



## Métodos Geofísicos Como Base Para o Diagnóstico Geotécnico na Movimentação de encostas da Serra do Mar – Paraná/Brasil

\*Celso Carvalho Magalhães, Cibele Cláuber de Aguiar, Brain Tecnologia Ltda, Brasil

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

### Resumo

Este trabalho trata de diagnóstico geológico/geotécnico de uma encosta na região da Serra do Mar/PR através de métodos geofísicos, buscando compreender a interação entre a dinâmica natural da encosta e a presença de um duto enterrado. Foram aplicadas as técnicas de GPR e Tomografia Elétrica que possibilitaram o diagnóstico geológico bem como a identificação de superfícies de movimentação em profundidade. A identificação das superfícies de movimentação possibilitou o mapeamento de superfícies de descontinuidade em profundidade delimitando áreas críticas com possível desenvolvimento de movimentos de massa, assim como a proposição de um modelo integrado para movimentação de encostas.

### Introdução

As obras de engenharia em meio a encostas têm dentre uma série de especificidades o fato de interagirem com maciços dinâmicos e, em muitos casos, extremamente susceptíveis à instabilizações. Entende-se por instabilizações aquelas que Cruden (1990) definiu genericamente como escorregamentos, ou movimentos de massa, rocha, solo e detritos, encosta abaixo.

Neste trabalho aborda-se a interação de um encosta, na região da Serra do Mar/PR, com um duto que percorre toda sua extensão. Movimentos de massa, mesmo que lentos, solicitam o duto podendo ocasionar danos e até mesmo rupturas na estrutura. Apresenta-se o diagnóstico geológico/geotécnico da encosta, buscando compreender a interação entre a dinâmica natural da encosta e a presença do duto enterrado. Propõe-se também um modelo para compreensão da dinâmica da encosta.

A sistemática utilizada constitui a visualização subterrânea das diversas estruturas geológicas que possibilitam a compreensão do fenômeno e seu desenvolvimento com o tempo. Tal visualização utiliza como técnicas básicas de apoio o (GPR) Ground Penetrating Radar e a Tomografia Elétrica devidamente calibrados por sondagens. A identificação das superfícies de movimentação possibilitou o mapeamento de superfícies de descontinuidade em profundidade delimitando assim áreas críticas com possível desenvolvimento de movimentos de massa.

Destaca-se a utilização de aquisição e processamento 3D para o Ground Penetrating Radar e a metodologia de interpretação radar estrutural/estratigráfica ambos inéditos e desenvolvidos pela Brain Tecnologia.

Os resultados da interpretação Radar-Estrutural/Estratigráfica 2D e 3D mostram consistência horizontal e vertical permitindo a identificação dos seguintes horizontes: zona estrutural dentro do colúvio, topo do solo residual, superfícies de movimentação ligadas ao fluxo gravitacional, superfícies de compensação e falhas geológicas geradoras da encosta apresentando coerência com os dados levantados pelas seções de Tomografia Elétrica. As anomalias de alta resistividade na resposta da Tomografia Elétrica, são correlacionadas à ocorrência de matações em meio à massa argilosa ou ainda a canaletas de drenagem devidamente mapeadas e identificadas.

### Metodologia

O trabalho contou com 4 fases distintas, a saber: Aquisição de Dados GPR 2D e 3D e de Tomografia Elétrica; Processamento dos Perfis GPR em Profundidade - 2D e 3D; Interpretação dos dados geofísicos da área; e integração dos dados com visita ao campo.

Os trabalhos de aquisição GPR 2D contaram com a realização de 27 seções GPR, adquiridas com a antena de 100 MHz e espaçamento entre traços de 0,40m, além de controle topográfico regular por levantamento a estação total.

O Processamento 2D contou com as seguintes etapas: FILTRAGENS NO DOMÍNIO DO TEMPO E FREQUÊNCIA, CORREÇÕES DE VELOCIDADE, MIGRAÇÃO F-K EM PROFUNDIDADE, FILTRAGENS DE FREQUÊNCIA e CORREÇÃO DA TOPOGRAFIA. Além dessas etapas, foram aplicadas as rotinas de definição da velocidade de migração aos dados oriundos com base nos CMP realizados.

Os trabalhos de aquisição GPR 3D contaram com a realização de 2 levantamentos em áreas distintas com antena de 200 MHz. O primeiro, 3D1, com 200 seções *inline* equiespaçadas a cada 1,0m e o segundo, 3D2, com 70 seções *inline* equiespaçadas em 2 metros.

No levantamento 3D1 a constituição da célula é retangular de dimensões 1,00m x 0,25m (*inline* x *crossline*) tendo sido mantida após o processamento. Para o 3D2 a geometria de aquisição adotada permitiu a constituição de uma célula retangular de dimensões 2,00m x 0,25m (*inline* x *crossline*), após o processamento onde interpolou-se uma *inline* a cada metro, essas dimensões passaram a ser 1,00 x 0,25m.

As seções de Tomografia Elétrica somam 5.600m num total de 22 seções adquiridas utilizando o arranjo de eletrodos denominado Wenner.

Algumas seções GPR 2D, 3D e Tomografia Elétrica são apresentadas como figura, o posicionamento na área de estudo e a identificação dessas seções ilustrativas podem ser vistas na Figura 1.

Os trabalhos de interpretação foram realizados em Estação de Trabalho Interativa (Workstation) que utiliza um Sistema Recursivo Especialista para interpretação dos dados.

Para integração dos dados o estilo de interpretação utilizada foi o da Interpretação Estrutural e Sismo-Estratigráfica, aqui denominada Estrutural e Radar-Estratigráfica, com definição das principais feições marcantes e recorrentes, para a área em estudo. Tal critério possibilitou a identificação de superfícies correlacionadas à zona estrutural dentro da argila do colúvio, topo do solo residual, superfícies de movimentação, superfícies de compensação e falhas geológicas geradoras da encosta.

### Caracterização Geológica/Geotécnica

#### Esboço Geológico/Geotécnico – Interpretação GPR 2D

A interpretação radar-estratigráfica das seções GPR 2D integrada à descrição das sondagens possibilitou a identificação de alguns horizontes distintos (Figura 2), que são detalhadamente ilustrados na Seção GPR 2D da Figura 3a e no modelo geométrico da Figura 3b. Notar que as denominações wavy, hummocky e plano paralela referem-se somente ao aspecto geométrico, não tendo qualquer conotação genética.

- Zona Estrutural 2: região de textura mais plástica que o solo residual sendo possível identificar maior fluidez do material silte-argiloso. Apresenta geometria interna denominada *Wavy*, com contatos truncados em sua base e topo denominados *base lap* e *top lap*. Nas seções com poços descritos o topo da Zona Estrutural 2 corresponde ao contato entre os materiais argilosos e arenosos.
- Solo Residual: região de textura reliquiar à rocha, apresenta uma geometria plano-paralela.

A interpretação radar-estrutural, relativa à formação e movimentação da encosta (Figura 4) identifica feições como:

- Superfícies de movimentação: assim denominadas por serem indicativas de ruptura no solo silte-argiloso. Tem seu sentido de movimentação direcionado ortogonalmente ao duto, sua zona de ocorrência é limitada na base pelo topo do solo residual.
- Superfícies de compensação: correspondem a movimentações desenvolvidas em direções variadas e sentido contrário às superfícies

movimentação. O encontro dessas duas superfícies de movimentação/compensação ocasiona o intumescimento do solo, fenômeno descrito nos próximos itens.

- Falhas geradoras da encosta: ocorrem nas maiores profundidades das seções, são sub-verticais e sua zona de ocorrência limitada ao topo do solo residual.
- Estruturas em flor: feições geométricas indicativas de transcorrência, sendo sua zona de ocorrência limitada ao topo do solo residual.

Todos os horizontes e feições acima descritos foram identificados em todos levantamentos realizados e com técnicas distintas, GPR 2D, 3D e Tomografia Elétrica.

#### Mapeamento Geotécnico de Detalhe – Interpretação GPR 3D

A identificação do duto em profundidade nas seções GPR 3D possibilitou o mapeamento das projeções da calha e do eixo do duto. Em um corte horizontal em (Depth Slice) a 2,5m de profundidade vê-se as marcas de movimentação e compensação da encosta (Figura 5). Um Depth Slice é um corte horizontal em profundidade em um volume de dados 3D.

Na visão tridimensional de dados 3D (Figura 6) observa-se a interação das superfícies de movimentação com a calha, a Zona Estrutural 2 bem como a distribuição espacial das falhas geradoras da encosta e das superfícies de movimentação. Essa mesma figura ressalta a interação entre as superfícies de movimentação/compensação, a calha do duto e conseqüentemente o próprio duto. Especial atenção deve ser dada ao fato da imagem ser a visualização do dado 3D, e não uma mera reconstituição 3D a partir de um dado 2D.

#### Caracterização Geológica/Geotécnica de Solos e Rocha – Tomografia Elétrica

Para coerência, confiabilidade e melhor interação dos dados, um segundo método foi aplicado. A Tomografia Elétrica foi escolhida para tal. A integração entre os dados de sondagem e a interpretação geofísica pela Tomografia Elétrica é mostrada na Figura 7. As áreas com anomalia de alta resistividade correspondem à matações, canaletas de drenagem ou o próprio duto.

São identificados horizontes de argila, material argilo-siltoso, solo residual/rocha alterada e rocha. Superfícies de movimentação e compensação e falha geradora de encosta também são evidenciada pela Tomografia (Figura 8).

#### Integração dos Dados Geológico/Geofísicos - Caracterização Geotécnica

A interpretação conjunta dos dados GPR 2D, 3D, Tomografia Elétrica e dos poços possibilitou a compreensão do modelo geológico/geotécnico da área estudada. Com a identificação das superfícies de movimentação e compensação localizadas pelos traços das seções, foi possível confeccionar o mapa de superfícies de descontinuidades mostrado na Figura 9. Esse mapa apresenta todas as superfícies de descontinuidades identificadas ao nível da Zona Estrutural 2 ( $\approx$  3m de profundidade).

Em visita ao campo foram identificados movimentos de massa em pontos críticos. Os locais onde esses movimentos foram observados são perfeitamente coerentes com o mapa de descontinuidades elaborado, validando assim a metodologia utilizada.

A Figura 10 apresenta uma imagem integrada das feições observadas no campo e das feições mapeadas na interpretação dos dados geofísicos, retirados do mapa e apresentado na figura anterior.

## Resultados

### Um Modelo Para a Dinâmica Geral de Movimentação de Encosta na Serra do Mar

A integração dos dados levantados permite a proposição de um modelo genético para movimentação de encostas nesse tipo de ambiente.

Dois fatores geológicos são relevantes para o entendimento do assunto em questão: (1) os grandes falhamentos formadores das encostas da Serra do Mar e, (2) Os falhamentos de escorregamento devido a fluxo gravitacional de argilas encharcadas.

O relevo serrilhado, escarpado em encostas abruptas da Serra do Mar (Figura 11), é condicionado por grandes falhamentos geológicos, apresentando rejeitos verticais conspícuos (e também horizontais) capazes de formar altos e baixos (Horts e Grabens, Figura 12a), que delineiam degraus por sobre os quais há entulhamento de material erodido nas partes mais altas e depositados nas partes mais baixas, denominado material coluvionar. Sendo esse material formado por blocos rochosos (matacões) imersos em uma massa silto-argilosa fina, com alta capacidade para reter água ou se encharcar e baixa capacidade para transmiti-la (Figura 12b)

Esse mecanismo é dinâmico o que significa que no tempo geológico, e ainda hoje, ocorrem essas movimentações. Vale observar que os mesmos são mecanismos regionais, em escala global, e estão ligados à movimentações de grandes massas rochosas continentais e subcontinentais, cuja expressão do movimento pode ser medida por terremotos em pontos remotos do continente americano e mesmo pequenos abalos sísmicos regionais.

Um segundo mecanismo é local e não menos importante. É aquele ligado ao fluxo gravitacional do material coluvionar (argiloso) supracitado, que entulha os degraus da encosta. Esse material, por possuir alta porosidade e

baixa permeabilidade e a depender da precipitação pluviométrica nos períodos chuvosos e também das inclinações dos taludes naturais, pode adquirir graus variados de fluidez capaz de gerar rompimentos que se traduzem em superfícies de movimentação, cujo modelo simplificado é exposto na Figura 13. O modelo geológico decorrente da interação entre os dois mecanismos acima descritos é sintetizado na Figura 14. Um dos movimentos de massa que exemplificam o modelo proposto pode ser visto na Figura 15.

## Conclusões

As seções GPR 2D adquiridas são de boa qualidade e ilustram claramente a dinâmica de movimentação da encosta. A penetração ficou em torno de 30m. A antena utilizada foi a de 100 MHz.

A análise Radar-Estratigráfica das seções demonstrou padrões recorrentes, possibilitando a identificação dos horizontes: Zona Estrutural 2, Topo do solo residual/rocha alterada e rocha. Tais horizontes foram definidos, de cima para baixo, conforme seus padrões texturais e de geometria interna. Entre a superfície e o Topo da Zona Estrutural 2 tem-se uma região intensamente fluidizada com geometria interna denominada Hummocky e descrita nas sondagens como argiloso. Sua geometria interna é denominada *Wavy*, com contatos truncados em sua base e topo denominados *base lap* e *top lap*. Nas seções com poços descritos o topo da Zona Estrutural 2 corresponde ao contato entre os materiais argilo e arenoso. O solo residual tem textura reliquiar à rocha e apresenta uma geometria plano-paralela de refletores.

O mapeamento das superfícies de movimentação permitiu estabelecer o Mapa Integrado de Descontinuidades. O universo de superfícies e o posicionamento das seções interpretadas podem permitir diferentes interpretações para a distribuição espacial das descontinuidades. Por outro lado a quantidade, a multiplicidade e o detalhamento dos dados levantados resguardam confiabilidade ao mapa proposto.

Outro aspecto importante é o fato de se ter um mapa estrutural em profundidade. Algumas dessas descontinuidades podem ser mapeadas em superfície, mas em sua grande maioria, encontram-se desenvolvidas apenas em profundidade, protomovimentação podem atingir ou não a superfície com o decorrer do tempo. Isso possibilita um diagnóstico preventivo das potenciais superfícies de ruptura fundamentando o monitoramento da encosta.

As Seções de Tomografia Elétrica realizadas confirmam a estratigrafia de solos definida pelo método GPR. Confirmam também a presença de matacões no interior da massa argilosa que constitui o material coluvionar e definem, com nitidez, a passagem do solo residual para rocha alterada e da rocha alterada para rocha sã. Os matacões apresentam anomalias de alta resistividade, dentro de uma matriz argilosa de baixa resistividade. Essas mesmas seções comprovam o modelo da dinâmica de movimentação da encosta proposto.

As discontinuidades mapeadas puderam ser constatadas no campo naquelas superfícies que interceptam a topografia. Esse resultado confirma a coerência e consistência espacial do levantamento aqui realizado.

Esse trabalho permitiu a proposição de um modelo genético integrado para movimentação de encostas na Serra do Mar. O sistema de falhas mapeado no interior do Solo Residual é um sistema de falhas geológicas normais e que, via de regra, não pode ser observado acima da superfície de topo do solo residual.

A visualização das superfícies de movimentação e do sistema de falhas normais, assim como a visualização dos horizontes definidos como Zona Estrutural 2 e Solo Residual/Rocha Alterada, ilustram a dinâmica de movimentação da encosta que pode ser sintetizada como o efeito conjunto de uma geologia regional ligada aos grandes falhamentos que definem os grandes blocos da Serra do Mar na região de Morretes, PR, e de uma geologia local ligada ao fluxo gravitacional de argilas encharcadas.

Esse modelo é concebido com base na interpretação radar estrutural/estratigráfica, análoga à interpretação sismo-estratigráfica, como ferramentas desenvolvidas na Brain Tecnologia Ltda, que se mostram de intensa eficácia na compreensão genética de processos geotécnicos, via mapeamento de estruturas internas e externas ligada ao sinal do Ground Penetrating Radar dado a sua evolução no tempo (profundidade) e espaço.

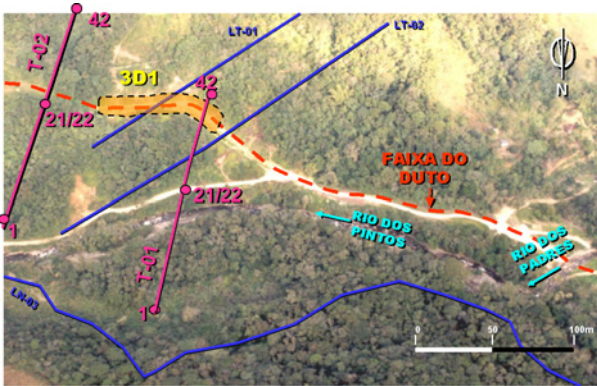


Figura 1 – Área de Estudo e Seções Ilustrativas

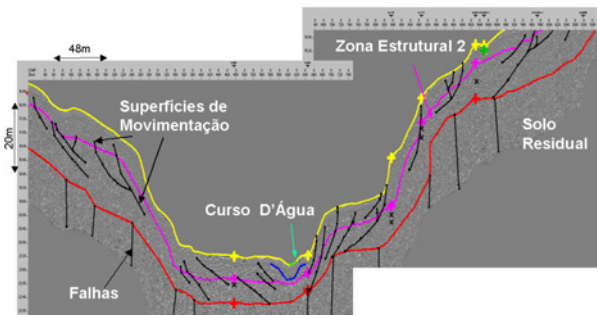


Figura 2 – Seção GPR01 Interpretada com Horizontes Mapeados

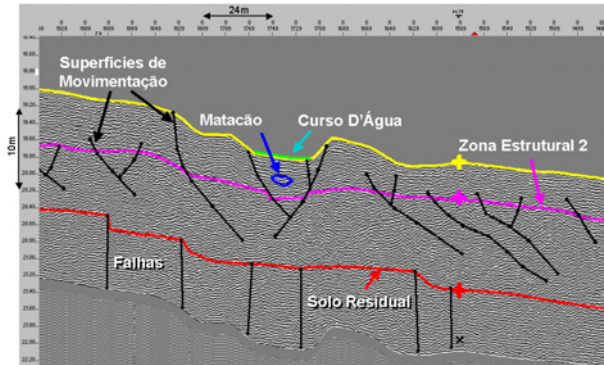


Figura 3a – Seção GPR03 Interpretada com Ênfase à Interpretação Radar Estratigráfica

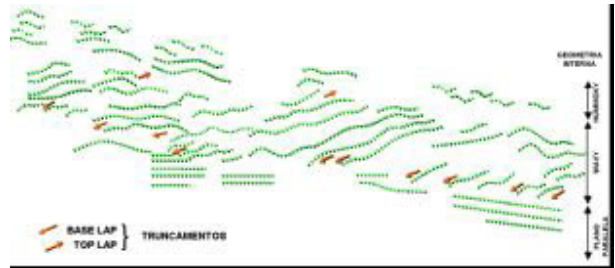


Figura 3b – Interpretação Radar-Estratigráfica para a Figura 3a

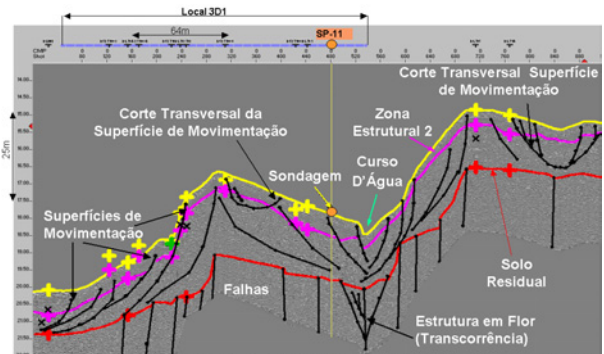


Figura 4 – Seção GPR02 – Interpretada com Ênfase à Interpretação Radar-Estrutural

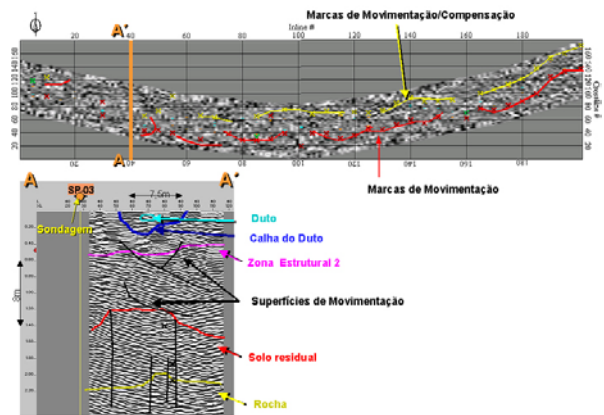


Figura 5 – Levantamento GPR 3D



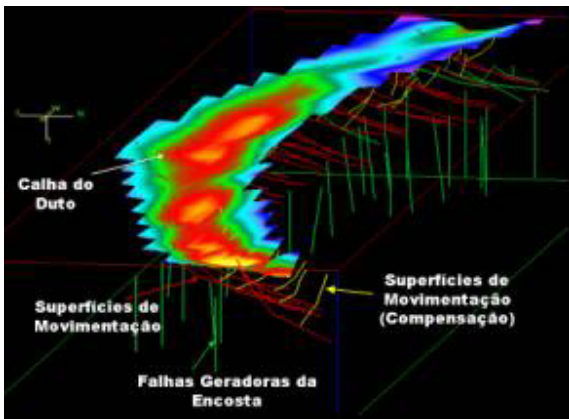


Figura 6 – Visualização Tridimensional – Dados 3D

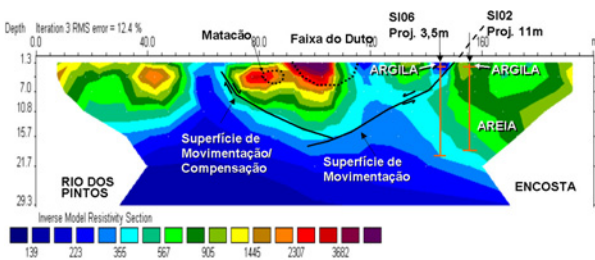


Figura 7 – Tomografia Elétrica e Sondagens

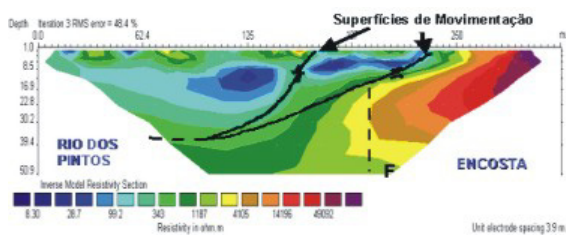


Figura 8 – Tomografia Elétrica

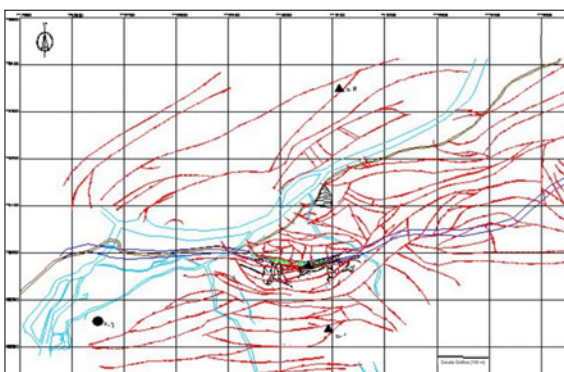


Figura 9 – Mapa de Descontinuidades

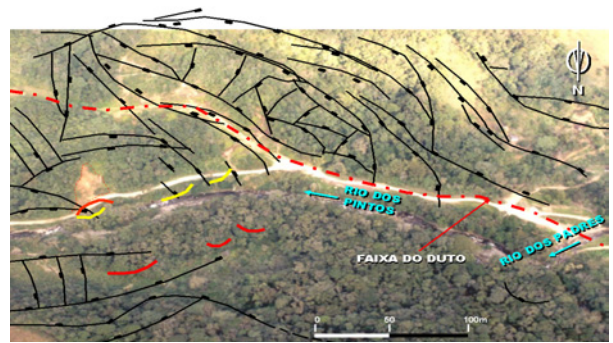


Figura 10 – Visualização Integrada

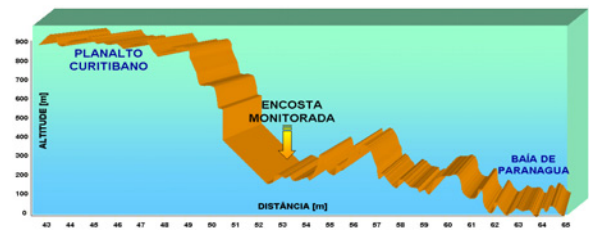


Figura 11 – Perfil Topográfico da Faixa do Duto na Serra do Mar

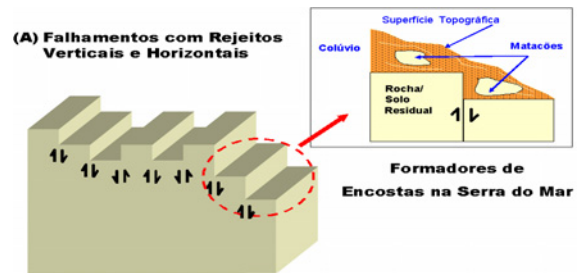


Figura 12a– Modelo para Falhamentos Regionais

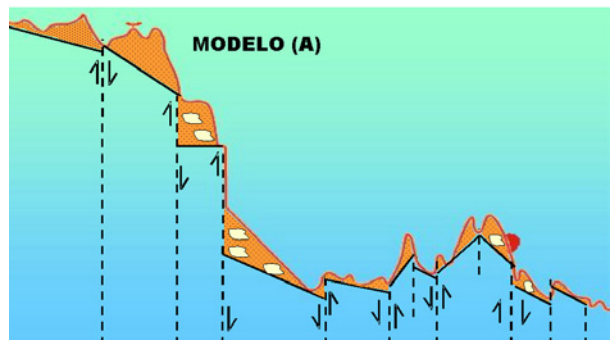


Figura 12b – Esboço Geológico no Percurso do duto

**(B) Superfícies de Movimentação**

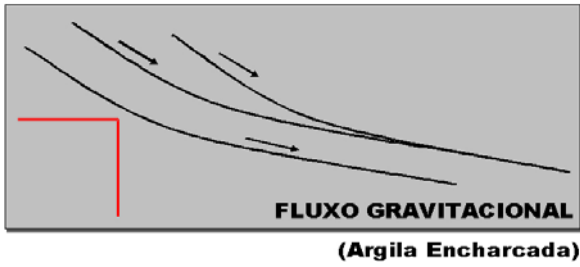


Figura 13 – Modelo (b)

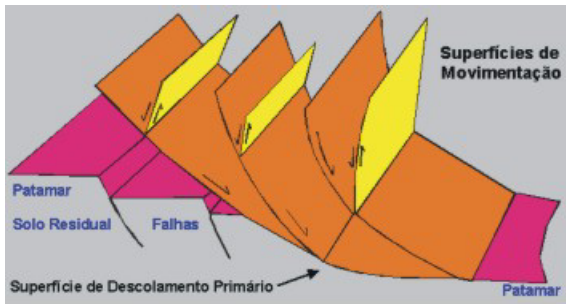


Figura 14 – Modelo Integrado Decorrente dos Processos Descritos nas Figuras 12 e 13

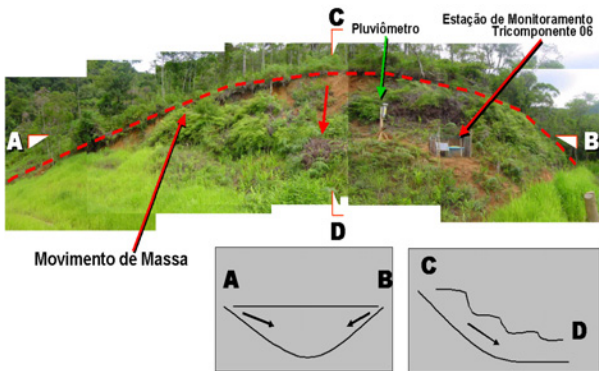


Figura 15 – Exemplo Local

**Referências**

BLOOM, A.L. 1988. Superfície da Terra. Trad. De Petri e R. Ellert. São Paulo: Edgard Blücher/EDUSP. 184p. (Série Textos Básicos de Geociências).

BRAIN Tecnologia Ltda. Relatórios Técnicos 2000/2001.

CRUDEN, D.M. 1990. Suggested nomenclature for a landslide summary. Bull. IAEG, nº41, p.13-16.

MAGALHÃES, C.C.1998. O Ground Penetrating Radar e Seu Uso na Avaliação Geológica para a Implantação de Hidroelétricas. Comitê Brasileiro Para a Construção de Hidrelétricas.

OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. 1998 Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. 586p.