



Estudos sobre a função objetivo na estimativa de parâmetros elásticos a partir da inversão das amplitudes da onda P refletida acima do ângulo crítico em levantamentos de sísmica rasa

Marcus Vinicius Aparecido Gomes de Lima*, Liliana Alcazar Diogo e Renato Luiz Prado, IAG-USP, Brasil

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do 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.

Abstract

We propose to implement an inversion algorithm to estimate shear wave velocity (V_s) and density (ρ) above and below the reflecting interface, extracting the information contained in phase changes in the compressional wave pulse reflected at post-critical angles of incidence. For this, in this work, we developed a study of the complexity of the inverse problem in terms of model parameters. The proposed problem has four parameters, so the behavior of the objective function was analyzed through computed transversal sections varying two parameters, fixing the others in the correct values. The obtained results until this moment are promising, showing a good convergence to the correct solution.

Introdução

Os efeitos das mudanças de fase e amplitude do pulso sísmico em levantamentos de reflexão sísmica rasa foram discutidos por Pullan e Hunter (1985); Diogo et al. (2004) e Diogo (2004), chamando a atenção dos usuários das técnicas de reflexão rasa quanto aos problemas que esses efeitos podem causar na identificação e no processamento das reflexões quanto ao potencial para determinar as propriedades elásticas em subsuperfície.

A partição de energia na interface, quantificada pelo coeficiente de reflexão é o principal fator responsável pelas mudanças no caráter do pulso refletido para ângulos de incidência maiores do que o ângulo crítico (θ_c). O coeficiente de reflexão, por sua vez, depende do ângulo de incidência, das densidades (ρ) e das velocidades das ondas compressional e de cisalhamento (V_p e V_s , respectivamente) nos meios acima e abaixo do refletor.

Propõe-se explorar a informação contida nas mudanças de fase do pulso da onda compressional refletida acima do ângulo crítico para estimar a densidade e a velocidade da onda de cisalhamento (V_s) dos meios acima e abaixo do refletor.

Para tal, pretende-se implementar um algoritmo de inversão minimizando a diferença quadrática entre os valores calculados e observados das amplitudes das ondas P refletidas. Para simplificar o problema inverso, Para verificar a viabilidade e se existe ambigüidade na determinação dos parâmetros citados acima, a função objetivo foi avaliada utilizando dados sintéticos como

foi assumido que as velocidades da onda P e a profundidade do refletor são conhecidas, ou seja, foram previamente obtidas pelos métodos convencionais de reflexão ou de refração e, portanto, o problema inverso possui quatro incógnitas, as velocidades da onda S e as densidades dos meios acima e abaixo do refletor considerado.

Uma das principais vantagens da metodologia proposta seria a possibilidade em se obter os valores de V_s e ρ , a partir de levantamentos em superfície empregando apenas ondas compressoriais. Lembrando, que a realização de levantamentos com ondas de cisalhamento, em geral, apresentam dificuldades quanto à geração de energia e identificação dos eventos sísmicos.

Através dos valores V_p , V_s e ρ determinam-se os módulos de elasticidade dos meios, os quais são importantes para a caracterização e avaliação das propriedades mecânicas de maciços para aplicações em geotecnia; para a estimativa da porosidade e conteúdo de água, podendo ser úteis para a caracterização de aquíferos e até mesmo auxiliar em estudos de problemas ambientais.

Neste trabalho, foi desenvolvido um estudo sobre o comportamento da função objetivo, utilizando-se dados sintéticos, para avaliar a viabilidade da metodologia proposta e orientar a implementação do problema inverso.

Metodologia

A função objetivo a ser utilizada no procedimento de inversão é o ajuste por mínimos quadrados das amplitudes observadas e calculadas da onda P refletida, descrita como:

$$L = \sum_j \left(\sum_k (A_{j,k}^{obs} - A_{j,k}^{calc})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

onde:

- o índice j refere-se ao número do traço registrado;
- o índice k refere-se ao número da amostra dentro da janela de tempo;
- A^{obs} são as amplitudes observadas no sismograma registrado;
- A^{calc} são as amplitudes dos sismogramas sintéticos calculadas em função dos parâmetros (h , V_{p_i} , $V_{p_{i+1}}$, V_{s_i} , $V_{s_{i+1}}$, ρ_i e ρ_{i+1}) que correspondem, respectivamente, a profundidade do refletor, a velocidade da onda P, a velocidade da onda S e a densidade dos meios acima (índice i) e abaixo (índice $i+1$) do refletor considerado.

dados observados de modo a garantir um perfeito controle da análise dos resultados. Na Tabela 1 são

apresentados os parâmetros utilizados para simular os dados reais.

Tabela 1- Parâmetros do modelo

Camada	Prof. (m)	Vp (m)	Razão Vp/Vs	Densidade (g/cm ³)
Solo	5	370	3.32	1.53
Sedimento	32	1650	1.87	1.9
Embasamento		4200	1.73	2.54

O estudo foi conduzido para a reflexão no topo rochoso (segunda interface do modelo) de modo que os parâmetros a serem estimados são as densidades e as velocidades da onda S na camada de sedimentos e no embasamento. Por conveniência adotou-se a razão entre as velocidades da onda P e da onda S (Vp/Vs) como sendo a variável do problema.

Assumindo meios elásticos e homogêneos, utilizou-se o programa SEIS88 (Cerveny & Psencik, 1988), baseado na teoria do raio, tanto para simular os dados observados, como para gerar os sismogramas calculados para cada conjunto de parâmetros do modelo.

Na Figura 1 é apresentado o sismograma gerado simulando uma aquisição para análise de ruído (*walkway noise test*), comum em levantamentos de reflexão sísmica rasa. Foram selecionadas duas janelas de afastamentos para computar os valores da função objetivo. A primeira janela, iluminada em vermelho na Figura 1, corresponde à região em que as mudanças na forma do pulso sísmico são mais evidentes e, portanto, seria o intervalo de afastamentos ideal para o problema proposto. Entretanto, nos dados reais, existirá a superposição do pulso da onda refratada a partir da distância crítica, sendo que o comprimento da janela de afastamentos em que essa superposição vai ocorrer dependerá principalmente do conteúdo de frequência do sinal. Em função disso, uma segunda janela de afastamentos foi investigada, iluminada em azul na Figura 1 posicionada fora dos afastamentos em que ocorreria a interferência da refração, com o objetivo de avaliar qual a diferença no comportamento da função

objetivo calculada utilizando sinais refletidos que apresentam uma variação na fase menos evidente.

Os testes realizados considerando-se uma situação ideal, mesmo sabendo que na prática não será encontrada, são importantes para: 1) investigar a complexidade do problema e se existe ambigüidade na determinação dos parâmetros do modelo, devido a aspectos intrínsecos à teoria física que relaciona tais parâmetros aos valores das amplitudes calculadas e; 2) avaliar qual a influência de cada um dos aspectos que afetam os dados reais, comparando-se o efeito causado por esses com os resultados obtidos para a situação ideal. Nesse sentido, investigou-se a influência da presença de ruído aleatório e um próximo passo será gerar o sismograma sintético incluindo o pulso refratado para avaliar qual o seu efeito no comportamento da função objetivo.

O ruído foi inserido utilizando o programa "suaddnoise" do pacote SU. Adicionou-se 10% de ruído aleatório com distribuição gaussiana, gerado em todas as frequências até a Frequência de Nyquist e em seguida foi aplicado um filtro corta alta acima de 400Hz (ruído 1). Para simular uma perturbação maior nos dados, o ruído foi gerado dentro da faixa espectral da *wavelet* (até 400Hz) (ruído 2).

Para o cálculo da função objetivo foi efetuado um *mute* preservando apenas a reflexão de interesse. Nas Figuras 2a, 2b e 2c são apresentados, respectivamente, os sinais sem ruído, corrompidos pelo ruído 1 e pelo ruído 2.

Como o problema proposto tem quatro incógnitas, o comportamento da função objetivo foi analisado através de seções transversais calculadas variando-se dois dos parâmetros, mantendo-se os demais em seus valores corretos. Assim, foram geradas seis seções correspondendo a cada uma das possíveis combinações com dois parâmetros. Os valores calculados foram representados na forma de curvas de nível (Figura 3).

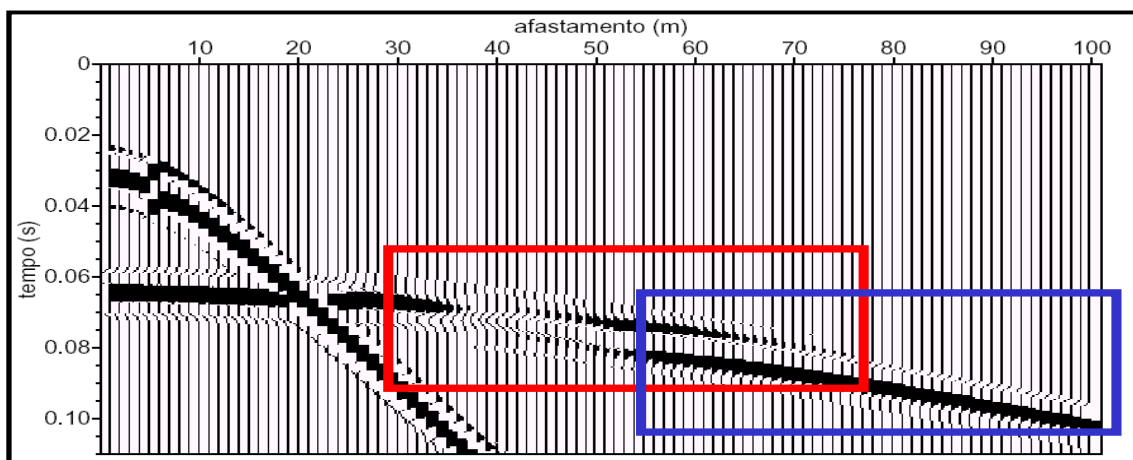


Figura 1- Sismograma sintético simulando uma aquisição para análise de ruído (*walkway noise test*), onde a janela de afastamentos iluminada em vermelho (correspondente ao intervalo de 30 a 78 m) representa a região em que as mudanças de fase são mais evidentes; e a janela de afastamentos iluminada em azul (correspondente ao intervalo de 55 a 103 m) seria representativa de uma região em que não ocorre superposição da refração.

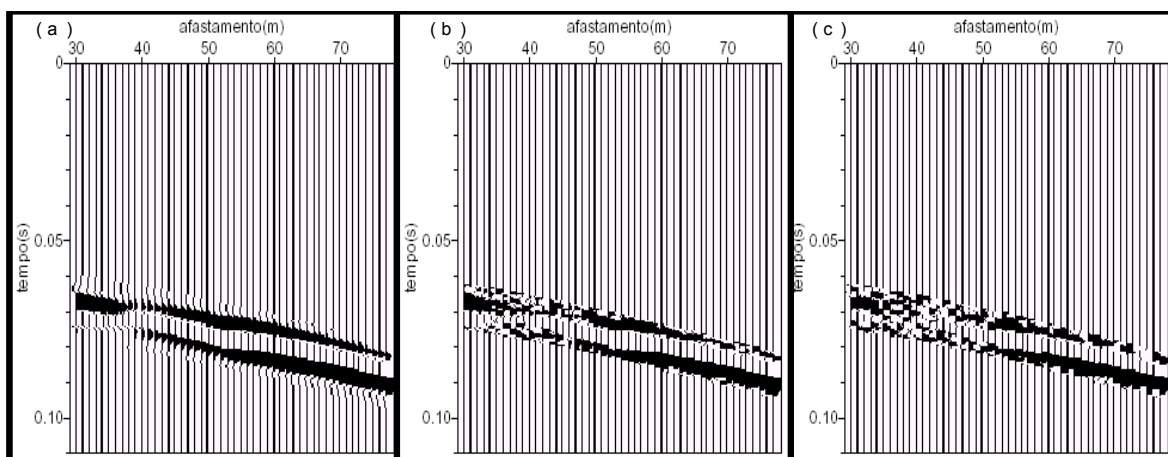


Figura 2- Registros selecionados (janela de afastamentos iluminada em vermelho na Figura 1) para o cálculo da função objetivo, simulando os dados observados: a) sem ruído; b) contaminados com o ruído 1 e c) contaminados com o ruído 2.

Discussões

Uma análise qualitativa do comportamento da função objetivo para a situação ideal, sem ruído, através das seções transversais apresentadas na Figura 3, mostrou que:

- 1) nos intervalos investigados não ocorreu a presença de mínimos locais;
- 2) o mínimo global, em todas as seções transversais, correspondeu aos valores exatos dos parâmetros do modelo investigado;
- 3) os valores da função objetivo no ponto de mínimo foram aproximadamente nulos;
- 4) a função objetivo apresentou diferentes topografias em cada uma das seções transversais;
- 5) em geral, as razões de velocidades **VpVs** são parâmetros melhor resolvidos do que as densidades, sendo que o parâmetro **VpVs(3)** é melhor resolvido que **VpVs(2)**.

Quando os sismogramas foram contaminados com ruído, observou-se:

- 1) em todas as seções transversais a topografia da função objetivo ficou mais suave, como exemplificado para as seções apresentadas na Figura 4;
- 2) que a posição do mínimo global permaneceu nos valores corretos, exceto para as seções apresentadas na Figura 5 (ruído 2) onde o ponto de mínimo global foi ligeiramente deslocado dos valores corretos, o que provavelmente poderia ser evitado eliminando-se os traços muito ruidosos no cálculo da função objetivo.

O comportamento da função objetivo calculada utilizando os sinais refletidos fora da região em que as mudanças de fase são mais evidentes (janela de afastamentos iluminada em azul na Figura 1) foi analisado sobre as seções apresentadas na Figura 6. Foram observadas topografias ligeiramente diferentes em relação às seções ilustradas na Figura 3, mantendo entretanto, as mesmas características mencionadas acima.

Conclusões

Os testes realizados até o momento indicaram que não existe ambigüidade na solução do problema inverso e que esse não apresenta complexidades, tais como, presença de mínimos locais e forte não linearidade.

Antes de implementar o algoritmo de inversão e de testá-lo sobre dados reais, serão realizados mais alguns testes com dados sintéticos para o cálculo da função objetivo, simulando situações que ocorrem em dados reais com o objetivo de assegurar a confiabilidade da metodologia proposta.

Agradecimentos

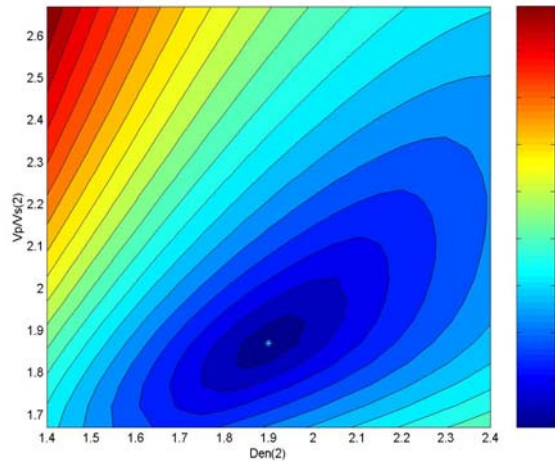
Nós agradecemos a Capes pela bolsa de estudos do aluno de mestrado M. V. A. G. de Lima.

Referências

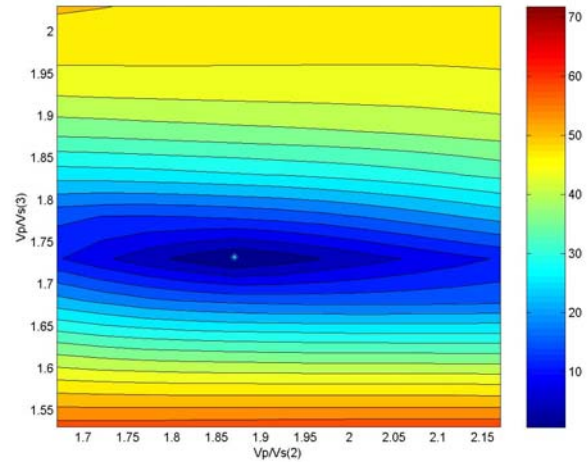
- Cervený, V., Pšenčík, I., 1988.** Program Package SEIS88.
- Cohen, J.K., Stockwell, J.W., 2000.** CWP/SU: Seismic Unix Release 33: A Free Package for Seismic Research and Processing. Center for Wave Phenomena. Colorado School of Mines, Colorado.
- Diogo, L.A., 2004.** Reflexão sísmica rasa acima do ângulo crítico de incidência: aquisição, processamento e interpretação. I Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, 26-28 setembro, 5p.
- Diogo, L.A., Le Diagon, F.M.M., Prado, R.L., 2004.** Bedrock imaging using post-critical shallow seismic reflection data. *Journal of Applied Geophysics* 57, 1-9.
- Pullan, S.E., Hunter, J.A., 1985.** Seismic model studies of the overburden-bedrock reflection. *Geophysics* 50, 1684-1688.

Resultados

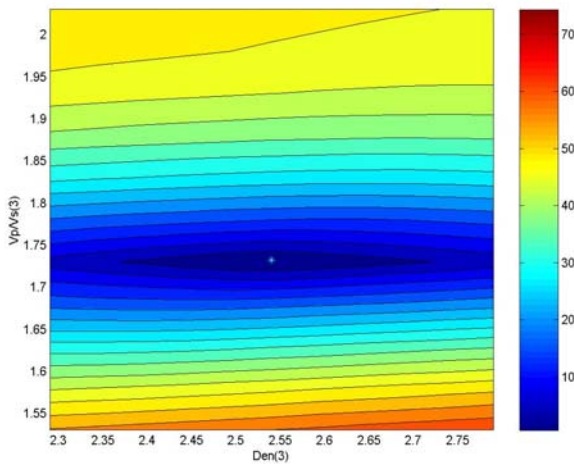
3- a



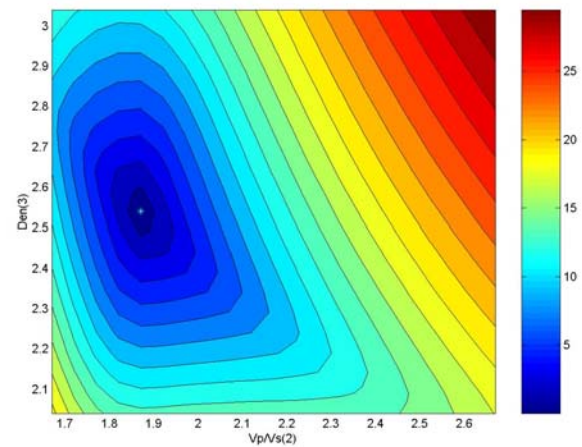
3- d



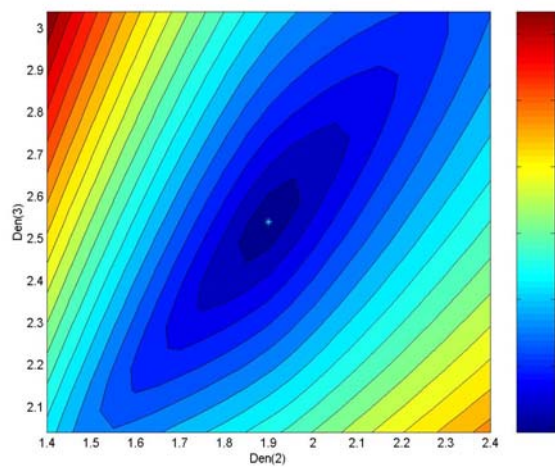
3- b



3- e



3- c



3- f

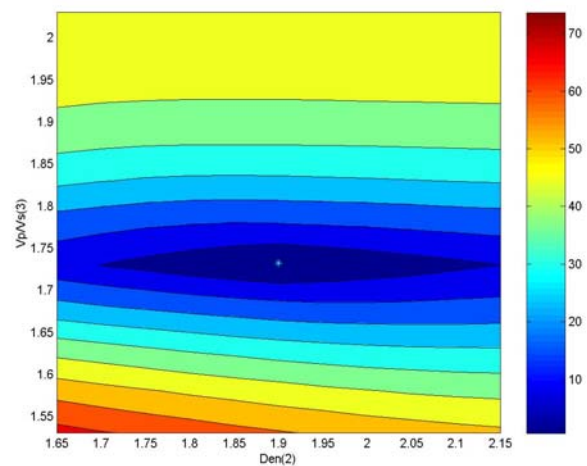
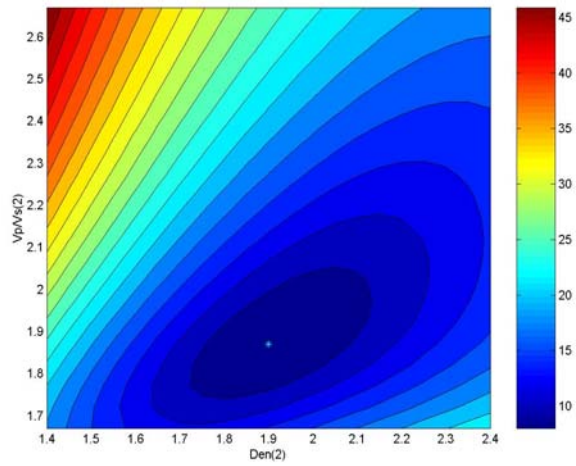


Figura 3- Seções transversais da função objetivo calculadas em função das variações dos parâmetros: $VpVs(2)$, $VpVs(3)$, $Den(2)$ e $Den(3)$, utilizando os dados sem ruído (Figura 2a)..

4- a



4- b

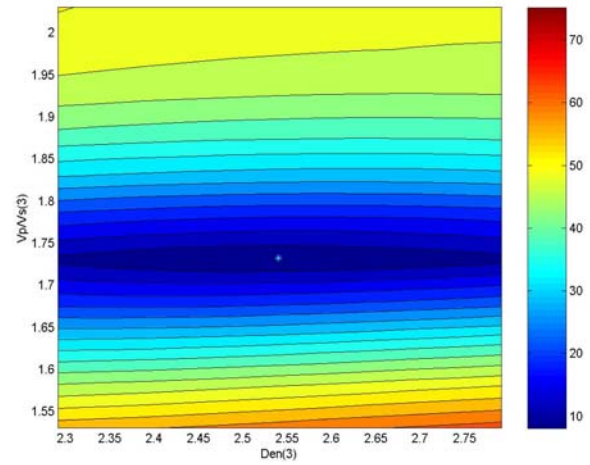
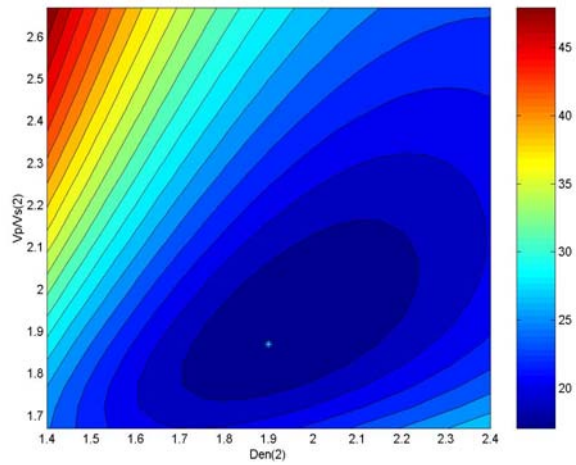
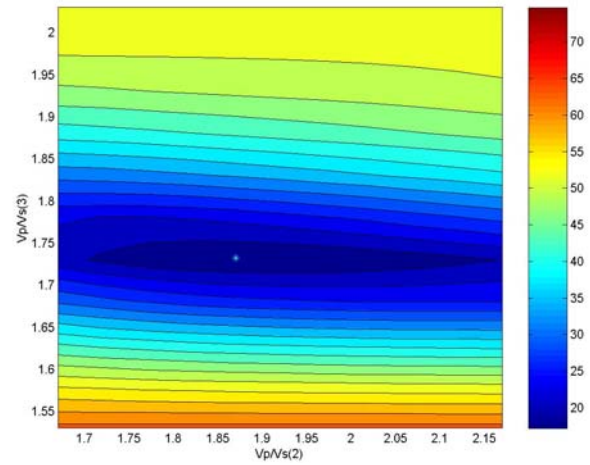


Figura 4- Seções transversais da função objetivo calculadas utilizando os dados com o ruído 1 (Figura 2b).

5- a



5- b



5- c

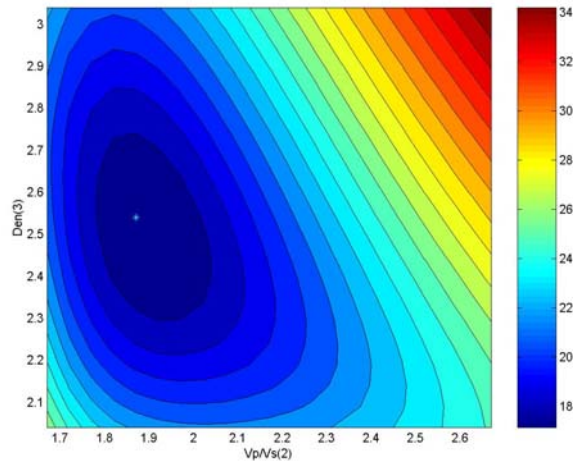
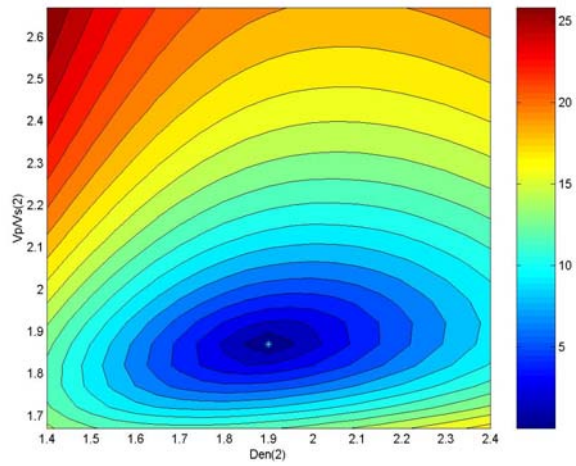
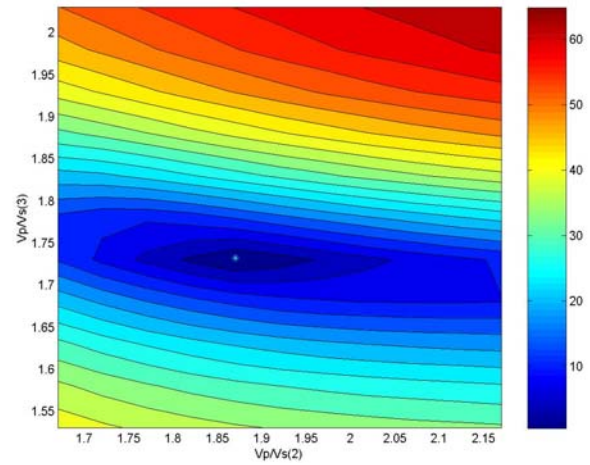


Figura 5- Seções transversais da função objetivo calculadas utilizando os dados com o ruído 2 (Figura 2c).

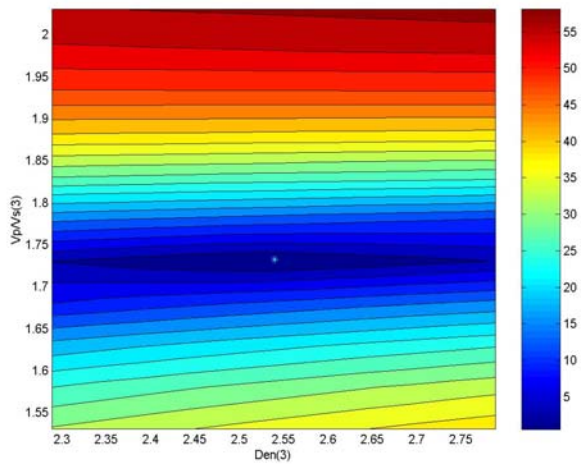
6- a



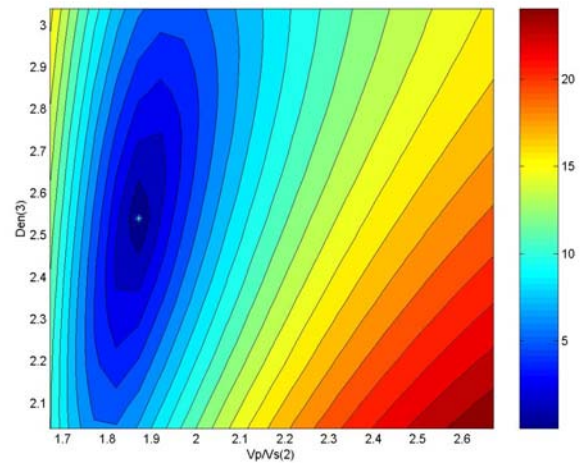
6- d



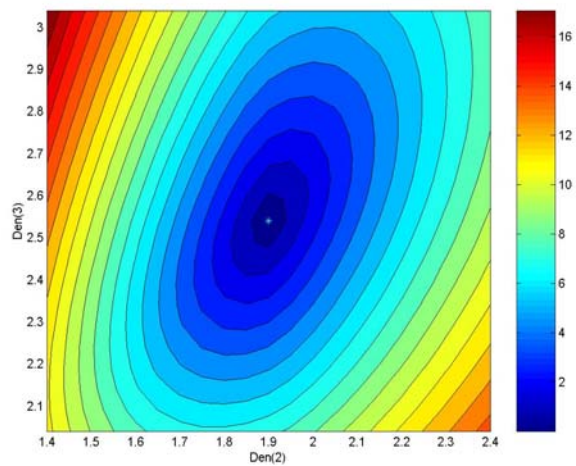
6- b



6- e



6- c



6- f

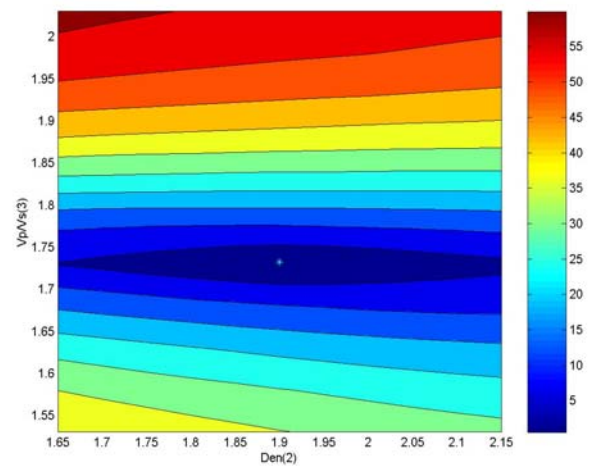


Figura 6- Seções transversais da função objetivo calculadas utilizando os dados da janela de afastamentos iluminada em azul (Figura 1).