



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## INVERSÃO DE COEFICIENTES DE REFLEXÃO $R_{pp}$ PARA DETERMINAÇÃO DE DIREÇÃO E GRAU DE FRATURAMENTO MEDIANTE REDES NEURAIS

R. O. V. dos Santos<sup>1</sup>, F. A.V. Artola<sup>1</sup>, S. A. B. da Fontoura<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LCG-GTEP / PUC-Rio – Grupo de Tecnologia em Engenharia de Petróleo, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Rua Marquês de São Vicente 225, Gávea, Rio de Janeiro. CEP 22453900  
{rvsantos, artola, fontoura }@civ.puc-rio.br

**Resumo** - A determinação dos parâmetros que controlam as propriedades físicas das rochas tem se transformado em um dos itens mais pesquisados nas últimas duas décadas. Muitos são os algoritmos que tem sido propostos com o intuito de relacionar atributos sísmicos com esses parâmetros. O amplo reconhecimento do caráter eminentemente anisotrópico dos materiais terrestres tem permitido construir relações matemáticas com significado físico muito mais realista do que as baseadas nas clássicas considerações isotrópicas. Isto tem tornado possível pensar na possibilidade de obtermos informações específicas relacionadas a parâmetros de rochas reservatório de óleo ou gás natural, muito úteis tanto para geocientistas como para engenheiros de petróleo, a partir de dados sísmicos. Aqui, estudamos as possibilidades de inversão dos coeficientes de reflexão  $R_{pp}$  em um modelo simples. Esta inversão é feita com Redes Neurais (RNs), a partir da análise da reflexão da onda P na interface que separa uma camada isotrópica de outra anisotrópica, considerando-se uma geometria de aquisição fixa e bem definida. O objetivo é a determinação dos parâmetros  $\phi$  (direção preferencial do sistema de fraturas verticais) e  $\eta$  (grau de fraturamento ou densidade de fraturas). Utiliza-se uma relação analítica que permite associar coeficientes de reflexão com diversos parâmetros do meio, entre eles  $\phi$  e  $\eta$ , para a geração de um banco de dados teórico que serve para treinamento e posterior teste das RNs projetadas. Os experimentos iniciais mostram bons resultados na determinação de  $\phi$  e  $\eta$ , fato que encoraja a extensão do procedimento para modelos mais realistas.

**Abstract** – The determination of the parameters that guide the physical properties of rocks has become one of the most researched fields for the last two decades. Many algorithms have been proposed to relate seismic attributes to such parameters. The well known anisotropic behavior of terrestrial materials leads to the construction of mathematical relations much more realistic than the ones based on the classical isotropic assumptions. This has made plausible the acquisition of very particular information about oil and gas reservoirs, which is useful not only for geoscientists but also for petroleum engineers, from seismic data. Here, we study the  $R_{pp}$  reflection coefficients inversion for a simple two layers model. This inversion is done by Neural Networks (NNs), analyzing the reflection of the P wave on the interface between an isotropic layer and an anisotropic one, given a fixed and well defined acquisition geometry. The aim is to determine the parameters  $\phi$  (preferential direction of the vertical fracture system) and  $\eta$  (fracture density). We make use of an analytical relation that associates  $R_{pps}$  values with an extent of media parameters, being  $\phi$  and  $\eta$  among them. The use of this relation allows the construction of a theoretical database, which is used to train and test the designed NNs. The initial experiments show good results on the prediction of  $\phi$  and  $\eta$ , what encourages subsequent research efforts.

## 1.Introdução

Todo trabalho que planeja a execução de processos de inversão, com o propósito de determinar valores confiáveis associados a parâmetros, tem que lidar com o problema da não unicidade da solução dos problemas. Este problema pode ser parcialmente relacionado com grau de “envolvimento” de cada parâmetro na resposta sísmica (atributo sísmico). As relações analíticas mostram que os parâmetros que controlam a resposta sísmica “participam” no efeito final em diferentes graus ( Grechka et al, 2001). Isso traz como consequência uma ambigüidade na determinação, mediante inversão, dos parâmetros menos “participativos”. O problema pode ficar muito mais difícil se os parâmetros a serem estudados não participam explicitamente nas relações matemáticas que associam os atributos sísmicos disponíveis com os parâmetros do meio estudado.

Em face desses problemas, avaliamos aqui um método robusto para inversão de coeficientes de reflexão  $R_{pp}$ , baseado em Redes Neurais (RNs) e visando a obtenção dos parâmetros  $\phi$  e  $\eta$  (direção preferencial do sistema de fraturas verticais e grau de fraturamento). Ainda que se tenha usado dados sintéticos nesse trabalho, a metodologia pode ser imediatamente estendida para dados reais, bastando para isso que os valores de  $R_{pp}$  sejam adquiridos a partir de dados sísmicos. Esses coeficientes podem ser obtidos utilizando-se algumas das técnicas de processamento amplamente disponíveis na literatura (Castagna & Backus, 1993).

Os dados sintéticos foram gerados usando-se um modelo simples e bem definido, consistindo em uma interface que separa uma camada isotrópica de uma outra anisotrópica (Figura 1). O caráter anisotrópico da segunda camada é induzido pela presença de um sistema de fraturas verticais, orientados segundo o ângulo  $\phi$  com relação a uma direção de observação.

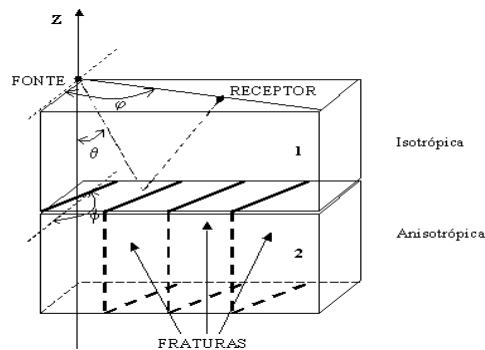


Figura 1 – Modelo

Em termos gerais, os coeficientes de reflexão são funções não lineares, muito complexas, dos parâmetros do meio. Nos anos recentes, algumas aproximações têm sido propostas para caracterizar os coeficientes de reflexão e transmissão para os modos PP e PS em meios anisotrópicos ( Ruger, 1997; Vavrycuk & Psencik, 1998; Jílek, 2001). Pelo menos teoricamente, os parâmetros que podem ser determinados usando-se essas relações, mediante inversão, são, basicamente, o contraste de velocidades associadas às ondas P e S, o contraste de densidades e os parâmetros anisotrópicos de Thomsen (Thomsen, 1986), já que  $R_{pp}$  é função desses parâmetros.

A técnica de RNs vista como ferramenta de regressão não linear vai justamente de encontro ao problema da não linearidade na relação  $R_{pp}$  – parâmetros dos meios. A complexidade da tarefa é potencialmente contornada com algoritmos robustos de aprendizagem sobre um banco de dados observado ou mesmo gerado sinteticamente (Haykin, 1999).

Com o propósito de obter-se os parâmetros  $\phi$  e  $\eta$  por inversão com RNs, determinou-se, primeiro, um conjunto de tensores elásticos (*compliance* e *stiffness*) em função desses parâmetros. Para isso foi aplicada a teoria conhecida como *linear slip* (Schoenberg, 1980; 1983). A partir dos tensores calculados, fazendo-se uma combinação adequada dos seus elementos linearmente independentes, calculou-se os parâmetros anisotrópicos de Thomsen para valores específicos de  $\phi$  e  $\eta$ . Com os parâmetros de Thomsen e a equação que relaciona o  $R_{pp}$  com parâmetros do meio (Equação 1), em particular com  $\phi$  e  $\eta$ , construiu-se um banco de dados com o propósito de treinar e testar as RNs projetadas, de modo que elas permitam estimar valores associados aos parâmetros de interesse, sempre que se disponha de novos valores de  $R_{pp}$  como informação de entrada.

Por tratar-se de um trabalho experimental, para a geração do banco de dados, considerou-se duas restrições principais:

- i) Conhecimento prévio das velocidades  $\alpha$  (velocidade vertical da onda P) e  $\beta$  (velocidade vertical da onda S), e das densidades dos meios.
- ii) Disponibilidade da seguinte geometria de aquisição hipotética: 9 receptores posicionados de acordo com as combinações de três azimutes ( $\varphi$ ) – 15°, 45° e 120° - e três ângulos de incidência ( $\theta$ ) – 20°, 25° e 30°.

Considerou-se que, para o projeto das RNs, um vetor de entrada com 9 valores de  $R_{pp}$ , colhidos cuidadosamente da geometria de aquisição fixada (nove receptores), seja suficiente para determinação dos parâmetros objetivos em questão ( $\phi$  e  $\eta$ ).

## 2. Variação dos coeficientes $R_{pp}$ com o ângulo de incidência e o azimute

Se assumirmos uma interface horizontal e plana separando dois meios anisotrópicos, o  $R_{pp}$  pode ser escrito como (Vavrycuk & Psencik, 1998):

$$R_{pp} = P_0 + P_1 \sin^2 \theta + P_2 \sin^2 \theta \operatorname{tg}^2 \theta \quad (1)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de incidência e, os termos  $P_0$ ,  $P_1$  e  $P_2$  são dados por:

$$P_0 \approx \frac{1}{2} \frac{\rho_2 - \rho_1}{\left(\frac{\rho_1 + \rho_2}{2}\right)} + \frac{1}{2} \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right)} \quad (2)$$

$$P_1 = P_1^{(ABS)} + P_1^{(M)} \sin \varphi \cos \varphi + P_1^L \sin^2 \varphi \quad (3)$$

$$P_2 = P_2^{(ABS)} + P_2^{(M1)} \sin 2\varphi \cos 2\varphi + P_2^{(M2)} \sin \varphi \cos \varphi + P_2^{(M3)} \sin^2 \varphi \cos^2 \varphi + P_2^L \sin^2 \varphi \quad (4)$$

onde  $\varphi$  é o azimute do plano incidente e,  $P_1^{(ABS)}$ ,  $P_1^{(M)}$ ,  $P_1^L$ ,  $P_2^{(ABS)}$ ,  $P_2^{(M1)}$ ,  $P_2^{(M2)}$ ,  $P_2^{(M3)}$  e  $P_2^L$  são termos que dependem de  $\alpha$  e  $\beta$ , e dos parâmetros anisotrópicos de Thomsen (Thomsen, 1986).

No contexto do nosso problema, o elemento estrutural que induz a variação azimutal de  $R_{pp}$  é o sistema de fraturas verticais.

## 3. Metodologia de obtenção de $\phi$ e $\eta$

Considerando-se a geometria de aquisição fixada nesse trabalho, os parâmetros anisotrópicos de Thomsen, para o efeito do cálculo do  $R_{pp}$ , podem ser relacionados com as seguintes variáveis:

**Tabela 1** – Parâmetros para a determinação dos tensores *compliance* e *stiffness* e para o cálculo de  $R_{pp}$

$\phi$ - Direção do sistema de fraturas $[0, \pi/2]$
$\eta$ - densidade de fraturas
$\alpha_1$ - Velocidade da onda P no meio 1
$\alpha_2$ - Velocidade da onda P no meio 2
$\beta_1$ - Velocidade da onda S no meio 1
$\beta_2$ - Velocidade da onda S no meio 2
$\rho_1$ - Densidade do meio 1
$\rho_2$ - Densidade do meio 2

Variando-se os valores atribuídos a cada uma das grandezas da Tabela 1, diversos tensores *compliance* e *stiffness*, assim como de  $R_{pp}$ , são computados, podendo-se gerar um grande banco de dados teórico. A proposta consiste na utilização desse banco de dados no treinamento supervisionado de uma RN de regressão, que posteriormente pode ser testada com dados reais, de forma similar ao realizado em Boadu, 1998. O atributo objetivo, ou seja, o atributo a ser determinado pela inversão, pode ser, teoricamente, qualquer um dos parâmetros exibidos na Tabela 1. Aqui os atributos objetivos serão  $\phi$  e  $\eta$ . Os atributos preditivos são o conjunto de valores de  $R_{pp}$  calculados para formação do banco de dados teórico.

Com o propósito de determinar os parâmetros  $\phi$  e  $\eta$ , projetaram-se duas arquiteturas de RNs Multilayer Perceptron – Back Propagation (Haykin, 1999). Os 9 valores de  $Rpp$  obtidos da geometria de aquisição fixada compõem o vetor entrada (“tupla preditiva”) em comum (Tabela 2), e os valores de  $\phi$  e  $\eta$  constituem-se nas respectivas saídas (“tuplas objetivas”). As arquiteturas são ilustradas na Figura 2.

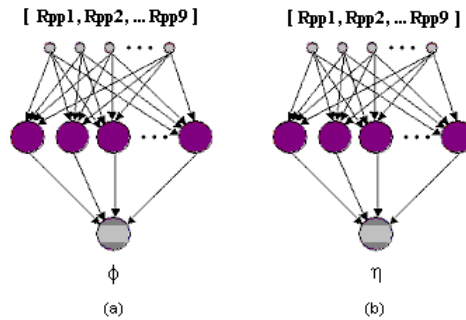


Figura 2 - Arquiteturas propostas. Em (a), para obter  $\phi$ ; em (b) para obter  $\eta$

Tabela 2 – Tupla preditiva (Vetor de entrada)

TUPLA PREDITIVA								
$Rpp(\varphi_1, \theta_1)$	$Rpp(\varphi_2, \theta_1)$	$Rpp(\varphi_3, \theta_1)$	$Rpp(\varphi_1, \theta_2)$	$Rpp(\varphi_2, \theta_2)$	$Rpp(\varphi_3, \theta_2)$	$Rpp(\varphi_1, \theta_3)$	$Rpp(\varphi_2, \theta_3)$	$Rpp(\varphi_3, \theta_3)$
$\theta_1 = 20^\circ$			$\theta_2 = 25^\circ$			$\theta_3 = 30^\circ$		
$\varphi_1=15^\circ, \varphi_2=45^\circ, \varphi_3=120^\circ$								

Para simplificar o processo de inversão, a construção do banco de dados para treinamento foi realizada mantendo-se o maior número possível de parâmetros da Tabela 1 constantes. A Tabela 3 mostra os valores utilizados para formação das tuplas objetivas e preditivas:

Tabela 3 – Intervalos para construção do banco de dados teórico – obtenção de  $\phi$  e  $\eta$

PARÂMETRO	INTERVALO
$\phi$ (graus)	[0, 1, 2, ..., 90] - 91 valores
$\varphi$ (graus)	[15, 45, 120] – 3 valores
$\theta$ (graus)	[20, 25, 30] – 3 valores
$\eta$	[0,01; 0,02; ... ; 0,20] – 20 valores
$\alpha_1$ (Km/s)	3,5
$\alpha_2$ (Km/s)	4,0
$\beta_1$ (Km/s)	1,75
$\beta_2$ (Km/s)	2,00
$\rho_1$ (kg/m <sup>3</sup> )	$2,1 \times 10^3$
$\rho_2$ (kg/m <sup>3</sup> )	$2,3 \times 10^3$

Assim, três tabelas distintas podem ser separadas nesse problema. A primeira, definida por tuplas mostradas na Tabela 2, é a tabela preditiva compartilhada pelos dois casos de inversão; as outras duas são tabelas com apenas uma coluna cada uma, representando as variáveis objetivo em questão ( $\phi$  e  $\eta$ ). Com os intervalos de dados sugeridos, o número total de registros gerados em cada tabela considerada foi  $91 \times 20 = 1800$ . Considerando-se uma representação numérica de 8 bytes por campo, o volume total em disco rígido ocupado nesse caso é de aproximadamente 155 KB.

## 4. Resultados

Cada uma das RNs construídas (Figura 2) foi treinada com 2/3 do total de observações geradas no banco de dados (1200) e testada sobre o número de observações restantes (600). A escolha dos conjuntos de treinamento e teste foi aleatória, e o conjunto de pesos iniciais de cada rede foi determinado por validação cruzada (Haykin, 1999).

A Figura 3 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos para estimação do grau de fraturamento e os valores originais desse parâmetro no conjunto de teste; o erro MAPE (mean absolute percentage error) foi de 1,75. A Figura 4 mostra o gráfico de dispersão pertinente.

Para estimação da direção do sistema de fraturas, a Figura 5 compara os valores originais e os valores previstos, nas 600 observações de teste; o erro MAPE ficou em 5,69. O gráfico de dispersão associado é mostrado na Figura 6.

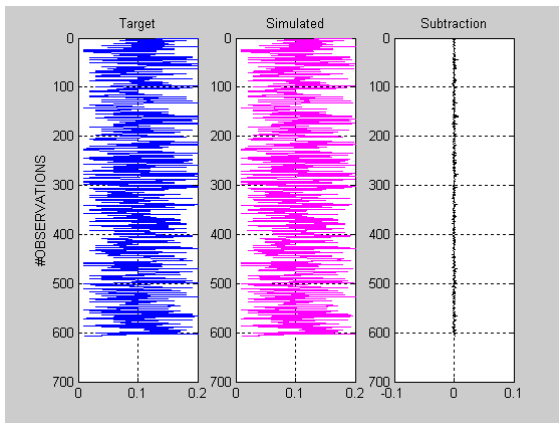


Figura 3: Determinação de  $\eta$  sobre o conjunto de teste. *Target* = Original, *Simulated* = Previsto e *Subtraction* = Target-Simulated.

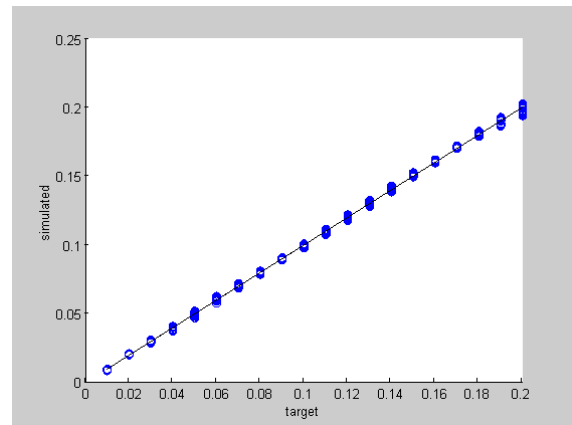


Figura 4: Gráfico de dispersão, Previsto x Real.

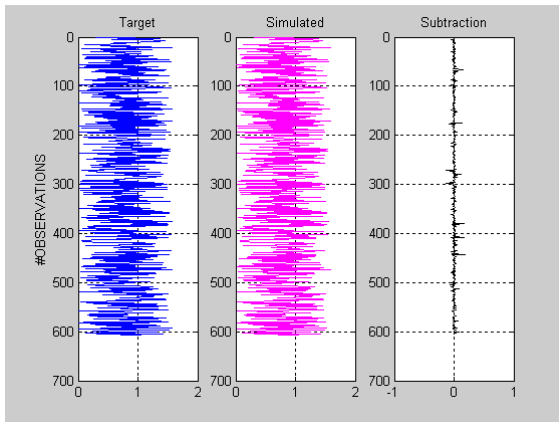


Figura 5: Determinação de  $\phi$  (radianos) sobre o conjunto de teste. *Target* = Original, *Simulated* = Previsto e *Subtraction* = Target-Simulated.

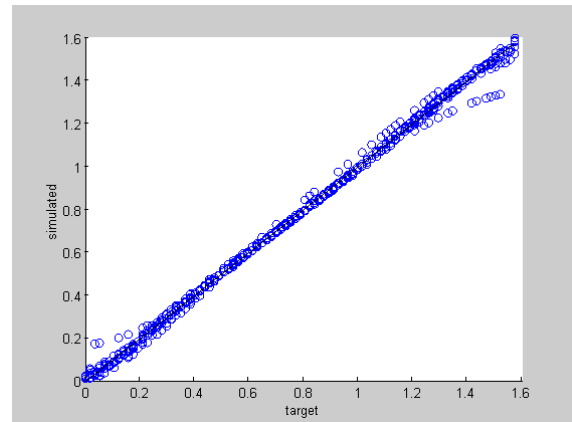


Figura 6: Gráfico de dispersão, Previsto x Real.

## 5. Conclusões

Apesar do caráter preliminar dos experimentos, os resultados são bons, já que, de fato, as RNs construídas mostram bom desempenho na previsão, i.e.,  $MAPE < 10$ . Convém esclarecer que o limite superior  $MAPE = 10$ , ou 10% de erro absoluto médio no conjunto de teste, é um valor admitido pelo especialista geofísico como razoável para esta aplicação.

O uso de uma função matemática que serve como ponte entre uma grandeza associada a um atributo sísmico –  $R_{pp}$  – e os parâmetros do meio, revela ser bastante adequado para formação de um banco de dados relevante, permitindo a

aplicação bem sucedida de RNs no processo de inversão. Assim sendo, com base nos resultados deste trabalho, planeja-se fazer mais experimentos, de modo a ampliar a avaliação da metodologia sugerida, estendendo-a para cenários muito mais realistas e complexos.

## 6. Referências

- BOADU, F., 1998, Inversion of fracture density from field seismic velocities using artificial neural networks: *Geophysics*, 63, 534-545.
- CASTAGNA, J. P. and BACKUS, M.M., 1993, AVO analysis-tutorial and review. Offset-dependent reflectivity - Theory and practice of AVO analysis: *Soc.Expl. Geophys.*, 3-37.
- GRECHKA, V.; BAKULIN, A. & TSVANKIN, 2001, Seismic characterization of vertical fractures described as general linear-slip interfaces, CWP project review report.
- HAYKIN, S., 1999, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- JÍLEK, P., 2001, Converted PS-wave reflection coefficients in weak anisotropic media: CWP project review report.
- RUGER, A., 1997, P-wave reflection coefficients for transversely isotropic models with vertical and horizontal axis of symmetry: *Geophysics*, 62, 713-722.
- SCHOENBERG, M., 1980, Elastic wave behavior across linear slip interfaces: *J. Acoust. Soc. Am.*, 68, 1516-1521.
- SCHOENBERG, M., 1983, Reflection of seismic wave from periodically stratified media with interfacial slip: *Geophys. Prosp.*, 31, 265-292.
- THOMSEN, L., 1986. Weak elastic anisotropy, *Geophys.*, 51, 1954-1966.
- VAVRYCUK, V. & PSENCIK, I., 1998, PP-wave reflection coefficients in weakly anisotropic elastic media: *Geophysics*, 63, 2129-2141.