

## SIMULAÇÃO DA ONDA COMPRESSIONAL APLICADO EM MODELOS DIGITAIS DE ROCHAS

Gracimário Bezerra da Silva<sup>1</sup>; Leopoldo Oswaldo Alcázar Rojas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba, [eng\\_gracimario@hotmail.com](mailto:eng_gracimario@hotmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal da Paraíba, [leopoldo@ct.ufpb.br](mailto:leopoldo@ct.ufpb.br)

### Resumo

A caracterização das propriedades petrofísicas das rochas, assim como o estudo de propriedades elásticas do meio rochoso, são de extrema importância na análise de reservatórios petrolíferos. Imagens microtomográficas permitem gerar modelos digitais de rochas os quais têm possibilitado a avaliação das propriedades petrofísicas das rochas. Neste trabalho, através de modelos digitais de rochas, determinou-se a velocidade da onda compressional no meio rochoso de uma amostra de rocha carbonáticas mediante a utilização dos softwares *Avizo Fire 8.1* e *Comsol Multiphysics*. Este trabalho tem como objetivo determinar a velocidade da propagação da onda compressional em uma amostra de rocha carbonática que pode ser caracterizado como um reservatório de petróleo, a partir de imagens de microtomografia de raios-X já disponíveis, utilizando simulação numérica, e comparar com o valor estimado experimentalmente. Para gerar um modelo digital de rocha, foram selecionadas 300 imagens localizadas na porção intermediária de uma amostra carbonática da Bacia do Araripe. Delimitou-se um volume da amostra a ser processado no qual se extraiu um *subvolume* cúbico de dimensões 300 por 300 por 300 *voxels*, passando por um processo de segmentação que se baseia na determinação de um limiar de tom de cinza que separa a matriz mineral dos poros, definindo desta forma o que é poro e o que é matriz. E, posteriormente, a amostra foi submetida por mais alguns processamentos para se ter a determinação da velocidade em que a onda P atravessa a amostra de rocha. Por fim, os resultados obtidos foram discutidos e analisados.

**Palavras-chave:** Microtomografia de raios-x, petrofísica, onda compressional.

## Introdução

A descoberta de um reservatório de petróleo é possível após um dispendioso estudo e análise de dados geofísicos e geológicos de uma bacia sedimentar. Na indústria de petróleo faz-se o uso do método sísmico de reflexão, sendo este, um método de prospecção (mais utilizado) que fornece alta definição das feições geológicas de superfícies propícias a acumulação de hidrocarbonetos, a um custo relativamente baixo (Thomas, 2004).

O levantamento sísmico se dá através da geração de ondas sísmicas (vibrações) por meio de fontes artificiais, que se propagam através do meio rochoso. Essas ondas são refletidas e refratadas de acordo com a presença de diferentes constituições petrofísicas (Thomas, 2004). Parte da energia onda emitida é refratada passando para cama inferior, enquanto parte da energia dessa onda é refletida, retornando à superfície. Ao chegar à superfície, as reflexões dos pulsos de ondas são captadas por determinados equipamentos de registro, denominados receptores (sensores) que podem ser geofones ou hidrofones. No caso em que o levantamento sísmico ocorre em terra, utiliza-se geofones que se tratam de receptores eletromagnéticos. Por outro lado, quando o levantamento sísmico é em água, são utilizados os hidrofones, sendo estes, receptores de pressão.

De acordo com Figueiredo (2007), a porção de energia refletida é proporcional à diferença de impedância acústica entre os dois meios.

As ondas elásticas por ser de dois tipos: ondas de cisalhamento (Ondas S) e ondas compressão (Ondas P). As ondas P propagam-se em todos os meios (sólidos, líquidos ou gasosos). São ondas de compressão porque comprimem e distendem as rochas, alterando o seu volume e são ondas longitudinais que fazem a rocha vibrar paralelamente na direção da onda (DIAS et al., 2014). A velocidade de propagação deste tipo de onda varia com o meio em que se propaga, sendo adotados os seguintes valores: 330 m/s no ar, 1450 m/s na água e 5000 m/s no granito. Já as ondas S são ondas transversais em que o deslocamento do meio é perpendicular à direção de propagação da energia emitida. Segundo Thomas (2004), até o momento somente as ondas P vem sendo utilizadas comercialmente nos levantamentos sísmicos.

Atualmente, o uso de sistemas de geração de imagens, como a exemplo, a microtomografia computadorizada de raios-X, tem possibilitado na determinação de propriedades petrofísicas assim como o estudo da propagação de ondas acústicas em rochas-reservatórios de óleo e/ou gás. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo determinar a velocidade de propagação da onda

compressional ou onda P em uma amostra de rocha carbonáticas, que pode ser caracterizado como um reservatório de petróleo, a partir de imagens microtomográficas.

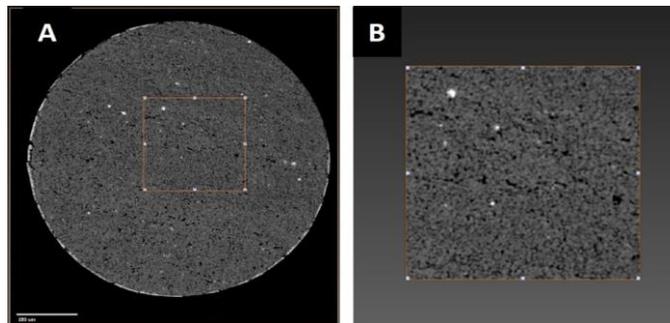
## Metodologia

A amostra investigada, denominada PT11\_H1, é de uma rocha carbonática, a qual consiste de uma rocha sedimentar que pode ser caracterizada como um potencial reservatório de petróleo e gás. Tal amostra, em forma de plugue, foi extraída de um afloramento da Formação Santana na Bacia do Araripe.

As propriedades petrofísicas e acústica da amostra de rocha em estudo foram estimadas através da análise de imagens de microtomografia de raios-X, por meio de simulação numérica, a qual foi feita com a utilização dos softwares *Avizo Fire 8.1* e *Comsol Multiphysics*.

Para gerar um modelo digital de rocha, foram selecionadas 300 imagens localizadas na porção intermediária da amostra, sendo então, selecionadas as imagens de número 301 a 600. As 300 imagens selecionadas foram processadas por meio do software *Avizo Fire 8.1* e, a partir das imagens processadas, retirou-se um *subvolume* cúbico de dimensões 300 por 300 por 300 *voxels*, como mostrado na Figura 1, usando o comando *extract subvolume*.

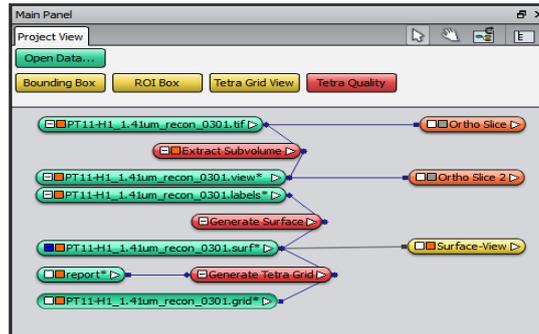
**Figura 1.** Slice 2D da amostra em estudo a) Imagem importada no *Avizo Fire*, b) Região de interesse.



Segundo Apolinário (2016) a obtenção da velocidade de propagação da onda compressional, a partir das imagens microtomográficas, é baseada em uma modelagem 3D que emprega o método numérico de elementos finitos na simulação da propagação da onda. Para isto foi utilizado o software *Comsol Multiphysics*.

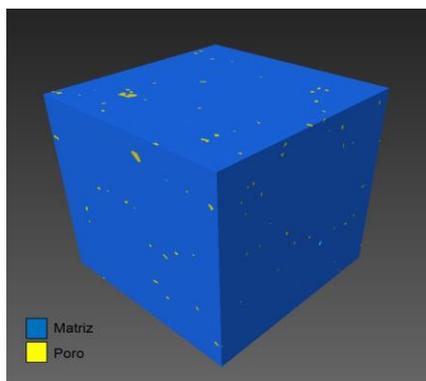
Neste trabalho, a malha utilizada foi gerada por meio das imagens de microtomografia compiladas no *Avizo Fire 8.1*. A Figura 2 apresenta o fluxo de trabalho para a geração da malha da amostra em estudo, utilizando o software *Avizo Fire 8.1*, onde são utilizados os *slices* segmentados.

**Figura 2.** Fluxo de trabalho para a geração da malha da amostra em estudo.

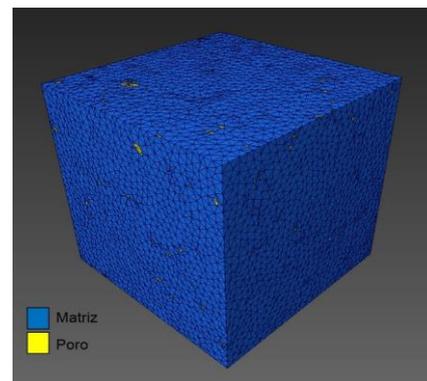


Então, para se gerar a malha, partiu-se do *subvolume* gerado a partir das imagens microtomográficas. Ao *subvolume*, foi conectada a ferramenta de binarização *edit new label field*, para que fosse determinado quais *voxels* representavam poros e quais representavam matriz. Dentro da ferramenta, por meio do *segmentation editor*, adicionou-se a fração poro e a fração matriz, utilizando o limiar de tom de cinza com valor de 55. Sendo que para a fração poro, adotou-se os valores de zero até o valor do limiar, e para a fração matriz, do valor do limiar até o valor máximo. Após a segmentação, utilizou-se o comando *remove islands* e *smooth labels*. O primeiro tem como finalidade remover possíveis ruídos existentes nas imagens, e o segundo, visa simplificar o modelo por meio da suavização das porções angulosas das imagens. Depois desse processo, aplicou-se a ferramenta *Generate Surface* no qual uma superfície 3D é gerada, como é mostrada na Figura 3.

**Figura 3.** Superfície 3D gerada a partir de slices segmentados.



**Figura 4.** Malha utilizada na modelagem de propagação da onda P.



Para que a malha seja gerada não podem existir interseções entre os elementos da superfície, assim é necessário aplicar alguns testes como o *intersections test* e o *orientation test*. Foram também aplicados alguns filtros como o *prepare generate tetra grid*, e o *fix intersection* com o objetivo de obter uma malha bem representativa. Na Figura 4 mostra a malha tetraédrica gerada.

Após gerada, a malha foi importada para o *Comsol Multiphysics*, onde foram submetidas aos ensaios de simulação de propagação das ondas compressoriais. Após a malha ser importada, o

próprio software a interpreta e gera domínios, que são grupos de tetraedros que representam um mesmo material, sendo definidos em seguida, os materiais que constituíam cada domínio. Assim, assumiu-se que o domínio de matriz da rocha seria composto por apenas um mineral, a dolomita. Já o domínio dos poros seria composto de ar. Posteriormente, para cada material foram adicionadas as propriedades, mostradas na Tabela 1, necessárias para o estudo de propagação da onda P.

Tabela 1. Valores de entrada das propriedades dos materiais utilizadas no *Comsol Multiphysics*<sup>1</sup>.

Propriedade	Dolomita	Ar
Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	2820	1,3
Velocidade do som (m/s)	5789	340
Compressibilidade (Pa-1)	Não utilizado	1,01x10-4
Módulo de cisalhamento (GPa)	45	Não utilizado
Módulo de incompressibilidade (GPa)	94,9	Não utilizado

Para realização do ensaio, utilizou-se o módulo *pressure acoustics transient, time dependent*, dentro da sessão *acoustics* do *Comsol Multiphysics*. Este módulo permite estudar a passagem de pulsos de pressão ao longo do tempo que atravessam determinado meio (Apolinário, 2016). Também foram definidas que as unidades utilizadas nos ensaios seriam na ordem de micrômetros e microssegundos, devido, respectivamente, às dimensões da amostra e visando otimizar o tempo de ensaio. O intervalo de tempo de estudo do ensaio foi definido para iniciar em zero e encerrar em 0,15  $\mu$ s, tempo necessário para a onda P se propagar no meio rochoso.

Por fim, delimitou-se o sistema de estudo, sendo determinadas as regiões as quais ocorreriam a propagação de ondas, as fronteiras do sistema, os valores iniciais de pressão de gradiente de pressão, além do local da aplicação do pulso de pressão. A propagação de ondas foi configurada para ocorrer em todos os domínios, independente de poro ou matriz. As fronteiras do sistema selecionadas foram todas as faces do cubo, exceto a que havia sido selecionada para ser a face na qual ocorreria a emissão do pulso de pressão. O pulso de pressão foi selecionado para ocorrer na face do cubo que possuísse o menor número de domínios, se propagando em direção à face oposta, de acordo com a Equação (1).

$$P = A_{mp} \cdot \text{sen}(2\pi ft) \quad (1)$$

Onde: P é o pulso de pressão;  $A_{mp}$  é a amplitude inicial do pulso de pressão; f é a frequência da onda; e t é o tempo.

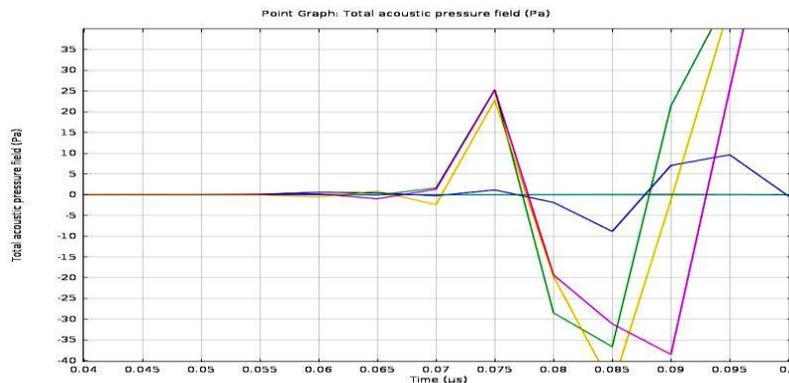
<sup>1</sup> Valores das propriedades de cada material em estudo extraídos da literatura.

Utilizou-se uma amplitude de 100 Pa. A frequência adotada foi de 25 MHz, para que pudesse ser observada ao menos uma forma de onda completa no interior da amostra. Depois, foram selecionados seis pontos de leitura por meio da ferramenta *Point Graph*, existente no menu *Results*, sendo selecionados os quatro vértices da face oposta ao plano de aplicação do pulso de pressão, e dois pontos no centro da face.

## Resultados e Discussões

O resultado gerado pelo *Comsol Multiphysics* é um gráfico de pressão por tempo (Figura 5), que evidencia a primeira chegada de onda P em cada ponto, representada por cada curva.

**Figura 5.** Variação de pressão gerada pela passagem da onda simulada no *Comsol Multiphysics*.



A partir da Figura 5, foi realizada uma picagem da onda sendo medido o tempo da chegada da primeira onda para cada ponto. Com o dado do tempo de chegada da primeira onda, foi realizado o cálculo da velocidade de propagação da onda computacional ( $V_{comp}$ ) por meio da Equação (2).

$$V_{comp} = n.R/t \quad (2)$$

Onde:  $V_{comp}$  é a velocidade de propagação da onda computacional;  $n$  é o número de *slices* da subamostra;  $R$  é a resolução de cada amostra do imageamento por microtomografia; e  $t$  é o tempo de chegada da primeira onda nos pontos de medição.

Para fins de comparação, o valor<sup>2</sup> da velocidade de propagação da onda P na amostra de rocha em estudo obtido de forma experimental é de 5789 m/s.

Na Tabela 2 são mostrados os resultados dos ensaios de porosidade, permeabilidade, tortuosidade e a velocidade da onda compressional, da amostra em estudo, sendo estes valores obtidos através da petrofísica computacional a partir de imagens de microtomografia de raios-x.

<sup>2</sup> Dado disponível no laboratório de petrofísica da Universidade Federal de Campina Grande, obtido através do equipamento *Autolab 500®*. Equipamento, este, utilizado para a medição das propriedades elásticas.

**Tabela 2.** Propriedades petrofísicas da amostra em estudo obtidas através da petrofísica computacional.<sup>3</sup>

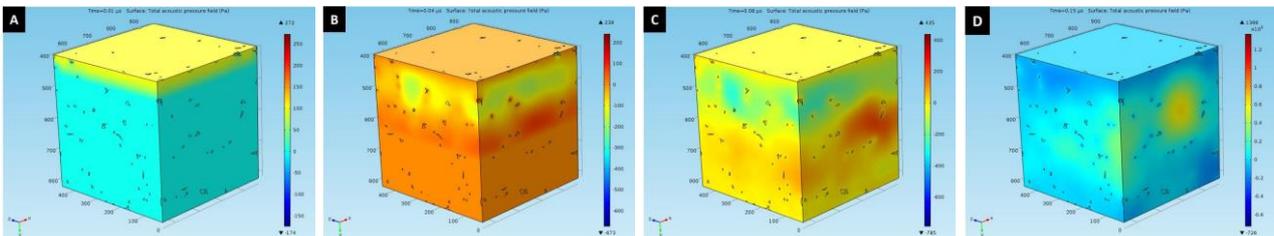
Amostra	Porosidade (%)	Permeabilidade (mD)	Tortuosidade	Vp (m/s)
PT11_H1	9,96	0,000015	2,5	6043

Analisando a propagação da onda compressional (Onda P) na amostra em estudo, nota-se que houve uma certa aproximação nos resultados de velocidade da onda P extraído da literatura com o obtido através de simulação numérica. Contudo, a amostra estudada apresenta uma baixa porosidade e uma certa homogeneidade, o que facilita a propagação da onda P no meio.

De acordo com Apolinário (2006), acredita-se que para otimização do cálculo de velocidades de ondas P pelo método computacional, deva-se adicionar um número maior de pontos de leitura, podendo assim obter um valor médio de velocidade com um nível de confiabilidade maior.

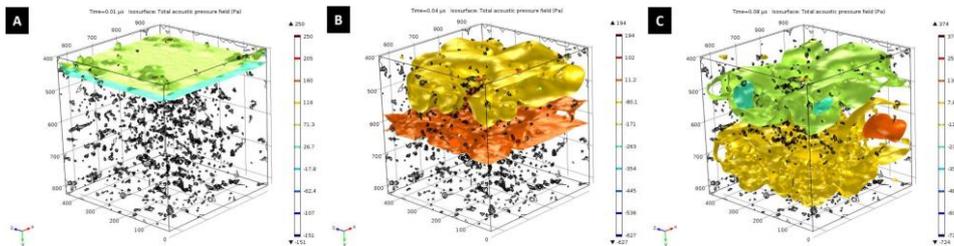
A Figura 6 mostra a simulação de como a onda compressional se propaga no meio, nos tempos de 0,01  $\mu$ s, 0,04  $\mu$ s, 0,08  $\mu$ s e 0,15  $\mu$ s. É possível observar que no tempo de 0,08  $\mu$ s a onda já tem atravessado todo o meio.

**Figura 6.** Propagação da onda de pressão na amostra em estudo nos tempos de a) 0,01  $\mu$ s; b) 0,04  $\mu$ s; c) 0,08  $\mu$ s; e d) 0,15  $\mu$ s.



Na Figura 7 também é mostrada a propagação da onda compressional no meio estudado, nos tempos de 0,01  $\mu$ s, 0,04  $\mu$ s e 0,08  $\mu$ s, de forma a visualizar como a onda se propaga no interior da amostra. É possível observar a má conectividade entre os poros o que evidencia uma baixa permeabilidade da rocha.

**Figura 7.** Propagação da onda de pressão na amostra nos tempos de a) 0,01  $\mu$ s; b) 0,04  $\mu$ s e c) 0,08  $\mu$ s.



<sup>3</sup> Propriedades petrofísicas da amostra de rocha em estudo obtidos de forma computacional por Silva (2016).

Como o software *Comsol Multiphysics* faz leituras pontuais, pode-se ocorrer a propagação de onda diretamente pela matriz da subamostra, sem haver nenhuma influência do poro e do fluido contido em seu interior, e isso, gera resultados predominantemente superdimensionados, pouco representativos e pouco comparativos com as velocidades de onda P medidas convencionalmente. No entanto, como a leitura da velocidade computacional na amostra relativamente se aproximou da leitura de velocidade obtida de forma convencional, fica evidenciado que o potencial do método computacional para o estudo de velocidades de ondas compressoriais elásticas foi, de certa forma, representativa.

## Conclusões

A aplicação do método computacional para obtenção de velocidades de ondas P gerou um valor próximo ao do medido convencionalmente em laboratório para a mesma amostra, e desta forma, fica evidenciado que a medição pontual de velocidade para a amostra em estudo tem apresentado uma boa representatividade e tem se mostrada satisfatória, uma vez que, o meio estudado é homogêneo, e isso, facilita a propagação da onda.

## Referências Bibliográficas

APOLINÁRIO, F. O.; **Influência da Saturação Fluida nas Propriedades Elásticas de Rochas Carbonáticas**. Dissertação de Mestrado – Programa De Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2016.

DIAS, A. G.; FREITAS, M. C.; GUEDES, F.; BASTOS, M. C; **Onda sísmica**. Revista de Ciência Elementar. Vol. 2. Nº 1. 2014.

FIGUEIREDO, A. M.; **Mapeamento Automático de Horizontes e Falhas em Dados Sísmicos 3D baseado no algoritmo de Gás Neural Evolutivo**. Dissertação. Rio de Janeiro. PUCRio. Departamento de Informática, 2007.

SILVA, G. B.; **Simulação Numérica de Propriedades Petrofísicas em Modelos Digitais de Rochas**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande/PB. 2016.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. 2. Ed – Rio de Janeiro. Interciência: Petrobras, 2004.