



## Processamento e interpretação de dados 3D de GPR: Aplicação na localização de estruturas de dissolução e colapso na ETO/ETE do campo de Fazenda Belém-Bacia Potiguar.

\*Pedro Xavier Neto <sup>1</sup>, [pedroxavier@petrobras.com.br](mailto:pedroxavier@petrobras.com.br), e Walter Eugênio de Medeiros <sup>2,3</sup>, [walter@dfe.ufrn.br](mailto:walter@dfe.ufrn.br)

1- PETROBRAS/UN-RNCE/ATEX/PS, Natal, RN.

2- Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica – PPGG/UFRN, Natal, RN.

3- Depto. de Física Teórica e Experimental– UFRN/CCET, Natal, RN.

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper was reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Resumo

Na área da ETO / ETE (estação de tratamento de óleo/efluentes) do campo de Fazenda Belém – Ce, é comum o surgimento de feições erosivas em superfície, de forma circular ou alongada que provocam perda de volumes expressivos de solo. Estas feições, a depender do seu porte e da profundidade, podem comprometer as estruturas superficiais, tais como edificações, paredes de diques, tanques, postes, etc. A partir da necessidade de conhecer em detalhe a morfologia e a área de ocorrência dessas feições, foi realizado um levantamento 3D com GPR (*ground penetrating radar*) objetivando investigar a presença de estruturas de dissolução em uma área de tancagem da ETO/ETE.

Os resultados mostram a presença de ravinas alongadas, associadas a fraturas, e permite orientar as ações mitigadoras que devem ser adotadas para preservar a integridade estrutural dos tanques da ETO/ETE.

### Introdução

O campo de Fazenda Belém localiza-se na porção oeste da Bacia Potiguar terrestre. A região caracteriza-se por uma topografia bastante plana, sendo recoberta pelo Barreiras, e por sedimentos Quaternários. Subjacente ao Barreiras ocorre o calcário da Formação Jandaíra (Cretáceo) cujo topo, muito irregular, reflete uma paleo-topografia associada a processos de karstificação

No campo de Fazenda Belém existe uma unidade industrial de tratamento de óleo e efluentes (ETO / ETE). Na ETO/ETE, e em vários locais no campo, existem históricos de colapsos de terreno associados à dissolução do substrato calcário, que na área é recoberto por sedimentos da Formação Barreiras, com espessuras que variam de 5 a 30 metros. Estas estruturas de colapso provocam recalque de terreno, e é comum o aparecimento de dolinas e ravinas, que oferecem riscos às edificações da ETO/ ETE, e às demais estruturas de produção espalhadas na área do campo.

O aparecimento dessas estruturas de colapso está relacionado diretamente com a desestabilização, provocada pelo fluxo de água que se infiltra no solo, carregando consigo a cobertura superficial arenosa resultando no surgimento de profundos buracos, muitos deles bem próximos das construções da ETO / ETE. Esses elementos, a depender de seu porte e da profundidade, podem comprometer edificações, paredes de diques, tanques, postes, etc.

O fato de existir uma cobertura sedimentar recobrendo o cárstico, agrava o risco geotécnico em Fazenda Belém pela dificuldade de identificar em superfície os locais susceptíveis a colapso. Adicionalmente, o relevo altamente irregular do topo do calcário frustra qualquer tentativa de interpolação a partir de dados de poços ou de geologia de superfície.

A partir da necessidade de conhecer em detalhe a morfologia e a área de ocorrência dessas feições é que foi feito um estudo com GPR (*ground penetrating radar*) na área da ETO/ETE, de forma a iluminar o problema de forma objetiva.

Foi realizado um levantamento 3D com GPR objetivando investigar a presença de estruturas de dissolução em uma área de tancagem da ETO/ETE.

Os dados foram processados segundo procedimentos adaptados para o GPR a partir do processamento sísmico e foram posteriormente interpretados com a utilização dos softwares SeisX e VoxelGeo.

Os resultados confirmam a presença de estruturas de dissolução em forma de ravinas alongadas, associadas a fraturas, e permite orientar as ações mitigadoras que devem ser adotadas para preservar a integridade estrutural dos tanques da ETO/ETE.

### Contextualização geológica do cárstico de Fazenda Belém

Os calcários da Formação Jandaíra foram depositados há 90 milhões de anos em ambiente de mar raso. Posteriormente grande parte da plataforma carbonática foi elevada acima do nível do mar, tendo passado por períodos sucessivos de exposição e erosão, com o desenvolvimento de *karst*, e de soterramento por sedimentos arenosos continentais- (Barreiras e aluviões), (Gusso, 1988).

O Grupo Barreiras, pelas suas características permo-porosas, e por exibir na região significativa superfície de captação de águas meteóricas, acumula em sua base umidade considerável, favorecendo sobremaneira a dissolução dos calcários através da percolação de fluidos.

Ao que parece a percolação se dá através de fraturas com direção preferencial NE-SW, coincidente com o padrão do fraturamento regional (Corsino, 1989).

A dissolução das rochas carbonáticas é um processo lento e gradual, que depende da ação continuada dos fluidos percolantes. Entretanto o colapso do substrato calcário ou da cobertura sedimentar é rápido, por vezes quase instantâneo, sendo inicializado tanto por causas naturais (fluxo hidrológico intenso e constante) quanto devido a causas induzidas pela atividade produtiva humana (Sowers, 1996).

Os “buracos” que aparecem de vez em quando na região e que trazem o solo, árvores, arbustos e construções, são na verdade dolinas. As dolinas aparecem quando a rede de drenagem cárstica evolui no substrato calcário, e a água que se infiltra, promove o transporte da cobertura superficial, e do regolito que preenche as fraturas, para o interior de cavernas.

Essas cavernas, que resultam da dissolução do calcário, permitem acomodar o material desestabilizado, gerando uma erosão remontante que provoca o afinamento da capa sedimentar, e o aparecimento de dolinas quando ocorre o colapso do terreno em superfície.

A dissolução do calcário, é condicionada pela percolação de água que circula através de fraturas e falhas que cortam a formação. Portanto a ocorrência de dolinas, em última análise, está também associada à presença de fraturas que permitem a passagem de água.

A cobertura sedimentar do cárstico em Fazenda Belém, agrava o risco geotécnico, pois dificulta a identificação em superfície, de locais susceptíveis a colapso. Adicionalmente, o relevo altamente irregular do topo do calcário frustra qualquer tentativa de interpolação a partir de dados de poços ou de geologia de superfície.

A figura 1 descreve os vários estágios evolutivos de formação dessas estruturas de dissolução em calcário.

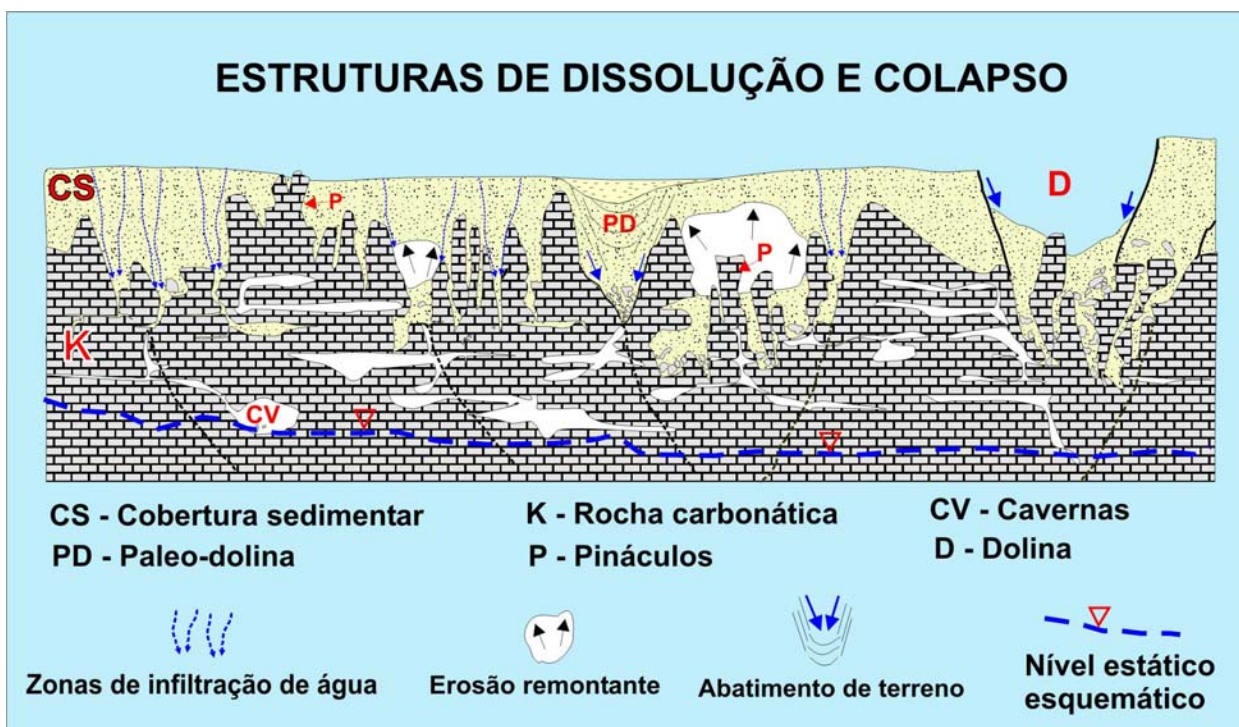


Figura 1 – Evolução de estruturas de colapso. O substrato carbonático (K) sofre dissolução pela percolação de fluidos através de fraturas, que vão se alargando dando origem a espaços vazios na rocha carbonática. Com o avanço da dissolução, a cobertura sedimentar (CS) vai preenchendo gradativamente os espaços vazios gerando uma erosão, de baixo para cima (setas pretas), que provoca o afinamento da capa de sedimentos até o ponto de colapso, quando ocorrem as dolinas (D). A superfície da rocha carbonática assume um relevo irregular, ruiniforme, sendo comum a ocorrência de pináculos (P), resultantes da erosão diferencial. O processo é lento e gradual, porém o seu desfecho, com o colapso do terreno, muitas vezes ocorre subitamente, sem indicações prévias de seu início. (Modificado de Beck, 1991)

## Aquisição de dados de GPR

O levantamento cobriu uma área de aproximadamente 300 m<sup>2</sup> e constou de 25 linhas de 21 m de comprimento, espaçadas de 0.6 m (21 m na direção *in-line*, e 14.4 m na direção *cross-line*). O intervalo entre traços foi de 0.3 m, perfazendo 71 traços por linha, totalizando 1775 traços. O levantamento, mono-canal, foi realizado com *offset* entre as antenas (transmissor-receptor) constante de 1.2 m.

A aquisição foi realizada à semelhança de um hipotético levantamento marítimo mono-linha com multiplicidade 100%, isto é, uma linha por *swath*, um canal por registro, uma amostra por célula de 0.3 x 0.15 m. O tempo de registro foi de 500 ns, e a razão de amostragem de 1 ns. A composição do *dataset* 3D foi realizada na etapa de processamento, através da gridagem e definição do tamanho da célula. O layout do levantamento é mostrado na figura 2.

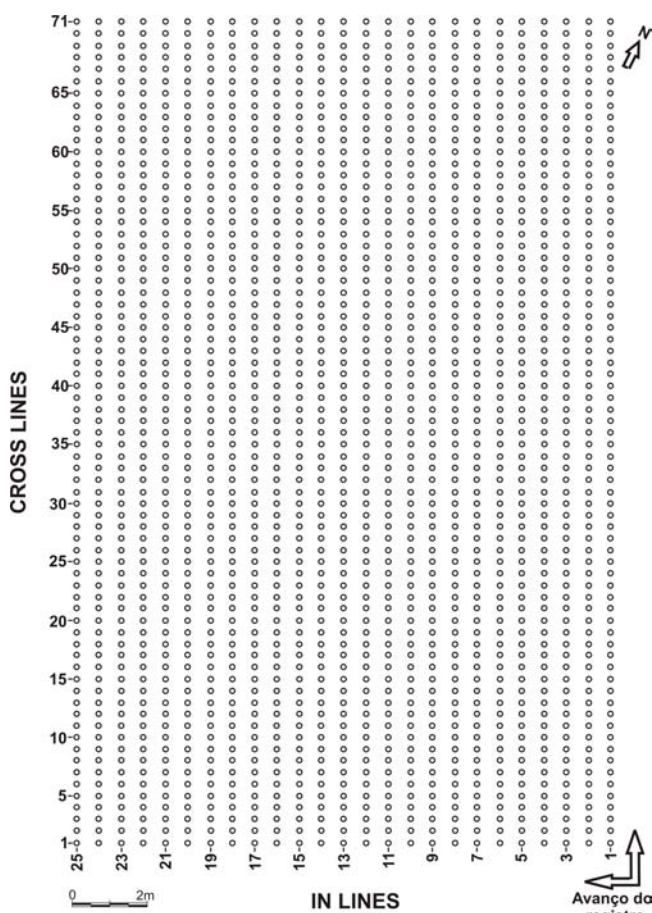


Figura 2- *Layout* do levantamento de GPR. A aquisição foi mono-canal, e se assemelhou a uma aquisição marítima com um cabo, e um canal por tiro. A montagem do *dataset* 3D foi feita no processamento.

## Processamento e interpretação dos dados

As fontes de ruídos dentro da área industrial afetam todo e qualquer método geofísico que se use na investigação das estruturas de dissolução. Em vista disso, a estratégia utilizada neste estudo, fundamentou-se em rigoroso controle da localização das fontes de ruídos superficiais e na utilização de técnicas de processamento para elevar a razão sinal/ruído.

Os dados registrados foram submetidos a um processamento inicial que consistiu nas seguintes etapas:

- Correção para *zero-offset*, para compensar o afastamento fonte-receptor, sendo baseada na velocidade da onda direta pelo ar (0.3 m/ns);
- Dessaturação, objetivando corrigir o efeito de indução eletromagnética existente entre as antenas, bem como da interferência resultante do acoplamento entre o pulso emitido e as reflexões das camadas mais rasas;

Depois, os dados foram convertidos para o formato SEG Y e carregados no software ProMax, onde foi dada seqüência ao processamento. Após a composição do *dataset* 3D, procedeu-se à correção dos efeitos de propagação, realizada através de ganho linear e exponencial (SEC) e do balanceamento espectral; migração, utilizando velocidades obtidas com levantamentos CMP na área, e re-escaladas para utilização com o formato SEG Y de dados sísmicos; filtragem F-K, para remoção de eventos inclinados relacionados a ruídos, normalmente gerados por reflexões da onda aérea em obstáculos na superfície; e filtragem final, utilizando filtros de frequência tipo passa-banda. Não foram aplicados ganhos equalizadores, como o AGC, visando preservar o máximo possível as relações de amplitude entre os eventos.

A figura 3 apresenta os painéis de todas as *in lines* brutas (3A), e após processadas (3B). É possível perceber a melhoria significativa da imagem após o processamento.

Após processados, os dados foram carregados em *workstations* e interpretados com os softwares SeisX e VoxelGeo. A figura 4 apresenta *displays* extraídos do SeisX. Em 4A é mostrada a *in-line* 5 onde é evidente, entre 50ns e 150 ns, a presença de uma faixa de alta amplitude que corresponde à uma zona afetada por dissolução encaixada em fratura subvertical, cuja direção coincide com a da *in line* 5. Em 4B é mostrada a *cross-line* 23, que corta ortogonalmente a zona fraturada. Em 4C, é apresentado um *time-slice* correspondendo a 114 ns, e onde está bem evidente a zona de dissolução.

A figura 5, apresenta um cubo 3D extraído do VoxelGeo, mostrando em perspectiva a zona de dissolução encaixada em fratura subvertical. Também são mostrados os tanques metálicos que se constituem em intensa fonte de ruído para o GPR.



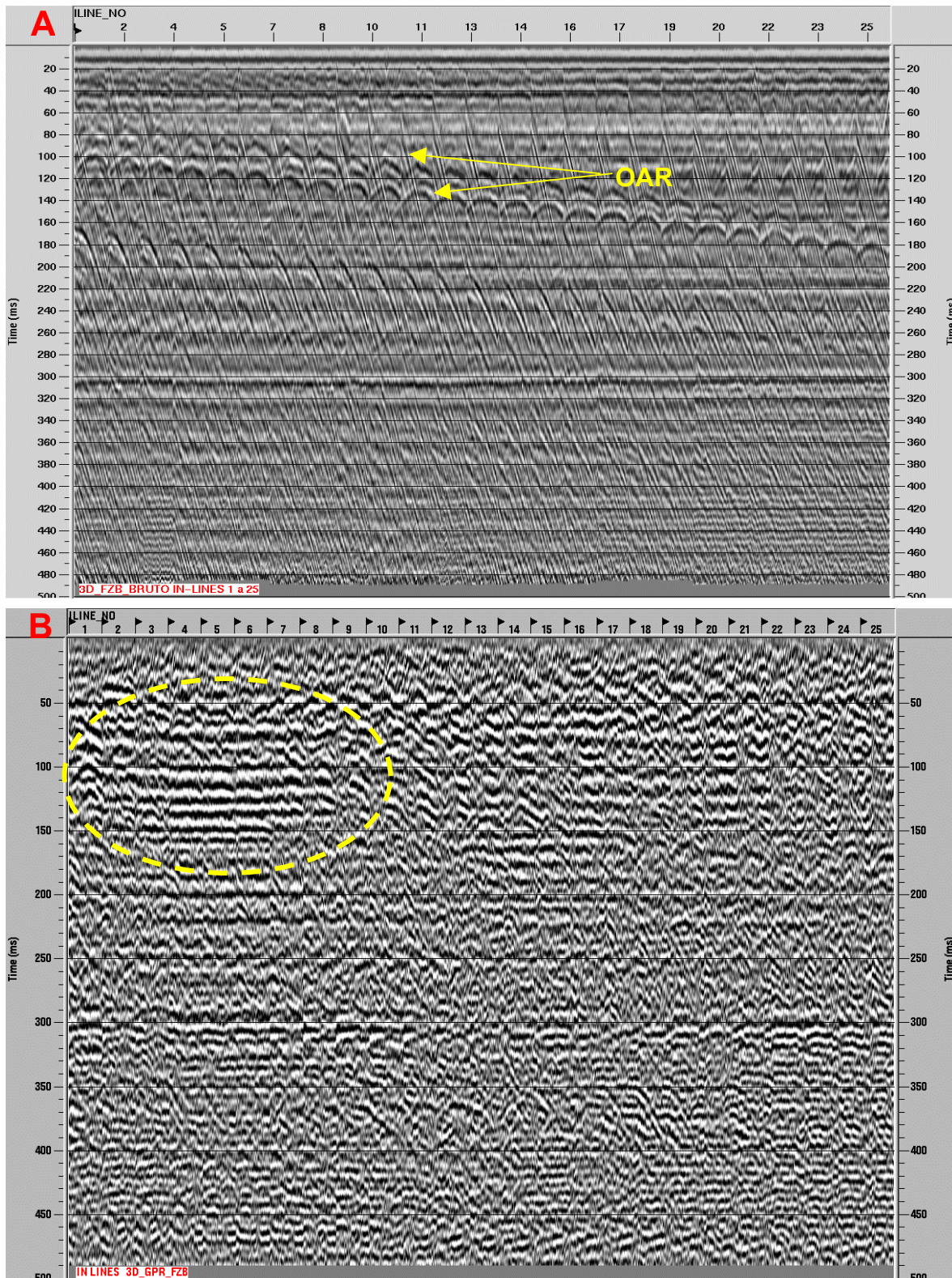


Figura 3 – Painéis com in-lines brutas (A) e processadas (B). Em (A) o dado bruto está comprometido por ruídos de diversas origens, sendo os mais maléficos, os resultantes da reflexão da onda aérea em obstáculos superficiais (onda aérea refletida-OAR). No dado final processado (B) fica claro a melhoria da qualidade da imagem, onde é possível agora discernir uma região anômala (elipse amarela), associada à dissolução do regolito que preenche uma zona fraturada.



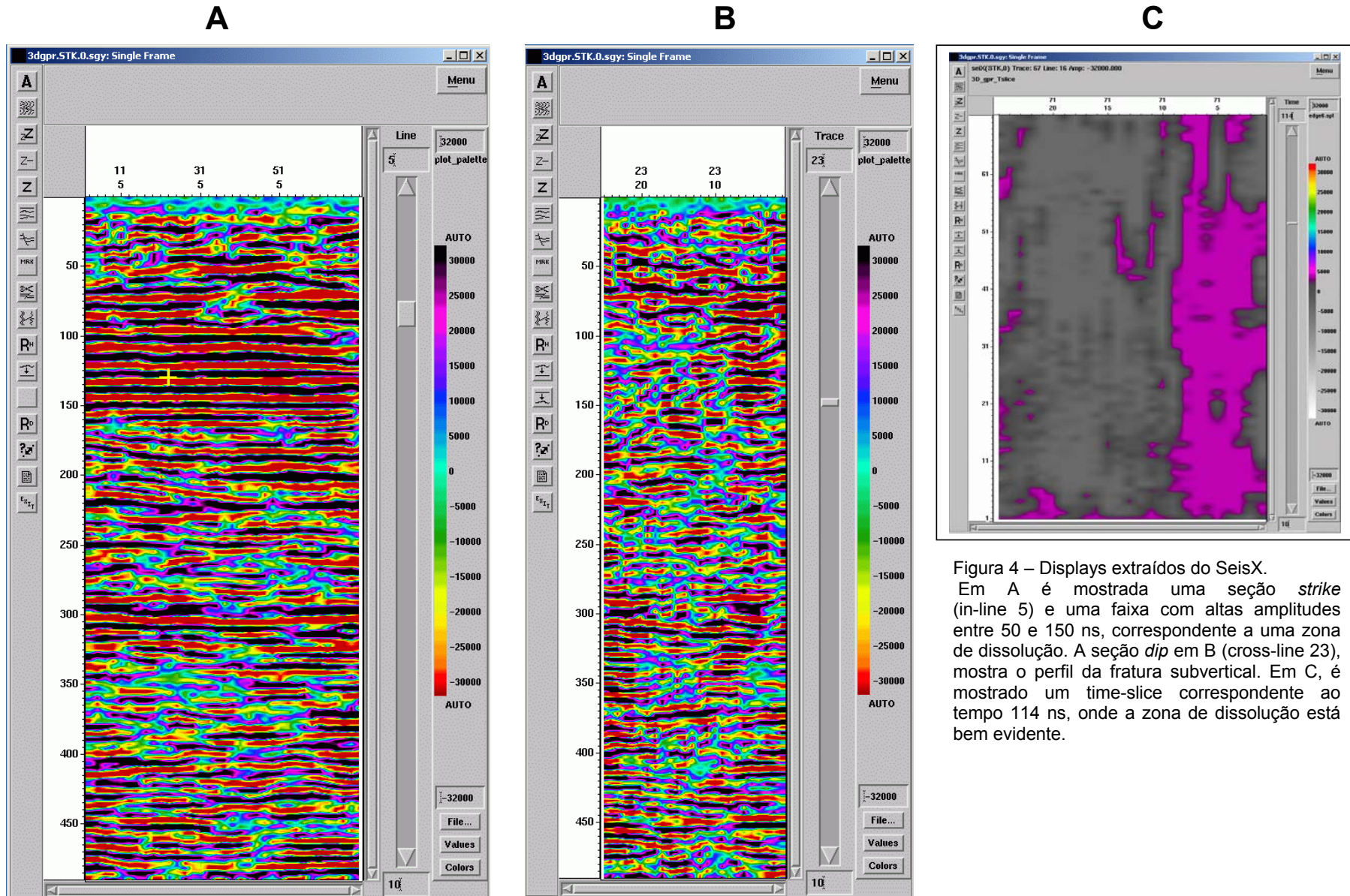


Figura 4 – Displays extraídos do SeisX.  
Em A é mostrada uma seção *strike* (in-line 5) e uma faixa com altas amplitudes entre 50 e 150 ns, correspondente a uma zona de dissolução. A seção *dip* em B (cross-line 23), mostra o perfil da fratura subvertical. Em C, é mostrado um time-slice correspondente ao tempo 114 ns, onde a zona de dissolução está bem evidente.

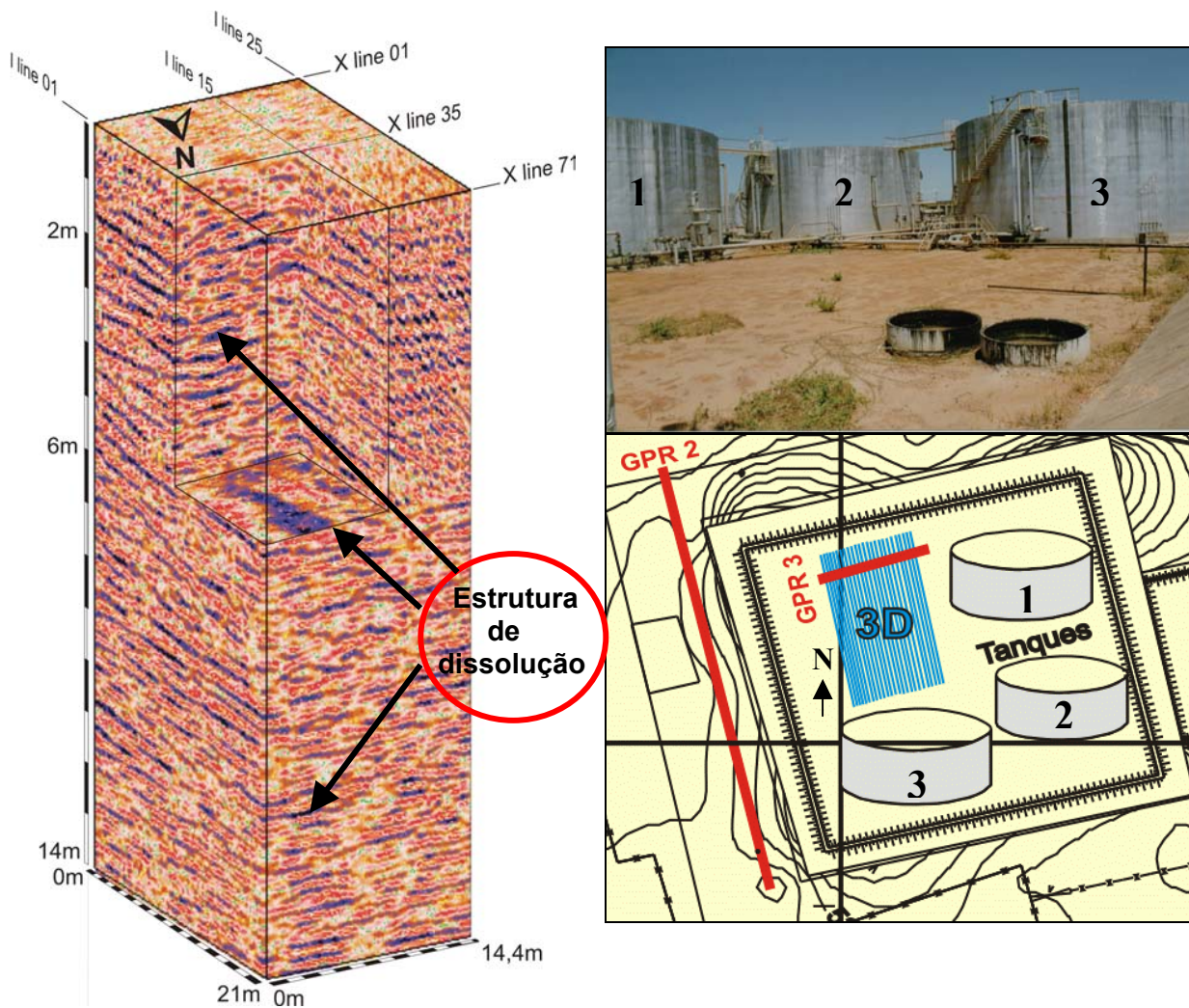


Figura 5 – Cubo 3D de GPR mostrando a presença de estrutura de dissolução associada a ravina encaixada em fratura subvertical. O levantamento, de direção NNW, foi realizado em um pátio de tancagem onde existem várias fontes de ruídos para o GPR. As posições dos tanques (1, 2 e 3) estão identificadas na foto e no croquis.

### Conclusões

O uso do GPR em áreas industriais é viável, desde que se tenha um bom controle da localização das fontes de ruídos superficiais. Para tanto é necessário também uma boa documentação da aquisição dos dados.

A utilização de recursos de processamento e interpretação de dados sísmicos aos dados de GPR, testados neste trabalho também se mostrou viável, e permitirá expandir a utilização do GPR em problemas complexos, que demandam maior acuidade da imagem.

### Referências

Beck, Barry F., 1991, On Calculating the Risk of Sinkhole Collapse, in Kastning, E.H. and Kastning, K.M., editors, Proceedings of the Appalachian Karst Symposium: National Speleological Society, Huntsville, Alabama

Corsino, A.R. 1989 - Processos de Karstificação com Colapso de Terreno da Formação Jandaíra na Área da Estação de Tratamento de Óleo (ETO) do Campo de Fazenda Belém - Bacia Potiguar Emersa. DEBAR/DIRGEO/SETOG I – rel. Interno - 17p.

Gusso, G.L.N 1988 - Nota Técnica Sobre a erosão subterrânea em Fazenda Belém. DEBAR/DINTER/SEBAT - rel. int. 15p.

Sowers, George F 1996. Building on sinkholes: design and construction of foundations in karst terrain. ASCE press, 202 p.