

# Modelamento do Coeficiente de Efeito do Ângulo de Incidência para Transdutores não Focalizados usando Curvas Cáusticas e Dados Experimentais

Valquíria Macedo<sup>1</sup>, Brígida Rocha<sup>1</sup>, Stefan Luthi<sup>2</sup> e Karel Heller<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Federal do Pará, Brazil.

<sup>2</sup>Department of Applied Earth Sciences, Delft University of Technology, The Netherlands

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 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.

## Abstract

We performed laboratory experiments on selected representative rock samples to investigate the dependence of a reflected ultrasonic pulse on the angle of incidence. Non-focussed transducers with frequencies of 200 kHz and 500 kHz are used. The results show a simple relationship that, when normalized for the peak amplitude, is only a function of the frequency and not the rock type (i.e. the acoustic impedance). This behavior can be mathematically described by a simple geometric model with random noise. Beyond a critical angle, the reflected signal is, for all practical purposes, lost.

## Introdução

No Laboratório Dietz da Universidade de Delft, Holanda, foram realizadas medidas de amplitude refletida para estudar o comportamento da amplitude do sinal refletido com o uso da ferramenta de varredura ultra-sônica (Ultrasonic Borehole Imager, UBI, Marca registrada da Schlumberger) para variações de ângulo de incidência. Estes experimentos foram usados posteriormente, para comprovar as simulações teóricas. A Figura 1 mostra o diagrama do sistema de medidas usado para a aquisição dos dados.

Para a realização das medidas, foram utilizados um Gerador de Pulso PANAMETRIX, um osciloscópio Le Croy 9400, Dual de 125 MHz e um PC IBM. As medidas foram efetuadas usando dois transdutores não focalizados, de 200 e 500 kHz, e três diferentes amostras: alumínio, arenito e siltito, todas com superfícies lisas.

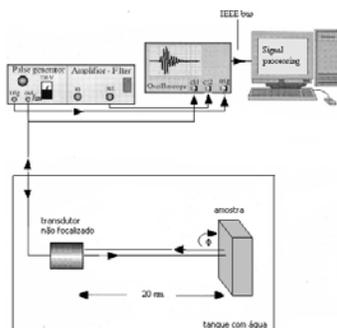


Figura 1 – Diagrama do sistema de medidas.

Todas as medidas foram feitas em um tanque com água e o posicionamento das amostras, bem como o pré-processamento, foram efetuados sob controle do mesmo computador.

O alumínio foi escolhido porque tem suas propriedades físicas bastante conhecidas servindo nesse caso como padrão de aferição. As amostras de arenito (Bentheimer sandstone) e siltito (Beringer siltstone) foram escolhidas porque são rochas tipicamente encontradas em situações reais de perfuração de poço na indústria petrolífera. A argila, embora seja comum em rochas sedimentares, não pode ser usada nestes experimentos porque não é resistente ao contato com a água, utilizada como meio de propagação dos sinais ultra-sônicos. A composição mineralógica das amostras estudadas é dada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição mineralógica das amostras.

	Arenito	Siltito
quartzo	56,75 %	53,70 %
ilita	17,85 %	17,96 %
kaolinita	9,01 %	9,31 %
Na-albita	7,37 %	7,5 %
siderita	4,02 %	2,73 %
clorita	3,08 %	2,89 %
outros	1,92 %	2,31 %

O procedimento experimental consistiu em girar a amostra em torno do eixo x em passos de meio grau, com o transdutor localizado a uma distância fixa de 20 cm, com o objetivo de satisfazer as condições de campo distante, uma vez que o campo próximo calculado para cada transdutor estende-se até 5,3 cm. Para cada medida, foram tomadas 4096 amostras, com o tempo variando a cada 10 nanosegundos. A amplitude da onda refletida foi obtida através da transformada de Hilbert da forma de onda registrada para cada ângulo de incidência, uma vez que a transformada de Hilbert permite calcular a envoltória do sinal e a extração do valor de pico.

## Resultados Experimentais

Na figura 2 são mostradas as respostas das ondas completas para a amostra de alumínio, usando o transdutor de 200 kHz. O ângulo de incidência é definido como a diferença entre o eixo de propagação da onda e a normal à superfície da amostra. As amplitudes refletidas

das três amostras em função do ângulo de incidência são mostradas na figura 3(a) para o transdutor de 200 kHz e na figura 3(b) para o transdutor de 500 kHz. As curvas são normalizadas pela amplitude máxima, ou seja, pelo caso de incidência normal (0 grau).

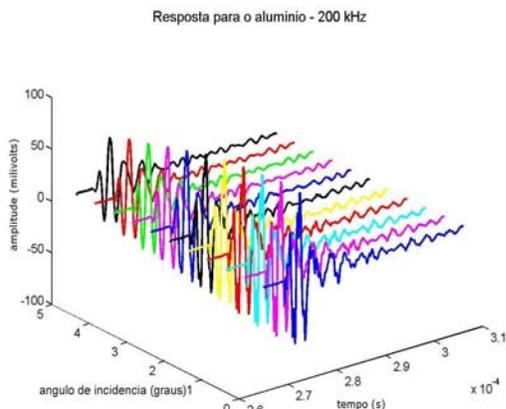


Figura 2 - Resposta do alumínio para o transdutor de 200 kHz de 0 a 5 graus.

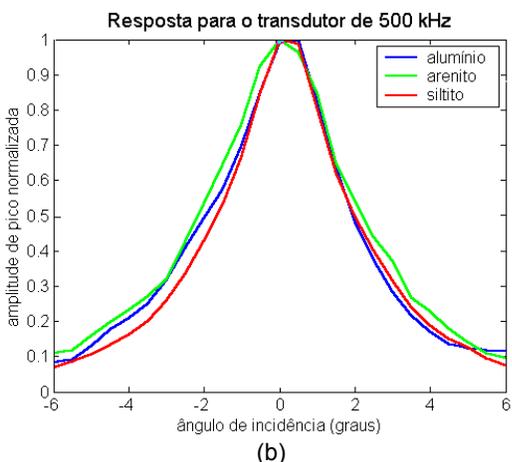
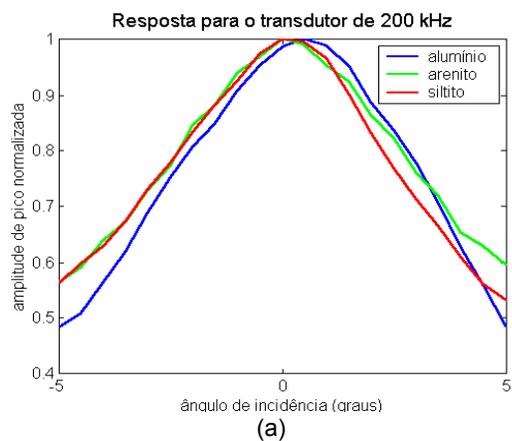


Figura 3 – Amplitude refletida normalizada: (a) Transdutor de 200 kHz; (b) Transdutor de 500 kHz

Visto que a amplitude da onda refletida depende da frequência e do ângulo de incidência, pode-se observar que quanto maior a frequência, mais rapidamente decresce a amplitude da onda refletida. O mesmo

comportamento ocorre com o aumento do ângulo de incidência. Além disso, a propagação de uma onda sonora através de um corpo poroso como uma rocha, é modificada por vários fatores, entre os quais a separação entre as partes sólidas da rocha (porosidade) e o tipo de material sólido (litologia). Obviamente, o tipo, a forma, as irregularidades e a compactação dos grãos que formam a parte sólida da rocha, influenciarão na amplitude do sinal refletido de acordo com o ângulo de incidência

Georgi(1985) determinou, experimentalmente, que a perda de amplitude resultante da variação no coeficiente de reflexão para desvios menores que 5 graus, pode ser superior a 50%. A Figura 3 apresenta perdas de aproximadamente 50 % para o transdutor de 200 kHz e perdas bem superiores a este valor para 500 kHz. A principal justificativa para que isto ocorra é devido ao fato da energia do transdutor ser colimada, de forma que quanto maior o ângulo de incidência, menor a energia refletida que volta ao transdutor. Além disso, o feixe acústico tem uma largura finita e é aconselhável que haja um compromisso do ângulo ente os raios incidentes e os raios refletidos. Um aumento entre estes ângulos pode fazer com que a energia acústica recebida deixe de ser refletida especularmente e passe a ser energia de espalhamento. Os efeitos da atenuação da onda, no meio 1, e os limites de detecção e resolução do transdutor são fatores que também devem ser considerados.

**Apresentação do modelo e testes em dados experimentais**

A Figura 4 apresenta o esquema simplificado de obtenção das respostas das superfícies rochosas em função do ângulo de incidência da onda ultra-sônica.

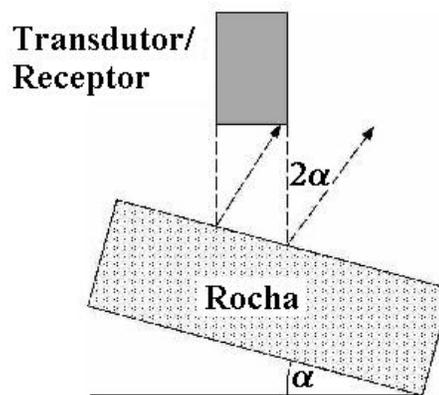


Figura 4 – Posição da amostra em função do ângulo de inclinação de  $\alpha$  graus

O transceptor (transmissor/receptor) permanece em uma posição fixa, enquanto que as amostras são inclinadas a cada medida. Obviamente, a cada movimento, o ângulo de incidência não será mais normal à superfície da amostra e sabe-se que, quando a amostra gira de um determinado ângulo, em torno de um eixo normal ao plano de incidência, o raio refletido gira, no mesmo sentido, o dobro do ângulo de giro da amostra. Portanto, para uma inclinação  $\alpha$ , o ângulo de reflexão será  $2\alpha$ , conforme mostrado na Figura 5.

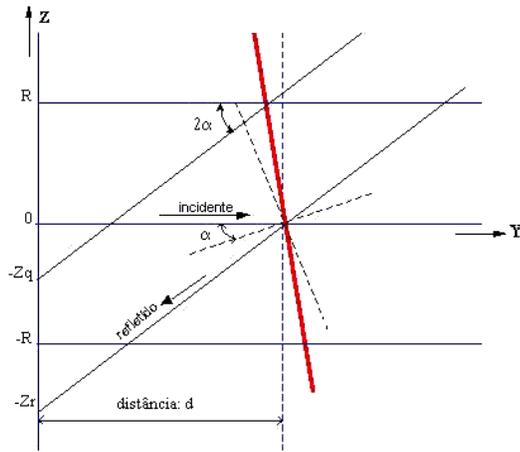


Figura 5 – Diagrama para o cálculo da interseção da área refletida com a área do transdutor.

Para calcular a resposta de uma superfície por um feixe ultra-sônico refletido, é necessário calcular as contribuições para o sinal elétrico a partir da interseção do feixe refletido com a área do transdutor. Empregando o diagrama mostrado, na Figura 5, foram deduzidas as equações para calcular as áreas de interseção (Macedo,2002), onde:

- Zr = deflexão vertical do feixe refletido;
- Zq = deflexão vertical do feixe incidente;
- d = distância axial até a superfície refletora;
- α = ângulo de incidência;
- 2α = ângulo de reflexão.

Para uma rotação positiva do plano de incidência

$$Zr = Zq - \left(d + \frac{Zq}{\text{tg}(\alpha)}\right)\text{tg}(2\alpha) \quad (1)$$

e para uma rotação negativa do plano de incidência

$$Zr = Zq + \left(d + \frac{Zq}{\text{tg}(\alpha)}\right)\text{tg}(2\alpha) \quad (2)$$

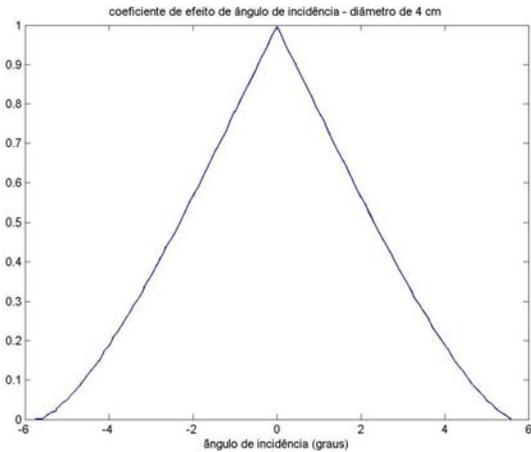
Na Figura 6(a), está representada a área iluminada pela onda refletida, denominada neste trabalho de coeficiente de efeito de ângulo de incidência, para o transdutor de 200 kHz, considerando que a área do transdutor e a área iluminada são as mesmas. A Figura 6(b) mostra a mesma curva para o transdutor de 500 kHz.

De acordo com Angelsen (2000), após o ponto de transição entre a zona de Fresnel e a zona de Fraunhofer, o feixe de um transdutor não focalizado diverge em um ângulo consistente dado por

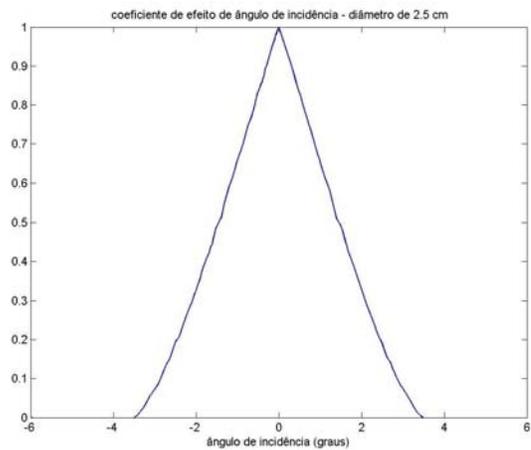
$$\theta = \arcsen\left(0.61 \frac{\lambda}{r}\right) \quad (3)$$

Para o transdutor de 200 kHz, com raio de 2 cm, este ângulo é igual a 13,2235 graus, enquanto que para o transdutor de 500 kHz e raio de 1,25 cm, o ângulo é 8,4184 graus. Usando um simples cálculo trigonométrico para estes ângulos e uma distância de 20 cm (localização da amostra), há um aumento considerável no raio do círculo que representa a área iluminada. Por outro lado, a expressão (3) também define o ângulo onde o feixe acústico tende a zero. Isto significa que, apesar da área

ser maior, a principal contribuição para a reflexão se concentra próximo ao eixo do transdutor, visto que há um decréscimo considerável da potência do feixe nas regiões fora do eixo e próximas das bordas. Levando em conta estes fatores, no cálculo da reflexão, considerou-se uma área iluminada 10 % superior à área do transdutor.



(a)



(b)

Figura 6 – Efeitos do ângulo de incidência: (a) Coeficiente de efeito de ângulo de incidência para uma superfície circular com 4 cm de diâmetro (transdutor de 200 kHz); (b) Coeficiente de efeito de ângulo de incidência para uma superfície circular com 2,5 cm de diâmetro (transdutor de 500 kHz).

**Ruído**

Na realização dos experimentos, para obtenção das respostas das superfícies rochosas, em função do ângulo de incidência da onda ultra-sônica, verificou-se que para o transdutor de 200 kHz para ângulos absolutos maiores que 5 graus, dependendo do valor deste ângulo, havia perda do sinal com redução da amplitude para valores inferiores a 10 % do valor com incidência normal em uma escala de milivolts. Para o transdutor de 500 kHz este efeito era verificado para ângulos absolutos superiores a 6 graus.

Depois de realizar as simulações para a obtenção da Figura 6, percebe-se que esta simulação não é semelhante ao conjunto de dados obtidos, experimentalmente, com um transdutor. A diferença principal é a falta de ruído. Existem diferentes tipos de ruído, mas achamos que o mais satisfatório neste caso é o ruído branco, que é não correlacionado (Janssen,1998). Este ruído pode ser descrito por um processo puramente aleatório, com média zero e variância unitária, cuja potência é uniformemente distribuída em todas as frequências, e cada componente de frequência contribui com a mesma quantidade na potência total. Para determinar os parâmetros requeridos para produzir o ruído adicional, os conjuntos de medidas experimentais foram usados como referência.

A Figura 7 mostra o ruído branco (ruído aditivo gaussiano) gerado para o transdutor de 200 kHz. Para cada medida foi criado um vetor com 4096 pontos, todos espaçados de 10 nanosegundos, para estar perfeitamente compatível com as medidas efetuadas para cada ângulo de incidência. A amplitude do ruído foi obtida do valor de pico da transformada de Hilbert da forma de onda, que por tratar-se de um ruído aditivo deverá ser o mesmo valor para qualquer ângulo de incidência, inclusive para a incidência normal

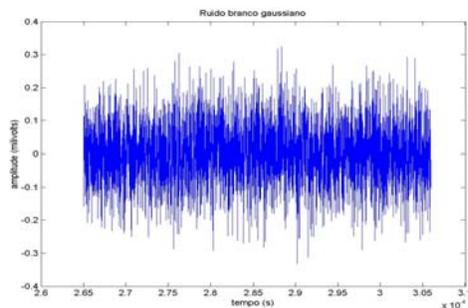


Figura 7 – Transdutor de 200 kHz:: ruído branco gaussiano

A curva resultante para o coeficiente de efeito do ângulo de incidência, já com o ruído aditivo, é mostrada na Figura 8

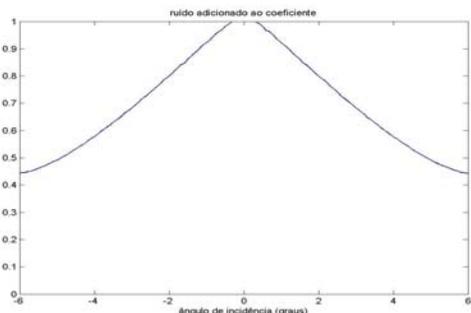


Figura 8 – Transdutor de 200 kHz: ruído adicionado ao coeficiente

Na Figura 9 são mostrados o fator de correção e a curva média obtida da média da resposta do transdutor de 200 kHz. É importante ressaltar que, apesar da semelhança

entre as duas curvas, ainda existe uma diferença sistemática, embora pequena.

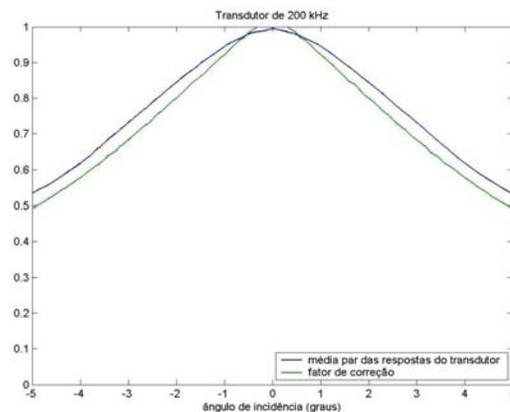


Figura 9 - Média par das respostas e fator de correção para o transdutor de 200 kHz.

Na análise feita para o transdutor de 500 kHz, percebe-se que há uma diminuição considerável na influência do ruído no sinal. Entretanto, como o raio do transdutor é consideravelmente menor que para o transdutor de 200 kHz, o aumento no ângulo de incidência faz com que o sinal decresça mais rapidamente, de forma que para ângulos absolutos maiores que 4 graus a contribuição do ruído na resposta do transdutor é maior que o próprio sinal.

A Figura 10 mostra as curvas obtidas para o transdutor de 500 kHz

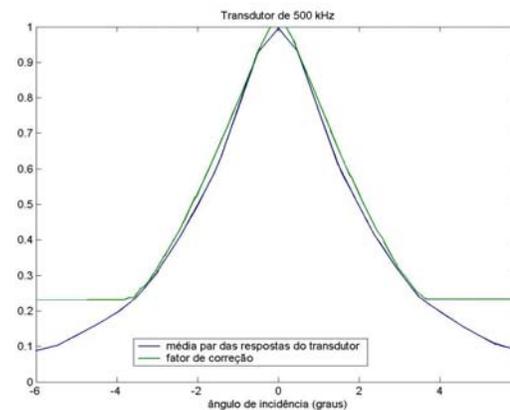


Figura 10– Média par das respostas e fator de correção para o transdutor de 500 kHz.

**Correção das amplitudes recebidas**

O método de correção proposto usa os recursos de busca e identificação oferecidos pelo aplicativo MATLAB. Os valores calculados para as amplitudes refletidas devem ser corrigidos pelas curvas mostradas nas figuras 9 e 10, para as frequências de 200 e 500 kHz, respectivamente. O fator de correção é armazenado em um vetor, de acordo com o ângulo de incidência. Por sua vez, as amplitudes refletidas e os ângulos de incidência correspondentes, também são armazenados em outros vetores. Para cada valor de amplitude e ângulo de

incidência é feita uma busca para identificar o fator de correção correspondente.

### Conclusão

As Figuras 11 e 12 mostram o resultado final das correções do sinal recebido usando o coeficiente de efeito do ângulo de incidência. Os resultados apresentam uma diferença superior a 10% para alguns valores da amplitude, apenas para ângulos, onde foi detectado, experimentalmente, que há predominância de ruído e conseqüentemente perda acentuada do sinal.

As correções para o transdutor de 200 kHz e diâmetro igual a 4 cm apresentam um resultado bem melhor por causa da área do transdutor, bem superior à área do transdutor de 500 kHz e diâmetro igual a 2,5 cm.

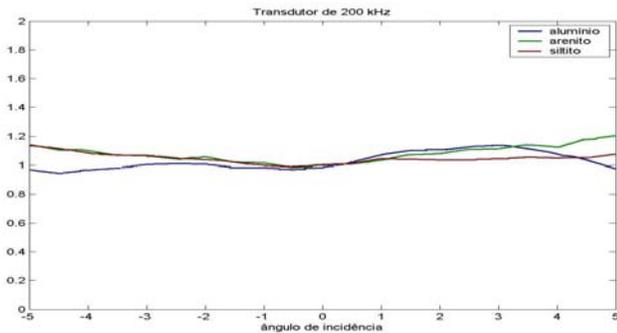


Figura 11 – Dados corrigidos para o Transdutor de 200 kHz

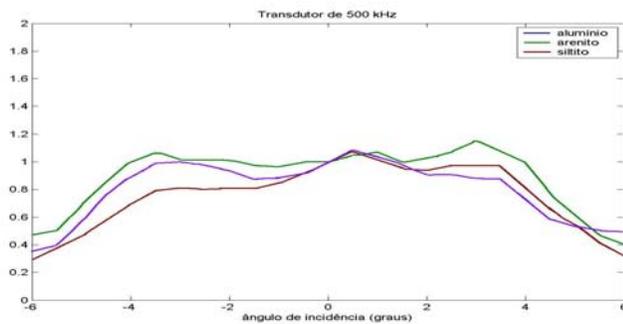


Figura 12 – Dados corrigidos para o Transdutor de 500 kHz.

### Referências

**Angelsen BAJ**, 2000 – “Ultrasound Imaging : Waves, Signals, and Signal Processing”, Emantec, Norway - [www.ultrasoundbook.com](http://www.ultrasoundbook.com).

**Georgi DT**, 1985, “Geometrical Aspects of Borehole Televiewer Images”, Transactions, SPWLA Twenty-Seventh Annual Logging Symposium, Dallas, Texas, USA.

**Janssen CRM**, 1998, Performance of search algorithms for angle matching in intravascular elastography, M. Sc. Thesis, Lab of Seismics and Acoustics, Department of Applied Physics, TUDelft.

**Macedo VG**, 2002 – “Correção de Imagens Ultra-sônicas em superfícies Irregulares para Extração de Sinais Geológicos” - Tese de Doutorado, UFPa

### Agradecimentos

Ao convênio UFPa/CNPq, à empresa Schlumberger pelo apoio financeiro e ao engenheiro Karl-Heinz Wolf da TUDelft por ter fornecido as amostras.