

# **INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NA SECAGEM VIA MICRO-ONDAS EM SECADOR BATELADA ESCALA DE BANCADA**

I. J. PETRI, N. CARNEIRO, J. M. SANTOS, C. R. DUARTE e C. H. ATAIDE

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

e-mail: [chataide@ufu.br](mailto:chataide@ufu.br)

**RESUMO** – Com intuito de atender a legislação ambiental, há uma crescente necessidade de otimizar o processo de separação entre o cascalho e o fluido de perfuração, que são gerados durante o processo de perfuração de poços de petróleo. Os equipamentos utilizados atualmente para esse fim apresentam sérias dificuldades em atender às normas ambientais. A proposta desse trabalho é avaliar a eficiência de remoção de fluido de perfuração via micro-ondas, que promove um aquecimento seletivo dos materiais e aumenta a recuperação de componentes do fluido. Para tal, foi construída uma unidade de secagem por micro-ondas em batelada para testar algumas condições operacionais. As variáveis analisadas foram: temperatura de controle, vazão de alimentação de inerte, teor inicial de fluido e o tipo de rocha. Os resultados mostraram que a secagem atinge altas eficiências (90%), podendo chegar a teores muito baixos de contaminante (abaixo 1% n-parafina residual) e que há influência da temperatura, teor inicial de fluido e tipo de rocha, não havendo influência da vazão de inerte.

## **1. INTRODUÇÃO**

O fluido de perfuração pode ser dividido em três categorias: aquoso, não-aquoso e areados. Atualmente, o fluido de perfuração mais utilizado pela Petrobras é o de base não-aquosa. As bases não-aquosas mais utilizadas neste tipo de fluido de perfuração podem ser as olefinas internas, alfa olefinas, n-parafina, iso-parafinas, éster e acetais. Essas bases são todas prejudiciais ao meio ambiente sendo os responsáveis pela contaminação de cascalhos retirados da perfuração de poços (Asme, 2005). A Petrobras utiliza uma emulsão de n-parafina e água em seu fluido de perfuração e a legislação ambiental vigente no Brasil diz que o teor de n-parafina presente no descarte de resíduos sólidos em alto mar deve ser inferior a 6,9%, em massa.

O fluido de perfuração é bombeado para dentro da coluna de perfuração arrastando consigo cascalhos gerados pelo processo. O cascalho retirado é então levado para um processo de separação visando a reutilização do fluido e a descontaminação do cascalho para descarte. O processo de separação é chamado de sistema de controle de sólidos e é uma etapa muito importante, pois além de recuperar o fluido de perfuração, ele diminui os teores de contaminantes à abaixo dos níveis exigidos pela legislação ambiental (Pereira, 2013).

O sistema de controle de sólidos é composto por vários equipamentos de separação, com

destaque para o “secador” de cascalho, que corresponde ao último estágio de separação e garante um cascalho com nível de contaminação abaixo do exigido por lei. Esse equipamento é na verdade uma centrífuga vertical por onde entra o cascalho contaminado com fluido e saem duas correntes, uma correspondente ao cascalho a teores próximos de 6,9% de fluido e a outra que corresponde ao fluido puro. A operação de secagem de cascalho vem alcançando importância considerável na atualidade, devido às crescentes exigências ambientais, ganhando atenção destacada por parte das indústrias petrolíferas (Asme, 2005). O secador convencional de cascalho, atualmente, atende a essa legislação, no entanto, há riscos operacionais ligados às flutuações de eficiência nesse equipamento e também o teor de fluido de perfuração residual aderido ao cascalho está muito próximo do limite ambiental (Santos, 2014).

Considerando a necessidade de otimização do processo de secagem de cascalho, tem sido desenvolvida uma tecnologia de secagem industrial por micro-ondas, que vem se mostrando uma boa alternativa para adequação dos teores de contaminantes (n-parafina) abaixo dos níveis permitidos pela lei (Shang *et al*, 2006). Esse processo já é utilizado de forma eficaz nas indústrias de secagem de madeira, alimentícia e atualmente têm sido utilizado empregado em descontaminação de emulsões de fluido de perfuração de base não-aquosa (Pereira, 2013; Santos, 2014; Robinson *et al*, 2014; Petri, 2014). A secagem via micro-ondas apresenta como principal vantagem o aquecimento seletivo dos materiais que compõe a mistura, já que cada componente apresenta uma capacidade de absorver e transformar as micro-ondas em calor (Meredith, 1998).

Nesse contexto, no presente estudo foi empregado um aparelho micro-ondas comercial devidamente adaptado para operar como secador e aplicado à secagem do cascalho de perfuração. Foram realizados ensaios experimentais para avaliar o efeito das condições operacionais na remoção da n-parafina no cascalho oriundo da perfuração de poços de petróleo. As variáveis estudadas foram: a temperatura, vazão de inerte, tipo de rocha utilizada e teor inicial de fluido no cascalho.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A unidade de secagem foi construída a partir de um micro-ondas comercial da marca SHARP® modelo R-23GT com 1600 W de potência de saída, frequência de 2450 MHz e dimensões internas de 330x330x181 mm. A Figura 1 mostra o aparato experimental com todas as adaptações feitas. Sendo: 1 – manômetro; 2 – anemômetro; 3 – sistema de alimentação de gás inerte (N<sub>2</sub>); 4 – termopar para aferição de temperaturas do vapor; 5 - termopar para aferição de temperaturas do leito; 6 – disco espalhador de micro-ondas; 7 – bandeja de borossilicato.

Nos estudos foram utilizados vários tipos de rochas para verificar a influência do cascalho na secagem, a saber: basalto, granodiorita, ardósia e mármore, nomeadas como rocha ígnea extrusiva, rocha ígnea intrusiva, metamórfica I e metamórfica II, respectivamente. Para garantir uma maior contaminação de n-parafina no cascalho foi utilizado o fluido de perfuração BR-MUL base parafina doado pela PETROBRAS, que também doou o cascalho de perfuração empregado nos estudos de influência das variáveis operacionais na eficiência de remoção de contaminante.

Em cada teste foram empregados 1500 g de cascalho contaminado com fluido de perfuração.

Esse material era acondicionado em um recipiente de borosilicato e posteriormente alimentado ao forno. O material era posicionada no centro do microondas, o termopar era introduzido no seio do leito, ligava-se a injeção de inerte ( $N_2$ ), ajustava-se o tempo de secagem e deixava o material aquecer até a temperatura de controle, permanecendo nela até o fim da secagem. Após o fim do ensaio o material da bandeja era homogeneizado e então se realizava o teste de retorta, que revelava o teor de n-parafina e água residual.

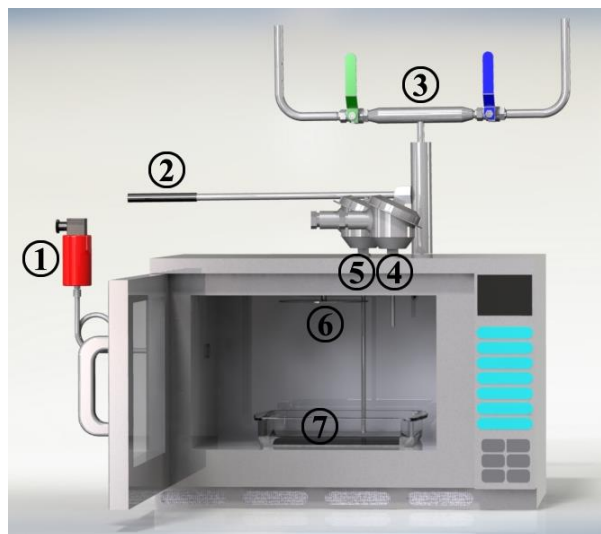


Figura 1 - Unidade experimental de secagem via micro-ondas

Para os ensaios da influência da temperatura de controle, foi feito um cromatograma da n-parafina recolhida do fluido de perfuração. Para isso, foi utilizado um equipamento de cromatografia gasosa da marca SHIMADZU modelo GCMS-QP2010. Após constatado os componentes da n-parafina e seus respectivos pontos de ebulição, escolheu 4 temperaturas de controle diferentes para realizar os testes a um tempo de secagem de 12 minutos.

Os ensaios da influência da vazão de inerte foram realizados em quatro vazões de  $N_2$  diferentes: 35, 103, 172 e 241 L/min. A temperatura de controle foi 290°C e o tempo de secagem foi de 13 minutos.

Para os ensaios da influência do cascalho na secagem foram utilizados as rochas: ígnea extrusiva, ígnea intrusiva, metamórfica I e II. Contaminou estas rochas com 19,37% de fluido de perfuração (10 % de n-parafina) e submeteu à secagem utilizando uma temperatura de controle de 260°C e tempo total de secagem de 18 minutos.

Nos ensaios de influência dos teores iniciais de fluido na secagem foram escolhidos teores iniciais de fluido de 9,9%, 13,7%, 20,3%, 24,4% e 27,5%, ou seja, teores iniciais de n-parafina de 5%, 7,9%, 10,5%, 12,6% e 14,3%, respectivamente. A temperatura de controle utilizada foi 290°C e o tempo de secagem foi o tempo em que o material atingia 290°C + 100 segundos.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Influência da temperatura de controle

Para estimar a faixa de ebulição da n-parafina, foi feito um cromatograma da n-parafina recolhida no fluido de perfuração e os resultados de porcentagem de área dos picos da cromatografia são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados de porcentagem de área de picos da cromatografia gasosa para n-parafina

	n-parafina	T <sub>ebulição</sub> (°C) (à 760 mmHg)
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	6,17	214,5
C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	15,77	234,0
C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	57,28	251,0
C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	18,48	271,0
C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	2,31	287,0

Pelos resultados da Tabela 1, verifica-se que a n-parafina é formada inteiramente de alcanos saturados de cadeia linear com faixa de carbonos entre C<sub>12</sub>-C<sub>16</sub>. Observando a temperatura de ebulição destes hidrocarbonetos, pode-se concluir que a faixa de ebulição da n-parafina do fluido de perfuração se situa entre 214-287°C. Através dos ensaios de cromatografia, realizou-se os testes da influência da temperatura de controle do leito para as seguintes temperaturas: 125°C, 175°C, 225°C e 290°C. Os resultados são mostrados na Figura 2. Os teores mássicos iniciais de n-parafina e água para estes ensaios são 10,52% e 9,82%, respectivamente, ou seja, teor inicial de 20,34% de fluido.

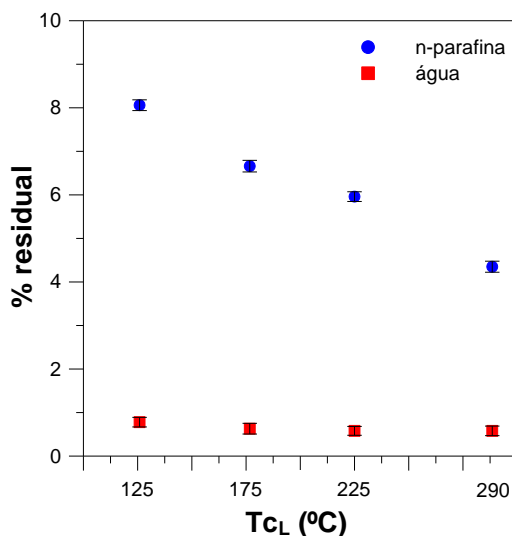


Figura 2 - Teor residual em função da temperatura

De acordo com a Figura 2, observa-se que utilizando uma temperatura de controle muito abaixo da temperatura de ebulição da n-parafina (125°C e 175°C) não se tem uma boa remoção da n-parafina,

pois não se atinge ainda a temperatura de ebulição da mesma, a remoção é realizada pelo arraste feito pela evaporação da água. Já com uma temperatura de controle dentro da faixa de destilação da n-parafina (225°C) se tem uma diminuição do teor de n-parafina residual graças a evaporação da n-parafina, mas é somente quando se utiliza uma temperatura de controle que abrange toda a faixa de destilação da n-parafina (290°C) é que se tem uma boa remoção de n-parafina. Como todos os ensaios foram realizados em um mesmo tempo e massa, pôde-se constatar que quanto maior a temperatura, menor o teor de n-parafina residual. Porém, para evitar trabalhar com temperaturas muito altas, o essencial seria utilizar como temperatura de controle, a máxima temperatura de ebulição do componente orgânico, já que isso garante que todos os hidrocarbonetos sejam evaporados.

### 3.2. Influência da vazão de inerte

Os ensaios de influência da vazão de inerte foram realizados com uma alimentação 19,39% de fluido (teor de n-parafina e água de 10,36% e 9,53%, respectivamente). A Figura 3 mostra os teores residuais presente no cascalho em função da vazão de inerte.

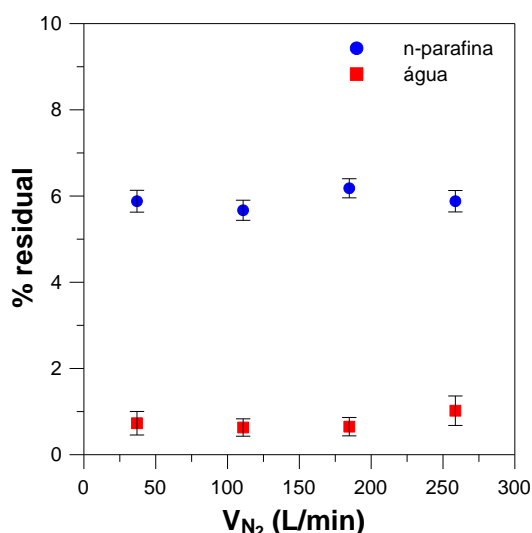


Figura 3 - Teor residual em função da vazão de inerte

De acordo com os resultados da Figura 3, observa-se que não há diferença significativa no resultados de n-parafina e água residuais, em nenhum valor de vazão de inerte utilizado. Esse comportamento se deve à ação do sistema de exaustão, que evita que o inerte não resfrie o material ou arraste os vapores de n-parafina. Vale ressaltar que Santos (2014), verificou que a secagem com adição de inerte é mais eficiente quando comparada à secagem isenta de inerte.. O autor constatou, também, que não há influência da vazão de inerte na secagem em uma faixa de 15-60 L/min.

### 3.3. Influência do cascalho contaminado

Os resultados de n-parafina residual dos ensaios de secagem utilizando os diferentes tipos de rochas são mostrados pela Figura 4. Os gráficos de temperatura dos vapores em função do tempo

referentes a estes testes são mostrados na Figura 5.

Na Figura 4, observa-se que a rocha metamórfica II obteve o menor teor residual de n-parafina (0,16%), seguido da rocha metamórfica I (0,40%) e pela rocha ígnea intrusiva (0,58%), por fim a rocha ígnea extrusiva (0,62%) obteve o maior teor de n-parafina residual. De acordo com Petri (2014, a rocha ígnea extrusiva pura apresenta um aquecimento rápido (315°C em 1 minuto), seguido da metamórfica I (100°C em 1 minuto), ígnea intrusiva (90°C em 1 minutos) e pela metamórfica II (40°C em 1 minutos). Com base nestas constatações, quanto mais lento o aquecimento da rocha, maior será a remoção de n-parafina no sistema. Isso pode ser justificado observando a Figura 5, que mostra a temperatura dos vapores em função do tempo de aquecimento. A rocha metamórfica II que aquece lentamente atinge temperatura de vapor bem mais alta que as demais rochas, que significa que mais n-parafina vai ser evaporada, já a rocha ígnea extrusiva que aquece rapidamente, atinge valores de temperatura de vapor muito inferiores, evaporando menos n-parafina.

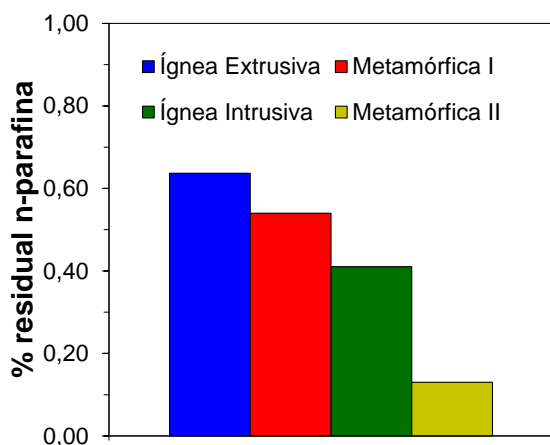


Figura 4 - Teor residual de n-parafina em função do tipo de rocha aquecida

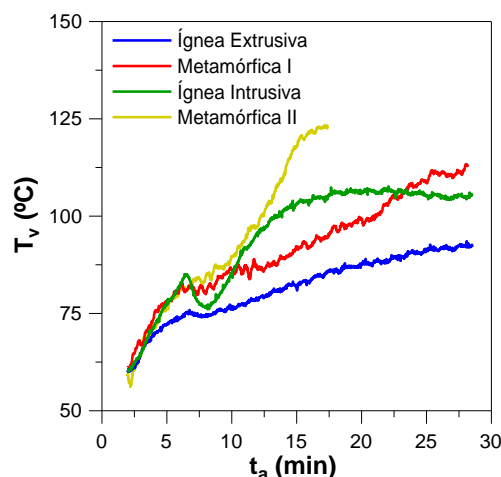


Figura 5 - Temperatura do vapor em função do tempo de aquecimento

### 3.4. Influência do teor inicial de fluido

Após os ensaios de secagem utilizando diferentes teores iniciais de fluido foram calculados a porcentagem de remoção de n-parafina para cada um dos ensaios, os resultados são mostrados na Figura 6. Foram obtidos também gráficos de temperatura em função do tempo de aquecimentos para os diferentes teores iniciais de fluido (Figura 7).

Na Figura 6 pode-se observar que quanto menor o teor inicial de fluido, maior a remoção de n-parafina. Observou-se também que para materiais fisicamente semelhantes a remoção de n-parafina é praticamente igual. Ou seja, cascalhos com fluido de perfuração com aspecto de pastas líquidas (teor n-parafina acima 11%) apresenta remoção cerca de 57% de n-parafina. Para cascalhos com aspecto de pastas viscosas (teor n-parafina entre 6% e 11%) tem remoção de aproximadamente 68%. E para cascalhos com aparência de pó úmido (menores que 6%) apresenta remoção de 84%.

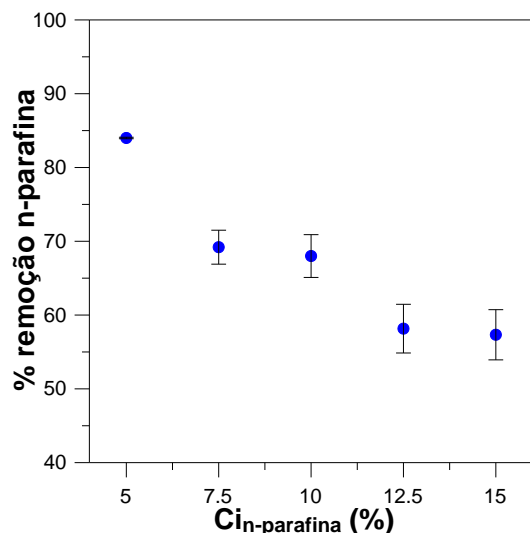


Figura 6 - Remoção de n-parafina em função da concentração inicial de fluido

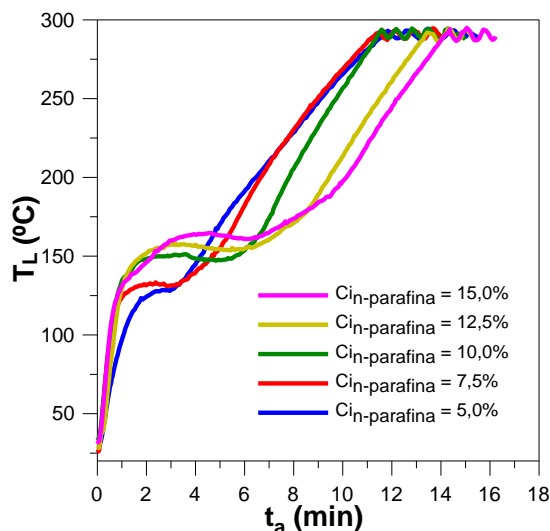


Figura 7 - Temperatura do leito em função do tempo de aquecimento a vários teores iniciais de n-parafina

Com o aumento do teor inicial de fluido há também um aumento do teor de água inicial, logo pela Figura 7 observa-se que à medida que aumenta o teor de água inicial, aumenta também o tempo na qual o material permanece na região de evaporação de água. Por exemplo, para um cascalho com teor inicial de 14,3% de n-parafina a região de evaporação de água está entre 1-7 minutos, já para um cascalho com teor de 5% de n-parafina a região de evaporação da água fica compreendida entre 2-4 minutos. Observa-se que para teores abaixo de 10,5% de n-parafina, o tempo de aquecimento até atingir 290°C é muito próximo, mas para teores maiores que 12,6% de n-parafina, esse tempo aumenta com o aumento do teor inicial de n-parafina.

## 4. CONCLUSÕES

Pode-se concluir com os teste de influência da temperatura que para uma boa operação de secagem do micro-ondas deve-se utilizar uma temperatura acima da temperatura de ebulição dos hidrocarbonetos da n-parafina, contaminante do fluido de perfuração

Para as condições estudadas, a vazão de inerte não teve influência na secagem microondas, pois o sistema de exaustão já trabalha de maneira eficiente.

Materiais com propriedades físicas semelhantes tendem a ter as mesmas eficiências de remoção. Porém, o cascalho contaminado pode se apresentar fisicamente, como um pó úmido, uma pasta viscosa ou pasta líquida. Essas diferenças nas propriedades físicas podem influenciar na penetração das micro-ondas modificando a eficiência de remoção do fluido.

Ao se utilizar vários tipos de rochas com cinética de aquecimento diferentes pôde constatar que rochas que aquecem mais lentamente após a secagem tendem a ter um teor residual menor do que as rochas que aquecem mais rapidamente.



## 5. NOMENCLATURA

$C_{i_{n\text{-parafina}}}$	teor inicial de n-parafina, [%];
$t_a$	tempo de aquecimento, [min];
$T_L$	temperatura do leito, [°C];
$V_{N_2}$	vazão volumétrica de gás nitrogênio, [L/min].

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME, S. S. C. *Drilling Fluids Processing Handbook*, Editora Elsevier, 2005.

SANTOS, J. M. *Remediação de sólidos de perfuração via aquecimento por microondas*, Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

ROBINSON, J. P., BINNER, E. R., SILVESTER, S. A., KINGMAN, S. W., LESTER, E. H. Investigation into the mechanisms by which microwave heating enhances separation of water-in-oil emulsions. *Fuel*, v. 116, p. 516-521, 2014.

MEREDITH R. *Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating*, London, Editora IET, 1998.

SHANG, H., SNAPE, C. E., KINGMAN, S. W., ROBINSON, J. P. Microwave treatment of oil-contaminated North Sea drill cuttings in a high power multimode cavity. *Sep. Purif. Technol.*, v. 49(1), p. 84-90, 2006.

PEREIRA, M. S. *Aplicação de Secagem por Microondas no tratamento de cascalho de perfuração*, Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

PETRI I. J. *Estudo da secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalhos de perfuração*, Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos no Projeto de Participação Coletiva em Eventos Técnicos-Científicos (PCE-00082-14) ao CNPq, CAPES e a PETROBRAS pelo apoio técnico-financeiro destinado à execução deste trabalho.