



Análise das propriedades elásticas de rochas e minerais evaporíticos

Julio C. R. Justen*, Petrobras/PUC-RIO; Eurípedes A. Vargas Jr, PUC-RIO; Irapoan Alves e Ailton L. S. de Souza, Petrobras

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society 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

This paper presents the results of elastic properties analysis of some sample of rock and evaporite minerals. These properties are of fundamental importance for the geophysical interpretation, as well as for the stability and drilling of wells, especially in the pre-salt section.

A quantitative interpretation of the elastic parameters was accomplished through the mineralogical characterization based on nondestructive testing as the X-ray micro tomography and scanning electron microscopy (SEM).

The results obtained in this study corroborate for the application of this methodology in other analyzes of rocks and evaporite minerals.

Introdução

Os evaporitos são rochas e minerais que se depositaram a partir da evaporação da água, em sua maior parte por restrições de antigos mares. Eles desempenham importante papel no sistema petrolífero das bacias brasileiras, desde as bacias paleozóicas (Solimões e Amazonas) até a grande bacia Aptiana que se formou entre o leste do Brasil e o oeste da África, Mohriak (2008).

Nas bacias costeiras brasileira a sequência evaporítica aparece com posição bem definida na carta estratigráfica, como por exemplo a Formação Ariri na Bacia de Santos, formando domos e estruturas diapíricas.

Os espessos estratos de rochas evaporíticas formam hoje um importante selo para os reservatórios do pré-sal das bacias de Santos, Campos e Espírito Santo, representando também um grande desafio na exploração e exploração de Petróleo na chamada seção pré-sal.

A correta caracterização elástica e mecânica deste litotipo tão particular é de fundamental importância para a interpretação geofísica, bem como, para a perfuração e estabilidade de poços de petróleo. Caracterização esta que normalmente é feita em laboratório com rochas análogas ou retiradas de testemunhos que amostraram esta parte da geologia da bacia.

Neste trabalho serão tratados os tópicos referentes à caracterização elástica e mineralógica dos minerais e rochas evaporíticas.

Caracterização elástica

Os valores de propriedades físicas dos evaporitos são, geralmente, obtidos a partir de perfis elétricos. A tabela 1 apresenta um resumo das principais propriedades físicas publicadas em artigos e livros técnicos, onde podemos verificar uma variação considerável nos valores propostos pelos diversos autores. Estudos em laboratório, com amostras e parametrização controlada mostram-se mais escassos.

Na figura 1 estão plotados os valores de densidade e vagariedade compressional, o inverso da velocidade, de 14 poços da bacia de Santos que perfilaram a seção evaporítica. Com base neste gráfico, e comparando com os valores da tabela 1, podemos inferir que, com exceção do litotipo gipsita, todos os evaporitos listados estão presentes na seção evaporítica da Bacia.

A grande dispersão dos pontos entre os valores dos minerais evaporíticos puros indica a presença de mistura entre os mesmos, seja na microestrutura ou devido à resolução vertical dos perfis elétricos, centimétrica à métrica dependendo da ferramenta, segundo alguns autores. A presença de arrombamento na parede do poço também contribui para esta dispersão de valores, entretanto neste gráfico os intervalos com arrombamento foram suprimidos.

A caracterização elástica em laboratório das amostras de rochas evaporíticas foi realizada em equipamento de propagação de pulso sísmico de alta frequência, onde com uma relação simples entre o comprimento da amostra e o tempo de trânsito, referente à propagação na amostra, do pulso ultrassônico é possível definir a velocidade de propagação da onda elástica – compressional ou cisalhante. A frequência central dos cristais utilizados é de 750 kHz enquanto que em perfis elétricos de velocidade a frequência típica é de dezenas de KHz. Uma melhor descrição do processo de análise pode ser vista em Morschbacher et. al. (2010).

Serão apresentados os resultados da análise em quatro amostras de evaporitos, de origem na mina de Taquari-Vassouras na parte terrestre da bacia de Sergipe, sendo uma amostra de carnalita e três amostras de halita. Para este tipo de estudo faz-se o uso de amostras cilíndricas de diâmetro padrão de uma polegada. Duas das amostras analisada estão representadas na figura 2

Estes cilindros são acondicionados em um vaso de pressão onde uma tensão confinante hidrostática é aplicada. Durante o ensaio esta tensão é variada e a velocidade compressional e a cisalhante, esta última em um par ortogonal de cristais, é tomada nos diferentes estágios de pressão confinante. Para estes ensaios a pressão máxima de confinamento foi de 6000 psi.

Mineral	Formula	Densidade (g/cm ³)	DTC (us/ft)	DTS (us/ft)	VP (m/s)	VS (m/s)	Referência
Halita	NaCl	2,04	67	120	4548	2540	1
		2,04	67	116	4548	2628	2
		2,03	67	-	4548	-	3
		2,18	67	118	4548	2628	4
		2,18	88	118	4482	2583	4
Anidrita	CaSO ₄	2,98	50	-	6096	-	1
		2,98	50	98	6096	3110	2
		2,98	50	-	6096	-	3
		2,98	54	97	5844	3142	4
		2,98	51	90	5976	3387	4
Carnalita	KClMgCl ₂ (H ₂ O) ₆	1,57	-	-	-	-	1
		1,57	79	-	3858	-	2
		1,57	78	-	3908	-	3
Taquidrita	CaCl ₂ (MgCl ₂)(H ₂ O) ₁₂	1,66	92	-	3313	-	1
		1,66	92	-	3313	-	2
Gipsita	CaSO ₄ (H ₂ O) ₂	2,35	52	-	5862	-	1
		2,35	53	-	5751	-	2
		2,35	52,5	-	5808	-	3
		2,35	53	-	5751	-	4
Silvita	KCl	1,86	-	-	-	-	1
		1,87	74	140	4118	2177	2
		1,88	74	-	4118	-	3
		1,99	79	140	3658	2177	4

Tabela 1 – Propriedades físicas dos minerais evaporíticos caracterizadas em perfis elétricos de poços. Onde DTC é o valor da vagarosidade compressional e DTS o valor da vagarosidade cisalhante. Os números na última coluna indicam a fonte de referência: 1 – ODP drilling manual (Blum, 1997); 2 – Crain's petrophysical handbook (Crain, 2001); 3 – Sal: Geologia e Tectônica (Mohriak, et. al, 2008) e 4 – The rockphysics handbook (Mavko, et. al., 2003).

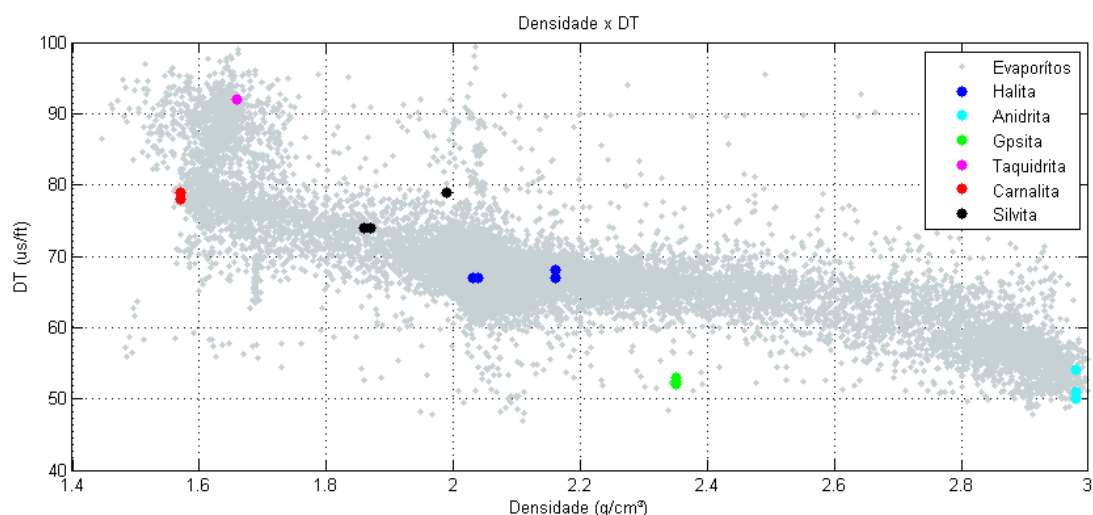


Figura 1 – Gráfico entre a densidade e a vagarosidade compressional. Os pontos cinzas representam os valores de perfis elétricos de 14 poços na Bacia de Santos que perfilaram a seção evaporítica. Os pontos coloridos representam os diferentes valores da literatura, vide tabela 1.

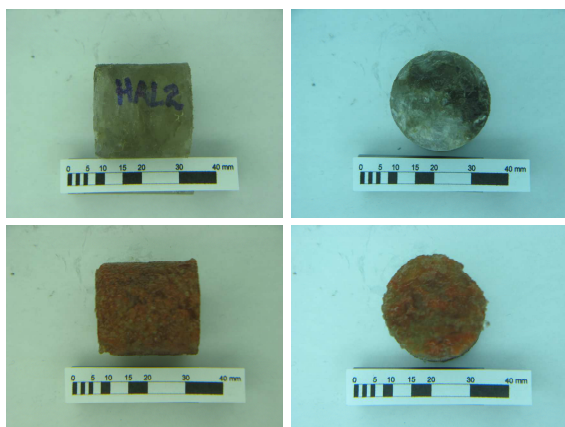


Figura 2 – Fotografia de duas das amostras analisadas. Os dois quadros superiores ilustram a amostra HAL02V (halita) e os dois inferiores a amostra CRN01V (carnalita).

Os resultados da análise de velocidade para estas quatro amostras estão sumarizados na figura 3 e tabela 2. Na figura 3 estão plotadas as curvas de variação de velocidade com a pressão confinante para a velocidade compressional e para a velocidade cisalhante, nesta última são adquiridos dois valores (VS rápida e VS lenta), pois são utilizados dois cristais ortogonais para identificar eventual anisotropia.

A dispersão entre os valores observados quando comparados entre mesmos litotipos, no caso das amostras de halita, ou contra os valores teóricos do mineral evaporítico puro pode ser explicada pela impureza da amostra, ou seja, pela presença de mais de um mineral evaporítico. Devemos ainda levar em consideração o erro experimental da análise de velocidade em laboratório, com valor típico de 2%.

A afirmação acima fica mais evidente ao analisamos a amostra CRN01V, carnalita. O valor de velocidade compressional superior ao mineral evaporítico puro indica a presença de um outro material de velocidade maior. Esta hipótese foi confirmada com a etapa de caracterização mineralógica, descrita a seguir.

Caracterização mineralógica

A petrografia macroscópica e microscópica das amostras de evaporitos é o ponto inicial da caracterização mineralógica.

Propriedades como textura, cristalinidade, densidade e coloração ajudam numa identificação prévia e qualitativa. No entanto, para este trabalho, uma descrição quantitativa se mostrou necessária, especialmente para identificar e, para um trabalho futuro, modelar o comportamento elástico em evaporitos com diferentes misturas de minerais.

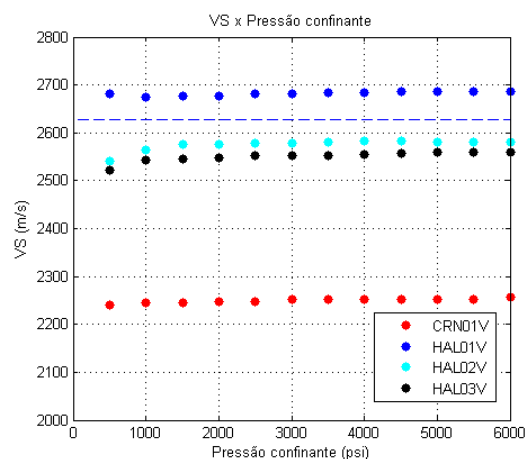
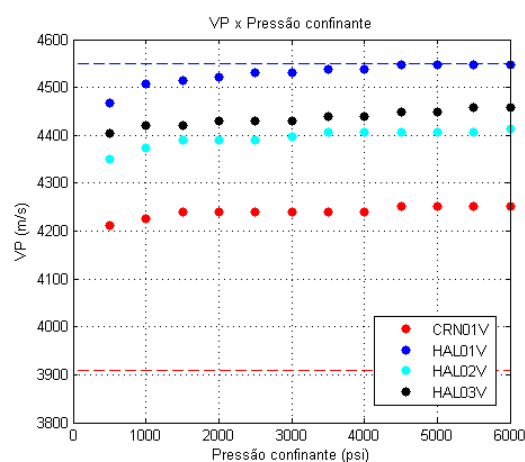


Figura 3 – Resultado da análise de velocidade elástica com pulso de ultra frequência em diferentes estados de pressão confinante. O gráfico superior refere-se ao resultado para onda compressional, enquanto o gráfico inferior ao resultado da onda cisalhante rápida. A linha azul tracejada representa o valor máximo de velocidade para a halita e a linha vermelha tracejada para a carnalita, vide tabela 1.

Amostra	Densidade (g/cm ³)	VP (m/s)	VS _{rápida} (m/s)	VS _{lenta} (m/s)
---------	--------------------------------	----------	----------------------------	---------------------------

HAL01V	2,09	4546	2686	2625
HAL02V	2,12	4413	2580	2553
HAL03V	2,11	4457	2560	2522
CRN01V	1,57	4252	2257	2253

Tabela 2 – Resultado da análise de velocidade das amostras para pressão confinante de 6000 psi

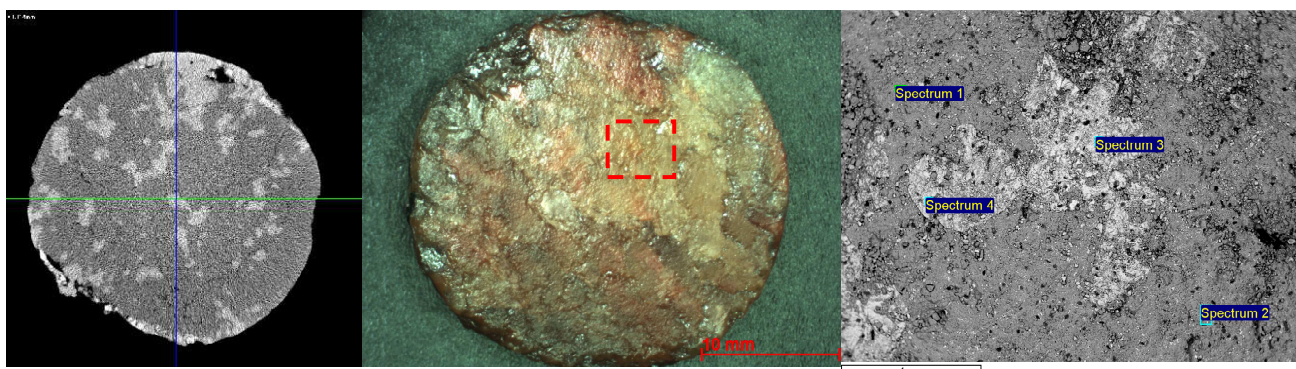


Figura 4 – Análise de microtomografia e MEV da amostra CRN01V. O primeiro quadro à esquerda ilustra a heterogeneidade da amostra na análise microtomográfica. No quadro do meio está representada a seção analisada pelo MEV. O quadro à direita define a região onde foram feitas as quatro microanálise por EDS, referente ao retângulo tracejado no quadro central.

Métodos como microtomografia de raios-x e microscopia eletrônica de varredura (MEV), este último em conjunto com o módulo de espectroscopia de energia dispersiva (EDS), apresentaram excelentes resultados nesta etapa da caracterização quantitativa dos evaporitos.

A amostra de carnalita CRN01V, que apresentou valores de velocidade compressional acima dos valores de referência, foi analisada seguindo a metodologia proposta de caracterização mineralógica quantitativa, figura 4.

A análise de microtomografia identificou duas regiões distintas de atenuação de raios-x, indicando a presença de minerais diferentes; uma fase escura, menos densa, e uma fase clara, mais densa. Em uma análise volumétrica 3D baseada na imagem foi obtida a composição de 86,53% da fase escura e 13,47% da fase clara.

A análise de MEV foi utilizada para identificar corretamente os minerais que compõem a rocha evaporítica. Na figura 4 estão listados os quatro pontos de microanálise por EDS e na figura 5 estão plotados os espectros para cada uma destas microanálises. Nos pontos 1 e 2 a presença dos elementos químicos Mg, Cl e K definem a região como o mineral carnalita, enquanto que nos pontos 3 e 4 a presença de apenas Na e Cl definem a região como o mineral halita.

Com os resultados obtidos com a microtomografia e com o MEV foi possível definir a composição de 86,53% de carnalita e 13,47% de halita para a amostra CRN01V. Esta presença do mineral halita é uma explicação plausível para o aumento da velocidade compressional frente os valores de referência. Um outro parâmetro que poderia ser utilizado é a densidade, no entanto frente a propriedade da carnalita de absorver a humidade do ar, mudando assim a forma cilíndrica do corpo e a massa ao longo das análises, os erros no cálculo de densidade são majorados.

Esta mesma metodologia foi aplicada em uma amostra de silvinita, figura 6. A silvinita é formada por silvita (KCl) e halita (NaCl). A análise microtomográfica mostrou que as propriedades de atenuação dos raios-x destes dois minerais são bem distintas, assim como a densidade,

permitindo uma correta definição do volume de cada fase mineral; 31% de halita e 69% de silvita. Também foram realizadas análises com o par MEV e EDS para garantir a composição química de cada uma das fases identificadas.

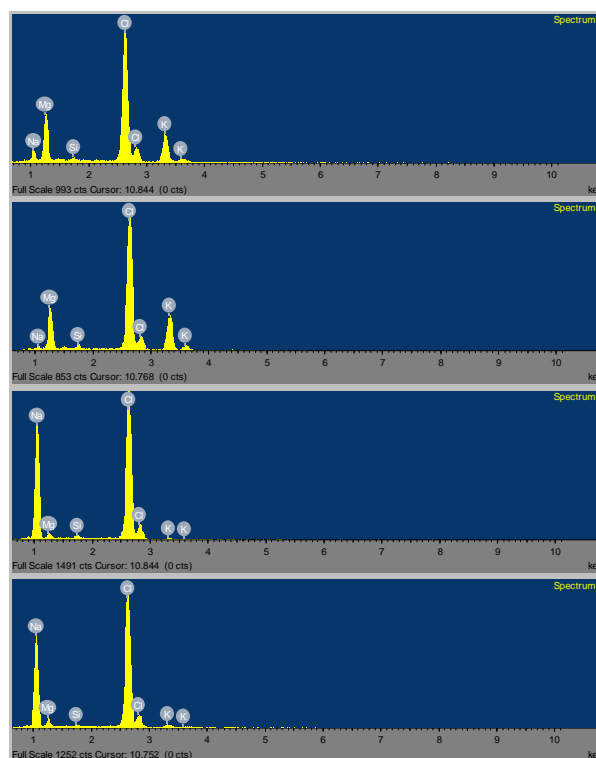


Figura 5 – Espectros das quatro microanálises por EDS nos pontos definidos na figura 4. Os dois primeiros indicando a presença do mineral carnalita (elementos químicos Mg, Cl e K) e os dois últimos indicando a presença do mineral halita (elementos químicos Na e Cl).

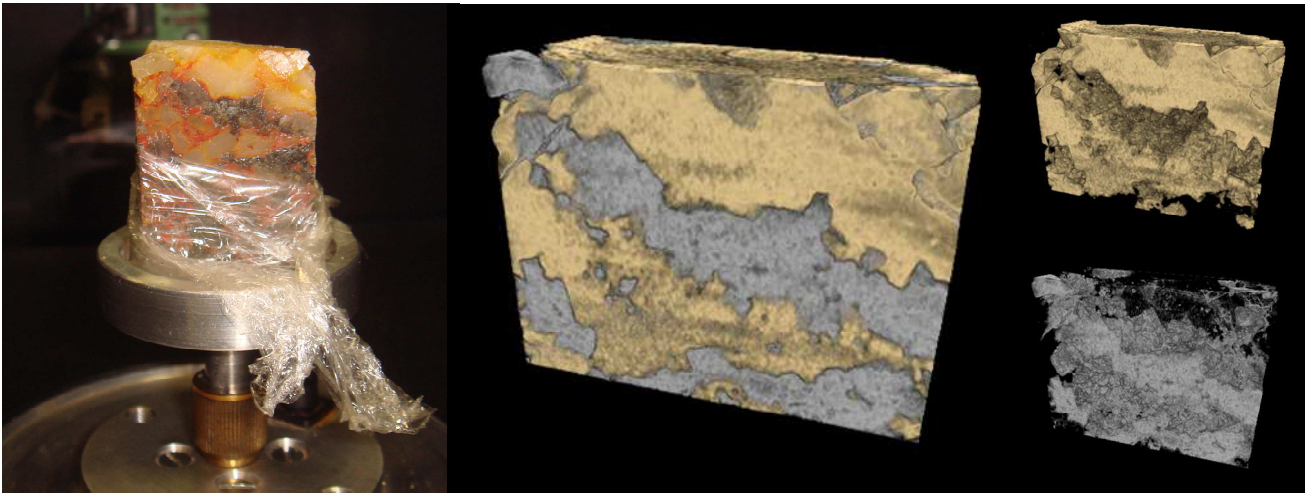


Figura 6 – Análise microtomográfica de amostra de rocha evaporítica contendo os minerais silvita e halita. Estes minerais são facilmente diferenciados pela microtomografia, onde a parte em amarelo representa a fração do mineral silvita e a parte em cinza a do mineral halita.

Conclusão

A escassez de dados publicados na literatura referente as propriedades elásticas de rochas e minerais evaporíticos em condições controladas de laboratório foi o principal motivador deste trabalho.

A metodologia de análise apresentada neste trabalho é uma referência para demais estudos a serem realizados em diferentes amostras de rochas evaporíticas.

A caracterização mineralógica aplicada, utilizando ensaios não destrutivos como o MEV e a microtomografia, proporcionou uma interpretação mais quantitativa dos resultados de velocidade.

Esta informação quantitativa permitirá, junto com uma maior base de dados, criar formulações para a inferência dos valores de velocidade em misturas de rochas evaporíticas.

Estudos comparativos do comportamento estático e dinâmico de diferentes amostras evaporíticas, sempre em conjunto com a caracterização mineralógica quantitativa, serão realizados em trabalho futuro, bem como, modelar computacionalmente o comportamento elástico em evaporitos com diferentes misturas de minerais.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos técnicos da gerência de integração Rocha-Perfil-Sísmica do CENPES/Petrobras pelo auxílio nas análises de caracterização elástica e mineralógica das amostras evaporíticas e a Petrobras pela oportunidade de divulgação deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Blum**, P.; 1997. "Physical properties Handbook"; ODP Tech. Note, 26.
- Crain**, E. R.; 2001. "Crain's Petrophysical Handbook"; <http://www.spec2000.net>
- Mavko**, G.; Mukerji, T. e Dvorkin, J.; 2003. "The Rock Physics Handbook"; Cambridge University Press.
- Mohriak**, W., Szatmari, P. e Anjos S.; 2008. "Sal Geologia e Tectônica. Exemplos nas Bacias Brasileiras"; Beca Edições Ltda.
- Morschbacher**, M.; Vasquez, G. e Justen, J., 2010. "Metodologias de estimativa das velocidades sísmicas em ensaios de laboratório". IV simpósio Brasileiro da SBGF.