

Uso de Fonte Sísmica Alternativa em Aquisição de Sísmica de Refração Rasa Aplicada à Geotecnia de Subsuperfície: Um Estudo de Caso

Guilherme Prosdocimi

Neogeo Geotecnologia LTDA., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, gprosdocimi@ngg.com.br

Gilvan Sá

Vale S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, gilvan.sa@vale.com

Fábio Miranda

Neogeo Geotecnologia LTDA., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, fabio@ngg.com.br

José Allan Maia

Vale S.A., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, allan.maia@vale.com

RESUMO: A presente pesquisa visou determinar/caracterizar o perfil de materiais existentes por meio de mapeamento geofísico, com utilização de fonte sísmica alternativa. Tal fonte é classificada como cartucho pirotécnico industrial para a fragmentação de rochas, cuja utilização é bastante indicada para áreas sensíveis à presença de pessoas, moradias, tráfego de veículos, infraestrutura ou restrições ambientais. A partir da correlação entre velocidades sísmicas *versus* grau de escarificabilidade, foi possível fazer ponderações acerca de qual categoria os materiais relacionam-se.

PALAVRAS-CHAVE: Sísmica de Refração, Investigação Geotécnica, Fonte Sísmica, Levantamento Geofísico.

1 INTRODUÇÃO

Na fase de investigação que antecede um projeto de engenharia, é comum utilizar métodos diretos, como sondagens, para obter informações sobre o subsolo. O espaçamento entre estas sondagens, no entanto, pode chegar facilmente a centenas de metros, ou até milhares de metros, como em casos de áreas com investigação restrita por questões ambientais, dificuldades de acesso dos equipamentos de grande extensão, etc. Nesses casos, é interessante recorrer a técnicas indiretas de investigação que permitam obter maior volume de informação, em menor tempo e com menores custos, sobre o subsolo.

A geofísica é uma ciência que desenvolve técnicas de investigação indireta utilizando conceitos físicos com aplicação cada vez mais

frequente em geologia e geotecnia, aliando baixo custo e resultados técnicos satisfatórios. Dentre os diversos métodos geofísicos existentes, será utilizado neste trabalho o método sísmico de refração rasa para investigação e identificação de materiais existentes em área de mineração. A sísmica de refração rasa baseia-se no fenômeno da refração que ocorre quando uma frente de onda mecânica atinge interfaces que separam estratos com diferentes velocidades de propagação da onda, em ângulo crítico. A sísmica de refração é tradicionalmente usada para determinar a espessura do manto de intemperismo assim como delinear interfaces mais profundas entre diferentes tipos de rochas que apresentem velocidades crescentes em profundidade.

2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho visa realizar, por meio de levantamento de seções sísmicas de refração rasa, o mapeamento subterrâneo indireto objetivando a caracterização do perfil de materiais existentes (pilha de estéril/estrato natural do terreno). Os dados geofísicos serão utilizados para subsidiar estudos no empreendimento de implantação do túnel de desvio de um curso de água em área de mineração, estado de Minas Gerais.

3 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

A área de estudo está situada no flanco sudeste do denominado Sinclinal Ouro Fino, porção centro-leste do Quadrilátero Ferrífero (QF), conforme Figura 1. A região do Quadrilátero Ferrífero situa-se no extremo sul do Cráton do São Francisco (Alkmim & Marshak, 1998). O Cráton consiste de uma unidade geotectônica consolidada ao final do Ciclo Transamazônico e que permaneceu relativamente preservada das remobilizações orogênicas Neoproterozoicas. Estas remobilizações formaram as faixas brasileiras que caracterizam o entorno do Cráton (faixas Brasília, Alto Rio Grande, Riacho do Pontal, Sergipana e Araçuaí).

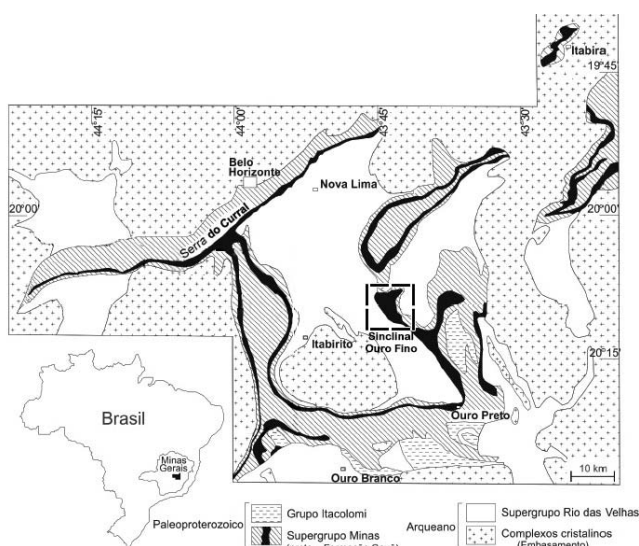


Figura 1: Localização do Quadrilátero Ferrífero no extremo sul do Cráton do São Francisco. Mapa modificado de Spier *et al.* (2008).

4 METODOLOGIA GEOFÍSICA

Os métodos sísmicos fundamentam-se na geração de ondas acústicas e na medição do tempo requerido para que estas ondas se propaguem da fonte de emissão até um conjunto de sensores (geofones ou hidrofones) dispostos em superfície ao longo de um perfil.

Ao longo de sua trajetória no interior do terreno, a onda sofre a influência das mudanças de propriedades elásticas das rochas, o que provoca mudanças em sua direção de propagação, segundo os princípios de Huygens, Fermat e Snell. Pelo princípio de Huygens, cada ponto de uma frente de onda comporta-se como uma nova fonte de ondas elementares e progressivas. Estas frentes de ondas têm seus raios aumentados com o passar do tempo e, por simplificação, a representação da propagação de uma onda é feita através de raios orientados, chamados de raios de onda. O princípio de Fermat estabelece que uma onda sempre irá seguir a trajetória de menor tempo, ou seja, a onda sempre irá propagar-se pelo percurso de tempo mínimo. A Refração Total ou Crítica ocorre quando a onda atinge uma interface com um meio de maior velocidade, cujo raio sísmico faça um ângulo de incidência tal que o ângulo de refração resulte em um ângulo reto (90°). Este ângulo de incidência é chamado de ângulo crítico.

A onda, após refratar-se criticamente, propaga-se paralelamente à superfície de separação, produzindo um movimento oscilatório paralelo à interface e imediatamente abaixo desta (Figura 2).

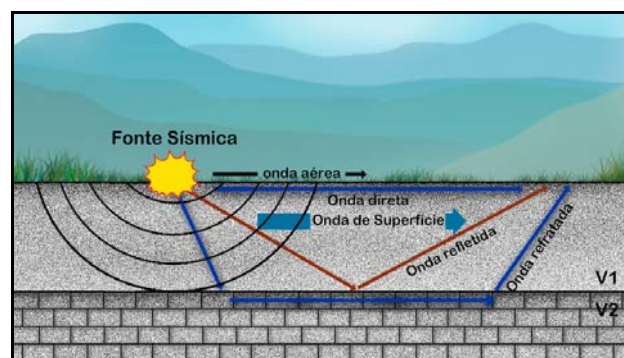


Figura 2: Propagação da onda paralela à superfície de separação dos meios. Fonte: Neogeo Geotecnologia LTDA.

Segundo Telford *et al* (1990), como não é possível o movimento relativo entre os dois meios, o meio superior é forçado a mover-se em fase com o meio inferior. O distúrbio no meio superior propaga-se ao longo da interface com a mesma velocidade do meio inferior. Estas perturbações originam no meio superior as ondas chamadas de “*head waves*”. O método de refração sísmica baseia-se na detecção destas ondas para obtenção do modelo de distribuição de velocidade e de profundidade do subsolo.

As taxas com as quais as ondas sísmicas propagam-se pelos meios elásticos são ditadas pelo módulo elástico e densidade das rochas pelas quais as ondas passam. Generalizando, as velocidades aumentam com o aumento da densidade e em rochas sedimentares, particularmente, crescem tanto com o aumento da profundidade de soterramento quanto em idade.

5 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para a aquisição de dados com o método da sísmica de refração rasa foi utilizado o sismógrafo da fabricante Geometrics, modelo Geode e módulo de 48 canais. Os geofones utilizados foram de 14 Hz e igualmente espaçados para cada linha sísmica executada. Diante do objetivo proposto, foram realizadas 7 (sete) seções sísmicas assim dispostas: 4 (quatro) seções longitudinais ao eixo do túnel e 3 (três) transversais ao eixo.

A fonte sísmica utilizada para as aquisições foi o *Pyroblast-C®*, (Figura 3). Tal tecnologia constitui-se de um cartucho pirotécnico industrial baseado em um composto propulsor integrado a um dispositivo elétrico (Esquife) que reage ocasionando a liberação de grande volume de gás inofensivo, principalmente Nitrogênio (N) e Dióxido de Carbono (CO₂).

O *Piroblast-C®* foi implantado em subsuperfície nos pontos denominados tiros, devidamente perfurados para a introdução dos cartuchos pirotécnicos e tamponados com auxílio de cimento de rápida secagem. Os furos contendo, aproximadamente, 300 gramas de *Pyroblast-C®*, foram realizados por meio de

trado manual até a uma profundidade aproximada de 1,5 metros.



Figura 3: Fonte sísmica utilizada para as aquisições, *Pyroblast-C®*.

A quantidade, em gramas, de *Pyroblast-C®* introduzida em cada ponto de tiro foi determinada por meio de testes de cargas (200, 300 e 500 gramas) necessários para uma leitura satisfatória das ondas pelo sismógrafo. Foi determinado 300 gramas como quantidade ideal. Para cada linha sísmica executada foram realizados 5 (cinco) pontos de tiros, assim dispostos: 70 metros antes do primeiro geofone, 10 metros antes do primeiro geofone, metade da linha, 10 metros após o último geofone e 70 metros após o último geofone (Figura 4).

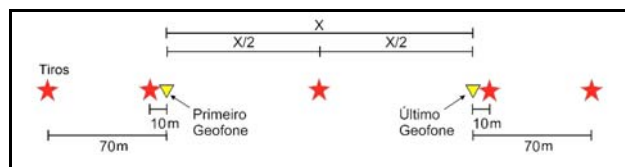


Figura 4: Esquema para disposição dos pontos de tiros.

No levantamento de sísmica de refração é necessária a realização da correção topográfica, isto é, a posição relativa entre fonte e receptores, em função da variação de sua altura

no terreno. Após a interpretação da velocidade da camada superficial, os dados de tempo para cada ponto (fonte e geofone) devem ser corrigidos, para eliminar possíveis distorções na interpretação devido à variação da altura absoluta entre geofone e fonte gerando um plano referencial.

6 RESULTADOS

As velocidades sísmicas são muitas vezes utilizadas com o objetivo de caracterizar materiais em subsuperfície. É importante salientar que métodos sísmicos são capazes de produzir configurações geométricas somente para as unidades com velocidades representativas, ou seja, para materiais que apresentam significativa diferença na propagação da onda sísmica.

As informações acerca da velocidade de propagação da onda podem ser utilizadas para a identificação de tipos de rocha, porém, dentro de certos limites, uma vez que há vários tipos de rochas as quais as faixas de velocidade se sobrepõem. Assim, apenas a velocidade não deve ser utilizada para a identificação do tipo de rocha constituinte de uma determinada área.

O modelo sugere uma situação com interfaces refratoras irregulares em que a velocidade aumenta com a profundidade, condição necessária para um levantamento de sísmica de refração. Os valores das velocidades nas camadas podem variar em função de alguns fatores tais como umidade local ou alterações climáticas, e nem sempre é possível obter valores de velocidades idênticos, mas somente com intervalos próximos.

É importante ressaltar que, para as interpretações sobre o tipo material, leva-se em conta a média da velocidade sísmica obtida nos perfis. Essa velocidade média pode variar conforme o tamanho das seções uma vez que a velocidade leva em consideração a geometria da camada.

Na área de trabalho foram adquiridas 7 (sete) linhas geofísicas pelo método sísmico de refração rasa, sendo 4 (quatro) delas longitudinais e 3 (três) transversais. Todas as seções apresentaram a diferenciação em dois

tipos de materiais com características distintas em virtude da análise das velocidades sísmicas médias de cada camada geofísica. A Tabela 1 abaixo ilustra os valores de velocidade sísmica média encontrada para os horizontes geofísicos identificados e a variação das espessuras do primeiro horizonte.

Tabela 1. Velocidades Sísmicas.

Linha	$*V_p$	$*V_p$	Espessura Horizonte 1 (m)
	Horizonte 1 (m/s)	Horizonte 1 (m/s))	
LL-01	600	3.675	6,8 a 57,19
LL-02	663	2.367	15,867 a 78,27
LL-03	447	2.936	31,46 a 45,6
LL-04	851	3.213	1,69 a 64,85
LT-01	625	3.441	10,7 a 18,13
LT-02	742	2.818	15,8 a 39,8
LT-03	711	3.222	6,5 a 14,12

$*V_p$: Velocidade sísmica média da onda P.

Não foi possível visualizar a base da última camada uma vez que a refração ocorre na interface superior e não foi visualizado outro material abaixo deste com maior densidade.

7 DISCUSSÕES E ANÁLISE CONJUNTA DOS DADOS

Através dos dados obtidos pelo método sísmico foi possível verificar correlações entre os locais de variação das velocidades sísmicas nos perfis de sísmica de refração rasa.

Os perfis de sísmica de refração rasa tiveram resultados eficazes em relação a identificação e diferenciação dos diferentes graus de alteração e/ou fraturamento em que os materiais estão submetidos. Em todas as seções foi possível diferenciar duas camadas geofísicas em virtude das velocidades sísmicas médias encontradas nas mesmas (Figuras 5 e 6).

O pacote superficial, com velocidades sísmicas que variaram de 447 m/s a 851 m/s, são compatíveis a materiais relacionados a solos, colúvios, depósitos superficiais bem como materiais inconsolidados ou pouco consolidados (Silva, 2013).

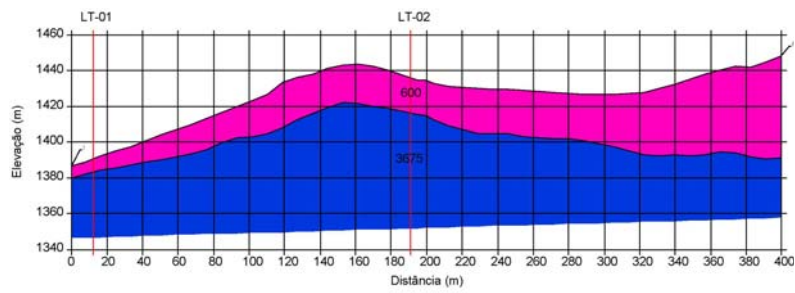


Figura 5: Seção de Sismica de Refração Rasa. Linha Longitudinal LL-01.

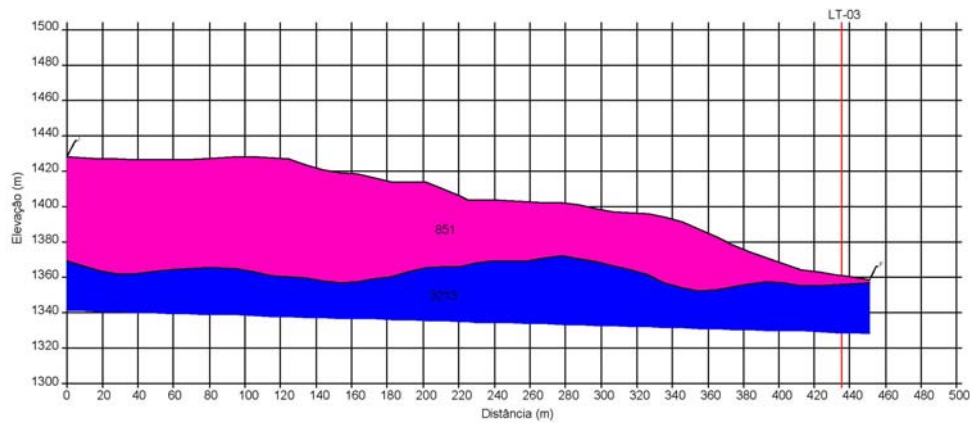


Figura 6: Seção de Sismica de Refração Rasa. Linha Longitudinal LL-04

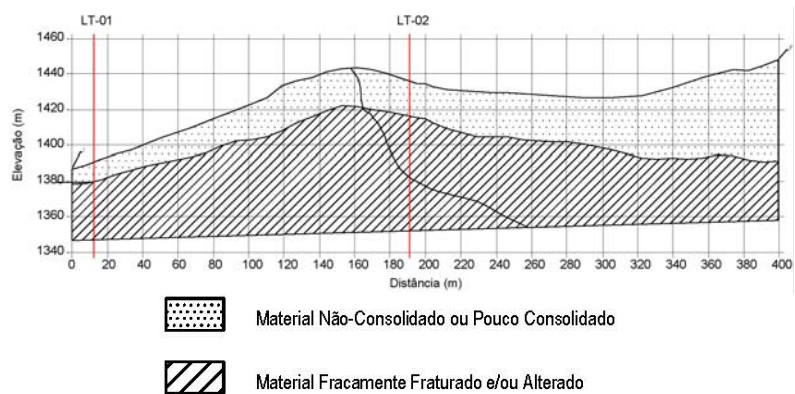


Figura 7: Modelo de Material Construído, Linha Longitudinal LL-01.

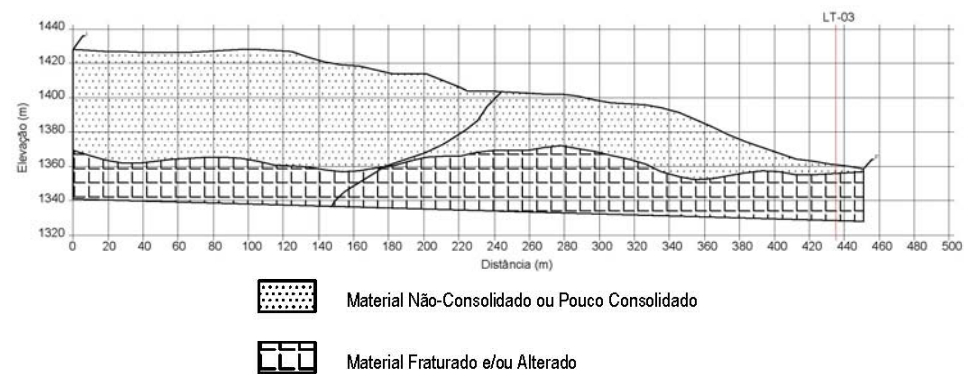


Figura 8: Modelo de Material Construído, Linha Longitudinal LL-04.

O segundo pacote, cujas velocidades aumentaram consideravelmente e variaram entre, aproximadamente, 2.400 m/s a 3.700 m/s, são compatíveis a materiais rochosos alterados e/ou fraturados quando associados aos menores valores de velocidade sísmica e compatíveis a materiais rochosos fracamente alterados e/ou fraturados quando associados aos maiores valores de velocidade sísmica encontrados (Silva, 2013).

A partir da correlação entre velocidades sísmicas *versus* grau de escarificabilidade (Redaelli & Cerello, 1998), foi possível fazer ponderações acerca de qual categoria os materiais relacionam-se.

De um modo geral, os valores médios de velocidade sísmica para o primeiro pacote relacionam-se a materiais de primeira categoria enquanto os valores relacionados ao segundo pacote geofísico enquadram-se a materiais de terceira categoria.

O modelo dos resultados vem de forma a corroborar com o estágio mais avançado do processo, ou seja, os modelos de materiais (Figuras 7 e 8).

A partir desses modelos, foi possível realizar ponderações acerca dos tipos de materiais encontrados e a caracterização do grau de resistência encontrado para os mesmos.

8 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho resultaram em uma correlação satisfatória no que se refere à identificação do tipo de material presente na área de estudo bem como sua caracterização quanto ao grau de alteração e/ou fraturamento.

O método de sísmica de refração constitui uma ferramenta essencial para a caracterização geomecânica dos materiais, permitindo a realização de ponderações a respeito de processos de alteração e/ou fraturamento. A metodologia gerou modelos de duas camadas com velocidades distintas no qual cada camada foi interpretada em termos do seu grau de alteração e/ou fraturamento. Em geral, a primeira camada apresentou velocidades sísmicas que variaram de 447 m/s a 851 m/s compatíveis a materiais relacionados a solos,

colúvios, depósitos superficiais bem como materiais inconsolidados ou pouco consolidados. A segunda camada, cujas velocidades aumentaram consideravelmente e variaram entre, aproximadamente, 2.400 m/s a 3.700 m/s, foram compatíveis a materiais rochosos alterados e/ou fraturados quando associados aos menores valores de velocidade sísmica e compatíveis a materiais rochosos fracamente alterados e/ou fraturados quando associados aos maiores valores de velocidade sísmica encontrados.

O tipo de fonte sísmica utilizado no levantamento geofísico constituiu uma inovação pioneira nas aquisições sísmicas de refração rasa do Brasil. O *Pyroblast-C*® representa uma tecnologia baseada em um cartucho pirotécnico industrial baseado em um composto propulsor integrado a um dispositivo elétrico (Esquipe) que reage ocasionando a liberação de grande volume de gás inofensivo, principalmente Nitrogênio (N) e Dióxido de Carbono (CO₂). Como forma de minimizar os riscos associados ao uso, transporte e manuseio da fonte, atualmente a tecnologia *Pyroblast-C*® vem sendo utilizada como forma alternativa ao explosivo convencional à emulsão.

Desta forma, a geofísica configurou-se como uma alternativa viável e satisfatória quanto a identificação e caracterização de materiais pertencentes à área de mineração, estado de Minas Gerais. As aquisições servirão como insumo técnico a posteriores estudos geotécnicos locais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradem às seguintes instituições pelo apoio e participação no projeto:

- Vale S.A. - Gerência de Geotecnia, Hidrogeologia e Fechamento de Mina - Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos;
- Neogeo Geotecnologia LTDA.;
- Trieste LTDA.

REFERÊNCIAS

- Alkmim, F. F. & Marshak, S. (1998). *Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero*. Precamb. Res., 90:29-58.
- Pyroblast-C®. Fragmentador de Rochas. <http://www.pyroblast-c.com>. Representante no Brasil: Trieste LTDA.
- Redaelli, L. L.; Cerello, L. (1998). “Escavações”. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. ABGE. Cap. 19. p. 311-330.
- Silva, M. (2013). Caracterização Geotécnica do Maciço Rochoso e Fundações em Estacas Embutidas em Rocha. Dissertação de Mestrado. Recife/PE. 169p.
- Spier, M. R.; Greiner, R.; Rodríguez-León, J. A.; Woiciechowski, A. L.; Pandey, A.; Soccol, V. T. and Soccol, C. R. (2008). *Phytase production using citric pulp and other residues of the agro-industry in SSF by fungal isolates*. Food Technol. Biotechnol., 46, 178-182.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. A. (1990). *Applied geophysics*, 2nd edition: Cambridge Univ. Press.