



## **PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DE FLUIDOS ORIUNDO DO PROCESSO DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO E GÁS**

JANAINA M. PEDROSA<sup>1\*</sup>, HÉLDER M. GUERREIRO<sup>1</sup>, ARLEY S. ROSSI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Amazonas  
Faculdade de Engenharia Química  
\*e-mail: janainamonteiro2014@gmail.com

**RESUMO** – A tecnologia de aquecimento e secagem através de micro-ondas, para promover a remoção de cascalho de perfuração da escavação de poços de petróleo e gás, tem sido estudado ao longo dos últimos anos e tem se mostrado uma técnica promissora. A cinética de aquecimento e secagem, bem como a interação do campo eletromagnético com o material a ser aquecido estão diretamente associadas as propriedades dielétricas. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades dielétricas do fluido de perfuração e os aspectos fundamentais da cinética de aquecimento por micro-ondas. Para a concentração de contaminantes, através do fluido de perfuração, quanto maior concentração, maior seria a habilidade de transformar energia absorvida em calor. Por meio do estudo de cinética de aquecimento e secagem compreendeu-se aspectos importantes relacionados à interação da água com os componentes da mistura cascalho/fluido, bem como o aquecimento do sólido e transferência de energia por condução para bases orgânicas. Portanto, esses resultados são de grande relevância para o aprimoramento e desenvolvimento de melhorias na operação de aquecimento dos fluidos de perfuração por micro-ondas para a remoção de contaminantes, assegurando um tratamento rápido, eficaz com baixo custo energético.

### **1. INTRODUÇÃO**

#### **1.1 Fluido de perfuração**

Atualmente, a técnica de escavação rotativa é a mais empregada na perfuração de poços de petróleo. O processo se baseia em comprimir a broca contra a rocha a ser perfurada, executando movimentos de rotação, gerando assim, o esmerilhamento da rocha. Estes fragmentos de rochas gerados no processo de perfuração são conhecidos como cascalho de perfuração e devem ser removidos dessa operação pelo fluido de perfuração, que entra pelo interior da broca e retorna à superfície, pelo espaço anular entre a coluna de perfuração e as paredes do poço, carreando consigo os cascalhos.

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, que tem como principal função a lubrificação da coluna e o resfriamento da broca, promover a limpeza do fundo do poço, além de transportar os cascalhos até a superfície do poço. Usualmente o fluido de perfuração é injetado por bombas pelo interior da coluna e retorna a superfície, pelo espaço anular entre a coluna de perfuração e as paredes do poço (DARLEY *et.al*, 1988).

Os fluidos de perfuração podem ser classificados de acordo com o tipo de fase contínua utilizada, podendo ser fluido de base aquosa, não-aquosa e fluidos aerados. Os fluidos de base não-aquosa são os mais utilizados atualmente no Brasil por apresentar diversas vantagens em relação aos outros tipos de fluidos, como menores problemas operacionais e baixos coeficientes de atrito.

Os fluidos sintéticos empregados neste trabalho foram dois tipos largamente utilizados nas operações de perfuração *onshore* pela PETROBRAS e são denominados pela empresa de BR-MUL. O primeiro emprega na formulação da emulsão inversa de uma n-parafina como base sintética (BR-MUL-parafina) e o segundo utiliza uma olefina interna linear como base sintética (BR-MUL-olefina). As razões base sintética ou orgânica e água (O/W) utilizadas na preparação de ambos os fluidos são 70/30 em peso. Maiores detalhes sobre cascalho, fluido de perfuração e suas particularidades podem ser encontradas nos trabalhos de PEREIRA (2010, 2013), SANTOS (2014), PETRI (2014), PANISSET (2014) e ROSSI *et. al.*, (2016).

## 1.2 Propriedades dielétricas

Toda onda de natureza eletromagnética tem a mesma velocidade no vácuo, diferindo em si apenas pelo comprimento de ondas ( $\lambda$ ). E essa propriedade diminui à medida que ocorre o incremento na frequência de oscilação, e pode ser calculado pela equação (1)

$$\lambda_0 = \frac{c}{f} \quad (1)$$

A absorção da energia pelo material depende da permissividade relativa ( $\epsilon_r$ ), que é uma expressão formada por uma parte imaginária, conhecida como fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ) e uma parte real denominada constante dielétrica ( $\epsilon'$ ). A permissividade relativa determina a capacidade de um material absorver e dissipar energia quando submetido ao aquecimento por micro-ondas (HACKE, 1999).

$$\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2)$$

A constante dielétrica ( $\epsilon'$ ) é relacionada a capacidade que um material tem de armazenar energia através da formação do campo elétrico. O fator de perda dielétrica indica a capacidade que um material tem de dissipar energia absorvida na forma de calor.

### 1.2.1 Tangente de perdas ( $\tan\delta$ )

A tangente de perda, que é o fator de dissipação, nos fornece a informação de como a energia que foi armazenada no material através do campo elétrico, é dissipada na forma de calor. A tangente de perdas é definida pela seguinte equação (3).

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (3)$$

O ângulo ( $\delta$ ) descreve a diferença entre o campo elétrico e a polarização do material, ou seja, quanto maior for a diferença de fase, maior será a conversão de energia em calor, como mostrado na relação da Figura (1)

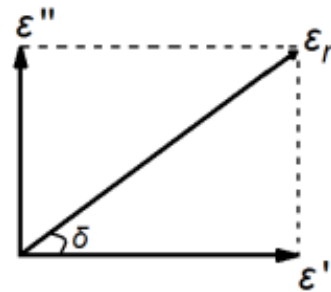


Figura 1: Diagrama que define a tangente de perdas

### 1.2.2 Fatores que afetam as propriedades dielétricas dos materiais

As propriedades dielétricas dos materiais são influenciadas por alguns fatores, mas os mais relevantes, para este trabalho, são a frequência de campo e temperatura. As propriedades dielétricas variam com a oscilação do campo elétrico aplicado. Isso pode ser explicado devido a polarização das moléculas, orientação dos dipolos, com a incidência do campo aplicado (NELSON, 2010; VENKATESH *et. al.*, 2005).

As propriedades dielétricas apresentam um comportamento dependente da temperatura também, devido ao fato de que: com o aumento da temperatura, haverá um aumento na agitação das moléculas. Com o incremento da temperatura, a constante dielétrica tende a diminuir, em baixas frequências de micro-ondas (NELSON *et al.*, 2012).

As medições de propriedades dielétricas do fluido de perfuração são o foco principal do presente trabalho. Foram realizados experimentos para avaliar o efeito da concentração de contaminante, da temperatura

de aquecimento e influência da distribuição de tamanho das partículas nas propriedades dielétricas dos cascalhos. Deste modo, estes dados podem ser utilizados para propor melhorias na operação de descontaminação destes sólidos via micro-ondas, garantindo um tratamento mais eficiente e rápido com menor custo energético.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Propriedades dielétricas

Os fluidos de perfuração olefina e parafina foram desenvolvidos pela Petrobras e são largamente empregados nas operações de perfuração da empresa. O fluido de perfuração de base olefina possui em sua composição 43,36% de olefina e 27,06% de água, enquanto o fluido base parafina tem composição de 39,39% de parafina e 28,20% de água, o restante dos componentes são aditivos ou componentes específicos de cada fluido. As bases orgânicas puras são utilizadas na formulação dos fluidos de perfuração, e tanto as bases orgânicas como os fluidos de perfuração foram doados pela estação de fluidos unidade de Macaé, no estado do Rio de Janeiro.

O estudo destina-se a estudar as propriedades dielétricas dos fluidos de perfuração e das bases orgânicas puras.

### 2.1 Determinação das propriedades dielétricas

A técnica utilizada para realizar a medida das propriedades dielétricas, foi a de cabo coaxial aberto com a varredura de frequência através de um sensor.

A permissividade complexa, que compreende a constante dielétrica ( $\epsilon'$ ) e fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ ), são calculadas pelo analisador de rede, a partir da medida do coeficiente de reflexão do material, em contato com a ponta do sensor. A amplitude do sinal refletido é medida pelo equipamento com ajuda do software específico que acompanha o sensor. Essa medida é expressa em termos de permissividade relativa complexa (FRANCO et al., 2015). No caso, o analisador de rede é comandado por um computador, mediante um

programa específico através de uma porta GPIB, cujo esboço de montagem é mostrado na Figura 2.

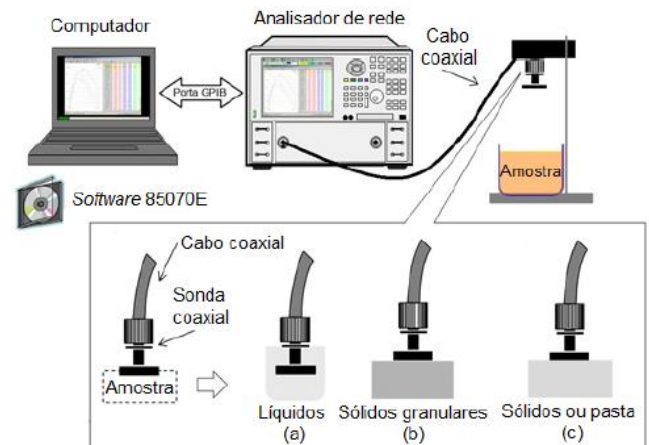


Figura 2: Analisador de rede com sonda para medição das propriedades dielétricas

Inicialmente foi realizada a calibração do dispositivo utilizado nas medidas das propriedades dielétricas. O seguinte procedimento foi empregado: para completa estabilização dos sinais o analisador de rede ficou ligado por cerca de uma hora antes dos testes. Posteriormente, escolheu-se a faixa que iria trabalhar, preferencialmente entre 2 e 3 GHz. Em seguida, ar e água deionizada, em uma temperatura conhecida, foram analisados de acordo com as recomendações do fabricante, com ajuda de um kit específico para essa finalidade. Os valores encontrados foram comparados com valores reportados na literatura. Após a calibração, o equipamento estava apto para medidas de propriedades dielétricas de fluidos de perfuração.

### 2.3 Unidade experimental

O equipamento de aquecimento e secagem por micro-ondas utilizado no presente trabalho pertence a marca SHARP® modelo R-23GT com potência total de 1600W divididos em dois magnetrons, frequência nominal de 2,45GHz e cavidade interna com medidas 330x330x210mm. O forno possui um disco giratório metálico, localizado na parte superior da cavidade, responsável pela distribuição das ondas eletromagnéticas do guia de ondas superior. O equipamento ainda dispõe de um sistema de exaustão, responsável pela

eliminação completa de vapor gerado na cavidade do forno. Foram realizadas algumas adaptações com o objetivo de coletar dados importantes nos ensaios, como a instalação de termopares, para monitorar as temperaturas do vapor e do leito, e também um transmissor de pressão, para informar a pressão no interior da cavidade. Além disso, foi instalado também um sistema de injeção de gás inerte ( $N_2$ ) e ar comprimido.

A Figura 3 mostra um esquema da unidade de aquecimento e secagem com todas as adaptações realizadas.

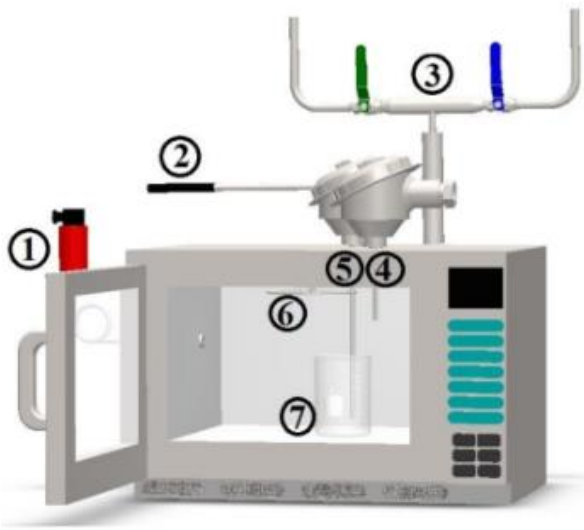


Figura 3: Esquema experimental da unidade de aquecimento e secagem por micro-ondas

Em que:

- 1 - Manômetro transmissor de pressão NOVUS modelo TP-691 com faixa de -1 a +1bar;
- 2 - Anemômetro de fio quente TSI PLUS modelo 8386 com faixa 1.27 a 78.7 ft/min;
- 3 - Válvulas para alimentação de gás inerte ( $N_2$ ) e ar comprimido;
- 4 - Termopar K ALUTAL faixa de 60 a 200°C para medidas de temperatura do vapor;
- 5 - Termopar K ALUTAL faixa de 35 a 550°C para medidas de temperatura do leito;
- 6 - Disco giratório metálico;
- 7 - Recipiente de borosilicato para aquecimento e secagem das amostras.

O gás inerte tem como principal função manter a atmosfera do forno livre de gases inflamáveis, evitando assim, o risco de possíveis acidentes. Um controlador de temperatura do tipo on/off foi adaptado ao sistema (PETRI *et. al.*, 2015), a fim de se realizar determinados testes com

controle da temperatura. Para isso, determina-se um valor de set point, e o equipamento mantém essa temperatura ligando e desligando automaticamente os magnétrons do micro-ondas.

## 2.4 Procedimento experimental

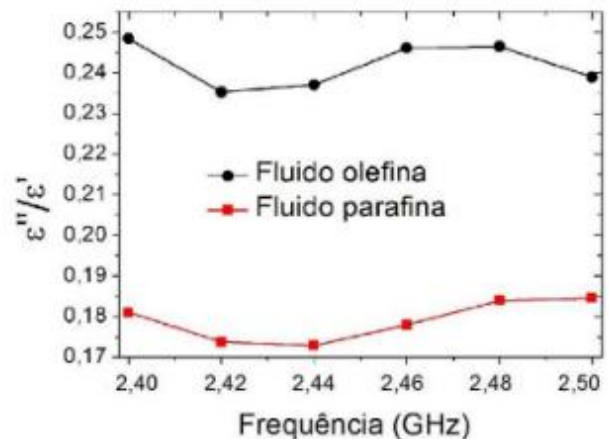
Foi aquecido 400g de cada material de forma separada durante um certo tempo, para obter a curva de temperatura e tempo para cada material. O tempo de aquecimento foi diferente para as amostras, devido as peculiaridades de cada fluido.

Foi realizada também a secagem de cascalho misturados com os dois fluidos de perfuração em diferentes tempos, aplicando o controle de temperatura. O objetivo principal desses ensaios foi verificar a remoção de água e fase orgânica, individualmente ao longo do tempo, em diferentes temperaturas de controle. Para isso, realizou-se a secagem de 400g de cascalho misturado com 20% de fluido de perfuração (20% peso), em diferentes tempos (1 a 8 min) com controle de temperatura em 150, 200 e 250°C.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Propriedades dielétricas

Já sabemos que  $\tan\delta > 0,1$  indica que o material possui uma grande facilidade de sofrer aquecimento por micro-ondas. A Figura 4 apresenta a tangente de perdas ( $\tan\delta$ ) para os fluidos de perfuração e bases orgânicas puras.



(a)



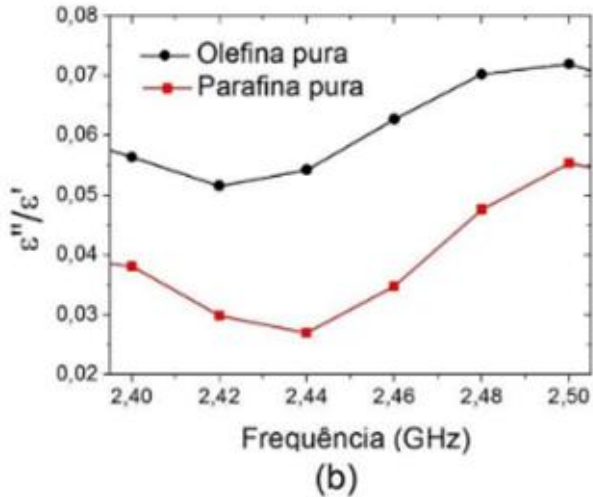


Figura 4: Perfil de perdas com a frequência (temperatura ambiente). (a) fluidos de perfuração (b) bases orgânicas puras

Observando os gráficos presentes na figura 4, podemos notar que os fluidos de perfuração apresentam valores das propriedades dielétricas próximos, o que indica um processo de remoção similar das duas bases orgânicas. As bases orgânicas puras apresentam um comportamento similar, apenas a olefina com valores de  $\tan\delta$  um pouco superiores a parafina. Isso pode ser explicado pela maneira, levemente, diferente que a olefina se comporta diante das micro-ondas. A parafina é um pouco mais transparente que a olefina. Podemos comprovar esse fato de acordo com os valores apresentados na Tabela 1.

	fluido olefina	fluido parafina	Olefina pura	Parafina pura
$\epsilon'$	8,191	8,037	2,577	2,536
$\epsilon''$	1,979	1,409	0,151	0,078
$\epsilon''/\epsilon'$	0,241	0,175	0,058	0,031

Tabela 1: Propriedades dielétricas dos fluidos de perfuração e das bases orgânicas puras para frequência de 2,45GHz

Conseguimos observar, com os dados disposto na Tabela 1, que o valor da constante dielétrica ( $\epsilon'$ ) é maior para a olefina. A incidência do campo elétrico sobre o material, é determinada pela constante dielétrica. O mesmo fato é observado pelas bases orgânicas. O valor do fator de perda dielétrica ( $\epsilon''$ )

também é maior para ambos os casos, fluido olefina e base orgânica pura olefina.

Na Figura 5 foi analisado o comportamento da tangente de perdas referente as nossas amostras, comparando o valor da  $\tan\delta$  das bases orgânicas puras e devidamente recuperadas após o teste de aquecimento

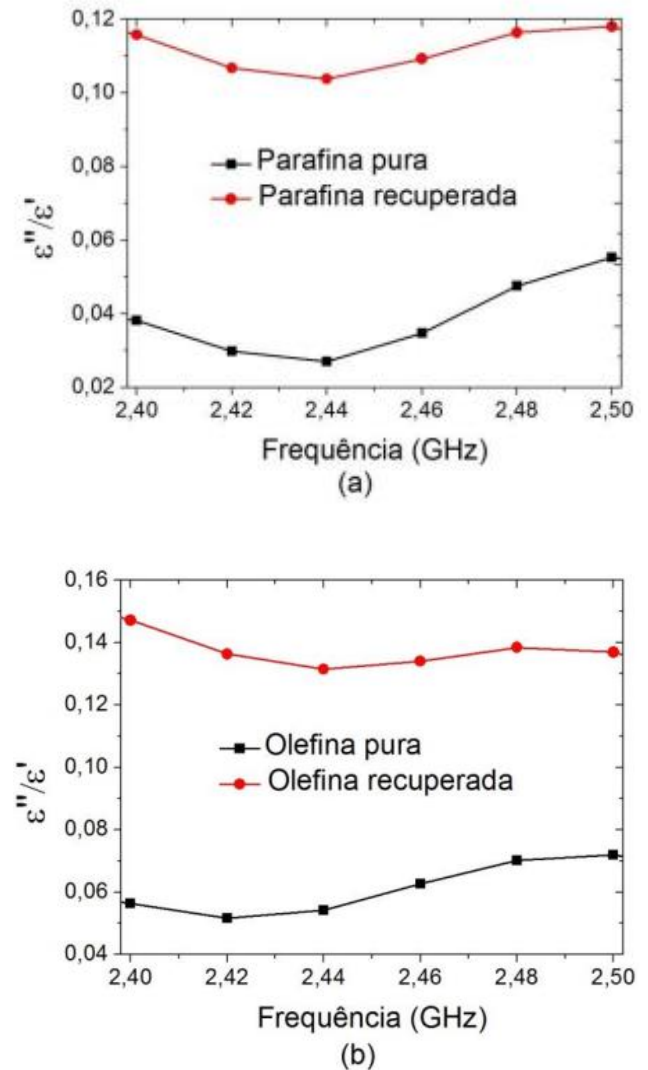


Figura 5: Perfil da tangente de perdas com frequência, (a) parafina pura e recuperada (b) olefina pura e recuperada

Percebeu-se razoável diferença nos valores de tangente de perdas para ambos os pares de compostos puros e recuperados (Figura 5a e b). Os valores observados apontam que tanto a parafina quanto a olefina recuperada alcançaram valores superiores quando comparados com suas respectivas bases orgânicas puras. Deste modo, o aquecimento por micro-ondas causa alguma mudança em

algumas propriedades destes compostos, ainda que a estrutura molecular e suas respectivas cadeias carbônicas não sejam bruscamente alteradas, como já mencionado em trabalhos anteriores (SANTOS, 2014, PETRI, 2014 e ROSSI et. al, 2016).

Para comparação e entendimento de suas respectivas cadeias carbônicas foi realizada uma análise em um cromatógrafo gasoso, acoplado em um espectrômetro de massas, para os compostos de parafina e olefina pura e recuperadas. Os resultados são apresentados em porcentagem de áreas de picos, que é proporcional a fração mássica de cada componente. A parafina recuperada após testes de aquecimento e secagem, via micro-ondas, apresentou a mesma cadeia de alcanos lineares, com faixa de carbonos variando entre C12 e C16 e temperaturas de ebulição na faixa de 173 a 289°C. A diferença principal entre a base pura e a recuperada está na redistribuição da cadeia carbônica com os principais alcanos (C14 e C15) alterando suas concentrações mássicas, mas mantendo a estrutura da cadeia carbônica sem modificações significativas.

A Figura 6 mostra as curvas de aquecimento de vários compostos referentes aos fluidos de perfuração, bases orgânicas puras e ao cascalho puro. A curva de aquecimento da água apresenta comportamento clássico, com patamar de evaporação em 100°C.

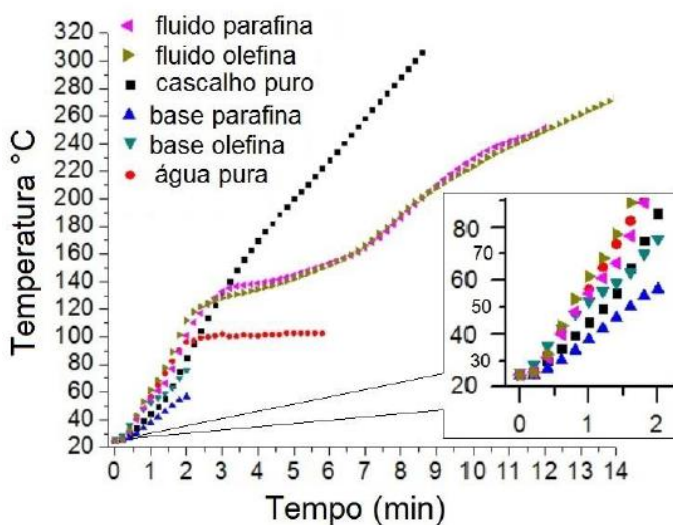


Figura 6: Curva de aquecimento para fluidos de perfuração, cascalho puro e bases orgânicas puras.

Nota-se que os dois fluidos de perfuração, apesar de possuírem bases orgânicas diferentes, mostraram uma cinética de aquecimento bastante semelhante, isso ocorre, provavelmente, pela proximidade de suas propriedades dielétricas (Tabela 1). Nas curvas de aquecimento de ambos os fluidos de perfuração, observa-se uma inclinação aproximadamente constante entre 0 e 2 minutos, em que neste intervalo ocorre aquecimento de todo o material (água, fase orgânica e aditivos). Entre, aproximadamente, 2 a 7 minutos ocorre a evaporação de grande parte da água com possível arraste de base orgânica. A partir de 7 minutos, ocorre aquecimento dos aditivos presentes nos fluidos de perfuração e estes, por sua vez, transferem por condução, energia às bases orgânicas iniciando o processo de evaporação delas. Devido a pequena diferença nas propriedades dielétricas dos compostos orgânicos, o teste para o fluido parafina atingiram cerca de 12 minutos e para fluido olefina 14 minutos.

Para a análise dos fluidos de perfuração, constatou que o fluido base olefina possui maior permissividade complexa, ou seja, maior constante dielétrica e maior fator de perda dielétrica. Deste modo, esse fluido teria maior habilidade de converter energia através da formação do campo elétrico em calor

Como esperado as bases orgânicas puras não sofreram aquecimento considerável, pois possuem  $\tan \delta$  0,1, ou seja, são transparentes frente a ação das micro-ondas. Deste modo, a maioria das ondas incidentes no material são refletidas novamente para o emissor de ondas eletromagnéticas. Entretanto, existe a suspeita que esse aquecimento sofrido pelas bases orgânicas puras, é devido a troca térmica, ocorrida por condução, através do termopar instalado para medir a temperatura do leito.

Na comparação entre bases orgânica puras e bases orgânicas recuperadas, de um processo de aquecimento via micro-ondas, as bases recuperadas possuem maiores valores de constante e fator de perda dielétrica. Isso ocorre devido a uma modificação na estrutura da cadeia carbônica da parafina e da olefina que foi constatada através de cromatografia gasosa.

A Figura 7 ilustra a cinética de secagem, por micro-ondas, da água presente no cascalho misturado com fluidos parafina e olefina (Figura 7a), e também da fase orgânica presentes nestas mesmas misturas (Figura 7b). Estes resultados experimentais são provenientes da mistura do cascalho com os fluidos em diferentes temperaturas.

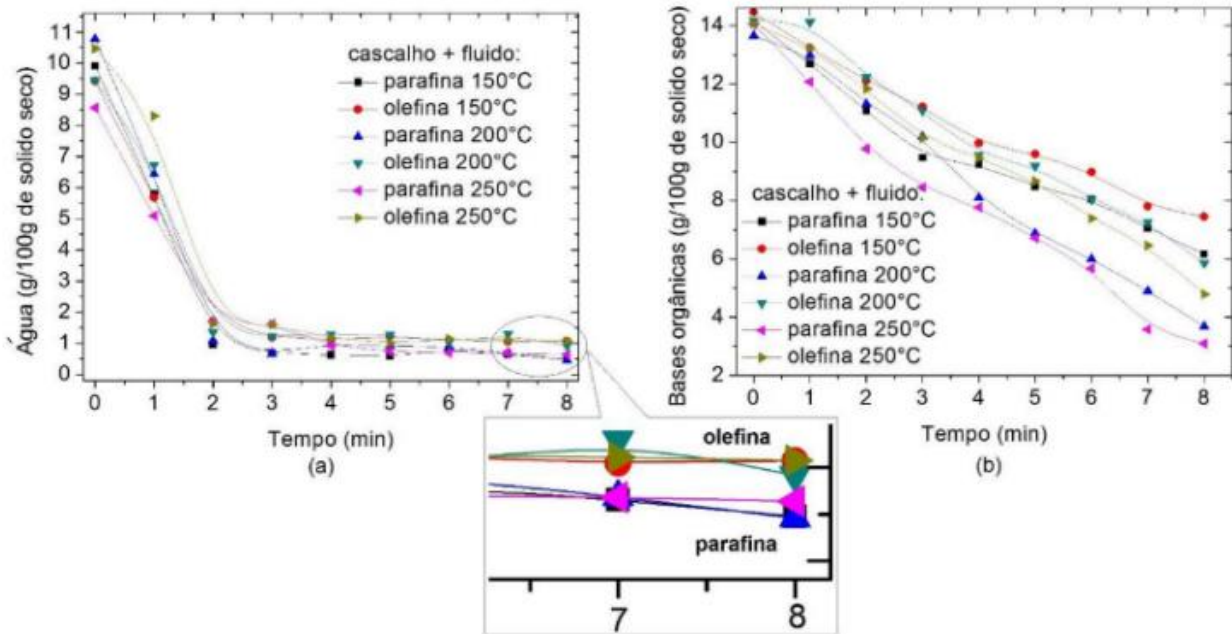


Figura 7: Cinética de secagem da água presente no cascalho com fluidos (a), e secagem da fase orgânica presentes no cascalho com fluidos (b).

No caso da evaporação da água presente nos cascalhos misturados com fluidos de perfuração (Figura 7a), embora o comportamento seja muito semelhante para ambos os fluidos, observa-se que a remoção da água quando o cascalho está misturado com fluido olefina é menor em relação ao cascalho misturado com fluido parafina. Isto ocorre devido as propriedades físico-químicas das bases orgânicas onde a olefina possui maior peso molecular e maior temperatura de ebulição. Já para uma mesma base orgânica (olefina ou parafina) a temperatura de controle não influencia na taxa de remoção. Esse comportamento ocorre, devido ao fato que todas as temperaturas de controle avaliadas, são superiores a temperatura de ebulição da água.

Para a secagem dos componentes orgânicos (Figura 7b) a curva da cinética de remoção, dessas bases orgânicas presentes nos fluidos são semelhantes, diferindo apenas na

taxa da remoção. Tanto o teor de parafina quanto o de olefina, decrescem a uma taxa aproximadamente constante, na secagem de cascalho e fluido. Ao contrário da cinética de remoção da água, a temperatura de controle neste caso, embora não influencie o comportamento, altera a taxa de remoção da fase orgânica. Para uma mesma base orgânica

(parafina ou olefina), a remoção com controle de temperatura a 250°C é mais efetiva que a 150°C, por exemplo.

Comparando agora a remoção das duas bases à mesma temperatura, nota-se que a parafina é removida de forma um pouco mais intensa que a olefina. A taxa secagem de cascalho de perfuração misturado com fluido parafina e temperatura de controle de 150°C tem praticamente o mesmo desempenho, em termos de remoção de fase orgânica, que a secagem de cascalho misturado com fluido olefina e temperatura de controle de 200°C. Essa diferença entre as duas bases orgânicas fica evidente na análise de suas respectivas cadeias carbônicas. Enquanto a parafina é composta por hidrocarbonetos com cadeias de 10 a 13 carbonos, a olefina, por sua vez, possui cadeias de 15 a 18 carbonos além da insaturação presente em suas cadeias. Tais características

alteram as propriedades físico-químicas, dentre elas a faixa de ebulição de cada base orgânica.

Fato interessante na Figura 7b aponta que o arraste das bases orgânicas pela água não foi muito relevante nesse caso. Desta maneira, o mecanismo dominante é o próprio aquecimento da matriz de cascalho e esse cascalho, por condução térmica, transfere energia suficiente para a ebulição das bases orgânicas parafina e olefina.

#### 4. CONCLUSÃO

As propriedades dielétricas têm papel importante no desenvolvimento e aprimoramento dessa nova tecnologia, que aplica micro-ondas para o tratamento e descontaminação de cascalho de perfuração de poços de petróleo e gás. Assim, as propriedades dielétricas permitem compreender e otimizar a interação do campo eletromagnético com o meio que está sendo aquecido. A análise dos resultados permitiu identificar os aspectos que governam a dependência das propriedades dielétricas.

Para o estudo da influência da concentração de fluidos de perfuração misturados ao cascalho, para avaliação das propriedades dielétricas, de acordo com o aumento da concentração, a constante dielétrica e o fator de perdas dielétricas aumentaram, isto é, houve um aumento gradual da tangente de perdas com o aumento da concentração de contaminante. Deste modo, quanto maior a concentração de contaminante, maior seria a habilidade de transformar energia absorvida em calor.

#### 5. NOMENCLATURA

$\lambda_0$  = comprimento de onda no vácuo (m)

$c$  = velocidade da luz no vácuo ( $3 \times 10^8$  m/s)

$f$  = frequência de oscilação de campo (Hz)

#### 6. REFERÊNCIAS

DARLEY, H. C. H. e GRAY, G. R., Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, 5. ed., Editora Butterworth-Heinemann, 1988.

FRANCO, A. P.; YAMAMOTO, L. Y.; TADINI, C. C.; GUT, J. A. W. Dielectric properties of green coconut water relevant to microwave processing: Effect of temperature and field frequency. *Journal of Food Engineering* 155, 69–78, 2015.

HACKE, K. E. Microwave energy for mineral treatment processes - a brief review, *International Journal Mineral Processes*, v. 57, p. 1-24, 1999.

NELSON, S. O.; Fundamentals of dielectric properties measurements and agricultural applications. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, v. 44, n.2, p. 98-113, 2010.

NELSON, S. O.; TRABELSI, S. Factors influencing the dielectric properties of agricultural and food products. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, v. 46, n. 2, p. 93-107, 2012.

PANISSET, C. M. A., Novas alternativas para o sistema de separação sólido-líquido na perfuração de poços de petróleo: teste de uma unidade de VCS; busca do aumento de eficiência da operação de hidrociclonagem; e tratamento da borra de centrifugação por microondas. Tese de Doutorado. Uberlândia/MG, UFU, 2014.

PEREIRA, M. S. Caracterização de Cascalho e Lama de Perfuração ao Longo do Processo de Controle de Sólidos em Sondas de Petróleo e Gás. Dissertação de Mestrado. Uberlândia/MG, UFU, 2010.

PEREIRA, M. S., Aplicação de Secagem por Micro-ondas no tratamento de cascalho de perfuração. Tese de Doutorado. Uberlândia/MG, UFU, 2013.

PETRI, I. Secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalho de perfuração. Dissertação de Mestrado. Uberlândia/MG, UFU, 2014.

PETRI, I.; PEREIRA, M. S.; SANTOS, J. M.; DUARTE, C. R.; ATAIDE, C. H.; PANISSET, C. M. A. Microwave remediation of oil well



drill cuttings. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 134 p. 23-29, 2015.

ROSSI, A. S.; PEREIRA, S. P.; ATAIDE, C. H. *Fundamentals of Microwave Heating and Drying of Drilled Cuttings. Drying Technology*. 2016.

SANTOS, J. M., *Remediação de sólidos de perfuração via aquecimento por micro-ondas. Dissertação de Mestrado. Uberlândia/MG, UFU, 2014.*

VENKATESH, M.; RAGHAVAN, G. An overview of dielectric properties measuring techniques. *Canadian Biosystem Engineering*, v. 47, p. 7.15-7.30, 2005.