



Análise do efeito da pressão de confinamento na resistividade elétrica de rochas

Luísa Figueiredo Campbell, Marco Antônio Rodrigues de Ceia, Roseane Misságia, Victor Hugo Santos.
Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo (LENEP) – Universidade Estadual do Norte Fluminense (UNEF)

Copyright 2018, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no VIII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salinópolis, 18 a 20 de setembro de 2018. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VIII SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Abstract

This work investigates the effects of confinement pressure on the electrical resistivity and cementation factor of saturated carbonate and siliciclastic samples. For this analysis, an equipment that allows lateral pressure (bi-axial stresses) to be exerted on the rocks was used. The porosity and electrical resistance of the samples were measured and the values of electrical resistivity and cementation factor were calculated. Based on the results, it was possible to determine electrical resistivity behavior patterns in samples exposed to high confinement pressures, thus simulating overload conditions, similar to those imposed on reservoir rocks in situ.

Introdução

A determinação de propriedades petrofísicas é de fundamental importância para a caracterização de reservatórios de hidrocarbonetos. Nesse contexto, nota-se um grande interesse pelas medidas laboratoriais de propriedades elétricas, visto que estas atuam na complementação e refino de dados obtidos pela perfuração de poços. Um dos perfis utilizados na caracterização de reservatórios é o de resistividade elétrica, que fornece informações de litologia, porosidade e tipo de fluidos, além de ser aplicado no cálculo de saturação de água em reservatórios de petróleo. Archie (1942) estabeleceu uma relação entre resistividade elétrica, porosidade e saturação de água (e, portanto, a saturação de hidrocarbonetos), abrindo caminho para uma avaliação quantitativa das propriedades das formações usando perfis de resistividade elétrica.

A resistividade consiste na função inversa da condutividade e pode ser interpretada aplicando-se um campo elétrico em um material para a análise do efeito de cargas livres se deslocando em fase. É calculada a partir do valor de resistência elétrica, ou impedância elétrica, que por sua vez é definida como a oposição ao fluxo de corrente elétrica.

Aspectos relacionados ao comportamento da resistividade elétrica em amostras de rocha em função da variação da pressão de confinamento ainda são pouco explorados. Brace & Orange (1968) estudaram o efeito da pressão na resistividade elétrica de rochas, verificando um importante efeito da saturação no comportamento da resistividade. Mohammed et al. (2015) analisaram o efeito da pressão agindo na abertura e fechamento de poros semelhantes a rachaduras,

resultando em alterações na condutividade elétrica de arenitos. De forma semelhante, neste trabalho analisou-se o comportamento da resistividade elétrica em função da variação da pressão de confinamento. O intuito foi observar o comportamento da resistividade elétrica de rochas submetidas a um estado semelhante ao de sobrecarga (condições in situ). Os testes também permitiram visualizar a alteração do valor de resistividade elétrica e de fase em diferentes frequências (resistividade complexa). Além disso, estimou-se empiricamente o valor do coeficiente de cimentação (m) das amostras. De acordo com Knight & Endres (2005), m depende da geometria do espaço poroso ou da conectividade dos poros e é frequentemente referido como coeficiente de cimentação pela importância da cimentação na determinação da microgeometria do espaço poroso. O objetivo deste estudo é, portanto, a análise do comportamento da resistividade elétrica e do coeficiente de cimentação em amostras de rocha em função da variação da pressão de confinamento.

Amostras estudadas

Foram estudadas três amostras extraídas de afloramentos dos EUA, sendo elas dois arenitos (Berea e Boise) e um dolomito (Silurian Dolomite). A Tabela 1 apresenta informações de litologia e valores de permeabilidade e porosidade esperados destas rochas. A mineralogia foi determinada a partir de análise composicional por DRX. A Tabela 2 apresenta a dureza e a densidade dos minerais constituintes das rochas.

Amostra	Rocha	Permeabilidade a gás (mD)	Porosidade	Formação	Mineralogia
Berea	Arenito	200-315	19-20%	Kipton	95,56%Q, 3,08%F 0,88%K, 0,08%Mi 47,3%Q, 38,19%F, 8,01%Mi, 6,5%Cl
Boise	Arenito	1577-2040	27-28%	Idaho	
Silurian D.	Carbonato	100-170	20,9%	Thornton	99%D

Q - quartzo; F - feldspato; K - caulinita; Mi - mica; Cl - clinoptilolita; D - dolomita;

Tabela 1 – Informações das amostras padrão utilizadas, Kocurek (2018)

Mineral	Q	F	K	Mi	Cl	D
Dureza	7	6 - 6,5	1	2,5 - 3	3,5 - 4	3,5
Densidade (g/cm ³)	2,6	2,6	2,6	2,8	2,2	2,9

Q - quartzo; F - feldspato; K - caulinita; Mi - mica; Cl - clinoptilolita; D - dolomita;

Tabela 2 – Propriedades físicas dos minerais constituintes

Metodologia

A metodologia consistiu, inicialmente, na caracterização mineralógica das amostras por análise de DRX com um difratômetro de raio X, modelo D2 Phaser (Bruker). O equipamento, em conjunto com o software TOPAS, permitiu identificar e quantificar as fases minerais em amostras de rocha pulverizadas.

A determinação do volume de grãos foi feita através da técnica de expansão de gás. Esta etapa foi realizada sem aplicação de pressão de confinamento e também forneceu valores de porosidade, densidade total e densidade de grãos. Posteriormente, utilizou-se a mesma técnica de expansão de gás para a determinação do volume de poros das amostras para diferentes pressões de confinamento, conforme API (1998). Este procedimento possibilitou inferir a variação da porosidade em função da pressão externa aplicada.

Seguiu-se com a saturação das amostras com salmoura, de resistividade R_w , a fim de determinar as resistividades elétricas das amostras (R_o). Uma solução de água destilada com cloreto de sódio (NaCl) em concentração 0,023mol/L foi preparada. Em seguida, saturou-se a amostra com esta solução utilizando uma bomba a vácuo. Os procedimentos padrão para saturação da amostra podem ser encontrados em Maerefat et al. (1990). Depois de saturadas, as amostras foram inseridas no aparato descrito na Figura 1, que permite a aplicação de altas pressões de confinamento.

O porta amostras é associado a dois eletrodos de cobre

banhados a ouro, ligados a um medidor LCR (Wayne Kerr LCR Meter 4300). Nesse ponto é essencial garantir um bom contato entre eletrodo e rocha e, para tal, uma pequena esponja saturada com a solução foi posicionada entre a rocha e cada eletrodo. Como visto em Glover (2001), este procedimento ajuda a homogeneizar o fluxo de corrente, melhorar a conexão elétrica e evitar que minerais condutivos formem canais preferenciais de corrente na rocha. Após o posicionamento da amostra no equipamento, iniciaram-se as medidas de impedância elétrica das amostras (Z_m) e seu valor de fase correlato (Asm). A pressão de confinamento inicial foi de 600psi. Para cada pressão de confinamento, foram registradas, por meio do medidor LCR, a amplitude e a fase para diversas frequências (20Hz a 200kHz). O incremento de pressão utilizado nos testes foi de 400psi. A variação da fase com a frequência é importante neste caso, pois a resistividade elétrica da amostra foi posteriormente calculada a partir do valor de impedância elétrica correspondente à fase mínima (valor de fase que mais se aproxima de zero). Os valores obtidos foram corrigidos para a temperatura padrão de 25°C.

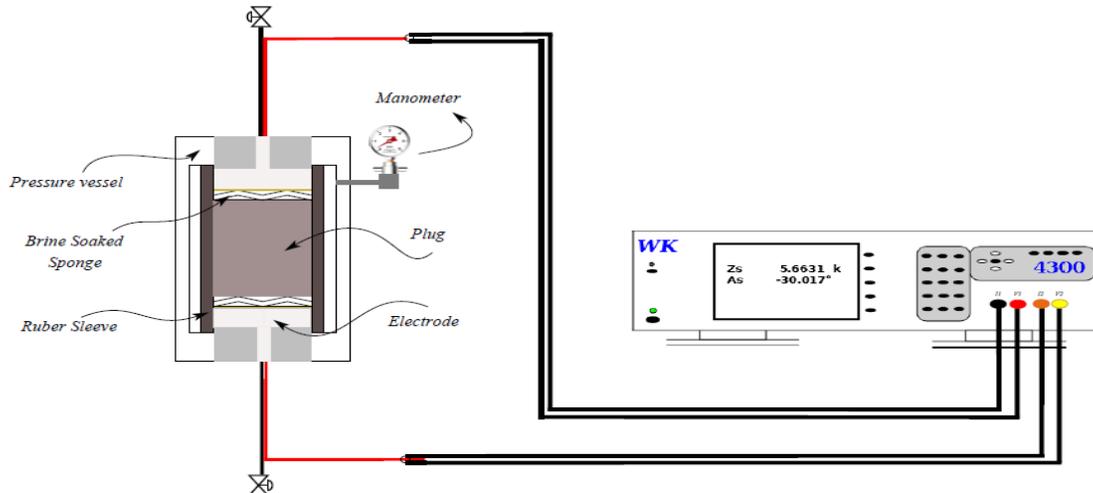


Figura 1 – Desenho esquemático do equipamento utilizado nos testes. É composto de um medidor LCR ligado a dois eletrodos e acoplado a um porta amostras, no qual é inserida a amostra

A resistividade elétrica da rocha (R_o) foi calculada multiplicando-se a impedância aferida no medidor LCR pela fração A/L (área sobre comprimento da amostra). Já a resistividade do fluido saturante (R_w) foi calculada por correlações encontradas em Worthington et al. (1990). A partir de R_o e R_w , o coeficiente de cimentação (m) foi calculado pela Lei de Archie (Equação 2). Esta equação deriva da Equação 1, que relaciona o fator de formação com a porosidade e o coeficiente de cimentação, considerando o valor do coeficiente de tortuosidade “ a ” igual à 1, conforme descrito por Glover (2008) e Worthington et al. (1993).

$$F = \frac{R_o}{R_w} = \frac{a}{\phi^m}$$

Equação 1 – Relação entre fator de formação (F), porosidade e coeficiente de cimentação (m)

Assim, foi possível obter o coeficiente de cimentação a partir dos valores de fator de formação e porosidade, como visto em Tiab & Donaldson (2004) e Glover (2008), ou inferido a partir do diagrama de fator de formação vs. porosidade.

$$m = \frac{-\ln\left(\frac{R_o}{R_w}\right)}{\ln(\phi)}$$

Equação 2 – Equação de Archie para o cálculo do coeficiente de cimentação (m)

O coeficiente de cimentação (m) é função da porosidade, que por sua vez varia com a pressão de confinamento. Portanto, para o cálculo de m , os dados de variação da porosidade com a pressão foram obtidos por meio de medidas de volume de poro através do método de expansão de gás (permo-porosímetro Coreval 700).

Os resultados obtidos permitiram a elaboração de espectros de: i) resistividade vs. frequência; ii) fase vs. frequência; iii) resistividade na fase mínima vs. pressão de confinamento; iv) coeficiente de cimentação vs. pressão.

Resultados

Seguindo a metodologia apresentada, foi calculada a resistividade elétrica das amostras para diferentes frequências e pressões de confinamento. A Figura 2 mostra o diagrama de resistividade vs. frequência obtido para a amostra Berea. Pode-se observar que, dada uma mesma frequência, a resistividade tende a aumentar na medida em que se aumenta a pressão. Ainda é possível observar o comportamento inverso da resistividade à medida em que se aumenta a frequência.

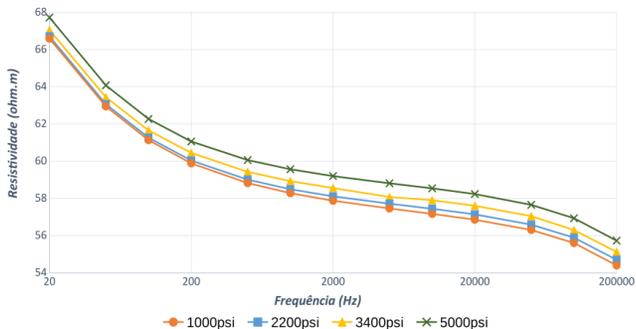


Figura 2 – Resistividade da amostra (R_o) vs. frequência (f) para diferentes pressões - amostra Berea

A Figura 3 mostra o diagrama ângulo de fase vs. frequência para diferentes pressões no arenito Berea. É possível verificar que, dada uma mesma frequência, a fase tende a se manter constante mesmo quando se aumentam as pressões de confinamento. Pode-se observar que a curva de fase vs. frequência é caracterizada por uma concavidade. Em baixas e altas frequências observa-se um aumento considerável do módulo do ângulo de fase, enquanto em frequências médias, no intervalo de transição, o ângulo de fase tende a se aproximar de zero, como é desejado.

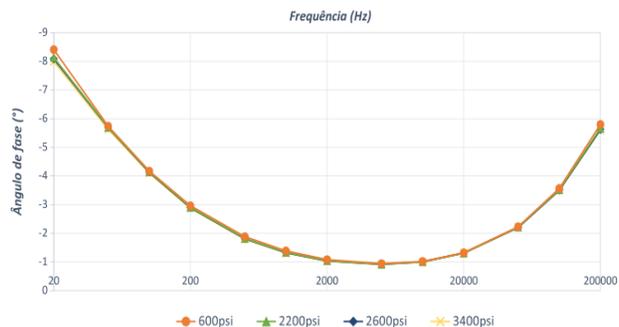


Figura 3 – Ângulo de fase (A_s) vs. frequência (f) para diferentes pressões - arenito Berea

A Figura 4 mostra a resistividade mínima vs. pressão para Berea. Verifica-se que a resistividade cresce à medida que a pressão de confinamento à qual a amostra é submetida aumenta.

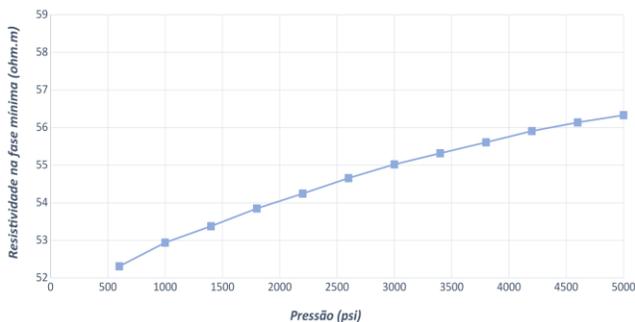


Figura 4 – Resistividade na fase mínima (R_o) vs. pressão para a amostra Berea

A Figura 5 apresenta os diagramas de resistividade na fase mínima vs. frequência para Boise, no qual pode-se observar que, dada uma mesma frequência, a resistividade tende a diminuir à medida que se aumenta a pressão. Foram registradas resistividades maiores para baixas frequências, seguidas por uma queda considerável de resistividade nas frequências mais altas.

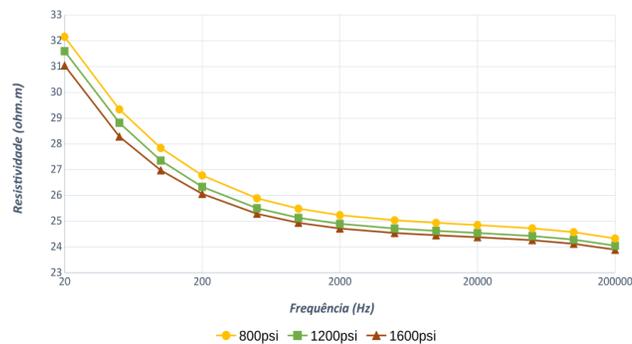


Figura 5 – Resistividade da amostra (R_o) vs. frequência (f) para diferentes pressões - arenito Boise

A Figura 6 representa o diagrama de ângulo de fase vs. frequência em diferentes pressões para Boise. É possível verificar que, dada uma mesma frequência, a fase tende a se manter constante mesmo quando se aumentam as pressões de confinamento. Porém, em baixas frequências, um aumento na pressão gera uma diminuição do valor do ângulo de fase, em módulo (para baixas frequências, quanto maior a pressão, mais a fase se aproxima de zero). A curva é caracterizada por uma concavidade.

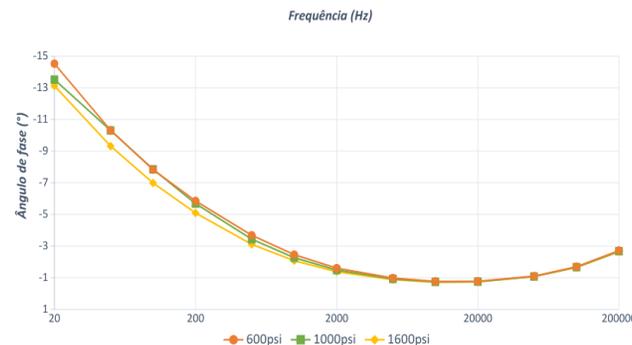


Figura 6 – Ângulo de fase (A_s) vs. frequência (f) para diferentes pressões - arenito Boise

Quanto à curva de resistividade na fase mínima vs. pressão para Boise (Figura 7), observa-se uma queda no valor de resistividade à medida em que se aumenta a pressão de confinamento, para uma mesma frequência. Este comportamento de resistividade é oposto ao da amostra Berea (Figura 4).

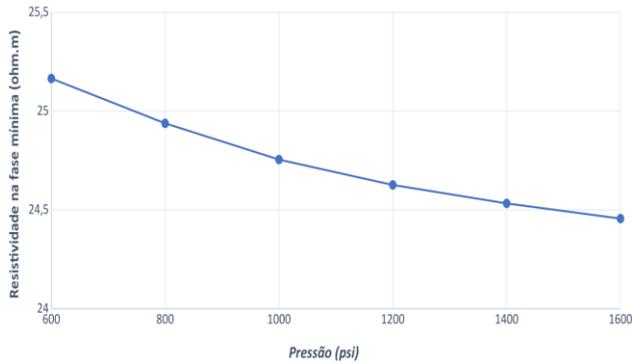


Figura 7 – Resistividade na fase mínima (R_o) vs. pressão para a amostra Boise

Quanto à amostra Silurian, a Figura 8 mostra seu diagrama de resistividade vs. frequência. Pode-se observar que, para uma mesma frequência, a resistividade tende a aumentar na medida em que se aumenta a pressão. Para Silurian os valores de resistividade se mantêm praticamente constantes em baixas frequências, enquanto em altas frequências se observa uma queda abrupta.

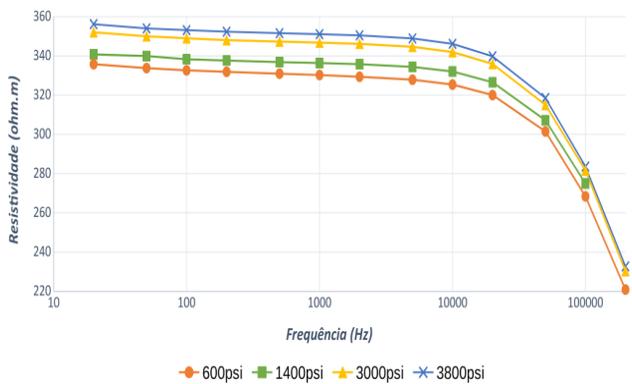


Figura 8 – Resistividade da amostra (R_o) vs. frequência (f) para diferentes pressões – dolomita Silurian

Analisando o diagrama de ângulo de fase vs. frequência em diferentes pressões para a amostra Silurian (Figura 9), é possível verificar que, dada uma mesma frequência, a fase tende a se manter constante mesmo quando se aumentam as pressões de confinamento, tanto em baixas quanto altas frequências. Pode-se observar, ainda, que a curva de fase vs. frequência para diferentes pressões é caracterizada por uma suave concavidade.

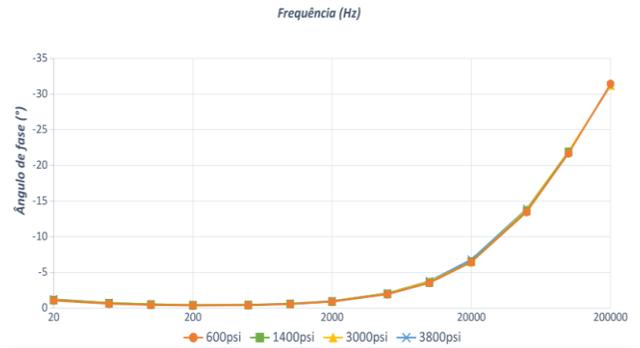


Figura 9 – Ângulo de fase (A_s) vs. frequência (f) para diferentes pressões – dolomita Silurian

A curva de resistividade na fase mínima vs. pressão para Silurian (Figura 10) mostra um aumento dos valores de resistividade quando se aumenta a pressão de confinamento, de acordo com o que era esperado. Silurian possui a maior taxa de crescimento nos valores de resistividade. Portanto, pode-se dizer que a amostra é mais suscetível aos efeitos da pressão de confinamento.

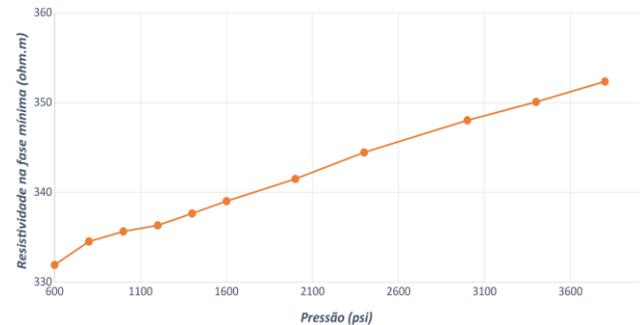


Figura 10 – Resistividade na fase mínima (R_o) vs. pressão para a amostra Silurian

Nas Figuras 11, 12 e 13 são apresentados os gráficos da variação do coeficiente de cimentação (m) em função da pressão para cada amostra. Pode-se observar que, tanto para o arenito Berea quanto para o dolomito Silurian, o valor do coeficiente de cimentação aumenta quando se aumenta a pressão. O arenito Boise mostrou comportamento oposto.

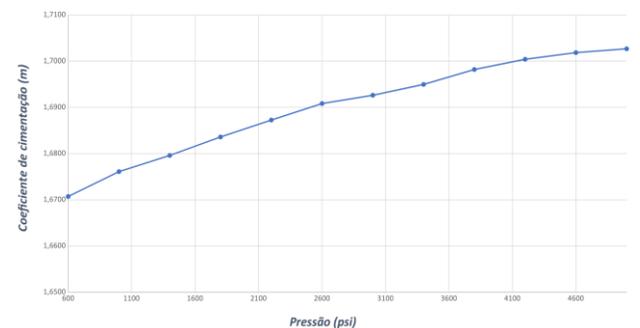


Figura 11 – Variação do coeficiente de cimentação (m) com a pressão para a amostra Berea

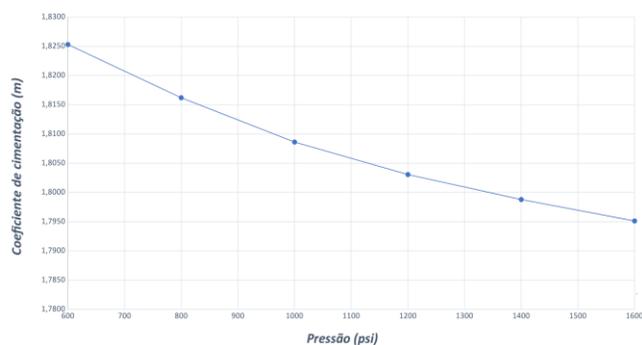


Figura 12 – Variação do coeficiente de cimentação (m) com a pressão para a amostra Boise

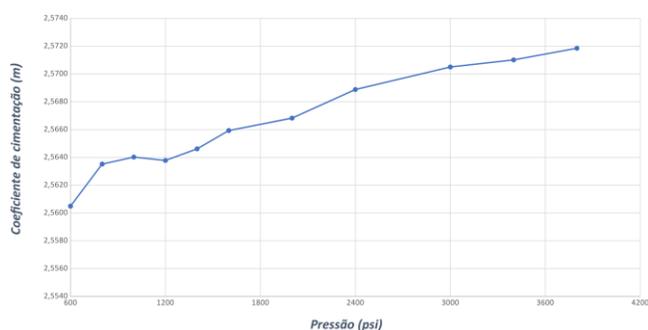


Figura 13 – Variação do coeficiente de cimentação (m) com a pressão para a amostra Silurian

O valor do coeficiente de cimentação pode ser calculado tanto por Archie (Equação 2), quanto por aproximação no gráfico da Figura 14, a partir do valor de fator de formação e da porosidade. De acordo com Glover (2008), por comparação, a equação de Archie é mais confiável e deve ser utilizada sempre que possível. A Tabela 3 mostra os valores encontrados de fator de formação e coeficiente de cimentação para as três amostras, na pressão de 1000psi, calculados por esses dois métodos.

Amostra	Porosidade	F	m_{calc}	m_{graf}
Berea	20,08%	16,16	1,67	1,60
Boise	34,24%	6,98	1,81	1,80
Silurian	17,57%	100,18	2,56	2,60

Tabela 3- Porosidade, fator de formação (F), coeficiente de cimentação calculado por Archie (m_{calc}) e coeficiente de cimentação inferido a partir do gráfico da Fig. 14 (m_{graf}) para as 3 amostras, em 1000 psi

Discussão

Para as amostras Berea e Silurian, observou-se que, para uma mesma frequência, o aumento da pressão de confinamento gera um aumento no valor da resistividade. Na Boise, percebeu-se um comportamento oposto, com queda de resistividade com o incremento da pressão de confinamento. Dada uma mesma frequência, a fase tende a se manter praticamente constante, mesmo quando se aumentam as pressões de confinamento. Quanto à resistividade na fase mínima vs. pressão, em Berea e Silurian, à medida em que se aumenta a pressão

de confinamento, o valor de resistividade também aumenta, seguindo o esperado. De acordo com Tiab e Donaldson (2004), a compactação oriunda da pressão de confinamento geralmente causa um aumento considerável na resistividade, especialmente em rochas pobremente cimentadas e em rochas de baixa porosidade. Boise se comportou de maneira oposta, com a diminuição da resistividade com um aumento de pressão de confinamento. Uma possível explicação seria a presença de clinoptilolita (Cl) em sua composição. Esse mineral pode adicionar uma forma distinta de condução de eletricidade, uma vez que apresenta grande facilidade de efetuar trocas iônicas. De acordo com Reynolds & Williford (1991), a presença da clinoptilolita nas amostras pode causar uma redução dos valores de resistividade elétrica. Quanto ao coeficiente de cimentação, dados publicados em Hensel et al. (1988), mostram um valor de $m=1,70$ para Berea na pressão de confinamento de 1000psi. Esse valor é muito próximo ao calculado neste trabalho ($m=1,67$) para esta mesma pressão. A divergência nos valores pode ser explicada pela variação da salinidade da solução. Os valores calculados do coeficiente de cimentação estão dentro do intervalo esperado, tanto para os arenitos Berea e Boise (entre 1,4 e 2,0), quanto para o carbonato Silurian (entre 2,0 e 2,6). Para Berea e Silurian, foi observado um aumento do coeficiente de cimentação (m) com a pressão. Já para Boise, o comportamento observado foi o oposto. A variação do coeficiente de cimentação com a pressão deve ser levada em conta no cálculo da saturação de água – e, conseqüentemente, de hidrocarbonetos – da formação.

Conclusões

Os valores de resistividade elétrica encontrados foram julgados satisfatórios. Para amostras distintas, foi observado tanto um comportamento crescente quanto decrescente da resistividade com o aumento das pressões de confinamento. Conclui-se que tal efeito pode ser explicado pela alteração do espaço poroso, que tende a diminuir com o aumento da pressão externa. Esta alteração também pode propiciar um aumento na condução elétrica da clinoptilolita e dos argilominerais presentes em algumas das rochas.

Os valores de coeficiente de cimentação (m) inferidos através do gráfico fator de formação vs. porosidade e os calculados pela Equação de Archie apresentaram valores similares. Ressalta-se que a variação do coeficiente de cimentação em função da pressão externa é um importante fator a ser considerado na estimativa de saturação de fluidos e seu negligenciamento pode resultar em erros no cálculo de reservas.

Agradecimentos

Agradecemos ao LENEP/UENF pela infraestrutura oferecida. Ao CNPq/INCT/Geofísica pela bolsa de Iniciação Científica de LC, à CAPES e ao PRH-PETROBRAS-226 pelo suporte financeiro. MC e RM também agradecem ao CNPq pelas Bolsas de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (DT).

Referências

API, 1998. Recommend practices for core analysis. RP-40. American Petroleum Institute, Washington, D.C., USA.

Archie, G. E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the AIME, 146, n. 01, p. 54-62.

Brace, W. F. & Orange, A., 1968. Further studies of the effects of pressure on electrical resistivity of rocks. Journal of Geophysical Research, 73, n. 16, p. 5407-5420.

Glover, P., 2001. Formation evaluation MSC Course Notes. The University of Aberdeen, p. 84-94.

Glover, P., 2008. Petrophysics MSC Course Notes. Imperial College, London, p. 10-20.

Hensel, W., Honarpour, M., Sprunt, E. & York, C., 1988. Compilation of electrical resistivity measurements performed by twenty-five laboratories. The Log Analyst, 29.

Knight, R. J. & Endres, A. L., 2005. An Introduction to Rock Physics Principles for Near-Surface Geophysics. Near-Surface Geophysics, p. 31-70.

Kocureck, 2018. Kocureck Industries Website www.kocureckindustries.com. Acessado em maio-2018.

Maerefat, N., Baldwin, B., Chaves, A., Latorraca, G. & Swanson, B., 1990. Part IV - Guidelines for saturating and desaturating core plugs during electrical resistivity measurements; SCA guidelines for sample preparation and porosity measurement of electrical resistivity samples. The Log Analyst, 31.

Mohammed, T. E., Gonzales-Sirois, S., Giroux, B., Schmitt, D. & Schmidt-Hattenberger, C., 2015. Effect of pressure on electrical conductivity and formation factor in sandstones. GeoConvention 2015: New Horizons.

Reynolds, W. R. & Williford, C. W., 1991. Zeolite and clay-mineral induced resistivity in simulated reservoir sand. Journal of Petroleum Science and Engineering, 5, p. 163-172.

Tiab, D. & Donaldson, E. C., 2004. Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. Elsevier.

Worthington, A. E. P., Hedges, J. H. & Pallatt, N., 1990. SCA guidelines for sample preparation and porosity measurement of electrical resistivity samples. Part I- Guidelines for preparation of brine and determination of brine resistivity for use in electrical resistivity measurements. The Log Analyst, 31.

Worthington, P. F., 1993. The uses and abuses of the Archie equations: the formation factor-porosity relationship. Journal of Applied Geophysics, v.30.

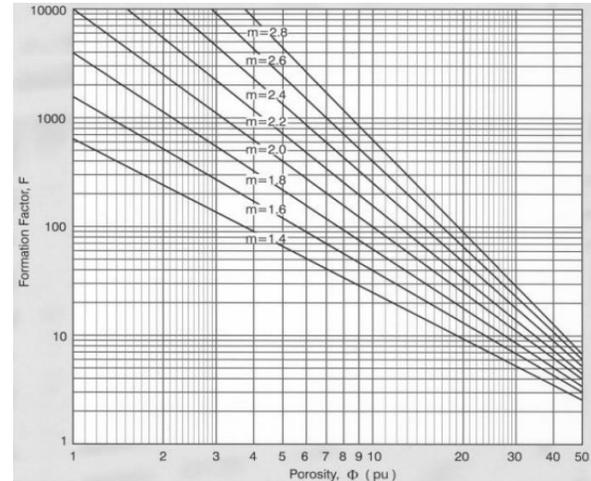


Figura 14 – Coeficiente de cimentação em diagrama fator de formação vs. porosidade, Glover (2008)

Berea		
Pressão (psi)	R_o ($\Omega.m$)	m
600	52,31	1,6707
1000	52,94	1,6761
1400	53,38	1,6796
1800	53,84	1,6836
2200	54,24	1,6873
2600	54,65	1,6908
3000	55,02	1,6926
3400	55,32	1,6950
3800	55,61	1,6982
4200	55,91	1,7004
4600	56,14	1,7019
5000	56,33	1,7027

Tabela 4 – Valores de resistividade (R_o) e coeficiente de cimentação (m) em diferentes pressões - amostra Berea

Boise		
Pressão (psi)	R_o ($\Omega.m$)	m
600	25,16	1,8253
800	24,94	1,8162
1000	24,75	1,8086
1200	24,63	1,8031
1400	24,53	1,7988
1600	24,45	1,7951

Tabela 5 – Valores de resistividade (R_o) e coeficiente de cimentação (m) em diferentes pressões - amostra Boise

Silurian		
Pressão (psi)	R_o ($\Omega.m$)	m
600	331,92	2,5605
800	334,54	2,5635
1000	335,66	2,5640
1200	336,33	2,5638
1400	337,66	2,5646
1600	339,03	2,5659
2000	341,51	2,5668
2400	344,46	2,5689
3000	348,03	2,5705
3400	350,08	2,5710
3800	352,35	2,5719

Tabela 6 – Valores de resistividade (R_o) e coeficiente de cimentação (m) em diferentes pressões - amostra Silurian