

## Estudo das Propriedades Petrofísicas de Rochas Artificiais

Igor Leonardo Guerra Galvão<sup>\*1,2</sup>, Milton Morais Xavier Júnior<sup>\*1,3</sup>, Francisco de Assis Olímpio Cabral<sup>\*1,4</sup>  
(\*DGEF/Departamento de Geofísica, <sup>2</sup>Bolsista PRH22-BR, <sup>3</sup>Professor Orientador, <sup>4</sup>Professor Co-orientador)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14<sup>th</sup> 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 report graduation contains the study of estimates of some petrophysical properties such as porosity, permeability and electrical resistivity models in artificial rocks created in the laboratory from the sintering of glass beads, plus a complete microstructural analysis of these models, through images digital (thin sections and computed microtomography). The objective was, knowing the few available evidence in the literature, producing artificial rocks in the laboratory with the same characteristics of the reservoir rocks and analyze the petrophysical properties of the same, in order to study, more cheaply (compared to samples obtained in the field mainly drawn from testimonies of wells), key aspects to characterize the storage and transmission of fluids in rock, essential to manage and predict the performance of an oil reservoir in the subsurface. The results were satisfactory and, as a pioneering work, serves as a basis for further laboratory petrophysical studies from these artificial models of rocks.

### Introdução

O conhecimento preciso das propriedades físicas das rochas é de suma importância para uma interpretação mais realista dos dados geofísicos que são registrados em campo, já que com as dificuldades físicas existentes na prática da prospecção de recursos minerais subterrâneos, a petrofísica surge como uma ferramenta fundamental da exploração mineral nos dias atuais.

Estudos petrofísicos são intensamente empregados com o objetivo de melhorar o conhecimento da distribuição de fases fluidas e das heterogeneidades internas num reservatório de petróleo, por exemplo. Com isso, torna-se possível delimitar e estimar reservas, determinando, inclusive, a quantidade de que está no campo.

Além disso, a petrofísica se interessa, particularmente, pelas propriedades que permitem a determinação de porosidade, permeabilidade e saturação de fluidos em uma rocha-reservatório, que são aspectos fundamentais para caracterizar o armazenamento e a transmissão de fluidos na rocha, com a finalidade de administrar e prever a performance de um reservatório em sub superfície, em outras palavras, a petrofísica investiga as propriedades físicas de minerais, rochas e fluidos nelas contidos, e como essas características se alteram em função dos

inúmeros fatores ambientais, como pressão, temperatura, saturação, salinidade e argilosidade; e condições instrumentais, como frequência, potência, ganho, espaçamento, amostragem e sensibilidade. Essa investigação petrofísica pode ocorrer na escala de campo (perfilagem geofísica feita na região) ou na escala de bancada (medição laboratorial das propriedades físicas de amostras de rochas/fluidos).

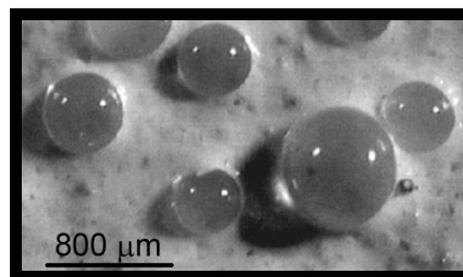
Partindo desse princípio e sabendo que a obtenção de amostras de rochas-reservatório são muitas vezes de difícil acesso, esse trabalho consiste num estudo de algumas propriedades petrofísicas das rochas reservatório observadas em rochas artificiais (porosidade, permeabilidade intrínseca e resistividade elétrica em função de uma frequência aplicada e do grau de saturação em água das amostras), no nosso caso, produzidas através da sinterização de esferas de vidro com vários diâmetros, que podem, pelo baixo custo de produção das mesmas, aliado a possibilidade de controle sobre a homogeneidade e dimensões das amostras, permitir uma análise menos dispendiosa das suas propriedades petrofísicas comparado com amostras de rochas reservatório obtidas em campo, principalmente as amostras retiradas de testemunhos de poços.

### Metodologia

Os trabalhos laboratoriais desenvolvidos se dividiram em quatro etapas principais: a produção das amostras sintéticas, os ensaios de porosidade, os ensaios de permeabilidade, além da mensuração da resistividade elétrica – em função de alguns parâmetros como frequência e a saturação em água – dos modelos desenvolvidos.

A produção das amostras sintéticas foi feita no Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas do Departamento de Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, à partir da sinterização de esferas de vidro (Figura 1) de diversos diâmetros (Tabela 1).

Figura 1 - Microesferas de vidro.



Fonte: Zengbo Wang (2011)

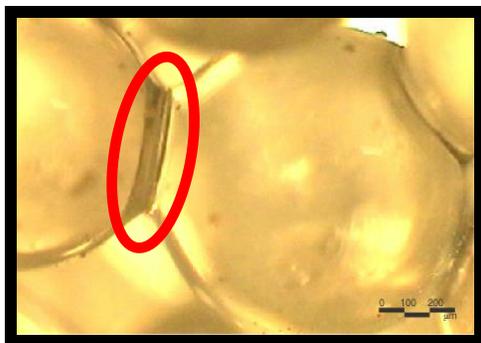
Tabela 1 – Diâmetros das esferas de vidro utilizadas na produção das amostras sintéticas.

DIÂMETRO EM MILÍMETROS (mm)						
0,063	0,090	0,125	0,180	0,250	0,355	1,00

Fonte: Própria (2014)

A sinterização é um processo natural que ocorre, por exemplo, quando partículas de no máximo poucas centenas de micrometros ( $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$ ) de diâmetro encontram-se em contato e a temperatura do ambiente é suficientemente alta para produzir uma união por coalescência (Figura 2), isto é, pela fusão de superfícies adjacentes. Muitas vezes as partículas em contato podem ser até milimétricas. Para que a sinterização ocorra é necessário que o sistema de partículas esteja o mais empacotado possível e que os vazios existentes entre elas sejam também, no máximo, da ordem de micrometros.

Figura 2 - Exemplo de região com união por coalescência (em vermelho) das esferas de vidro.



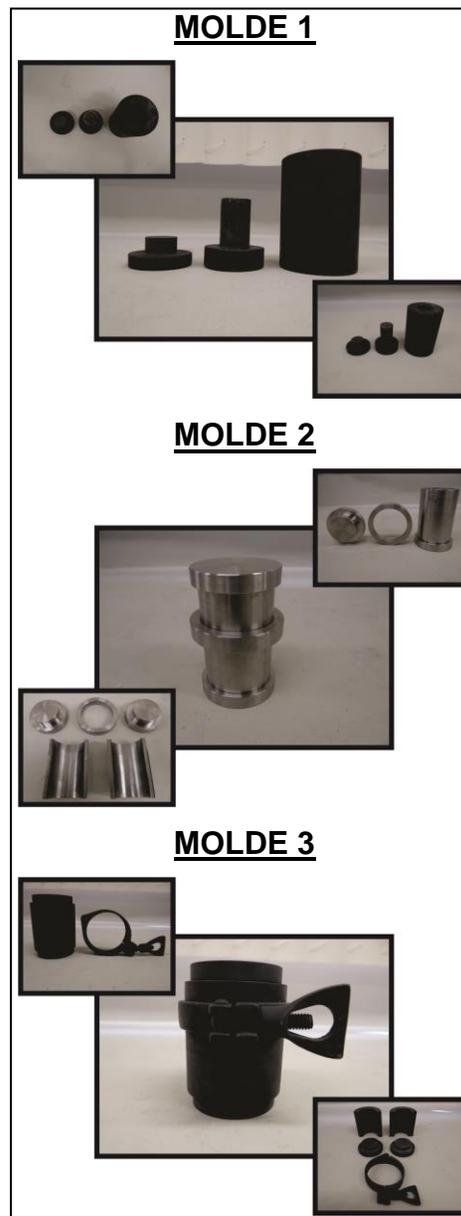
Fonte: Ciência dos Materiais (2014)

Após as amostras serem lavadas e peneiradas (em um agitador de peneiras), o processo de sinterização das esferas de vidro aconteceu em um forno mufla (indicado para processos laboratoriais de pesquisa), já que o mesmo nos permite trabalhar com faixas entre  $0^\circ$  e  $1300^\circ\text{C}$ .

Antes de serem sinterizadas, as esferas de vidro foram depositadas em três moldes cilíndricos de aço (Figura 3) torneados especificamente para o trabalho com as esferas de vidro: o primeiro com 1 polegada (25,4mm) de diâmetro no ambiente interno do molde e cerca de 110mm de comprimento, esse molde possui duas tampas de aço que encaixam nos seus limites e mantém o molde bem fechado; o segundo com 1,5 polegadas (38,1mm) de diâmetro para o ambiente interno do molde e 94mm de comprimento, o mesmo também possui tampas de aço de aço; e o terceiro também com 1,5 polegadas (38,1mm) de diâmetro para o espaço interno do molde e 94mm de comprimento, porém, com algumas adaptações em relação ao segundo molde que foi fabricado, como a presilha que envolvia todo o molde, aumentando a fixação das suas paredes “encaixantes”, que é uma outra adaptação que nos permite, após a retirada da presilha,

abrir o molde lateralmente, o que facilita a retirada das amostras feitas nesse molde.

Figura 3 - Os três moldes cilíndricos utilizados na produção das amostras sintéticas

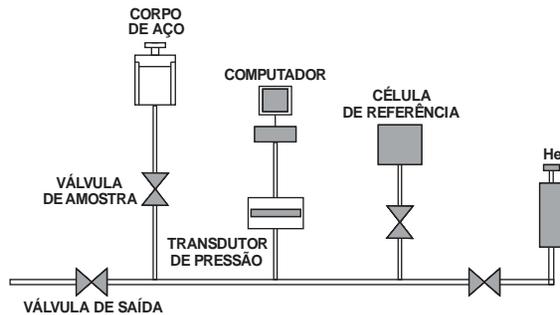


Fonte: Própria (2014)

Para a porosidade, as medidas dos modelos artificiais de rocha foram realizadas no Laboratório de Petrofísica da Universidade de Campina Grande (UFCG) a partir da utilização do porosímetro ULTRAPORE/PERM 500. O equipamento mede a porosidade da rocha através do método de expansão de gás, empregando-se a Lei de Boyle (1662) em um porosímetro à hélio (Esquema representado na Figura 4), onde uma alta pressão é aplicada no corpo de aço que contém a amostra sintética e uma resposta linear de um transdutor permite um rápido equilíbrio da pressão e consequentemente a determinação da porosidade efetiva.

Feito o ensaio, um software (instalado no computador e sincronizado com o equipamento) determina o volume de grãos (VG), o volume de poros (VP), o volume bulk (VB), a densidade de grãos (DG) e a diferença de pressão antes e após a pressurização com He ( $\Delta P$ ). Através dos dados obtidos para esses parâmetros, o próprio sistema equipamento-software calcula a porosidade efetiva ( $\phi$ ).

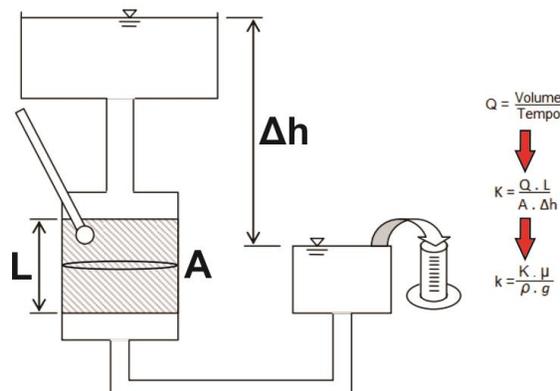
Figura 4 - Esboço do Funcionamento do porosímetro Ultra Pore 500 Pycnometer System.



Fonte: Própria (2014)

Quanto às estimativas de permeabilidade intrínseca, feitas no Laboratório de Propriedades Físicas das Rochas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, as medidas foram obtidas a partir de dados de condutividade hidráulica obtidos com a utilização de um permeômetro de carga constante (representado na Figura 5) produzido no próprio laboratório. Os ensaios de condutividade hidráulica são os mais realizados em laboratório, devido os seus baixos custos de operação.

Figura 5 - Esquema de Funcionamento de um Permeômetro de Carga Constante. A permeabilidade intrínseca ( $k$ ) é medida em função da condutividade hidráulica ( $K$ ), da viscosidade ( $\mu$ ) e do peso específico ( $\rho$ ) do fluido utilizado, além do valor da aceleração da gravidade ( $g$ ).



Fonte: Própria (2014)

As estimativas feitas com esse tipo de permeômetro é um dos métodos mais utilizados para obter valores de condutividade hidráulica, muito recomendado para estudos de rochas que possuem alta permeabilidade, como é o caso das rochas reservatório.

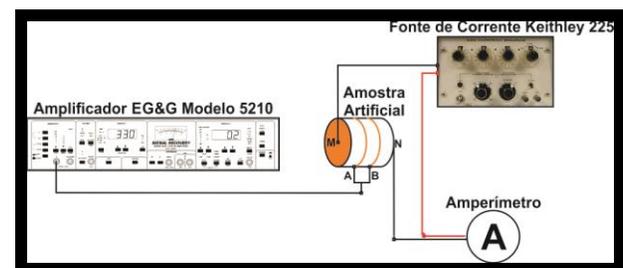
Nesse protótipo, o ensaio consta de dois reservatórios onde os níveis de água são mantidos constantes.

Mantida uma carga hidráulica  $h$ , o coeficiente de permeabilidade é determinado pela quantidade de água que percola a amostra (colocada no interior de um tubo de parede flexível) para um dado intervalo de tempo. Essa quantidade de água é medida por uma proveta graduada, e nos permite determinar a vazão ( $Q$ ) do fluido utilizado (água) na análise. Conhecidas a vazão e as dimensões do corpo de prova (comprimento  $L$  e a área da seção transversal  $A$ ), calcula-se o valor da permeabilidade intrínseca da rocha artificial ( $k$ ).

Por fim, as medidas de resistividade elétrica aparente foram obtidas a partir do método das "quatro pontas" (Figura 6), que consiste em sistemas de quatro eletrodos, sendo dois deles (A e B) usados para enviar uma corrente elétrica ( $i$ ) para a amostra e os outros dois eletrodos (M e N) usados para medir diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre eles. Os eletrodos de injeção de corrente (A e B) estavam conectados a fios de cobre que envolviam a amostra e os eletrodos de medida de tensão (M e N) estavam conectados a placas esféricas de cobre (em laranja na figura 6) que estavam conectadas as paredes do plugue em suas extremidades. Todos os eletrodos estavam igualmente espaçados em todas as medidas (em torno de 1,1cm de espaçamento).

Além dos eletrodos, o sistema era composto por uma fonte de corrente, um amperímetro e um amplificador, esse último nos dava a possibilidade de analisar a resistividade da rocha de acordo com as diferentes frequências de oscilação da corrente alternada que lhe eram aplicadas, já que, no caso deste trabalho, o objetivo era fazer uma análise das resistividades obtidas para frequências entre 100Hz e 10000Hz em amostras 100% saturadas, além de analisar as resistividades em função da % de saturação da rocha, desde os 100% de sua saturação até a rocha totalmente seca.

Figura 6 - Esquema dos instrumentos utilizados para medir a resistividade das amostras.



Fonte: Própria (2014)

### Resultados obtidos

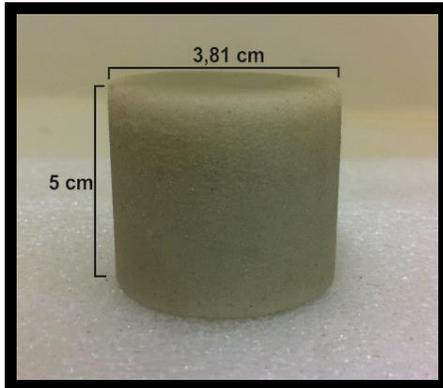
Inicialmente, percebemos que a dificuldade encontrada na produção das amostras sintéticas era à escolha correta da temperatura de sinterização para cada granulometria das esferas de vidro.

A literatura apresentou temperaturas entre 600 a 800°C como ideais para que ocorresse a plena sinterização de, no nosso caso, vidros sódio-silicatos, material que compunha as esferas. Foram exatamente nessa faixa de temperaturas que encontramos, segundo Chiang et al. (1977), as chamadas as "temperaturas de amolecimento"

do material, onde iniciou-se o processo de adesão das esferas através da formação de “pescoços” característicos de uma união por coalescência.

Foram produzidas amostras sintéticas (exemplo na Figura 7) nos três moldes, mas foram utilizadas para as análises petrofísicas apenas as amostras (das sete granulometrias abordadas nesse trabalho) produzidas nos moldes 2 e 3, de 1,5” (polegadas).

Figura 7 - Amostra com esferas de vidro de 0,125mm.



Fonte: Própria (2014)

Numa análise das medidas das propriedades petrofísicas das amostras, primeiramente de porosidade, os dados obtidos nas estimativas laboratoriais nos comprovam a boa resposta do modelo artificial rochoso para estudos de reservatórios. Os valores de porosidade diminuem à medida que aumentamos a granulometria das esferas de vidro utilizadas nas amostras, variando entre 23 e 40%.

Esses valores de porosidade estão associados a alguns fatores que tem influência direta na porosidade das rochas, como a seleção dos grãos, a forma dos grãos, a granulometria, além de um fator em específico para as amostras sintéticas, o grau de deformação das esferas com a temperatura.

O grau de deformação das esferas com as temperaturas de sinterização que lhe foram estabelecidas é o principal responsável pelos valores obtidos nas estimativas de porosidade. As esferas das amostras de baixa granulometria foram sinterizadas em baixas temperaturas, o que representa as mesmas um baixo grau de deformação. O oposto acontece com as amostras de alta granulometria, que tiveram as esferas sinterizadas em temperaturas maiores, fazendo com essas esferas se deformem mais que as esferas das amostras de menor granulometria. Com um maior grau de deformação, a seleção dos grãos piora e as esferas se rearranjam de forma a preencher os vazios existentes entre elas, diminuindo assim a porosidade da amostra, o que confirma os valores de porosidade que foram obtidos.

Existem outras características que não foram simuladas com as rochas sintéticas e retratadas nesse trabalho (que podem vir a ser tema de estudos futuros) que também tem uma influência direta nos valores da porosidade de uma rocha reservatório, são elas: a compactação dos grãos (com a profundidade), a cimentação, os

fraturamentos, à natureza das partículas, a recristalização dos minerais que compõe essa rocha e as dissoluções.

Quanto a permeabilidade, para que uma rocha seja considerada um reservatório de hidrocarbonetos explorável, a sua permeabilidade deve ser maior que cerca de 100 mD (o valor exato depende da natureza do hidrocarboneto - reservatórios de gás com permeabilidades mais baixas ainda são exploráveis devido à menor viscosidade do gás relativamente ao petróleo). Rochas com permeabilidades significativamente mais baixas que 100 mD podem formar selos eficientes em um sistema petrolífero.

Os valores de permeabilidade intrínseca desse trabalho foram obtidos em laboratório através das medidas de condutividade hidráulica em um permeâmetro de carga constante. Os resultados variaram entre 13000 e 333000 miliDarcy, e também foram obtidas para as sete granulometrias das amostras de rocha artificial que foram produzidas.

A permeabilidade, assim como a porosidade, também é inicialmente controlada por aspectos relacionados ao tamanho, seleção, forma e arranjo dos grãos, além do grau de deformação das esferas de vidros com as suas temperaturas de sinterização. Como percebido nos valores estimados, a permeabilidade nas amostras aumentou com o aumento da granulometria

A priori, como a porosidade das amostras diminuiu com o aumento das esferas, era esperado que os valores da permeabilidade também diminuíssem, porém, eles aumentaram à medida que a granulometria também aumentou, fato esse também associado a forte influência da deformação nas esferas por causa da temperatura de sinterização na qual foram submetidas, que apesar de piorar a seleção dos “grãos” e diminuir o arredondamento dos mesmos fazendo com que alguns dos poros fossem até fechados, aumentou o diâmetro dos poros restantes após o rearranjo das esferas deformadas, onde poros maiores ofereceram menos resistência ao escoamento por causa da aderência entre o fluido e a parede dos poros.

Esse aumento nos poros restantes após o rearranjo é um fator importante para o aumento da vazão do fluido e consequentemente da condutividade hidráulica. Quanto maior a condutividade hidráulica numa rocha, maior a permeabilidade intrínseca da mesma.

Além disso, as amostras de maior granulometria naturalmente tendem a ter valores de permeabilidade mais altos, já que haverá uma diminuição da tortuosidade na passagem dos fluidos e um aumento da adesão do fluido as paredes dos poros das amostras.

Por fim, para a resistividade elétrica aparente numa primeira proposta, assim como em medidas feitas em diversos trabalhos sobre rochas reservatório, os valores de resistividade para todas as amostras sintéticas 100% saturadas também diminuiram com o aumento da frequência, resultado da diminuição do número de colisões entre os íons presentes no eletrólito durante as suas movimentações entre os diferentes potenciais do circuito. Com o aumento da frequência, mesmo com uma

movimentação mais rápida dos íons, o período de oscilação da corrente é menor e em menos tempo ela muda de direção (Por causa da mudança de polaridade do campo magnético, já que se trata de uma corrente alternada), fazendo com que o percurso feito pelos íons também seja diminuído e a resistividade aparente medida seja mais baixa.

Numa segunda proposta dos experimentos (dessa vez com a % em água variando numa mesma amostra), os valores de resistividade aparente também diminuíram com o aumento da frequência (100, 1k, 5k e 10kHz), também em consequência dos fatores explicados nas análises das amostras com 100% de sua saturação. A diferença é que nas medidas de resistividade aparente feitas para diferentes valores de saturação, além de existir um decréscimo nos valores de cada curva, causado pelo aumento da frequência de oscilação da corrente na rocha, as curvas conseguintes a saturação de 100% da rocha, mesmo com esse decréscimo, mostraram um aumento dos valores de resistividade em cada uma dessas curvas conseguintes. Isso basicamente se deve ao fato de que a medida que a quantidade de eletrólitos diminuiu (diminuição da saturação), as medidas tiveram valores mais altos. Percebemos isso ao comparar uma curva de resistividade aparente para um valor alto de saturação com uma outra curva de resistividade aparente (na mesma rocha) agora com um valor menor de saturação. Esse aumento é mais bem visualizado na Figura 8, que mostra essas curvas da amostra sintética composta por esferas de 0,125mm para valores de saturação que vão de 100 a 0%.

### Considerações

As amostras sintéticas produzidas confirmaram os bons resultados do modelo para estudos petrofísicos de rochas reservatório, no que diz respeito aos aspectos que controlam inicialmente a porosidade, a permeabilidade e resistividade elétrica de uma rocha. As porosidades foram relativamente boas, variando entre 23 e 40%, e formaram uma estrutura porosa favorável aos estudos em laboratório. Um único ponto a ser levando em consideração nessas amostras é o fato da influência que o molde de aço veio a ter em cima das amostras, fazendo com que a medida que as temperaturas de sinterização aumentassem, aumentasse também o grau de deformação dessas esferas, diminuindo a porosidade com o aumento da granulometria, o que, em primeiro caso deveria ser ao contrário (porosidade aumentando com a granulometria). No fim desse trabalho, já foram iniciados outros estudos com essas rochas sintéticas, onde as mesmas estão sendo produzidas, ao contrário dessa pesquisa, em moldes de granito, o que nos gerou uma surpresa nos resultados, já que diferente do que acontecia nos moldes de aço, o granito não está tendo tanta influência nas esferas e elas não estão sendo deformadas com o aumento dessa temperatura de sinterização. Isso já evidência uma primeira mudança que deve ser feita nos próximos trabalhos com esses modelos sintéticos, o molde a ser utilizado.

Quanto à permeabilidade, os valores que foram obtidos em laboratório foram valores altos (de 13000 a 333000 mD), mas bem significativos no que diz respeito a rochas

reservatório. Assim como a porosidade, estavam sendo levados em consideração apenas aspectos iniciais que influenciam nesses valores de permeabilidade intrínseca, como granulometria, seleção de grãos e o arredondamento dos mesmos, além de, para amostras sintéticas em específico, a influência do grau de deformação com a temperatura. Em trabalhos futuros seria interessante adaptar os modelos artificiais a outras influencias que levam os resultados dos ensaios petrofísicos ainda mais próximos da realidade, como o efeito da compactação de camada subjacente sobre essa rocha, dissoluções, cimentação e até a recristalização de minerais. Simular todas essas influencias em novos trabalhos seria mais do que essencial na obtenção de resultados ainda mais consistentes.

As estimativas da resistividade elétrica também nos mostraram uma boa resposta e confirmaram os efeitos já esperados em função da saturação em água e das frequências de oscilação utilizadas. Seria interessante, em trabalhos futuros, fazer novas medidas levando em consideração todos os fluidos que podem percolar uma rocha reservatório (óleo, gás e água), afim de comparar os resultados com os dados desse trabalho e entender melhor como a resistividade se comporta a medidas em que esses fluidos se encontram juntos nos poros de uma rocha.

No mais, o trabalho com esse tipo de rocha artificial mostrou-se importante na petrofísica laboratorial de rochas, porém como todo trabalho pioneiro em uma área, inúmeras adaptações e incrementos devem ser feitos para que esse tipo de pesquisa chegue o mais próximo da realidade, dando um passo importante para a indústria petrolífera.

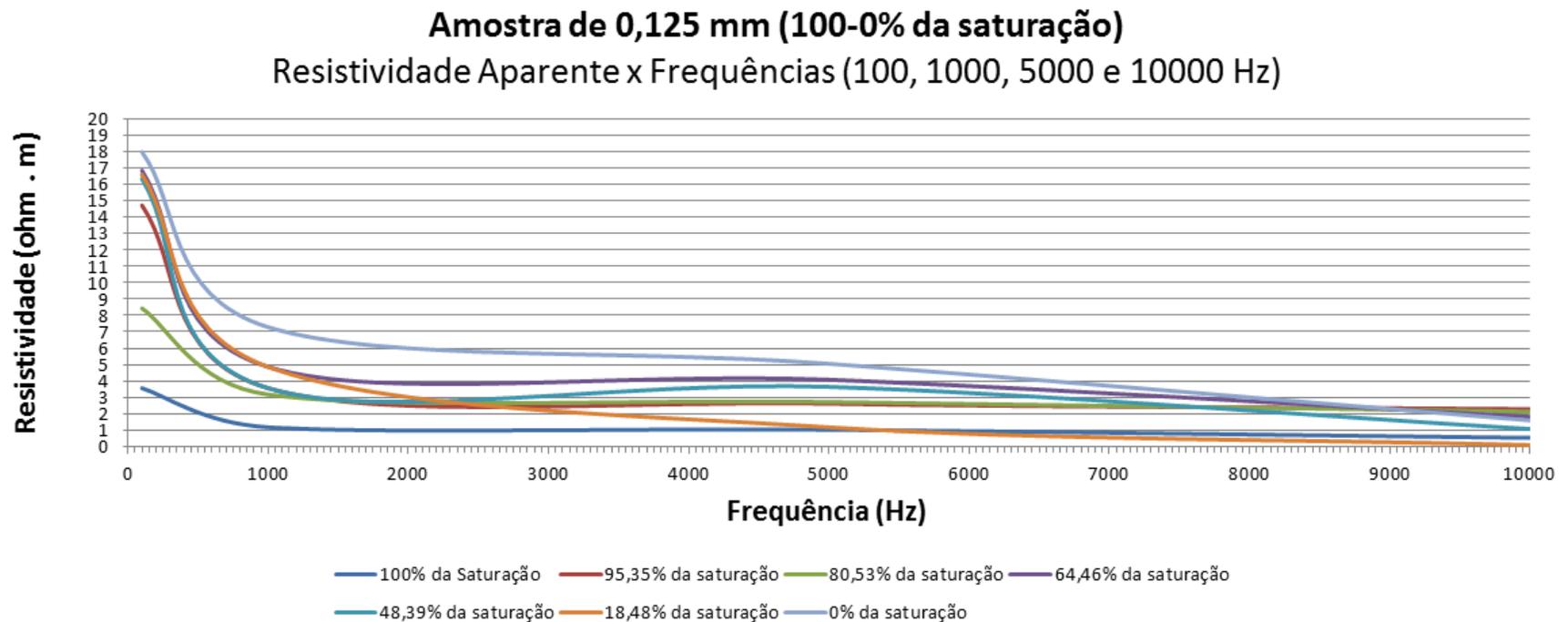
### Agradecimentos

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) e a PETROBRAS, por meio do Programa de Recursos Humanos para o de Setor de Petróleo e Gás (ANP – PRH 22), pela bolsa concedida ao autor durante o período da pesquisa. Ao Departamento de Geofísica da UFRN pela infraestrutura cedida. Ao professor José Agnelo, do Laboratório de Petrofísica da Universidade Federal de Campina Grande por permitir a utilização de alguns equipamentos do laboratório.

### Referências

- ARCHIE, G.E. 1950. **Introduction to petrophysics of reservoir rocks**. American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 34 (5), 943–961.
- CHIANG, Y., Birnie III, D., Kingery, W. D.. **Physical Ceramics, John Wiley Sons, Inc.**, N. York, EUA (1977) p. 392-398
- SANTOS, R.A.A. 2014. **Estimativa digital da porosidade e permeabilidade através de imagens tomográficas de rochas artificiais**. Natal, 2014. 38 p.
- SEGUNDO, F.R.D. 2014. **Síntese de Rochas artificiais a partir da sinterização de esferas de vidro**. Natal/RN, 2014. 30 p.

Figura 8 - Curvas de resistividade aparente para diferentes valores de saturação da amostra de 0,125mm. As curvas com valores mais altos de resistividade são obtidos para valores menores de saturação, já que os valores mais baixos de saturação representam uma rocha menor quantidade de eletrólito (água).



Fonte: Própria (2014)