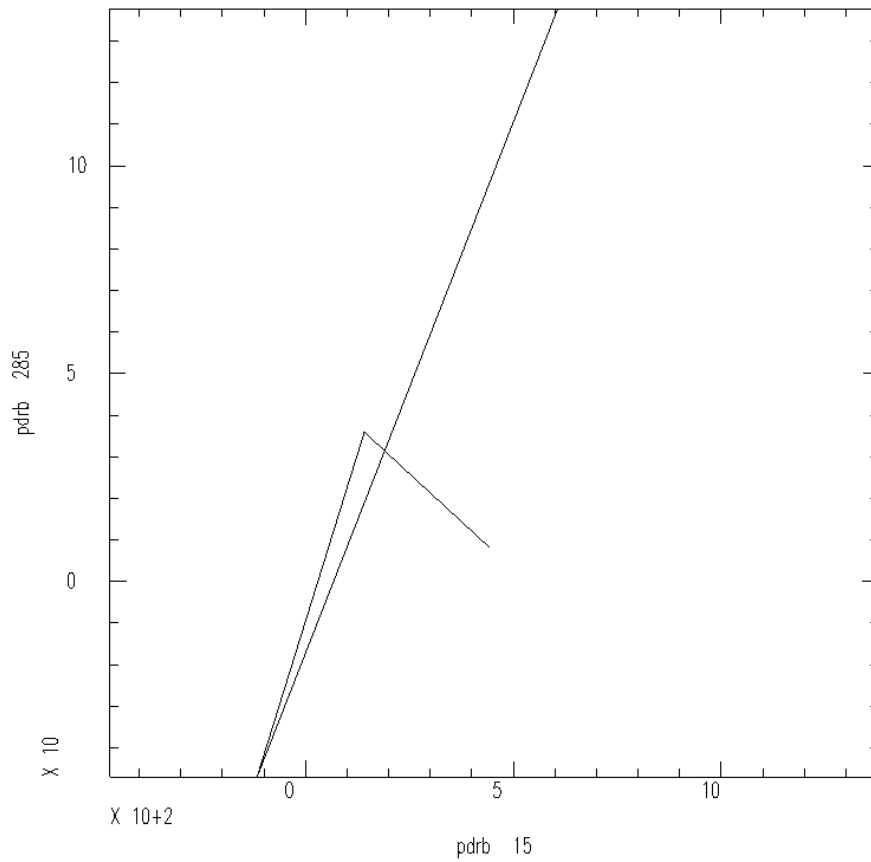


Imagem 76: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 48°.

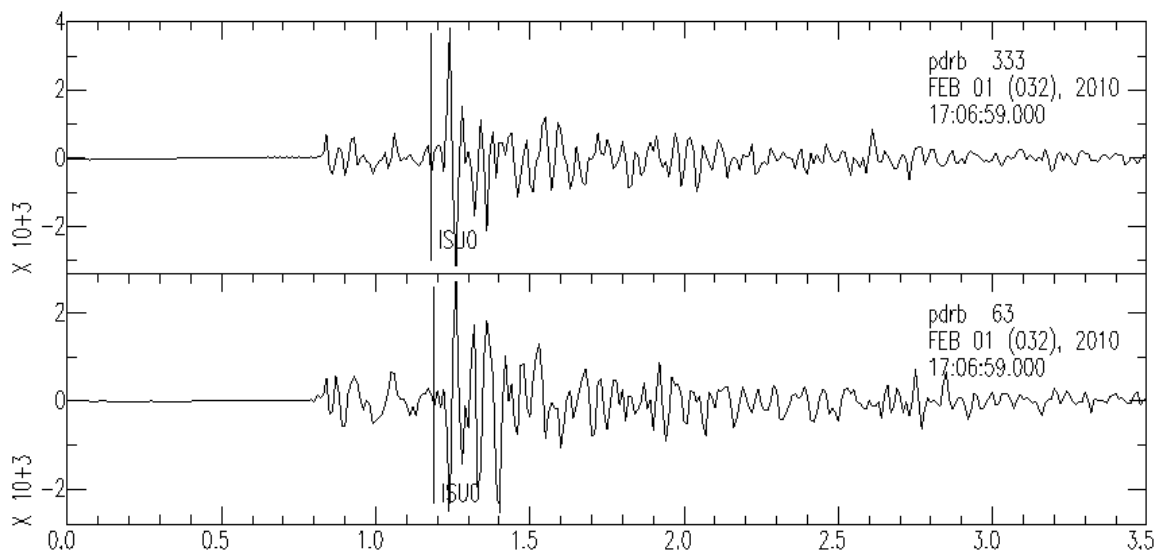


Imagem 77: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,02s

- Evento de 02/03/2010 na hora 01:46:36,00

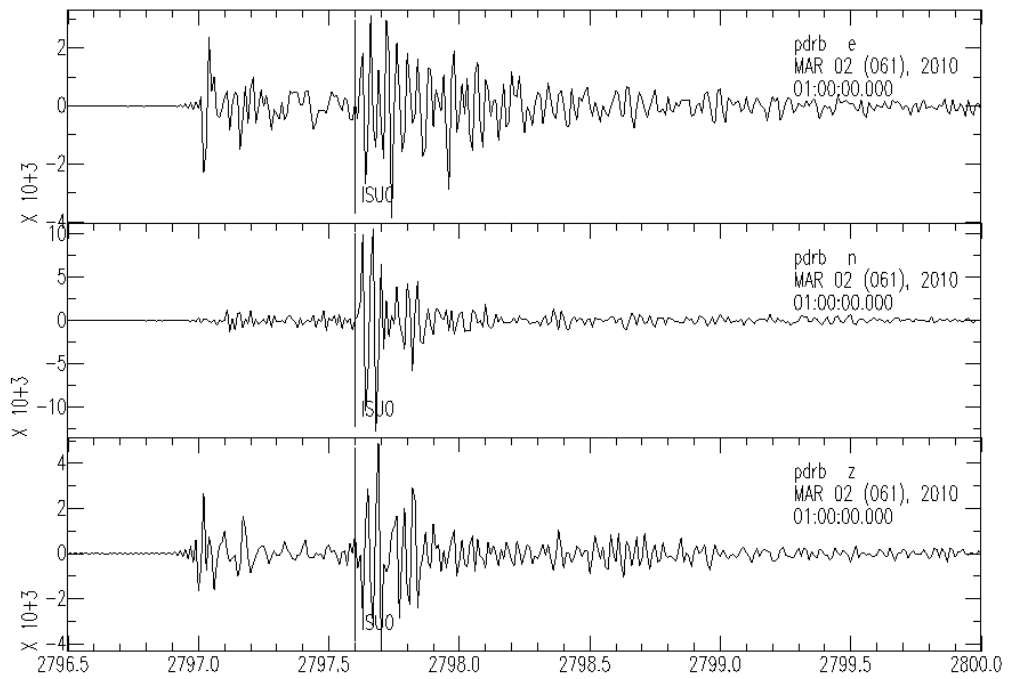


Imagem 78: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

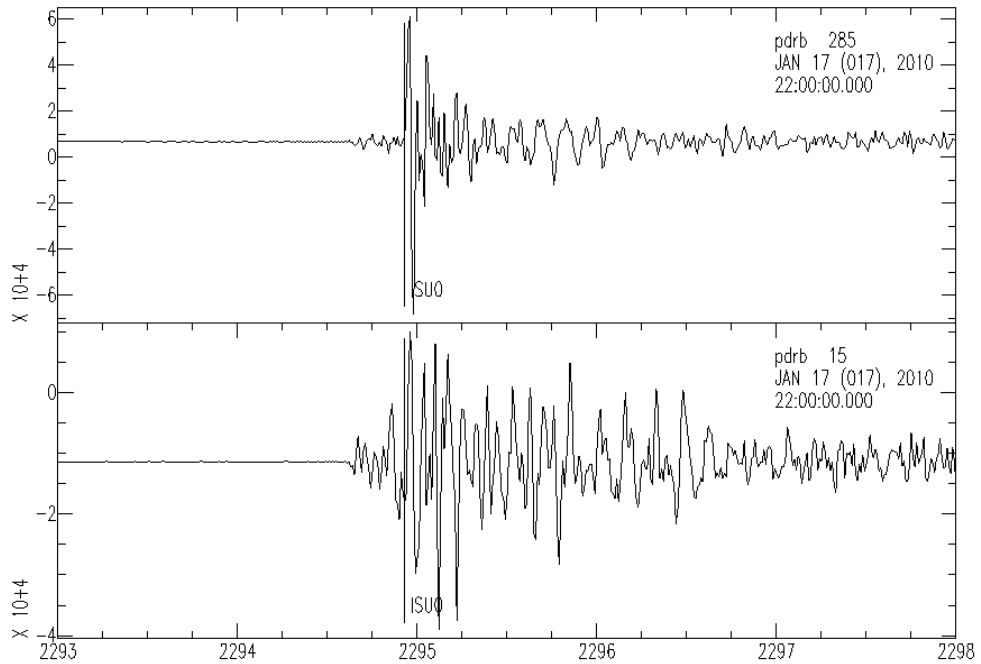


Imagem 79: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

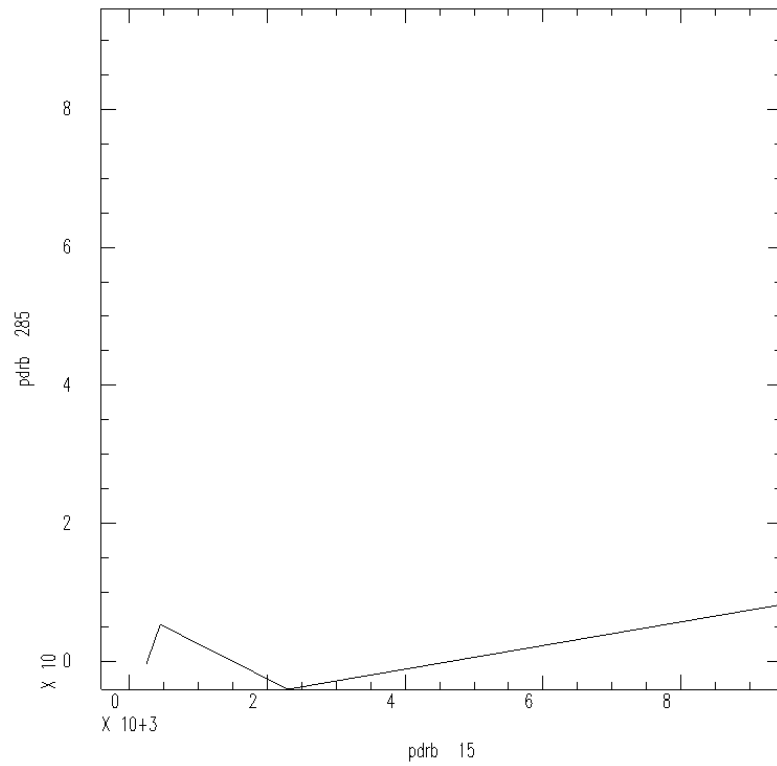


Imagem 80: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 347°.

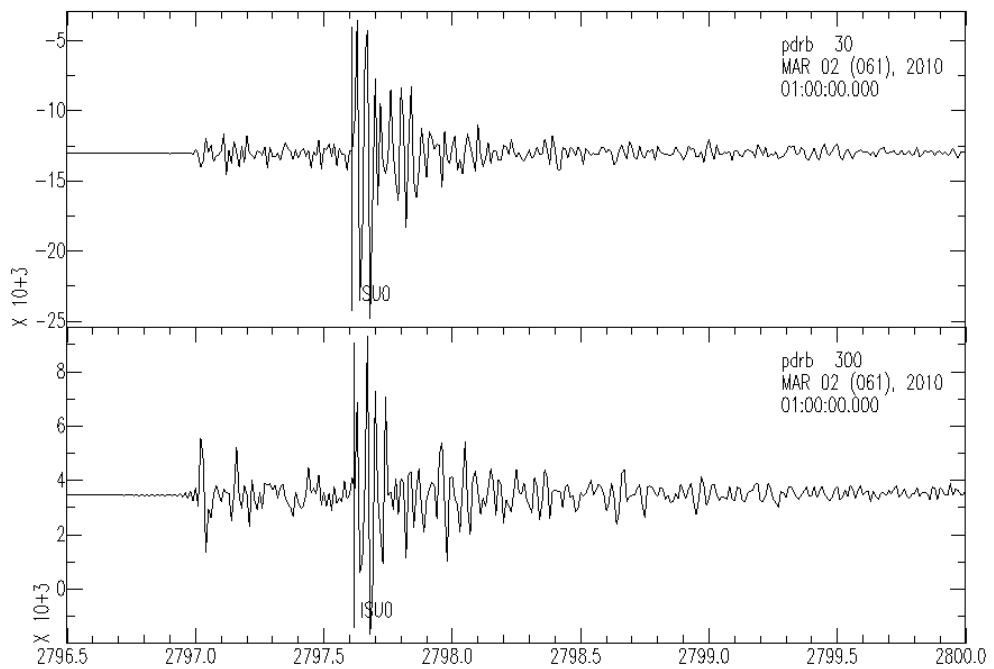


Imagem 81: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

## Estação FSJB

- Evento de 25/04/2005 na hora 03:57:00,71

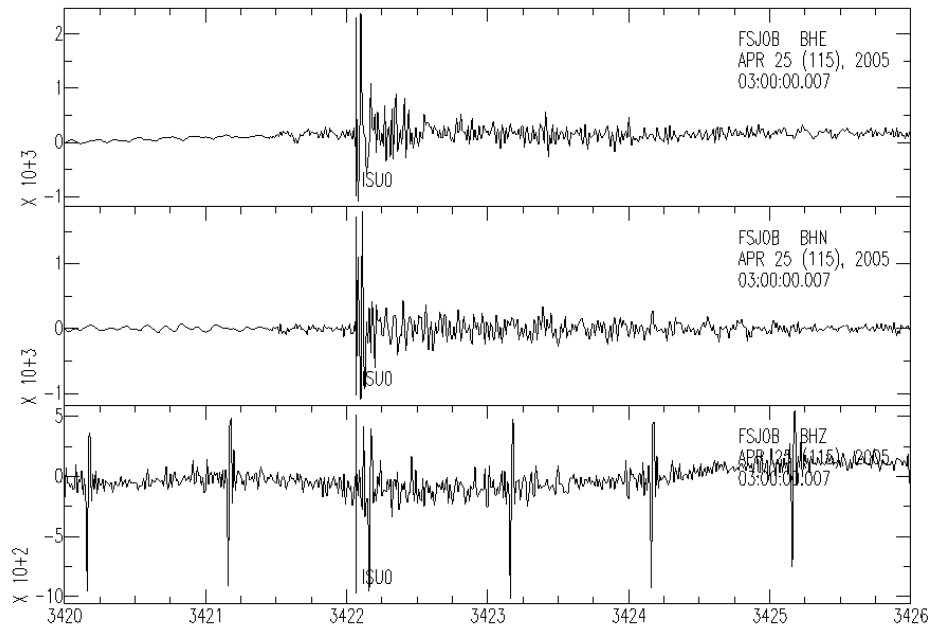


Imagem 82: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

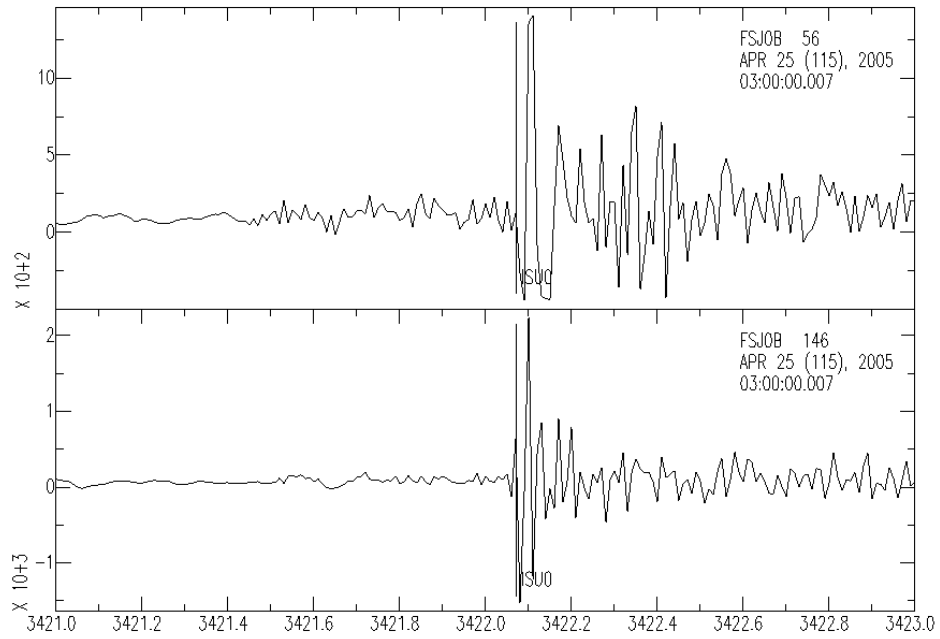


Imagem 83: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

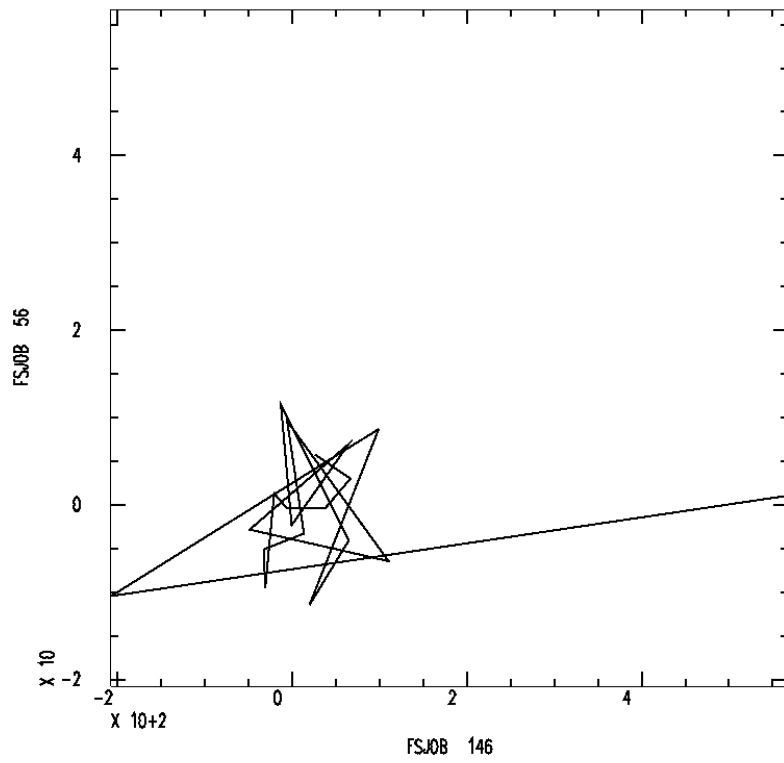


Imagem 84: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 301°.

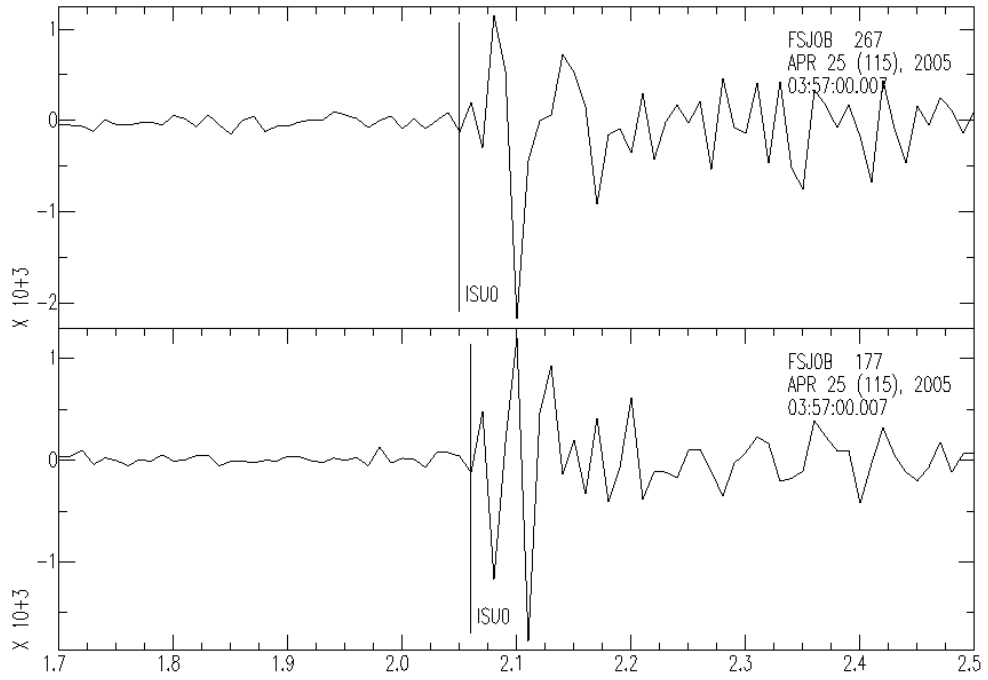


Imagem 85: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

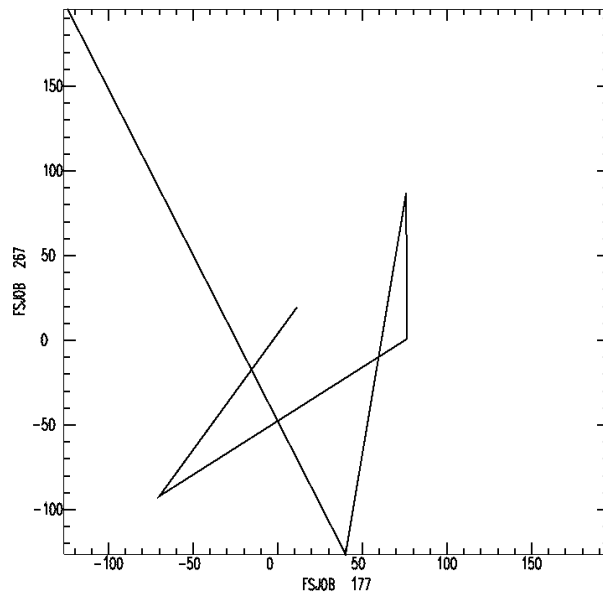


Imagem 86: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 25/04/2005 na hora 10:23:56,48



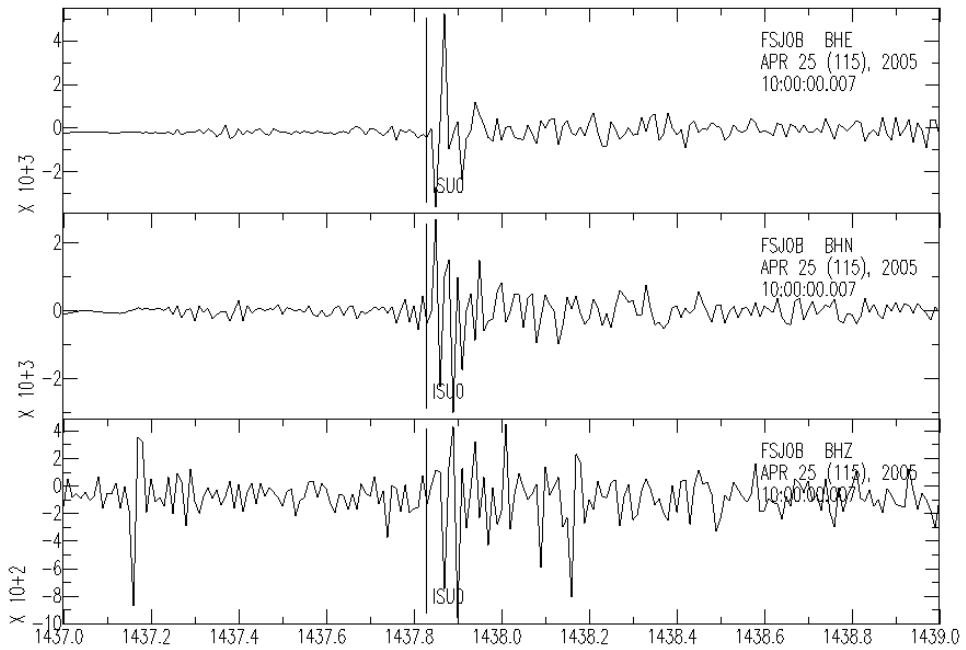


Imagem 87: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

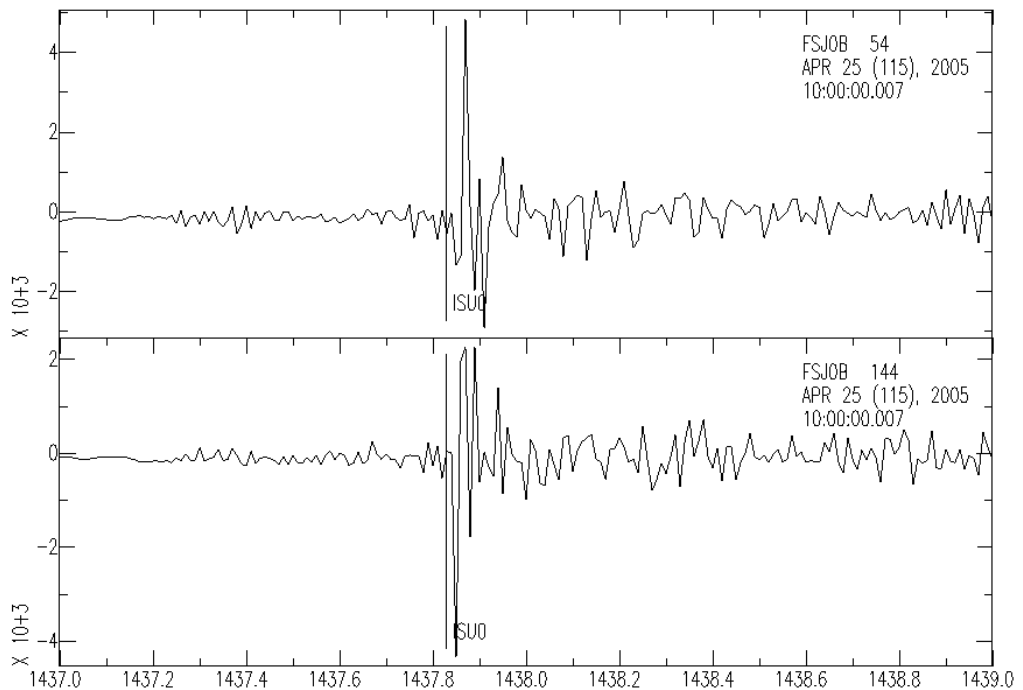


Imagem 88: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

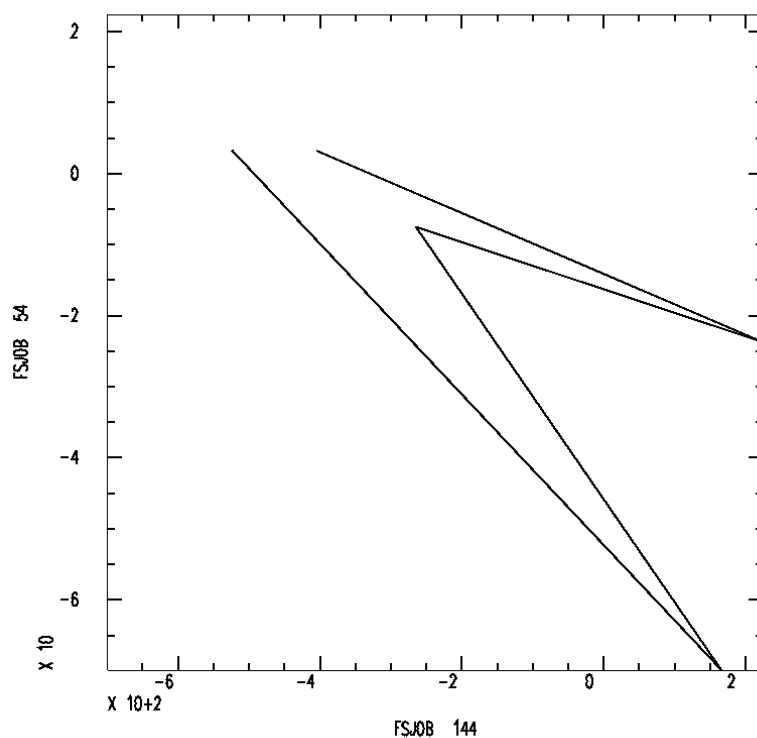


Imagem 89: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 103,78°.

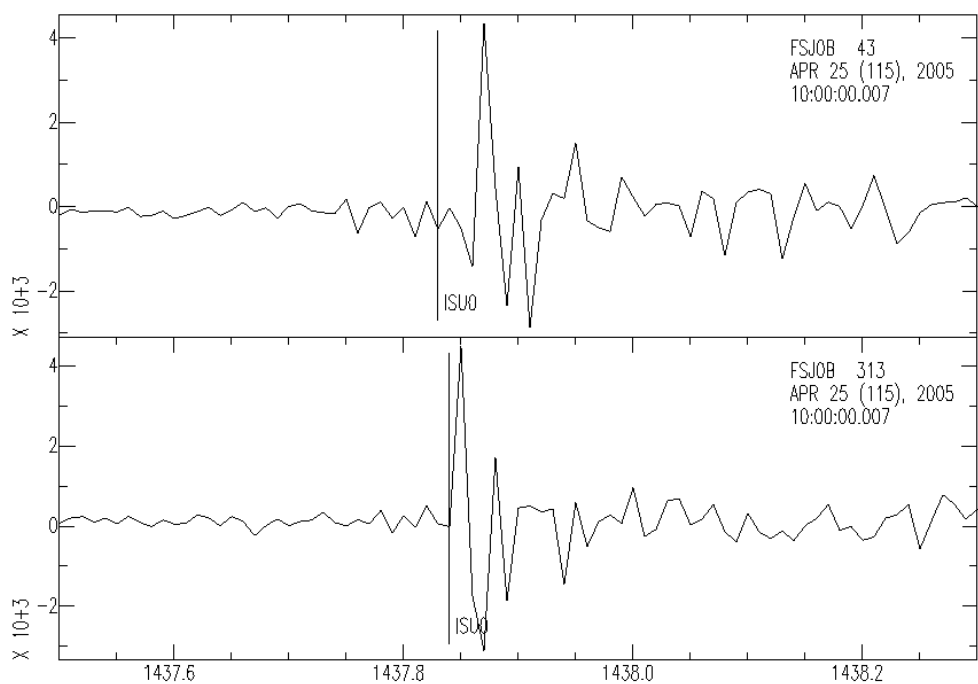


Imagem 90: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento,

com tempo de atraso 0,02s

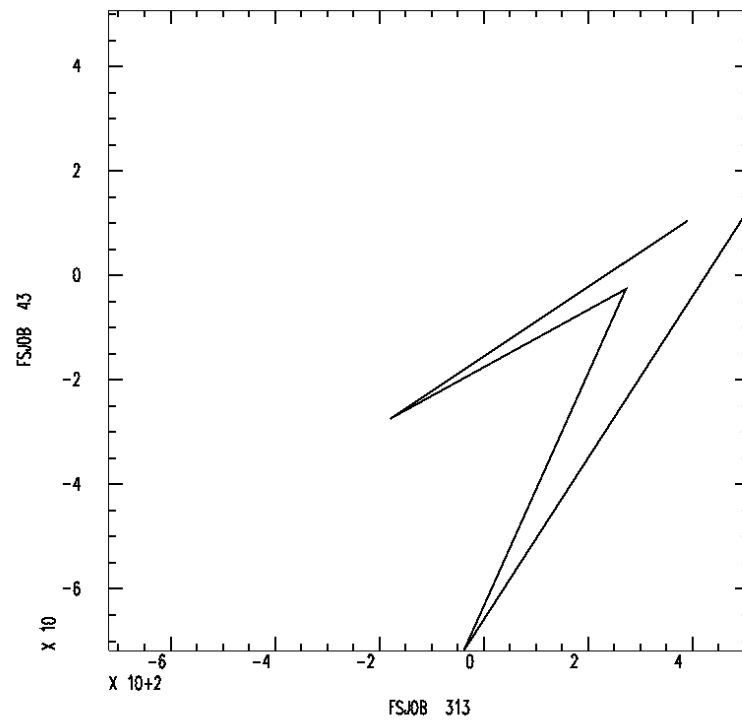


Imagem 91: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 29/04/2005 na hora 13:10:02,01

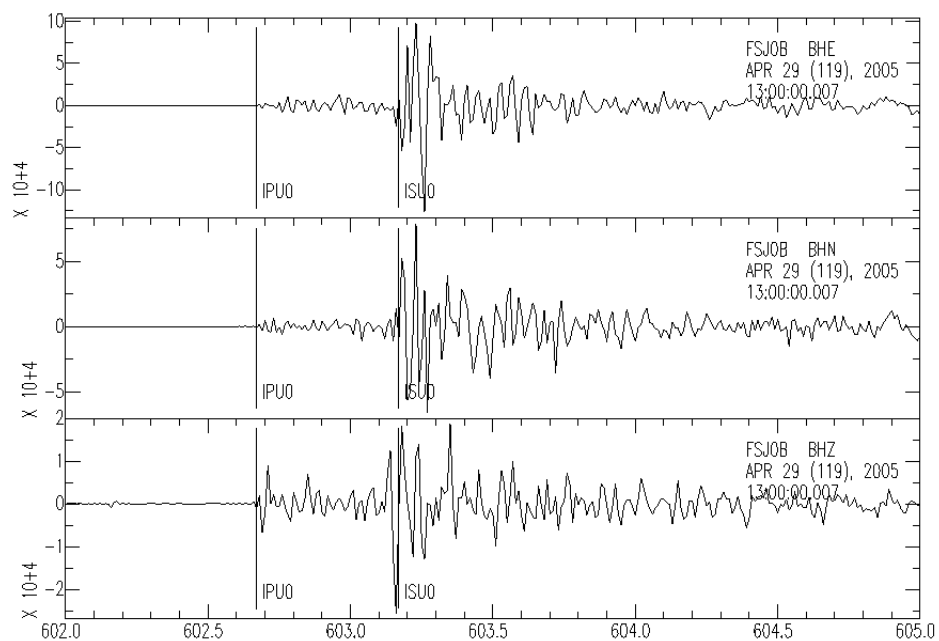


Imagem 92: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

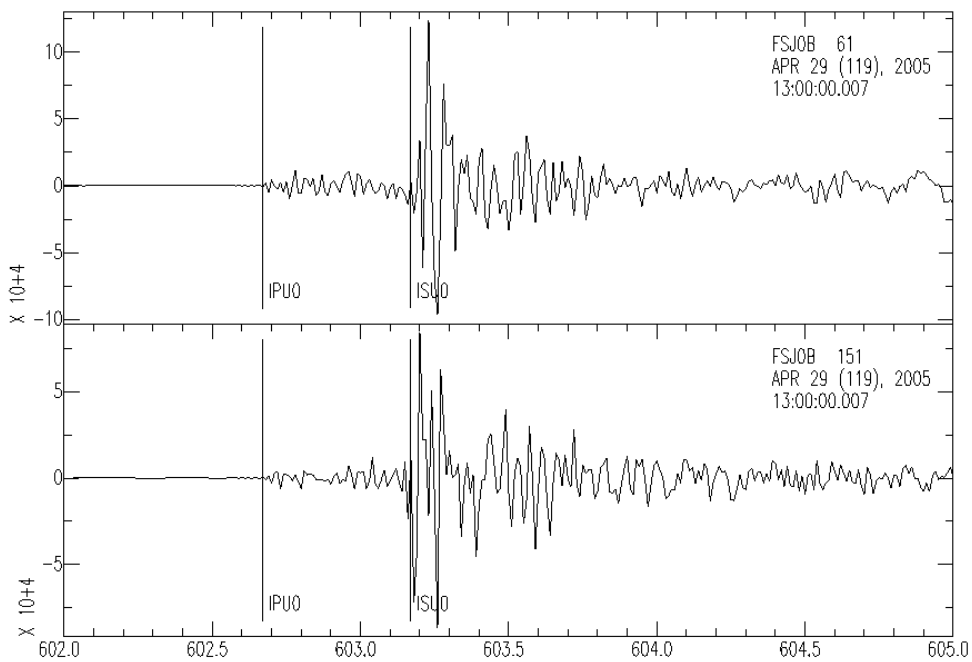


Imagem 93: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

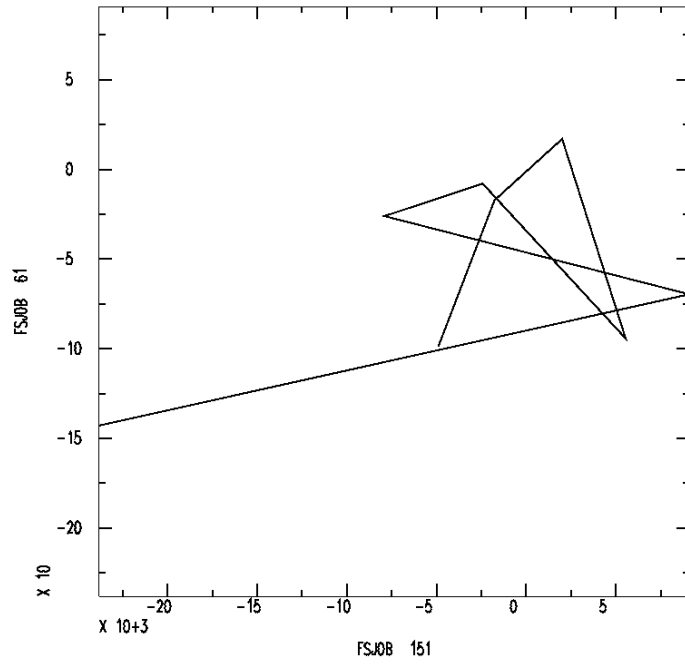


Imagem 94: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 111,05°.

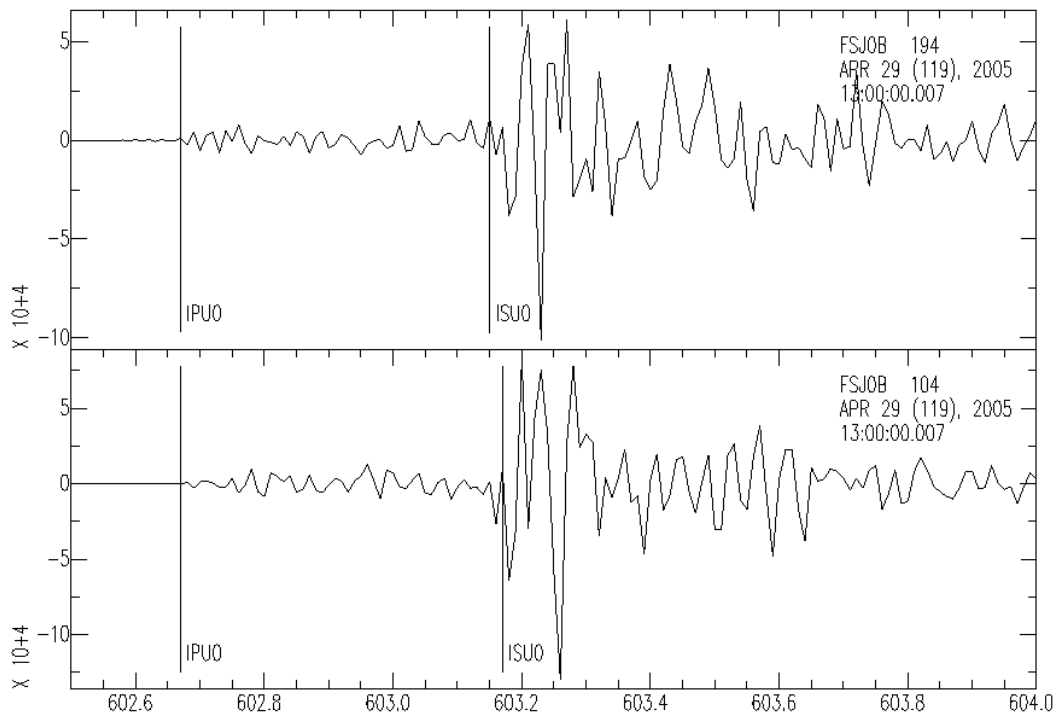


Imagem 95: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

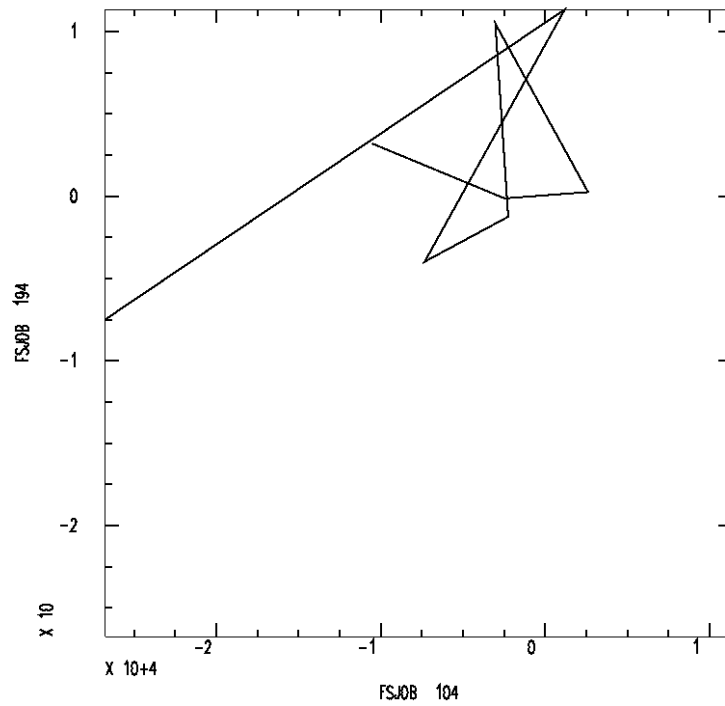


Imagem 96: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 29/04/2005 na hora 14:06:30,12

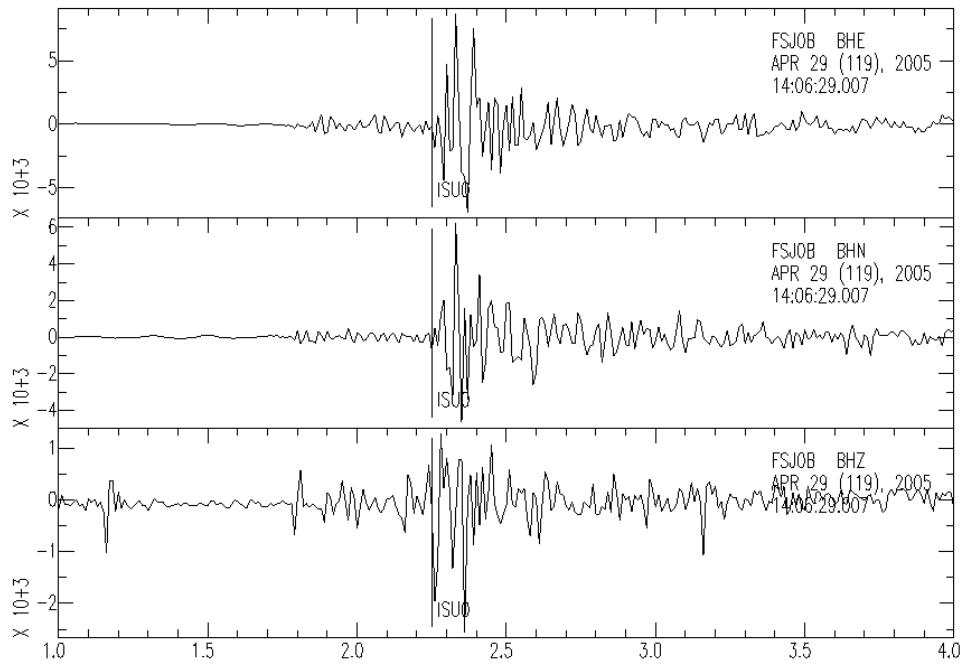


Imagem 97: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

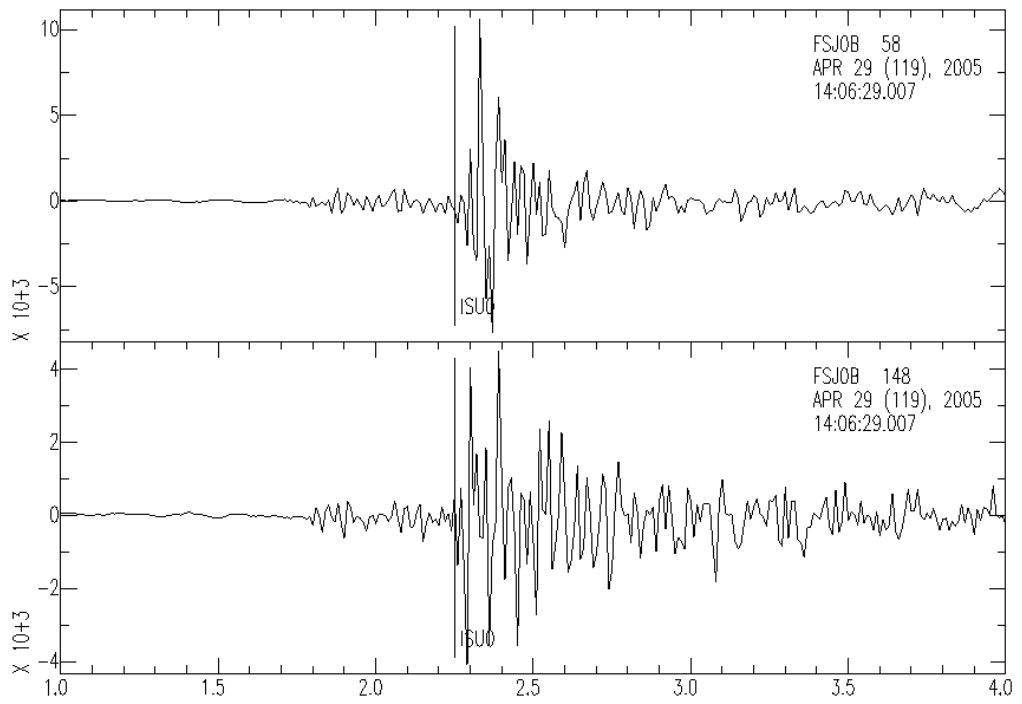


Imagem 98: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

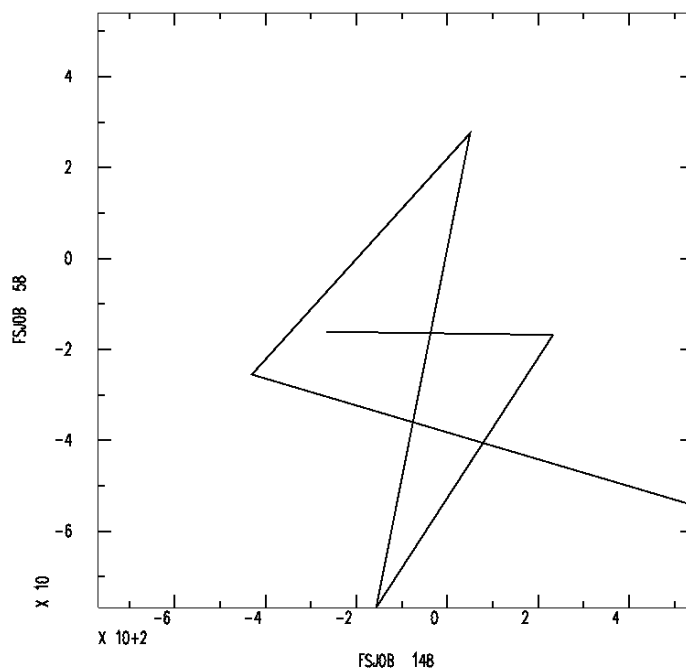


Imagem 99: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização  $256,04^\circ$ .

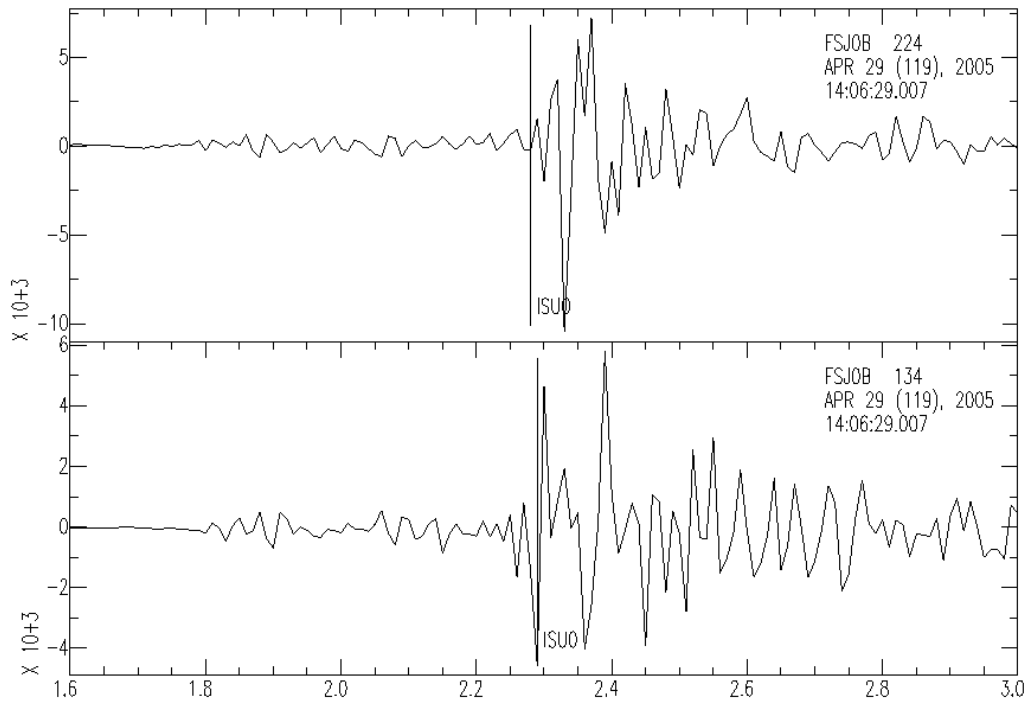


Imagem 100: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

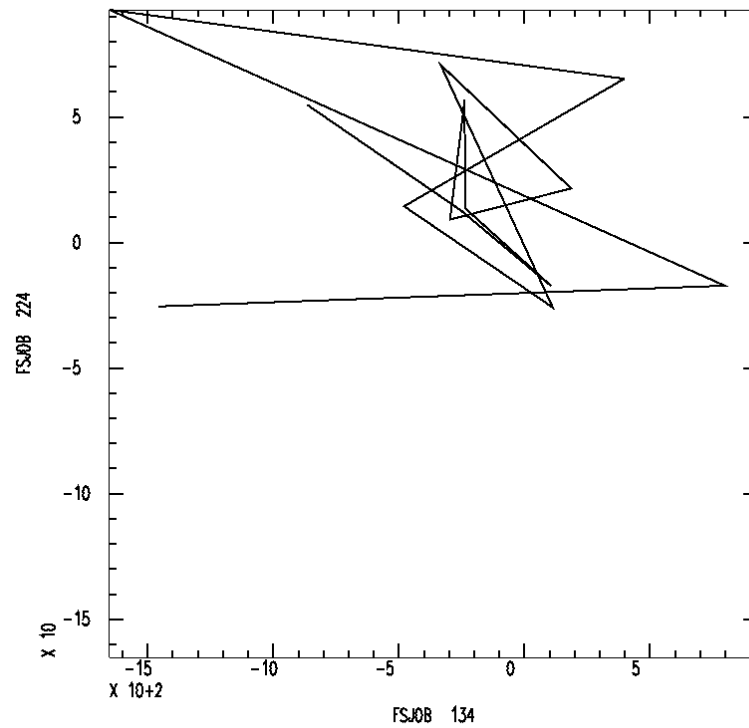


Imagem 101: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização



- Evento de 04/05/2005 na hora 15:47:50,83

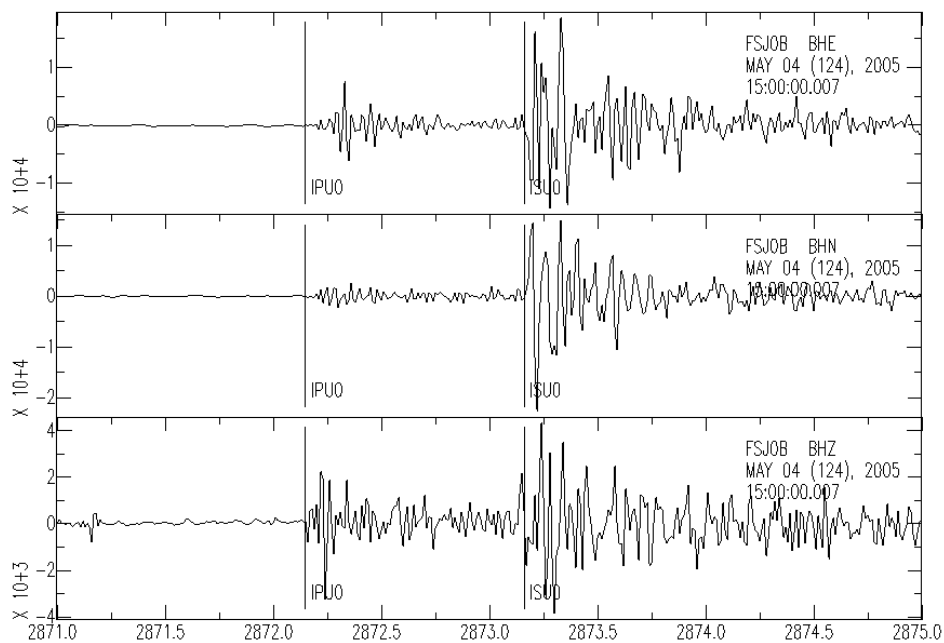


Imagem 102: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

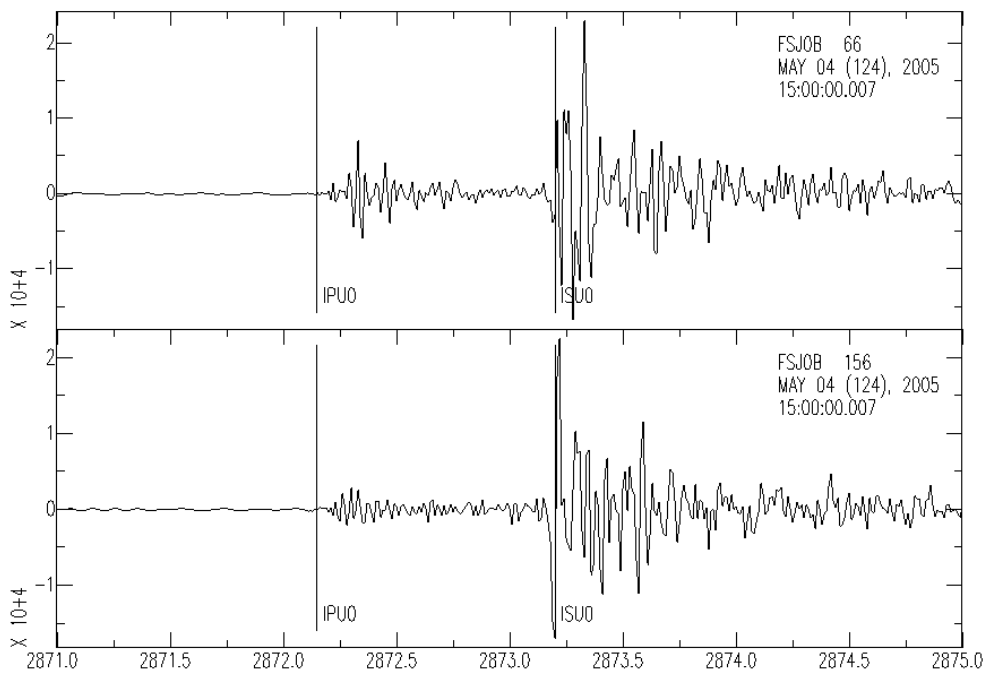


Imagem 103: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

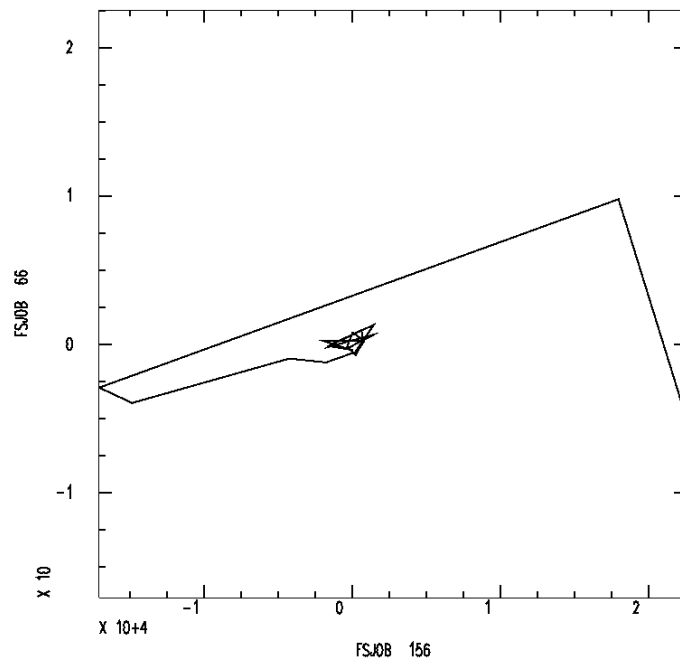


Imagem 104: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 265,29°.

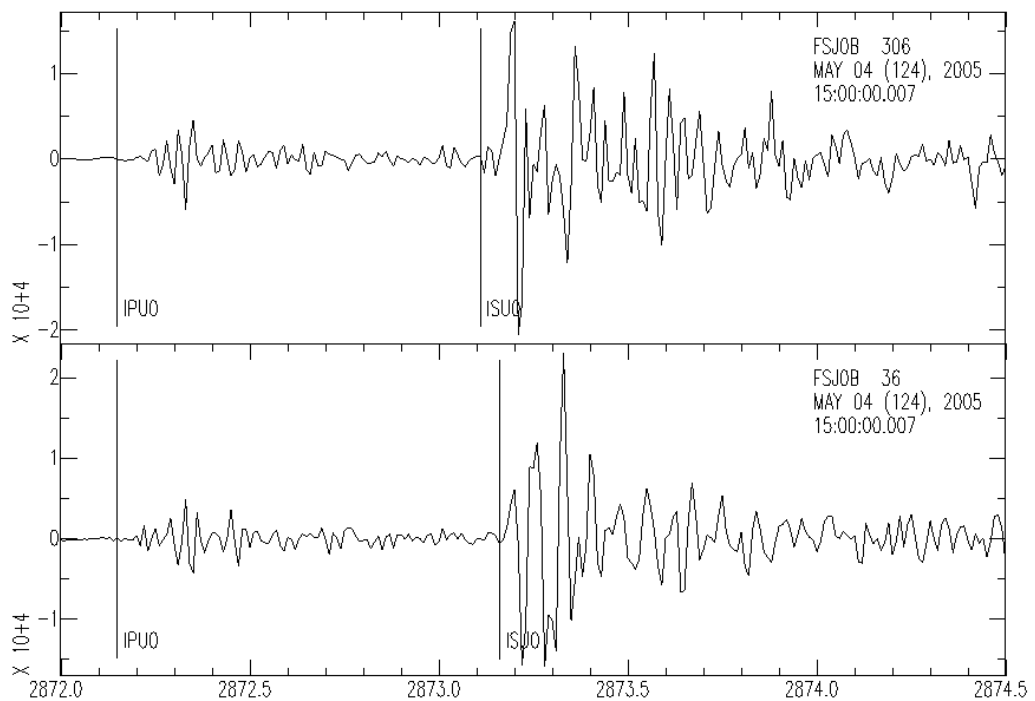


Imagem 105: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

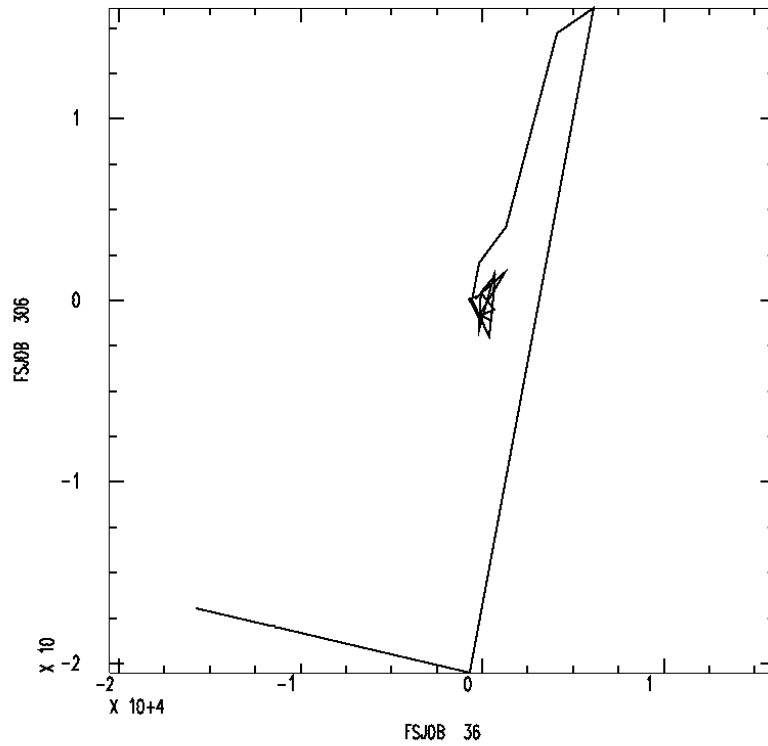


Imagem 106: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização

- Evento de 08/05/2005 na hora 07:25:21,18

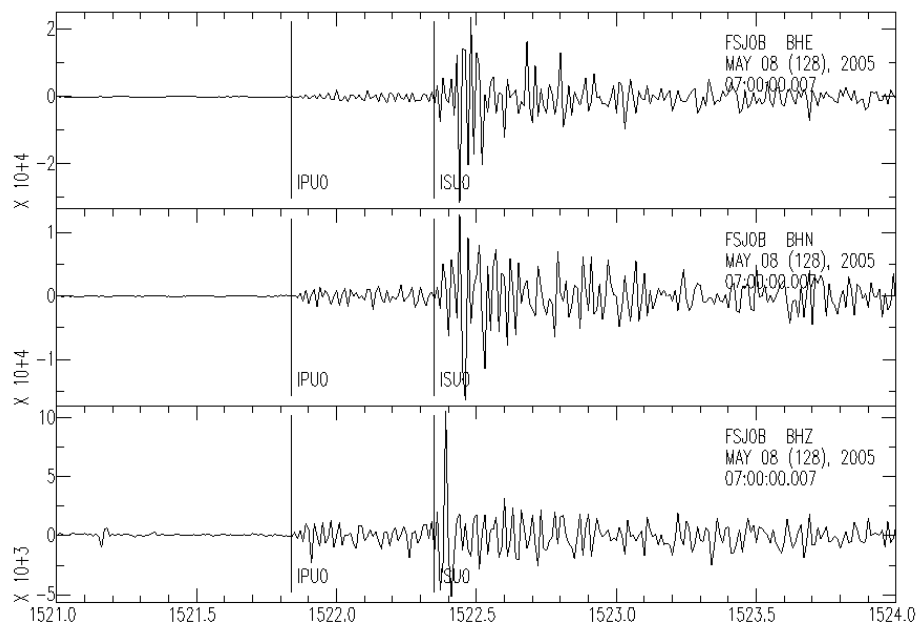


Imagem 107: Dados na coordenada Leste-Oeste, Norte-Sul e Vertical

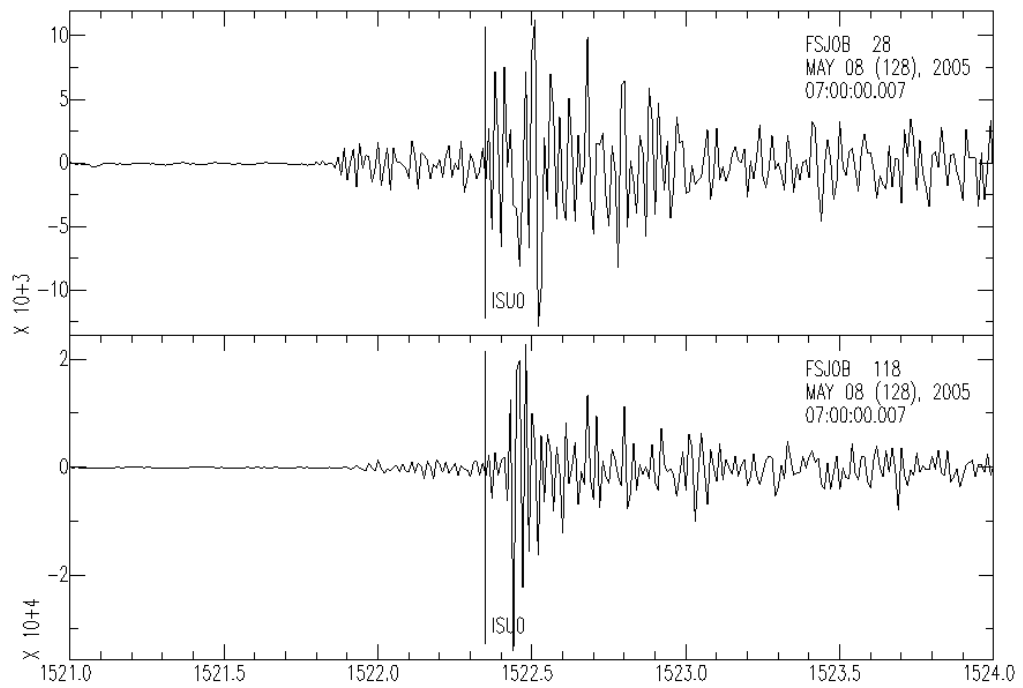


Imagem 108: Dados horizontais nas coordenadas radial e transversal

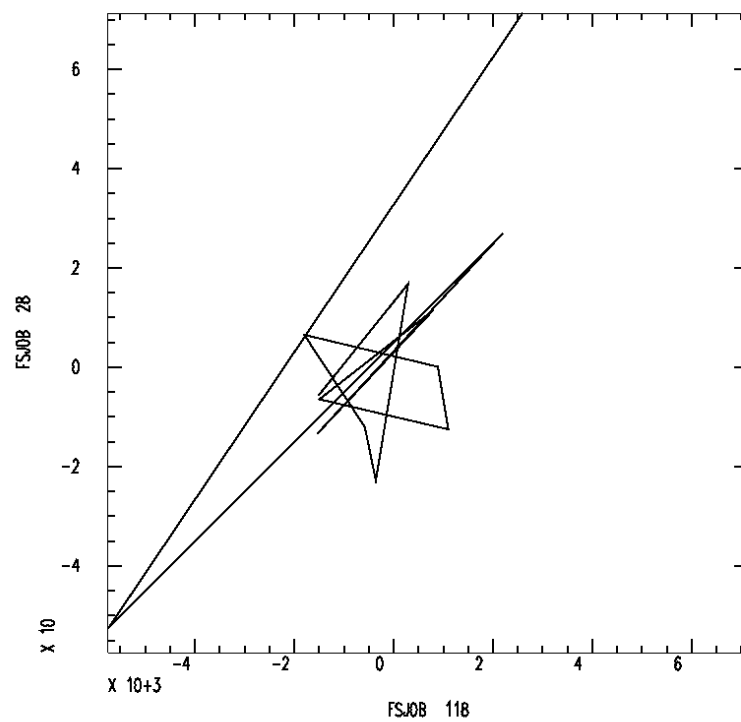


Imagem 109: Diagrama do Movimento de Partícula das coordenadas radial e transversal, com polarização 141,95°.

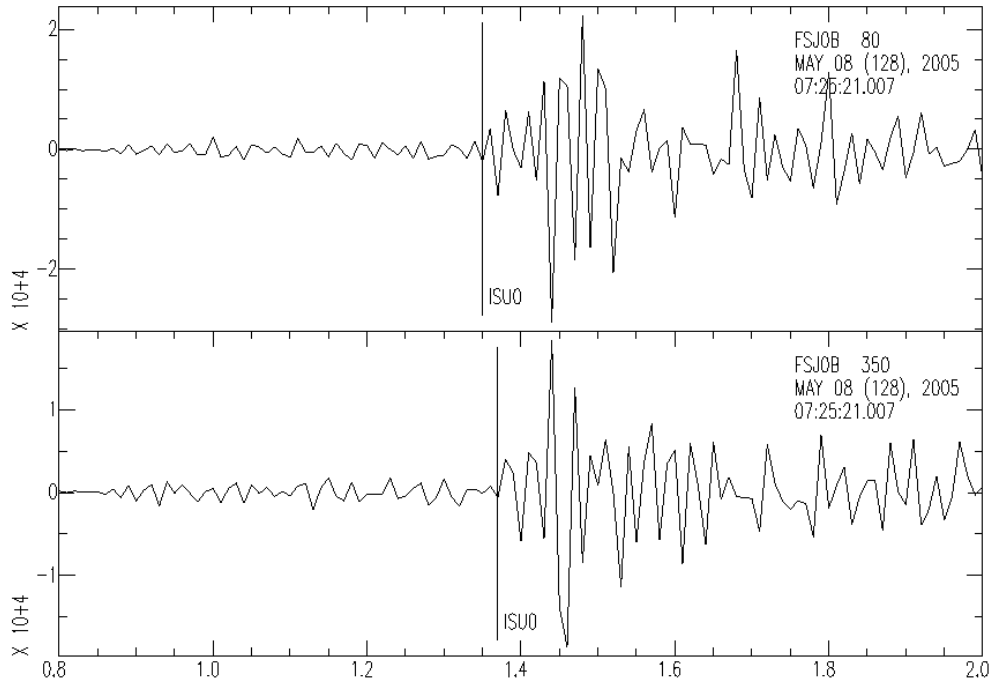


Imagem 110: Dados rotacionados na direção de polarização, apresentando a divisão da onda de cisalhamento, com tempo de atraso 0,01s

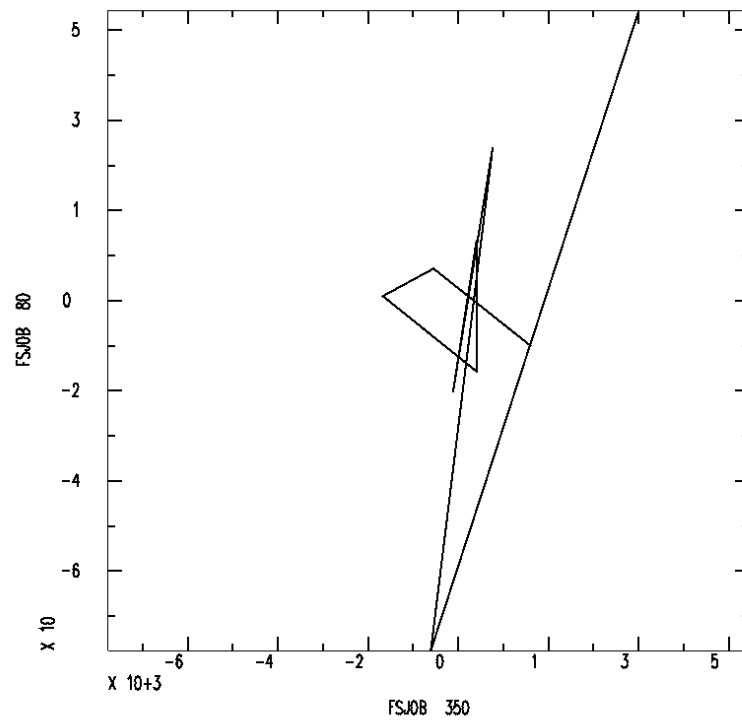


Imagem 111: Movimento de partícula após a rotação na direção da polarização