

ANÁLISE DO EFEITO DO TAMANHO DE PARTÍCULA NO PROCESSO DE DESCONTAMINAÇÃO DO CASCALHO DE PERFURAÇÃO VIA AQUECIMENTO POR MICROONDAS

J. M. SANTOS¹, I. J. PETRI¹, M. M. R. PENA¹, C. H. ATAÍDE¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química
E-mail para contato: chataide@ufu.br

RESUMO – Os fragmentos de rocha gerados durante a perfuração de poços de petróleo apresentam tamanhos distintos a depender da broca utilizada, do tipo de formação que está sendo perfurada e também do estágio da perfuração. Geralmente os cascalhos são gerados com diâmetros característicos relativamente grandes e vão sendo fragmentados até poucos micrômetros pela ação da broca à medida que a profundidade do poço aumenta. Este trabalho investigou o efeito do tamanho de partícula na eficiência de remoção da fase orgânica do fluido de perfuração aderida aos sólidos de perfuração ao submeter cascalho contaminado de três faixas distintas de tamanho ($< 425\mu\text{m}$, $425\text{--}710\mu\text{m}$ e $710\text{--}1180\mu\text{m}$) à secagem por microondas. Os ensaios mostraram que misturas formadas por maiores partículas de cascalho favoreceram a profundidade de penetração das microondas e desta forma, melhor foi a descontaminação observada. E que o processo foi capaz de adequar o cascalho às leis ambientais de descarte de resíduos de perfuração.

1. INTRODUÇÃO

Os fragmentos da rocha, gerados durante a perfuração, são comumente chamados de cascalho e são removidos continuamente através de um fluido ou lama de perfuração. Estes fragmentos de apresentam tamanhos distintos a depender, sobretudo, do tipo de broca utilizada e do tipo de formação que está sendo perfurada. No entanto, geralmente, os cascalhos são gerados com diâmetros característicos relativamente grandes e vão sendo fragmentados até poucos micrometros pela ação da broca de perfuração à medida que a profundidade do poço aumenta (SANTOS, 2014).

Em cenários de grande profundidade e complexidade é utilizado fluido de perfuração sintético de base não aquosa a fim de garantir o sucesso da perfuração, devido ao seu alto grau de lubricidade e capacidade de impedir a hidratação de argilas, além de poder ser utilizado em poços de alta temperatura e alta pressão, minimizando o dano à formação e ser resistente a contaminações. Porém há rigorosas restrições ambientais quanto ao descarte dos resíduos e efluentes das atividades de perfuração. A agência de proteção ambiental americana estipulou que o teor orgânico de fluido sintético aderido aos cascalhos descartados em plataformas *offshore* não pode ultrapassar 6,9% em massa e o descarte de cascalhos contaminados com fluido a base de óleo está proibido (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2010).

Com o objetivo de atender aos parâmetros ambientais regulamentares de descarte de resíduos,

foi introduzido ao final do sistema de controle de sólidos, o qual tem como objetivo a recuperação do fluido de perfuração, o “secador” de cascalho, que é na verdade uma centrífuga filtrante vertical (PETROBRAS, 2010). Porém riscos operacionais ligados a esse equipamento, e o fato do teor de fluido de perfuração residual alcançado estar muito próximo do limite ambiental, levam a busca por tecnologias alternativas. Com isso, observa-se um crescente interesse em reduzir o teor da fase orgânica do cascalho proveniente da perfuração de poços, empregando outros equipamentos (PEREIRA, 2013).

A secagem industrial por microondas vem sendo desenvolvida ao longo dos últimos anos e se mostra uma alternativa inovadora para a descontaminação de cascalhos de perfuração. Nesta técnica os hidrocarbonetos não são aquecidos diretamente por serem essencialmente transparentes em frequências de microondas, enquanto que a água presente nos poros e na superfície dos sólidos de perfuração é aquecida e convertida em vapor, este escapa fisicamente dos sólidos e arrasta os hidrocarbonetos. Dessa forma economias significativas de energia são alcançadas por não ser necessário aquecer todo o material (ROBINSON, 2010).

Portanto o objetivo geral deste trabalho é investigar a secagem por microondas como alternativa a descontaminação de cascalhos de perfuração e verificar como a distribuição do tamanho de partícula influencia na eficiência de remoção da fase não aquosa do cascalho contaminado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Unidade Experimental

A unidade experimental está ilustrada na Figura 1, e é composta por um sistema de aquisição de dados (1), conversor analógico-digital (2), sensor de temperatura do tipo PT100 (3), 6 fontes de microondas com capacidade individual de 1 kW operando a 2,45 GHz, (4), coletor de condensado (5), cavidade do forno de dimensões 100 x 60 x 35 cm (C x L x A) (6), sistema de exaustão (7), condensador (8), coletor de condensado (9) e banho termostatzado (10).

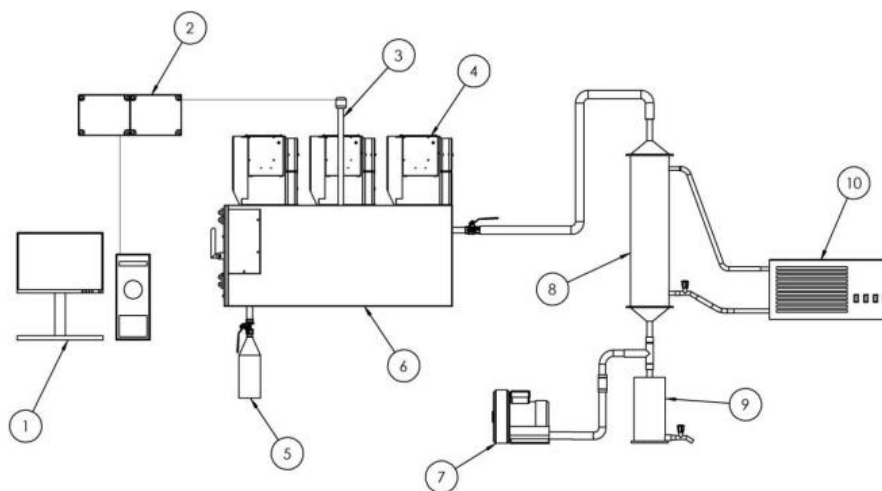


Figura 1 – Unidade Experimental

2.2. Caracterização dos materiais

Os materiais empregados no presente estudo consistem em cascalho seco e fluido de perfuração sintético a base de n-parafina provenientes da central de cascalho da Petrobras, situada no município de Carmópolis – SE.

O método de retorta foi aplicado para medir o teor de n-parafina e água no cascalho, antes e após a secagem. Para isso, foi utilizada retorta Fann de 50 mL. Esse procedimento consiste basicamente em aquecer certa quantidade de cascalho contaminado até que todo fluido seja evaporado. Os vapores são condensados em uma proveta e a concentração foi determinada segundo o procedimento recomendado pelo *American Petroleum Institute* (2005).

2.2.1. Cascalho de perfuração

A distribuição granulométrica dos sólidos foi determinada pela técnica de peneiramento (modelo *AS 200 control - Retsch®*) onde foram utilizados 1000 g de material seco e amplitude de 1,2 mm durante 30 minutos utilizando peneiras com aberturas de 38, 106, 212, 300, 425, 500, 710, 1000, 1180, 1400, 2360, 2800 μm .

A partir da distribuição obtida o cascalho seco foi separado em três faixas de tamanho de partícula ($< 425 \mu\text{m}$, $425 - 710 \mu\text{m}$ e $710 - 1180 \mu\text{m}$), as quais foram submetidas a um sistema de análise de imagens dinâmicas (*Camsizer - Retsch®*). Através destas análises foi possível determinar a distribuição de forma para cada amostra.

Foram realizadas três análises a fim de garantir a reprodutibilidade dos resultados. Quanto à forma, foram analisadas a razão de aspecto e a circularidade do material. A razão de aspecto (*RA*) possibilita a caracterização da forma anisotrópica da partícula, ou seja, o seu comprimento prolongado. Esse parâmetro é definido pela razão dos diâmetros x_{Cmim} (largura) e x_{Femax} (comprimento), já o fator de circularidade (*FC*) é um dos parâmetros mais utilizados para caracterizar a forma de partículas. Esse parâmetro é baseado na relação entre a área (*A*) da projeção bidimensional e a área do círculo que possui o mesmo perímetro (*P*) da partícula (ALLEN, 1997) e é calculado conforme a Equação 1.

$$FC = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (1)$$

2.2.2. Fluido de perfuração

O Fluido de perfuração utilizado nos ensaios é um fluido sintético denominado BRMUL. Este é uma emulsão de água em n-parafina contendo 42,7 % de n-parafina, 29,6 % de água e 27,7 % de aditivos e massa específica igual a 1,2 g/cm^3 . Os aditivos são adicionados ao fluido para garantir a estabilidade de propriedades como densidade e viscosidade.

A composição da n-parafina que constitui o fluido de perfuração utilizado neste trabalho foi obtida por cromatografia gasosa acoplada a um espectrômetro de massa (Figura 2) e apresenta hidrocarbonetos de cadeia lineares, contendo de 12 a 16 carbonos.

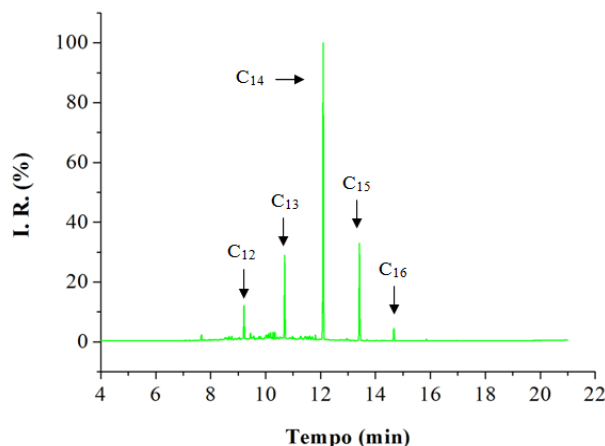


Figura 2 – Cromatograma da n-parafina presente no fluido BRMUL.

2.3. Efeito do tamanho de partícula

Para verificar se o tamanho de partícula influencia na limpeza do cascalho de perfuração, cada faixa de tamanho foi contaminada com fluido de perfuração de modo a obter alimentações contendo 20% de fluido, sendo 11% de n-parafina e 9% de água. Foram realizados 3 ensaios para cada faixa de tamanho mantendo-se constante as demais condições de operação: massa (3 kg), potência aplicada (2 kW) e energia específica (0,7 kWh/kg). Como variáveis resposta, foram obtidas: teor residual de n-parafina e água, e percentual de remoção de fluido e da fase orgânica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização dos materiais

A distribuição de tamanho acumulada do cascalho de perfuração, obtida por peneiramento, é apresentada na Figura 3. Nota-se que metade das partículas do cascalho tem diâmetro inferior a 500 μm e que 95% das partículas apresentaram diâmetro inferior a 1400 μm . Já a Figura 4 traz imagens do cascalho de perfuração e das três faixas de tamanho selecionadas para este estudo, obtidas pelo método de análise digital. Cada amostra apresenta duas imagens com ampliações diferentes, ambas fornecidas pelo equipamento.

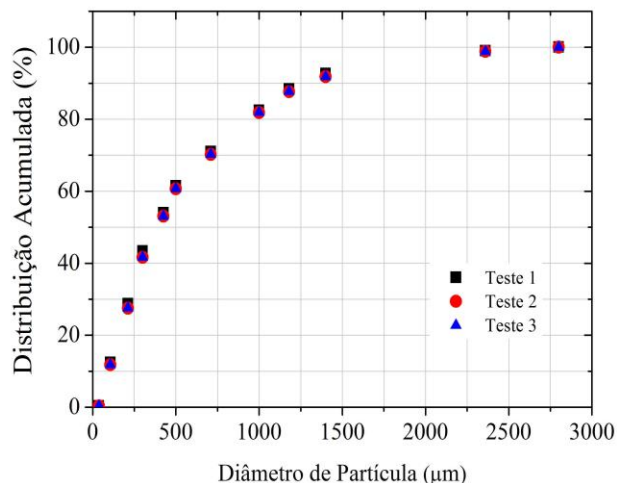


Figura 3 - Distribuição acumulada de tamanho do cascalho de perfuração

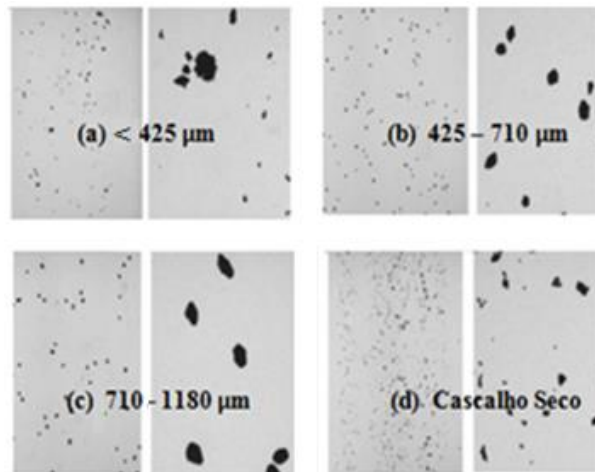


Figura 4 – Imagens do cascalho de perfuração.

É possível notar pela Figura 4(d) a vasta faixa de tamanho e o formato irregular das partículas do cascalho de perfuração. O mesmo não ocorre quando se examina as imagens das duas faixas de tamanho superiores (Figura 4(b) e 4(c)), observa-se então, uma distribuição mais uniforme do tamanho e da forma das partículas gerada pela ação do peneiramento. Já as imagens da faixa que compreende as partículas de cascalho de menores tamanhos (Figura 4(a)) mostraram a presença de grânulos, possivelmente gerados devido as fortes forças de coesão entre partículas finas.

Quanto à forma das partículas, foram avaliadas a razão de aspecto e a circularidade (Figura 5) dos grãos de cascalho nas três faixas de distribuição granulométrica estudadas neste trabalho.

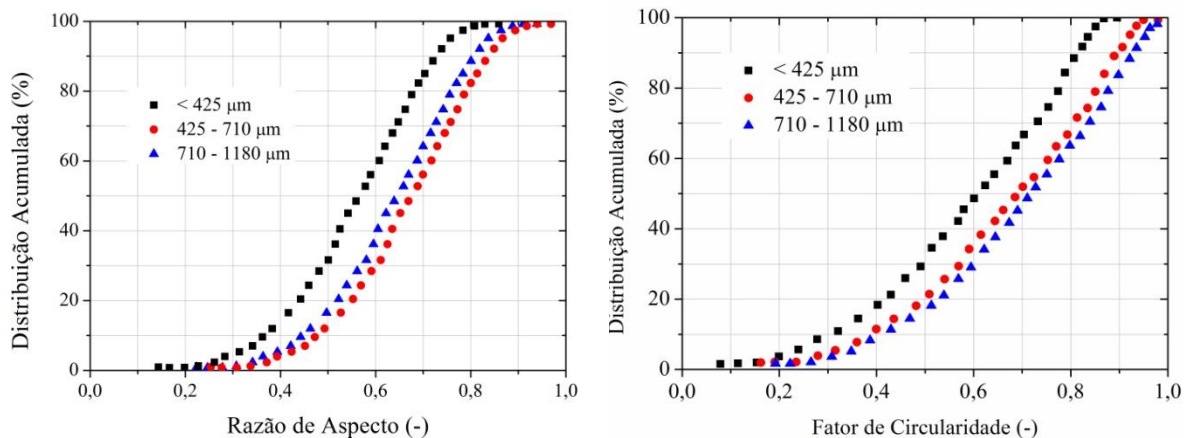


Figura 5 – Razão de Aspecto de Fator de Circularidade das amostras.

Para ambos os parâmetros, as faixas de distribuição de tamanho intermediária e superior apresentaram comportamento parecido, sendo que 50% das partículas tiveram razão de aspecto superior a 0,65 e praticamente todas as partículas apresentaram razão de aspecto inferior a 0,9, o que caracteriza o cascalho destas faixas como um conjunto de partículas não esféricas, porém pouco alongadas. Em relação ao fator de circularidade, observou-se que metade das partículas apresentou circularidade superior a 0,7 demonstrando que grande parte das partículas projeta uma área quase circular.

O fato da faixa que compreende as partículas mais finas ter apresentado comportamento diferente das demais não pode ser considerado significativo, e deve estar relacionado com a formação dos grânulos durante a análise (via seca).

3.2. Efeito do tamanho de partícula

Os resultados encontrados nos ensaios realizados para se verificar a influência do tamanho de partícula no processo de secagem do cascalho por microondas estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Remoção de fluido e da fase orgânica para diferentes faixas de tamanho de cascalho.

Tamanho de Partícula (µm)	Remoção de Fluido (%)	Remoção de n-parafina (%)	Teor residual de n-parafina (%)
< 425	62,10 ± 0,52	43,65 ± 1,79	6,02 ± 0,19
425 – 710	78,78 ± 0,71	73,53 ± 2,76	2,83 ± 0,30
710 – 1800	83,17 ± 1,30	83,04 ± 1,03	1,81 ± 0,11

Observando os valores apresentados na Tabela 1, nota-se que o tamanho de partícula influenciou significativamente no processo de descontaminação do cascalho de perfuração. Os valores dos percentuais de remoção de fluido, por exemplo, se situaram em torno de 62% quando foi utilizado cascalho com distribuição granulométrica inferior a 425 µm, 78% na faixa intermediária, de 425 - 710 µm, e 83% na faixa superior, que compreende as partículas de tamanho entre 710 - 1180 µm.

Tais dados mostraram que na secagem do cascalho de perfuração via microondas, misturas contendo partículas maiores de cascalho promoveram maior remoção de fluido que misturas constituídas por partículas mais finas.

Segundo Mujumdar (2007), a profundidade de penetração tem importância considerável no processo de aquecimento por microondas, uma vez que a energia fornecida deve penetrar através do material ou o aquecimento se dará apenas na superfície. A profundidade de penetração das microondas está ligada às propriedades dielétricas e também às propriedades físicas do material, como a densidade. Quanto mais denso for o material menor será a profundidade de penetração.

Misturas de cascalho e fluido de perfuração constituídas por menores partículas formam leito com menor porosidade que aquele formado a partir de grãos maiores de cascalho devido a intensas forças de coesão entre as partículas finas.

A redução do tamanho das partículas do cascalho ao reduzir a porosidade do leito, aumenta a densidade da mistura alimentada ao forno. Isto restringe a penetração das microondas apenas à superfície do material, promovendo menor remoção de fluido.

Porém, os cascalhos apresentam diâmetros característicos relativamente grandes e vão sendo fragmentados até poucos micrometros pela ação da broca à medida que a profundidade do poço aumenta. Portanto, nesta etapa em que os resíduos serão constituídos por menores partículas de cascalho, o ajuste de um maior tempo de residência, por exemplo, será necessário para atingir a mesma eficiência de descontaminação que aquela obtida a partir do cascalho gerado no início das atividades de perfuração.

A introdução de um mecanismo que promova a agitação do leito durante a secagem por microondas também se apresenta como alternativa para minimizar este efeito negativo na absorção da radiação. Esta movimentação deverá proporcionar ao material um aquecimento mais uniforme, melhorando assim a eficiência na descontaminação do cascalho de perfuração.

3.3. Qualidade da n-parafina recuperada

A fase orgânica do líquido recuperado nos ensaios de secagem foi analisada via cromatografia gasosa para avaliar a possibilidade de seu reaproveitamento na formulação de novos fluidos de perfuração. A Figura 6 traz o cromatograma obtido. Nota-se que o aquecimento por microondas não alterou de forma significativa a composição da fase orgânica presente no fluido de perfuração. Os picos encontrados na Figura 6 correspondem aos picos dos componentes da n-parafina presente no fluido BRMUL apresentados anteriormente na Figura 2.

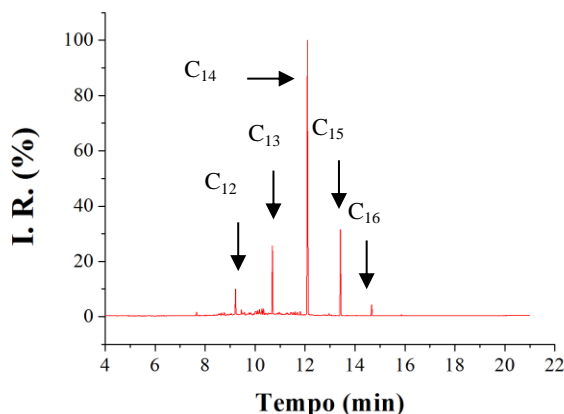


Figura 6 – Cromatograma da fase orgânica recuperada no processo.

4. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios de secagem e apresentados neste trabalho, nas condições estudadas, foi possível obter as seguintes conclusões:

- ✓ O cascalho submetido à secagem por microondas alcança teores de n-parafina residual que se enquadram na legislação ambiental e inferiores aos alcançados pela tecnologia atualmente utilizada.
- ✓ Misturas contendo partículas maiores de cascalho promovem maior remoção de fluido que misturas constituídas por partículas mais finas já que alteram a porosidade do leito, favorecendo assim, a penetração das microondas.
- ✓ A composição da n-parafina não é alterada pelo aquecimento por microondas, podendo assim, ser reutilizada na formulação de novos fluidos de perfuração.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice for Field Testing of Oil-based Drilling Fluids. Recommended Practice 13B-2. Washington, 2005.
- MUJUMDAR, A. S. *Handbook of Industrial Drying*. 3. ed. Estados Unidos: CRC PressTaylor & Francis Group, 2007.
- PEREIRA, M. S. *Aplicação de Secagem por Microondas no tratamento de cascalho de perfuração*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- PETROBRAS. Manual de Fluidos. 1. ed. Rio de Janeiro, 2011.
- ROBINSON, J. P., KINGMAN, S. W., SNAPE, C. E., BRADSHAW, S. M., BRADLEY, M. S. A., SHANG, H., BARRANCO, R. Scale-up and design of a continuous microwave treatment system for the processing of oil-contaminated drill cuttings. *Chemical Engineering Research and Design*, 88 (2), 146-154, 2010.
- SANTOS, J. M., *Descontaminação de sólidos de perfuração via aquecimento por micro-ondas*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Statistical Analyses Supporting Final Effluent Limitations Guidelines and Standards for Synthetic-Based Drilling Fluids and other Non-Aqueous Drilling Fluids in the Oil and Gas Extraction Point Source Category. 2010.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro da CAPES (bolsa de mestrado e doutorado), FAPEMIG (bolsa de Iniciação Científica), PETROBRAS e a 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).