



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**SECAGEM DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO VIA
MICRO-ONDAS COM AGITAÇÃO**

LEONARDO LIMA DE CARVALHO

Uberlândia – MG

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**SECAGEM DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO VIA
MICRO-ONDAS COM AGITAÇÃO**

LEONARDO LIMA DE CARVALHO

Monografia de graduação
apresentada à Universidade Federal de
Uberlândia como parte dos requisitos
necessários para a aprovação na disciplina
Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de
Graduação em Engenharia Química

Uberlândia – MG

2018

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA
DA DISCIPLINA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE
LEONARDO LIMA DE CARVALHO APRESENTADA À UNIVERSIDADE
FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 20/12/2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof^ª. Dra. Marina Seixas Pereira
Orientadora – FEQUI/UFU

Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
FEQUI/UFU

MSc. Ana Carolina Silva Mota
PPGEQ/UFU

*Dedico esse trabalho a Deus e à minha família,
em especial aos meus pais e ao meu irmão.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, esse Pai bondoso e amoroso, que me guia em todas as atividades e faz com que pessoas e circunstâncias surjam em minha vida, desenvolvendo-me em moralidade e conhecimento.

Aos meus pais, Lino Antônio e Ana Cláudia, e ao meu irmão, Lino, que são o meu alicerce, auxiliando-me e apoiando-me na caminhada. Todas as vitórias que eu possa alcançar tem por base o coração deles. Aos meus avós e tios, por todo carinho e boas vibrações.

A todos os professores, em especial, à Marina Seixas Pereira, que me orientou nesse trabalho, cultivando em mim não só valores do intelecto, mas virtudes morais. Seu exemplo de disciplina, paciência e fé no futuro auxiliaram-me em toda execução dos experimentos. Agradeço a doutoranda Ana Carolina Mota por todo auxílio nos ensaios e por tanto me ensinar durante esse ano de projeto. Ao professor Carlos Henrique Ataíde, por todos ensinamentos práticos e teóricos durante a graduação e pela disponibilidade de compor a banca avaliadora desse trabalho.

À Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU) por todas as oportunidades de aprendizados, experiências e disponibilidade da utilização da Unidade de Pesquisa Avançada para a realização dos experimentos desse trabalho.

À empresa PETROBRAS pelo fornecimento de todos os materiais, pelas informações e a oportunidade de contribuir academicamente para o processo.

Aos amigos de graduação, que representam uma segunda família, por toda paciência e cumplicidade nesses anos. Em especial, ao Victor, Fernanda, Marcelo, Guilherme e Gabriel.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET/EQ) e ao Diretório Acadêmico da Engenharia Química (DAEQ), onde grandes laços de amizade foram criados e muitas virtudes do intelecto foram desenvolvidas. Ao Grupo Espírita Universitário (GEU), por representar uma fonte de aprendizados morais e consoladoras no meu período de graduação. Por fim, aos irmãos em situação de rua, onde através do grupo Sopa Fraterna Francisco de Assis pude conhecê-los e, sem perceber, ser ajudado ao buscar ajudar.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	ii
RESUMO.....	iii
1 - INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 - Fluidos de perfuração	3
2.1.1 - Funções dos fluidos de perfuração	3
2.1.2 - Tipos de fluidos de perfuração	4
2.1.3 - Fluidos não aquosos.....	4
2.2 - Controle de sólidos	6
2.3 - Secagem via micro-ondas	7
2.3.1 - Fundamentos da secagem	7
2.3.2 - Secagem via micro-ondas	7
2.3.3 - Propriedades dielétricas	9
2.3.4 - Aplicações da secagem no controle de sólidos.....	10
3 - MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1 - Materiais	12
3.1.1 - Cascalho de perfuração	12
3.1.2 - Fluido de perfuração	13
3.1.3 - Micro-ondas: Unidade Experimental.....	14
3.2 - Metodologia de Secagem.....	17
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
5 - CONCLUSÃO	24
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Broca e o movimento do fluido de perfuração.	3
Figura 2.2 - Classificação dos fluidos de perfuração.	4
Figura 2.3 - Sistema de controle e tratamento de sólidos. Fonte: adaptado de DARLEY, CAENN E GRAY (2017).	6
Figura 2.4 - Caracterização de um magnétron.	8
Figura 3.1 - Fluido de perfuração utilizado nos ensaios experimentais. Fonte: adaptado de Mota (2018)	13
Figura 3.2 - Unidade experimental de secagem via micro-ondas. Fonte: adaptado de JÚNIOR (2014)	14
Figura 3.3 - Interface do software utilizado para leitura de pressões e temperatura Fonte: adaptado de JÚNIOR (2014).	15
Figura 3.4 - Forno com o sistema de agitação mecânica. Fonte: adaptado de JÚNIOR, 2014	16
Figura 3.5 - Perfil do agitador	16
Figura 3.6 - Geometria e dimensão do agitador utilizado	16
Figura 3.7 - Cascalho contaminado com fluido de perfuração a 12,5 % em massa de olefina (MOTA, 2018).	17
Figura 4.1 - Comparativo dos teores finais de olefina interna nos ensaios sem agitação e com agitação mecânica.	20
Figura 4.2 - Comparativo de ensaios com energia específica 0,5 kWh/kg sem agitação e com agitação mecânica.	20
Figura 4.3 - Gradação da dureza de plásticos.	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos e origens de fluidos de perfuração não aquosos. Fonte: adaptado de Júnior (2014)	5
Tabela 2.2 - Tangente de perda dielétrica ($\tan\delta$) de diferentes materiais a 25° C e 2,45 GHz (adaptada de GUÉNIN, 2016).	9
Tabela 3.1 - Composição química do cascalho utilizado (MOTA, 2018).	12
Tabela 3.2 - Teor mássico percentual do fluido de perfuração à base de olefina interna.....	13
Tabela 3.3 - Condições de operação e características dos ensaios	18
Tabela 4.1 - Teores finais de ensaios com ausência do sistema de agitação mecânica.....	19
Tabela 4.2 - Teores finais de ensaios com a presença do sistema de agitação mecânica com frequência angular de 10 rpm.	19
Tabela 4.3 - Características e propriedades mecânicas de materiais (Dados retirados dos sites: Incomplast, Ipen, Researchgate, JG e Embatech).	21

RESUMO

Em processos de perfurações de poços de petróleo, o transporte de fragmentos de rochas suscitado pelas brocas é realizado através de fluidos de perfuração. No Brasil, há um maior uso de bases sintéticas como fluidos de perfuração, devido ao seu baixo coeficiente de atrito e menor custo operacional. Entretanto, a alta toxicidade e baixa biodegradabilidade desses fluidos na natureza apresenta a necessidade de um processo de separação desses materiais, descontaminando o cascalho e permitindo o seu descarte no meio ambiente. Atualmente, o equipamento utilizado para separação é a centrífuga filtrante; entretanto, esse equipamento trabalha a uma margem de teor de contaminante muito próxima ao solicitado pela legislação ambiental, operando de maneira sobrecarregada. É nesse contexto que surge a possibilidade de estudo da técnica de secagem de cascalho contaminado via micro-ondas, visto que esse método apresenta alta eficiência de remoção, menores problemas operacionais, além de aquecimento seletivo de materiais e alto nível de segurança e automação. Vários estudos presentes na literatura foram concebidos verificando a influência da temperatura, da vazão de inerte, teor inicial de fluido, tipo de rocha e agitação mecânica na secagem via micro-ondas. Observou-se que a eficiência da secagem é função da energia específica utilizada no sistema e que a agitação mecânica demonstra, a priori, bons resultados. Visando analisar esse fenômeno, o presente trabalho teve por objetivo verificar a influência da agitação mecânica no leito utilizando energias específicas variadas e comparando com a literatura experimentos similares. Observou-se que o aumento da energia específica do sistema melhora a secagem do cascalho e que o equipamento de agitação mecânica interfere na eficiência, devido ao campo elétrico e à absorção de ondas eletromagnéticas pelos metais presentes no forno micro-ondas, concluindo que as suas partes mecânicas, a depender do tipo de material, podem diminuir a eficiência do processo. Como sugestão de trabalhos futuros, a elaboração de projetos de agitadores mecânicos com materiais de baixa tangente de perda, como polímeros, pode ofertar resultados promissores à secagem via micro-ondas.

Palavras-chave: secagem, micro-ondas, agitação, cascalho de perfuração.

1 INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo constitui um dos processos mais importantes para a economia nacional. Como atividade industrial, ela possui diversas etapas e, como todo processo, têm-se uma grande necessidade de reduzir custos, riscos operacionais e ambientais.

Para se perfurar um poço de petróleo utiliza-se o método de perfuração rotativo. Este método baseia-se em pressionar a broca sobre a rocha e realizar um movimento de rotação, ocasionando o esmerilhamento da rocha. (JÚNIOR, 2014). A remoção dos fragmentos de rocha é operada através de fluidos de perfuração.

Fluidos são componentes essenciais do processo de perfuração. O fluido de perfuração possui várias funções, sendo o transporte dos cascalhos para a superfície uma das mais importantes. Os cascalhos de perfuração, por sua vez, são fragmentos de material sólido produzidos à medida que a broca perfura a rocha. Como o fluido é bombeado no interior da coluna de perfuração, ao passar pela broca ele arrasta os sólidos, carreando-os até a superfície pelo espaço anular do poço (THOMAS, 2004).

O fluido possui, além da função de transporte do cascalho, a capacidade de selar formações permeáveis, esfriar, lubrificar e sustentar o conjunto de perfuração, transmitir energia hidráulica para o sistema e minimizar o dano do reservatório(ASME, 2005).

Os fluidos podem ser classificados de acordo com o tipo de fase contínua utilizada, podendo ser fluido base água, base não aquosa e fluidos aerados. Os fluidos base não aquosa são os mais utilizados no cenário brasileiro por apresentar diversas vantagens em relação aos outros tipos de fluido, como menores problemas operacionais e baixos coeficientes de atrito. São formados por bases orgânicas (sintéticas) como a n-parafina e outras bases como a olefina, poli-alfa-olefinas, ésteres, acetais, dentro outros (JÚNIOR, 2014). Entretanto, a desvantagem está no risco oferecido ao meio ambiente em caso de descartes fora do padrão estabelecido pelos órgãos reguladores, pois essas bases apresentam toxicidade e baixa biodegradabilidade.

Visando o atendimento de normas ambientais e a diminuição do custo global da etapa de perfuração, o fluido e o cascalho passam por um sistema de controle de sólidos ao chegarem na superfície. O sistema de controle de sólidos é composto por diversos equipamentos que promovem a separação do fluido e do cascalho. O fluido recuperado pode ser reutilizado, enquanto que o cascalho obtido ao final deste sistema ainda contém certa quantidade de fluido aderido à sua superfície (DARLEY, CAENN e GRAY, 2017).

O equipamento atualmente utilizado após o sistema de controle de sólidos se trata da centrífuga filtrante vertical, comumente chamada de secador de cascalho. Este equipamento é considerado fundamental na adequação dos resíduos aos padrões ambientais de descarte. No entanto, os teores orgânicos residuais alcançados por este equipamento estão muito próximos do limite ambiental (PEREIRA, 2013).

No Brasil, a partir de 2016, passaram a vigorar novas normas do IBAMA para o controle do descarte de fluidos de base não aquosa, que são similares às restrições aplicadas pela US EPA (IBAMA, 2015). A base comparativa da norma é a olefina e o descarte só é permitido para cascalhos com teores orgânicos menores que 6,9% em massa. Por esta razão, a Petrobras substituiu a parafina, base sintética anteriormente utilizada, pela olefina. A mudança foi necessária pois alguns estudos afirmam que a parafina apresentou piores resultados de biodegradabilidade anaeróbica do que a olefina interna (AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL, 2016) (DARLEY, CAENN e GRAY, 2017).

Uma tecnologia que vem sendo citada na literatura para descontaminação é a secagem por micro-ondas. Sabe-se que as micro-ondas são uma energia eletromagnética que promove o aquecimento através da vibração/rotação do momento dipolo das moléculas. Por ser um aquecimento seletivo e em nível molecular, este apresenta diversas vantagens em relação ao aquecimento convencional em áreas, como: sinterização de metais, secagem de alimentos, reações químicas endotérmicas, pirólise e tratamento de resíduos hospitalares (PANDA, SINGH, *et al.*, 2006)(GEDYE, SMITH e WESTAWAY., 1991)(SALEMA e ANI., 2012)(TATA e BEONE, 1995).

Variados estudos contidos na literatura foram levantados analisando a influência da temperatura, teor inicial de fluido, vazão de inerte dentro do sistema, tipo de rocha, reutilização de cascalho e agitação mecânica na secagem por meio de micro-ondas. O objetivo desse trabalho foi verificar a influência na secagem variando a energia específica do sistema, utilizando-se de um sistema para agitação mecânica do cascalho. Para isso, foram realizados testes sem a presença do equipamento de agitação, comparando esses dados com a literatura e investigando a sua viabilidade, compreendendo que as suas partes mecânicas, a depender do tipo de material, pode diminuir a eficiência do processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fluidos de perfuração

2.1.1 Funções dos fluidos de perfuração

A função primária do fluido de perfuração, historicamente, era atuar como meio de remoção dos cascalhos (DARLEY, CAENN e GRAY, 2017). Observa-se como tal função é desempenhada em um sistema de perfuração rotativo convencional na Figura 2.1. O fluido é bombeado no interior da coluna de perfuração e retorna à superfície pelo espaço anular, na região localizada entre as paredes do poço e a coluna, arrastando os fragmentos de rocha gerados pela broca (THOMAS, 2004).

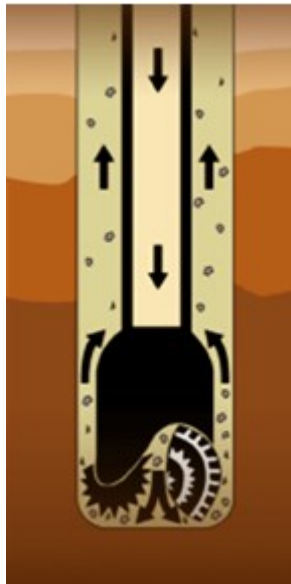


Figura 2.1 - Broca e o movimento do fluido de perfuração.

Segundo a ASME (2005), além do carreamento dos cascalhos, o fluido de perfuração é um líquido formulado a partir de produtos químicos utilizados em operação de perfuração que possui também funções de:

- Lubrificação da coluna;
- Resfriamento da broca;
- Carreamento de sólidos;
- Estabilidade química e física das paredes do poço.

2.1.2 Tipos de fluidos de perfuração

Quanto ao tipo de fluido, os fluidos de perfuração podem ser classificados de acordo com o principal constituinte de sua fase contínua: fluidos compostos por gases, conhecidos também como fluidos pneumáticos; e fluidos líquidos, sendo estes subdivididos em fluidos de base aquosa e base não aquosa. Um diagrama baseado nesta classificação está presente na Figura 2.2.

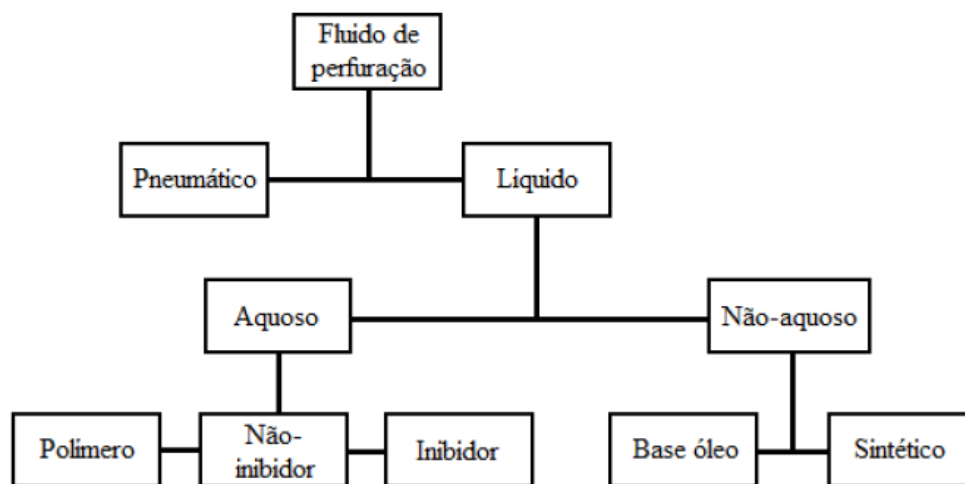


Figura 2.2 - Classificação dos fluidos de perfuração.

Os fluidos de perfuração aquosos são os mais utilizados, enquanto que os fluidos não aquosos são mais caros e exigem maior cuidado devido às restrições ambientais. Já os fluidos de perfuração pneumáticos, cuja fase contínua pode ser composta por ar, gás, ou espuma, têm seu uso limitado a formações de baixa pressão e por isso são pouco utilizados (MITCHELL e MISKA, 2011).

2.1.3 Fluidos não-aquosos

Os primeiros fluidos não-aquosos utilizados foram o óleo bruto e óleos refinados, denominados fluidos à base de óleo. A utilização de fluidos à base de óleo apresentava várias vantagens em relação aos fluidos de base aquosa, dentre elas: a possibilidade de perfuração de folhetos reativos e/ou argilosos, maior estabilidade em poços de alta pressão e alta temperatura, maior controle de corrosão e viabilidade de perfuração de poços direcionais de trajetória complicada e de grande afastamento (MOTA, 2018).

Devido a leis ambientais cada vez mais restritivas, principalmente no caso de locações *offshore*, surgiu a necessidade de desenvolver novos fluidos não-aquosos. Assim, a indústria petrolífera iniciou a pesquisa de outros tipos de bases orgânicas como alternativas ao

diesel. Os fluidos fabricados com estes compostos foram inicialmente chamados de pseudofluidos à base óleo, e posteriormente de fluidos sintéticos, porque eram sintetizados ou refinados e hidrogenados (SCHAFFEL, 2002).

Pelo fato de a fase não aquosa ser hidrofóbica, essa lhe confere vantagens e desvantagens com relação à fluidos base aquosa.

Vantagens:

- Pouca interação com argilas reativas;
- Menores coeficientes de atrito;
- Melhor controle de propriedades;
- Custos atrativos;
- Menores problemas operacionais;
- Não danifica a formação portadora de gás em reservatórios de baixa permeabilidade.

Desvantagens

- Necessidade de utilização de secadores de cascalhos devido às restrições ambientais do descarte do mesmo;
- Necessidade de uma complexa logística instalada, como estações de fluido, barcos, caminhões;
- Alto custo de fabricação.

Na tabela 2.1, têm-se os tipos e a origem das bases orgânicas mais utilizadas.

Tabela 2.1- Tipos e origens de fluidos de perfuração não-aquosos. Fonte: adaptado de Júnior (2014)

Base Orgânica	Origem
Diesel	Produto de refino
n-Parafinas	Frações alifáticas do refino, hidrogenado
Parafinas	Produto de refino hidrogenado
Iso-parafinas	Síntese a partir de hidrocarbonetos de cadeia curta
Linear alfa-olefina	Síntese a partir de hidrocarbonetos de cadeia curta
Olefinas internas	Síntese a partir de hidrocarbonetos de cadeia curta
Ésteres metílicos/etílicos	Trans esterificação de óleos vegetais e metanol (ou etanol)
Ésteres de cadeia longa	Esterificação de ácidos orgânicos e álcoois de cadeia longa
Acetais	Di-éter proveniente de síntese orgânica

2.2 Controle de sólidos

No sistema de controle de sólidos são aplicadas sequencialmente diferentes tecnologias para remover sólidos de formação do fluido de perfuração e, também, para recuperar o fluido de perfuração de forma que este possa ser reutilizado. O desafio enfrentado no processamento é remover os cascalhos e, ao mesmo tempo, minimizar a perda de componentes importantes, como barita, bentonita e fluidos de base não aquosa. Em última análise, o fluxo de resíduos sólidos corresponde ao cascalho de perfuração e aos sólidos do fluido de perfuração que ficaram aderidos ao cascalho(DARLEY, CAENN e GRAY, 2017).

Ao contrário dos fluidos de base aquosa, os de base não aquosa são reciclados por duas razões principais. A primeira está ligada ao fato de que o custo do fluido é alto e sua reutilização diminui o custo global da operação. A segunda razão é a norma regulamentada pela legislação ambiental, que restringe o descarte de cascalhos carreados por fluidos de perfuração não-aquosos. Por isso, além do controle de sólidos no fluido, os cascalhos também devem passar por tratamento de forma a atender às exigências ambientais(DARLEY, CAENN e GRAY, 2017).

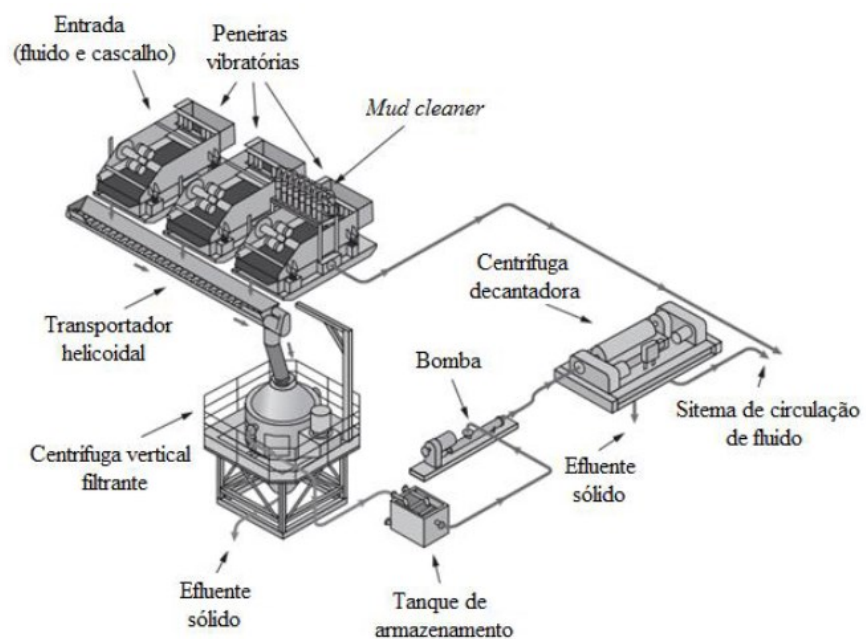


Figura 2.3 - Sistema de controle e tratamento de sólidos. Fonte: adaptado de DARLEY, CAENN E GRAY (2017).

Para o bom funcionamento do sistema de controle de sólidos, deve-se instalar vários equipamentos em série. Os equipamentos mais utilizados para a separação de sólidos são:

- Peneiras vibratórias;

- Hidrociclones;
- Centrífuga decantadora;
- Secador de cascalho (centrífuga filtrante).

Nesse sistema, o cascalho contaminado com fluido de perfuração sai do poço e entra em um conjunto de peneiras vibratórias. O material retido nesses equipamentos é enviado para o secador de cascalho e o material que passa é encaminhado para o *MudCleaner*. Este equipamento é um conjunto de baterias de Hidrociclones desareiaadores, Hidrociclones dessiltadores e peneiras vibratórias de aberturas mais finas. O material retido na peneira do *MudCleaner* é conduzido para o secador de cascalho e o material líquido para a centrífuga decantadora. A centrífuga separa o fluido e envia-o para um tanque de fluido recuperado, na qual ele pode receber aditivos para manter as propriedades do fluido de perfuração.

Já o resíduo da centrífuga é adicionado ao cascalho seco, pois devido à sua faixa granulométrica, sua passagem no secador de cascalho se torna inviável. O secador de cascalho faz a redução do teor de fluido do sólido para níveis inferiores ao exigido pela legislação ambiental (JÚNIOR, 2014).

2.3 Secagem via micro-ondas

2.3.1 Fundamentos da secagem

A secagem é uma operação unitária que visa a remoção de substâncias voláteis contidas em um material. Assim, o estudo desta operação inclui a obtenção de curvas de secagem, além da determinação do modelo cinético e do mecanismo de remoção das substâncias voláteis envolvidas. A secagem não é considerada um processo simples, pois envolve fenômenos de transferência de calor e massa em regime transiente, o que dificulta o controle de muitas alterações físicas e químicas (ANDREOLA, 2013).

A secagem, em métodos tradicionais, acontece em dois processos simultâneos. O primeiro envolve a transferência de energia, principalmente na forma de calor, do ambiente circundante para evaporar a umidade superficial. O segundo processo se trata da transferência da umidade interna para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo.

2.3.2 Secagem via micro-ondas

A energia micro-ondas é uma radiação eletromagnética não-ionizante com frequências que variam de 300 MHz a 300 GHz. Subdividida em três bandas de frequências:

- Ultra alta frequência (UHF: 300 MHz a 3 GHz);
- Super alta frequência (SHF: 3 GHz a 30 GHz);
- Extrema alta frequência (EHF: 30 GHz a 300 GHz).

Os fornos micro-ondas foram inventados há mais de 60 anos e, atualmente, a frequência mais utilizada em fornos comerciais é 2450 MHz.

As micro-ondas podem ser refletidas por uma parede espelhada tal como uma folha metálica, que são refletidas por sua interface dielétrica. E podem ser focados por refletores parabólicos ou por antenas.

A energia micro-ondas é produzida da energia elétrica com uma eficiência de aproximadamente 50% para 2450 MHz e suas vantagens são:

- Aquecimento sem contato físico;
- Aquecimento rápido;
- Aquecimento seletivo dos materiais;
- Alto nível de automação e segurança;
- Há transferência de energia e não calor;
- Rápido *start-up* e *stopping*.

O magnétron é a válvula eletrônica, presente nos fornos de micro-ondas, responsável pela transformação de energia elétrica em ondas eletromagnéticas.

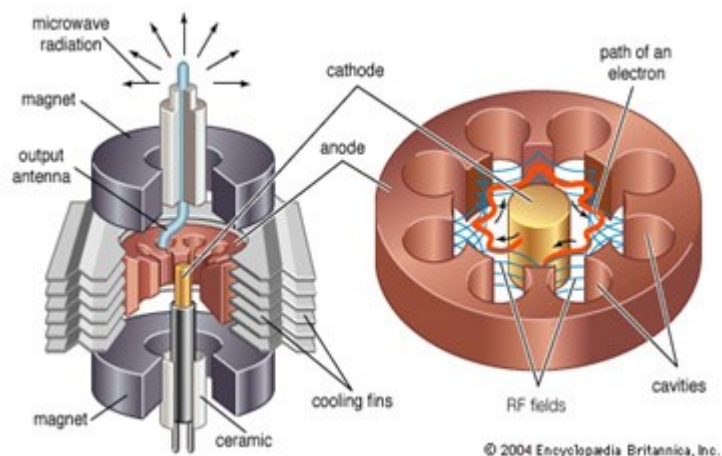


Figura 2.4- Caracterização de um magnétron.

Essa técnica de secagem vem se tornando atrativa devido à necessidade de tempos de processamento cada vez menores, sendo desenvolvida e aplicada em diferentes setores da indústria nas últimas décadas, além de evidenciar eficiência de secagem elevada em comparação aos métodos tradicionais.

2.3.3 Propriedades dielétricas

O conhecimento das propriedades dielétricas de um material possibilita entender como este comporta-se durante o processo de aquecimento por micro-ondas. As propriedades dielétricas dos materiais determinam a absorção da energia eletromagnética, a eficiência de conversão da energia eletromagnética em calor e a uniformidade do aquecimento do material (MOTA, 2018). Portanto, as propriedades dielétricas devem ser estudadas de forma a qualificar o potencial de aplicabilidade da tecnologia de micro-ondas em determinado sistema.

Um conceito importante para o entendimento das propriedades dos materiais é a tangente de perda, $\tan\delta$, que se refere ao quociente do fator de perda pela constante dielétrica, descrita na Equação (1). Esta propriedade indica a habilidade do material em converter a energia eletromagnética em calor (MOTA, 2018).

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1)$$

A constante dielétrica (ϵ') está relacionada à capacidade do material de armazenar a energia fornecida, e o fator de perda (ϵ'') representa a eficiência de transformação da energia absorvida em calor.

A tabela a seguir mostra a tangente de perda de diversos materiais.

Tabela 2.2 - Tangente de perda dielétrica ($\tan\delta$) de diferentes materiais a 25° C e 2,45 GHz (adaptada de GUENIN, 2016).

Material	Tangente de perda
Quartzo fundido	0,00006
Porcelana	0,001
Vidro de borossilicato	0,001
Teflon	0,00015
Polietileno	0,0003
Poliestireno	0,0003

Policarbonato	0,0006
Poliamida	0,005
Cloreto de polivinil	0,005
Acrilonitrilabutadieno estireno (Plástico ABS)	0,006-0,019

2.3.4 Aplicações da secagem no controle de sólidos

Com relação ao cascalho contaminado com fluido de perfuração na indústria petrolífera, os órgãos ambientais cada vez mais estabelecem restrições quanto ao seu descarte ao meio ambiente. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US EPA) proíbe o descarte de cascalho contaminado com fluido de base sintética com teores mássicos maiores que 6,9%. Esse fluido sintético deve obter, também, resultados de biodegradabilidade e ecotoxicidade iguais ou parecidos aos resultados padrão obtidos para a olefina interna (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2017).

Em 2015, o IBAMA instituiu novas normas de controle de descarte de fluidos de base não aquosa, similares às restrições empregadas pela US EPA, que passariam a vigorar a partir do ano de 2016. Por esse motivo, a empresa Petrobrás substituiu a parafina, fluido sintético utilizado, para a olefina interna.

Por essa razão, novas tecnologias de tratamento de cascalho contaminado com fluido de perfuração não aquoso são investigadas, sendo a secagem via micro-ondas uma das alternativas promissoras.

Em 2005, Shang *et al.* utilizaram um micro-ondas laboratorial e reduziram o teor de óleo contaminante do cascalho de perfuração a níveis abaixo a 1%. Mostraram também que o tempo de aquecimento e a potência aplicada foram os fatores que mais afetaram a secagem

Shang *et. al* (2006) utilizaram fluidos de perfuração de base não aquosa e verificam que o teor residual de óleo diminuiu com aumento da potência do micro-ondas, tempo de residência do material e dos componentes da mistura do fluido de perfuração.

Em 2007, Shang *et. al* concluíram que a água é o material mais dielétrico na emulsão do fluido de perfuração e que a água livre é o principal responsável pelo aquecimento do fluido. Já a água intersticial tem a função de arrastar os componentes orgânicos do cascalho contaminado.

Robinson *et. al*, em 2009, desenvolveram uma unidade contínua de secagem de cascalho contaminado com fluido de perfuração, com alimentação de 250 kg/h, potência de 15 kW e vazão de gás inerte de 15 L/min. Os autores constataram que chegaram a 0,1% de contaminante, o que é dez vezes mais eficiente que o mesmo processo em batelada.

Em 2012, Robinson *et. al* realizaram testes de secagem de cascalho contaminado com fluido de perfuração via micro-ondas com agitador mecânico. Os resultados mostraram que a eficiência de remoção passou de 40% para 90%.

Pereira (2013) estudou a descontaminação de cascalhos e constatou que: o aumento da energia específica melhora a eficiência do processo; a água livre é toda removida do cascalho e a n-parafina continua a ser removida mesmo após a água ser evaporada; e que o aumento do teor inicial de contaminante afeta negativamente a remoção de n-parafina. Concluiu, portanto, que o processo de secagem via micro-ondas é mais vantajoso que os métodos convencionais.

Em 2014, Júnior estudou a secagem de diversos tipos de cascalhos. Constatou que, utilizando o agitador mecânico, houve um grande aumento da eficiência (17%) ao utilizar uma agitação de 9 rpm de frequência angular quando comparado com um sistema sem agitação.

Mota, em 2018, verificou que, para uma energia específica constante, menores valores de potência resultam em menores taxas de aquecimento. Isto, por sua vez, aumenta a eficiência de remoção da fase orgânica. Concluiu, ainda, que a olefina é transparente em relação às micro-ondas, enquanto que a água e o cascalho utilizado neste trabalho são materiais absorvedores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Cascalho de perfuração

Os cascalhos utilizados nos testes experimentais são provenientes de perfuração de poços de petróleo doados pela empresa Petrobras.

MOTA (2018) constatou a composição química dos óxidos presentes no cascalho limpo pela técnica de Fluorescência de Raios X (FRX). O resultado obtido pode ser observado na Tabela 3.1. Os principais elementos presentes no cascalho são silício, cálcio, alumínio e ferro.

Tabela 3.1 - Composição química do cascalho utilizado (MOTA, 2018).

Espécie	Composição Química (%)
SiO ₂	37,19
CaO	11,01
Al ₂ O ₃	10,87
Fe ₂ O ₃	5,66
K ₂ O	2,84
MgO	2,56
BaO	2,34
Na ₂ O	2,08
SO ₃	1,68
Cl	1,53
TiO ₂	0,7
P ₂ O ₅	0,21

Para realização dos testes, o cascalho era inicialmente limpo, através de secagem pelo forno micro-ondas da marca SHARP modelo R-23GT na Unidade de Pesquisa Avançada da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI-UFU), por um tempo de 20 minutos. Após essa operação, as amostras eram analisadas pelo método da retorta, obtendo o teor de água e olefina desta, verificando níveis próximos de zero.

As retortas foram feitas utilizando um kit da marca FANN, modelo 210463, com 50mL de capacidade. O procedimento se iniciava pesando a amostra de material ou fluido que era, posteriormente, adicionado a uma célula de aquecimento, que atingia temperaturas de 400°C ± 40°C. Com isso, os componentes voláteis eram evaporados, passando através de um

condensador e coletados em uma proveta. Através do balanço de massa, determinava-se o teor de fase orgânica e fase aquosa. Todas as retortas foram feitas em réplicas.

3.1.2 Fluido de perfuração

O fluido de perfuração utilizado nos testes foi a olefina interna, concedida pela empresa Petrobrás SA. A escolha desse fluido tem por base as restrições ambientais impostas pelo IBAMA, em 2016, onde o fluido sintético escolhido para o processo deve obter resultados de biodegradabilidade e ecotoxicidade iguais ou parecidos aos resultados padrão obtidos para a olefina interna. Por esse motivo, a n-parafina foi substituída pela olefina interna nos processos petrolíferos da empresa Petrobrás.



Figura 3.1 - Fluido de perfuração utilizado nos ensaios experimentais. Fonte: adaptado de Mota (2018).

Na tabela 3.2, têm-se os teores mássicos da fase orgânica, não-orgânica e de sólidos da olefina interna utilizada para esses testes. Os valores foram obtidos pelo método da retorta do fluido de perfuração, por MOTA (2018).

Tabela 3.2 - Teor mássico percentual do fluido de perfuração à base de olefina interna.

Teor de fase orgânica	32,98
Teor de fase não-orgânica	31,03
Teor de sólidos	35,99
Razão orgânica/não orgânica	52/48

3.1.3 Micro-ondas: Unidade Experimental

Todos os experimentos foram realizados na Unidade de Pesquisa Avançada da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI-UFU), em um micro-ondas comercial da marca SHARP modelo R-23GT, de potência 1600 W, frequência 2450 MHz, cavidade em aço inox e dimensões internas de 330x330x181 mm. Na figura 3.2, têm-se uma representação do equipamento utilizado.

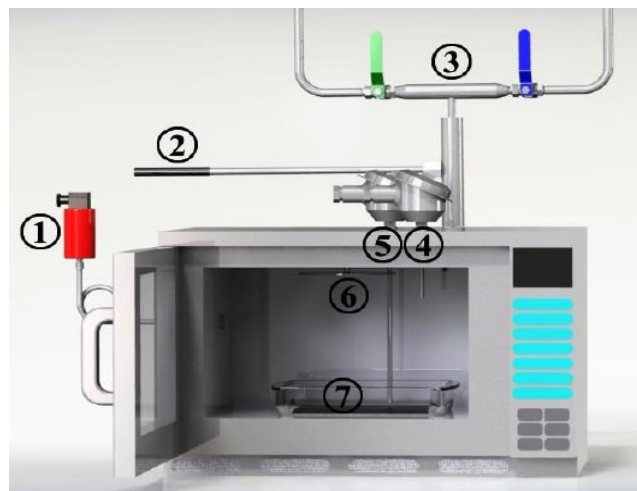


Figura 3.2 - Unidade experimental de secagem via micro-ondas. Fonte: adaptado de JÚNIOR (2014)

A unidade experimental apresenta os seguintes componentes:

- 1- Manômetro transmissor de pressão NOVUS TP-691, faixa de -1 a +1 bar para 0,3% FS de precisão;
- 2- Anemômetro de fio quente TSI VelociCalc Plus 8386;
- 3- Sistemas de válvulas para alimentação de gás inerte (N₂);
- 4- Termopar tipo K ALUTAL faixa de 60°C à 200°C para aferição de temperaturas do vapor;
- 5- Termopar tipo K ALUTAL faixa de 35°C à 305°C para aferição da temperatura do leito;
- 6- Disco giratório original do equipamento para melhor distribuição da micro-ondas;
- 7- Recipiente de borosilicato onde a amostra é alocada.

Os termopares e transdutores enviam um sinal de 4-20 mA para uma placa de aquisição de dados da marca National Instrumentos Modelo NI-USB-600, que são

transformados em valores de temperatura e pressão através do software *LabView 2010*. A interface do software encontra-se na figura 3.3.

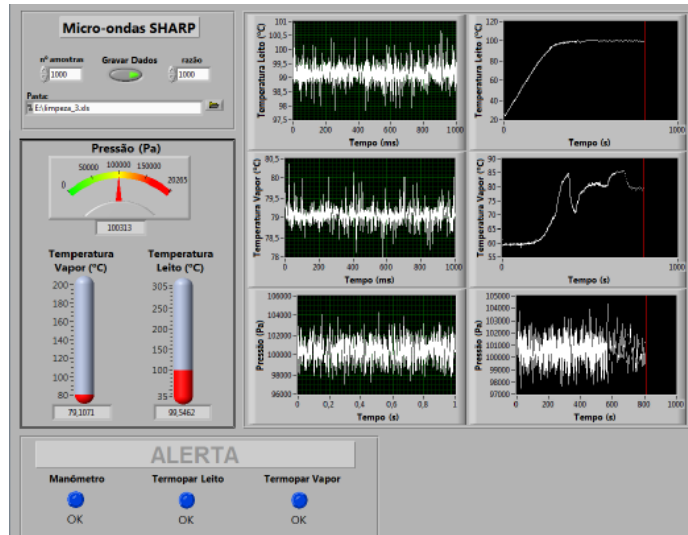


Figura 3.3 - Interface do software utilizado para leitura de pressões e temperatura
Fonte: adaptado de JÚNIOR (2014).

Visando estudar o efeito da mistura na eficiência da secagem via micro-ondas, optou-se por utilizar o sistema de agitação mecânica, onde o material pudesse ser homogeneizado enquanto a secagem é operada. Esse sistema foi acoplado a um redutor de velocidade e um inversor de frequência. A figura 3.4 mostra o sistema de agitação posicionado na cavidade do forno, sendo:

- 1- Motor WEB de 1/4 cv de saída de 1750 rpm;
- 2 - Redutor de velocidade WEG razão 1:31;
- 3 - Inversor de frequência WEB CFW08;
- 4 - Sistema de eixo, engrenagem 90° e mandril 3/8''.

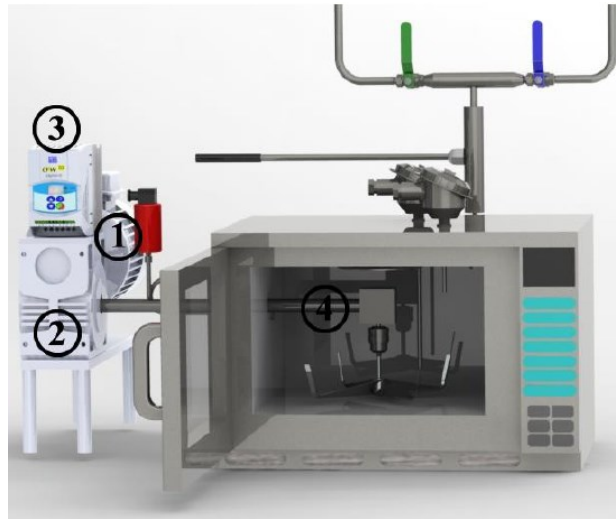


Figura 3.4 - Forno com o sistema de agitação mecânica. Fonte: adaptado de JÚNIOR, 2014.

O modelo de agitador utilizado foi o agitador axial de aço inox 340, com quatro pás de angulação de 45° . A figura 3.5 mostra o perfil e a figura 3.6 a geometria e dimensões desse aparato.

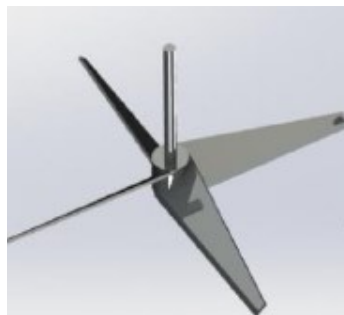


Figura 3.5 - Perfil do agitador.

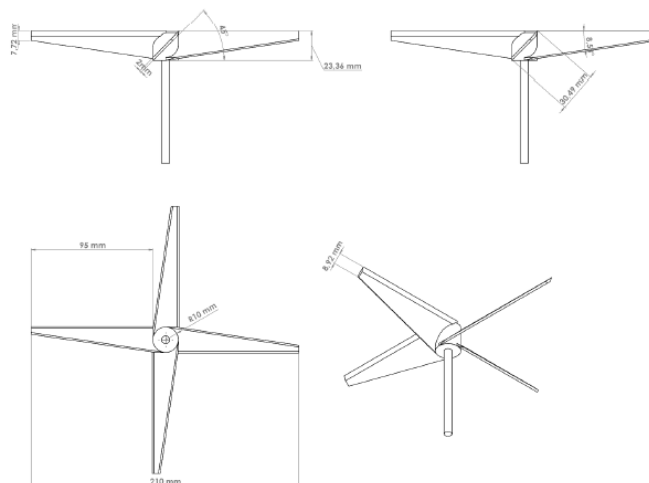


Figura 3.6 - Geometria e dimensão do agitador utilizado.

3.2 Metodologia de Secagem

Os testes de secagem foram realizados na Unidade de Pesquisa Avançada da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI - UFU).

O cascalho utilizado nos ensaios foi doado pela empresa PETROBRÁS S.A. para fins de pesquisa. Esse material foi tratado, inicialmente, por um processo de secagem através do forno micro-ondas da marca SHARP modelo R-23GT por um tempo de 20 minutos. Esse método teve por objetivo retirar, do material, contaminantes orgânicos e não-orgânicos. Posteriormente, retortas foram realizadas, em duplicata, para verificação dos teores desses componentes no cascalho limpo.

Após essa etapa, foram realizados balanços de massa com o intuito de prever a quantidade de fluido de perfuração necessária para que a alimentação apresentasse uma porcentagem mássica de 12,5% de olefina interna, em uma razão orgânica/não-orgânica de 52/48. Esse cascalho foi, então, contaminado com o fluido de perfuração sintético olefina interna, utilizado nos ensaios e descrito na seção anterior. Após mistura desses componentes e devida homogeneização, novas retortas foram realizadas, em duplicata, para averiguação dos teores e possível correção, caso necessário.

Nos ensaios de secagem foram utilizados uma massa de 700g desse material, que foi alocado no recipiente de vidro borossilicato mostrado na seção anterior.



Figura 3.7 - Cascalho contaminado com fluido de perfuração a 12,5 % em massa de olefina (MOTA, 2018).

O recipiente de vidro borossilicato foi posicionado no centro do micro-ondas e os orifícios do equipamento foram vedados com fita adesiva de alumínio da marca SCOTH modelo 425, com o intuito de evitar que houvesse entrada de ar e saída de vapores pela porta do equipamento.

Após realizado o processo de secagem, o material do recipiente era homogeneizado e duas amostras eram retiradas para o teste da retorta, realizadas em duplicatas. Dessa maneira, os teores orgânicos e não-orgânicos restantes eram determinados.

A tabela a seguir mostra as condições dos ensaios nesse trabalho.

Tabela 3.3 - Condições de operação e características dos ensaios.

Testes	Agitação Mecânica	Energia Específica (kWh/kg)	Concentração Inicial de olefina (% m/m)
1	Ausente	0,3	12,5
2	Ausente	0,4	12,5
3	Ausente	0,5	12,5
4	Presente	0,3	12,5
5	Presente	0,4	12,5
6	Presente	0,5	12,5

Para os ensaios com a presença de agitação mecânica, o sistema com este fim, descrito na seção anterior, foi acoplado ao forno micro-ondas utilizado nos testes, com uma agitação de 10 rpm. O estudo, em questão, não teve como foco principal analisar a influência de diferentes rotações; visou-se, contudo, a influência de se ter agitação ou não no processo, com a mesma energia específica e mesma concentração inicial de olefina interna no cascalho contaminado.

Todos os ensaios foram realizados em duplicata, totalizando 12 testes. Os valores finais encontrados para a secagem, em cada condição descrita acima, são a média dos valores encontrados pelas retortas das duplicatas.

Para efeitos de segurança, a utilização de uma vazão inerte se fez necessária para o arraste dos vapores orgânicos gerados devido à secagem. O inerte injetado no sistema tem a função de eliminar toda presença de O₂ na cavidade do equipamento visto que, acima da temperatura de fulgor, estes componentes podem se inflamar. Júnior (2014) mostrou que para uma faixa de vazão de inerte de 35 L/min a 241 L/min não houve variação na eficiência da secagem para esse equipamento. Nos experimentos com agitação mecânica e altas energias específicas optou-se, portanto, pela utilização de uma vazão mínima de inerte.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse item serão apresentados os resultados alcançados nos ensaios de secagem via micro-ondas de cascalho contaminado a 12,5%, em massa, com olefina interna.

A Tabela 4.1 apresenta os valores alcançados após ensaios com a ausência do sistema de agitação mecânica.

Tabela 4.1 - Teores finais de ensaios com ausência do sistema de agitação mecânica.

Ausência do sistema de agitação mecânica			
Energia Específica (kWh/kg)	Tempo de aquecimento (min)	Concentração Inicial (% m/m)	Concentração Final (% m/m)
0,3	7,88	12,5	9,35
0,4	10,5	12,5	6,57
0,5	13,13	12,5	3,82

Na tabela 4.2 são encontrados os valores de olefina interna presente no cascalho após ensaios de secagem utilizando-se do sistema de agitação mecânica a 10 rpm.

Tabela 4.2 - Teores finais de ensaios com a presença do sistema de agitação mecânica com frequência angular de 10 rpm.

Presença do sistema com agitação mecânica (10 rpm)			
Energia Específica (kWh/kg)	Tempo de aquecimento (min)	Concentração Inicial (% m/m)	Concentração Final (% m/m)
0,3	7,88	12,5	9,97
0,4	10,5	12,5	7,46
0,5	13,13	12,5	6,45

O gráfico, a seguir, compara os valores de secagem encontrados para os dois sistemas. Nota-se, primeiramente, que o aumento da energia específica melhora a eficiência da secagem. Há uma taxa de decaimento para ambos sistemas.

Observou-se, também, que a presença do agitador mecânico no sistema influenciou negativamente na secagem. O efeito intrusivo que o metal, que compõe o sistema de agitação, faz sobre as ondas eletromagnéticas interferiu no resultado da secagem. Júnior (2014) realizou ensaios com agitação mecânica e optou por deixar o sistema inserido na alimentação com frequência de rotação a 0 rpm nos testes sem agitação devido a esse efeito.

Esse trabalho comprova, pois, que essa interferência é significativa e que deve-se realizar um estudo de viabilidade econômica para implementação desse método.

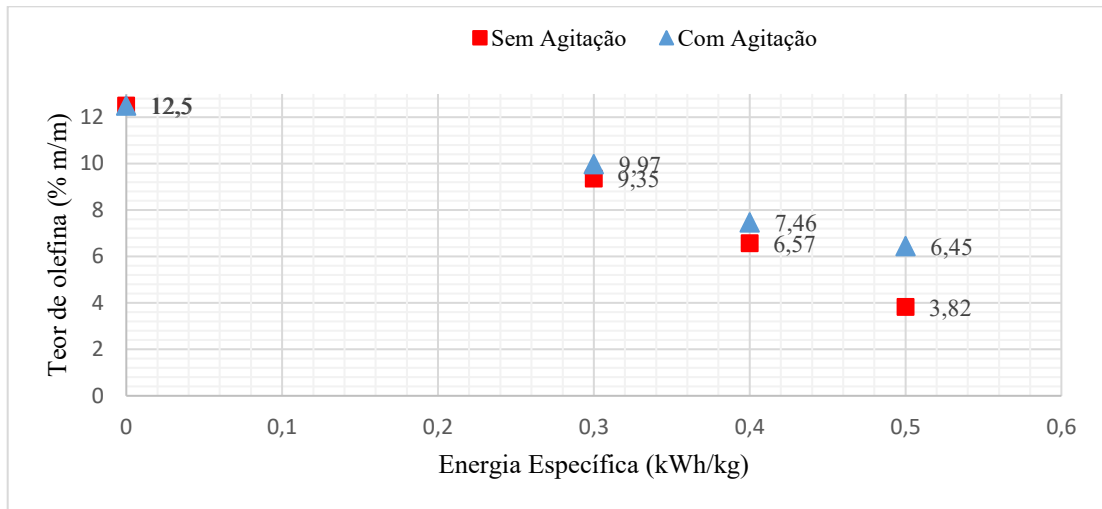


Figura 4.1 - Comparativo dos teores finais de olefina interna nos ensaios sem agitação e com agitação mecânica.

A figura 4.2 traz a comparação dos ensaios de secagem utilizados com Energia Específica de 0,5 kWh/kg. Nota-se que há, no sistema sem agitação mecânica, maior efeito de fronteira do que em relação ao sistema com agitação, onde a amostra é mais homogeneizada pelas hélices do agitador. Entretanto, observa-se também que o sistema sem agitação apresentou eficiência maior na secagem, sendo que as retortas comprovaram esse fato.

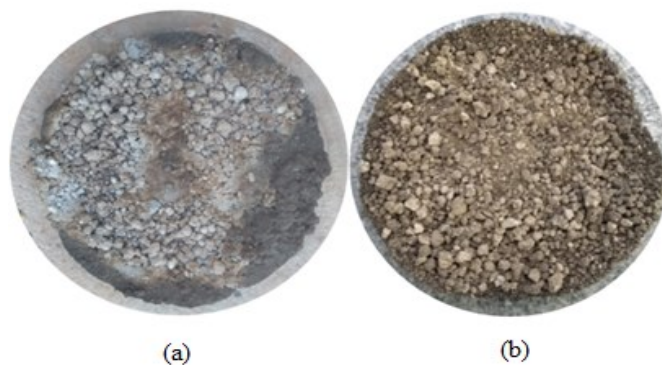


Figura 4.2 - Comparativo de ensaios com energia específica 0,5 kWh/kg: (a) sem agitação; (b) com agitação mecânica.

Para que não haja interferência na eficiência de secagem com a presença do sistema de agitação mecânica dentro do equipamento, pode-se averiguar a possibilidade de projetos de agitadores constituintes de outros materiais. Uma boa alternativa encontra-se nos polímeros, que apresentam baixa tangente de perda, ou seja, possuem baixa habilidade em

transformar ondas eletromagnéticas em calor, não influenciando a secagem. A tabela abaixo apresenta algumas características desses polímeros.

Tabela 4.3 - Características e propriedades mecânicas de materiais (Fonte: Incomplast, Ipen, Researchgate, JG e Embatech).

Material	Tangente de Perda	Resistência à tração	Dureza (Shore D)	Temperatura de trabalho
Polietileno	0,0003	35,16 MPa	73	Até 133°C
Poliestireno	0,0003	50,05 MPa	78	Até 220°C
Polycarbonato	0,0006	55,00 MPa	80 – 82	Até 250°C
PVC	0,005	50,33 MPa	80 – 83	Até 180°C
Plástico ABS	0,006 - 0,019	43,6 MPa	79	Até 135°C

Dureza é, conceitualmente, a resistência que o material oferece à penetração de um corpo duro. Determina-se a dureza com o auxílio de máquinas especiais, existindo diferentes métodos e escalas, que relacionam a amplitude de penetração com um valor numérico da propriedade dureza (CIMM).

O método Shore consiste na medição da profundidade da impressão deixada no material com a aplicação da carga e é dependente de outros fatores além da dureza, como das propriedades viscoelásticas e da duração do ensaio. Existem diversas escalas utilizadas em materiais com propriedades diferentes. As mais comuns são a A e D, sendo a A utilizada em plásticos macios e a D em plásticos rígidos. Cada escala resulta em um valor entre 0 e 100, sendo que valores maiores indicam um material mais duro (CT BORRACHA). Na figura 4.3 têm-se a escala de gradação de dureza de plásticos.

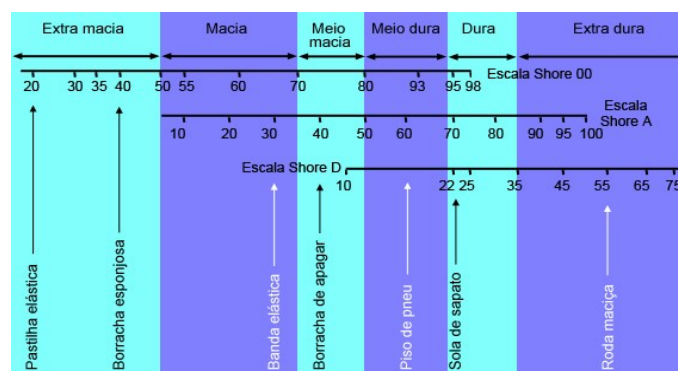


Figura 4.3 - Gradação da dureza de plásticos. Fonte: adaptado do site CT Borrachas.

Os polímeros mostrados na Tabela 4.3 apresentam boa resistência à tração e dureza excelente para a função de agitadores; porém, a faixa de temperatura de trabalho evidencia-se como empecilho. Secagens que não atinjam altas temperaturas poderão apresentar eficiência altas com agitadores constituintes desses materiais; todavia, para altas temperaturas, os agitadores poderão comprometer o processo.

Atualmente, novos polímeros estão sendo sintetizados com propriedades químicas e mecânicas excelentes. Entre eles, os Polímeros de Alta Performance ganham mercado devido à maior resistência à corrosão, à redução de peso e melhoria estética (opção por cores e liberdade de design) em relação aos metais. Entre eles, destacam-se o PEEK, PI e PEI.

Peças fabricadas com o polímero de alta performance PEEK (polieteretercetona) podem operar a temperaturas de até 260°C (480°F) e têm um ponto de fusão de cerca de 341°C (646°F). O plástico PEEK mantém as propriedades físicas, como resistência à tração e à flexão, em alto nível. A desvantagem da polieteretercetona é em relação ao seu alto preço, porém a possibilidade de fabricação de peças mais leves, mais fortes e capazes de sobreviver por mais tempo em ambientes severos pode compensar o investimento (PLASTICS).

O plástico PI (poliimida) é um polímero de alta performance que apresenta resistência, estabilidade dimensional e a resistência à deformação mesmo a temperaturas acima de 260°C. As baixas taxas de desgaste combinadas com a capacidade de trabalhar em condições não lubrificadas tornam o material ideal para situações aplicações de atrito e desgaste, prolongando a vida útil e reduzindo os custos de manutenção. Apresenta alta resistência a temperatura de até 470°C e boa usinagem. A desvantagem, assim como no plástico PEEK, está em relação ao seu alto custo; porém, como apresenta vida útil longa, poderá compensar o investimento (PLASTICS).

A Polieterimida ou PEI é um termoplástico amorfo com alta resistência e rigidez mecânica. O termoplástico PEI sem aditivos é translúcido e de cor âmbar com propriedades mecânicas, térmicas e elétricas excepcionais. Em aplicações mecanicamente exigentes, a adição de reforço de fibra de vidro, juntamente com as técnicas de extrusão, oferece aos usuários um material que possui maior resistência à tração e rigidez, além de melhorar a estabilidade dimensional. As polieterimidias possuem uma resistência à deformação notavelmente alta em uma variedade de temperatura e uma alta temperatura de operação permanente. Esse plástico apresenta alta resistência química ao cloro e resistência à radiação. A desvantagem encontra-se em relação ao seu alto custo; porém, como apresenta alta resistência e rigidez mecânica, terá vida útil prolongada (PLASTICS).

Portanto, a presença do agitador mecânico no forno micro-ondas ameniza o efeito de parede. Porém, prejudica a eficiência da secagem devido ao efeito intrusivo de metais que absorvem as ondas eletromagnéticas, transformando-as em calor e também alterando o campo elétrico. Um estudo de materiais que possuam baixa tangente de perda, para substituição do agitador mecânico metálico, pode favorecer o processo de secagem. Entre os diversos materiais, os polímeros apresentam boas características mecânicas e baixas tangentes de perda, mostrando-se como postulantes a ensaios futuros.

5 CONCLUSÃO

De acordo com as condições operacionais e experimentos realizados, concluiu-se que o aumento da energia específica beneficia a eficiência da secagem e que a presença do agitador mecânico amenizou o efeito de parede. Analisando os testes realizados sem a presença do sistema de agitação mecânica, notou-se que houve, para essas condições operacionais, melhores resultados quando comparados a testes com agitação mecânica a 10 rpm. Isso explicou-se pelo efeito intrusivo de materiais metálicos do sistema de agitação dentro do forno micro-ondas, absorvendo ondas eletromagnéticas, transformando-as em calor, e afetando o campo elétrico do processo.

Como sugestão para trabalhos futuros, um projeto de agitador mecânico constituído de materiais que possuem baixa tangente de perda pode beneficiar o processo de secagem de cascalho contaminado com fluido de perfuração. Polímeros convencionais possuem características interessantes para esse fim; entretanto, a temperatura de trabalho torna-se um empecilho. Já os polímeros de alta performance dispõem de altas temperaturas de trabalho e ótimas características mecânicas; entretanto, há o inconveniente do custo de obtenção. Deve-se, portanto, elaborar um estudo de viabilidade englobando fatores econômicos e técnicos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN CHEMISTRY COUNCIL. **A Comparison of the Environmental Performance of Olefin and Paraffin Synthetic Base Fluids (SBF)**. [S.l.]: [s.n.], 2016.

ANDREOLA, K. **Secagem de Cenoura (*Daucus carota* L.) assistida por micro-ondas**. Campinas. 2013.

ASME. **Drilling fluids processing handbook**. Burlington: Editora Elsevier, 2005.

CIMM. **O que é dureza?** Disponível em: <<https://www.cimm.com.br/portal/verbetes/exibir/510-dureza>>. Acesso em: 30 de Novembro 2018.

CT BORRACHAS. **Dureza**. Disponível em: <<https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-fisicas/propriedades-mecanicas/dureza/>>. Acesso em: 30 Novembro 2018.

DARLEY, H.; CAENN, R.; GRAY, G. R. **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**. 7^a. ed. [S.l.]: Editora Elsevier, 2017.

EMBATECH. **Características do Plástico ABS**. Disponível em: <<http://www.embatech.com.br/resinas/abs.asp>>. Acesso em: 20 Novembro 2018.

GEDYE, R.; SMITH, F.; WESTAWAY., K. Microwave in organic and organometallic synthesis. **Journal of Microwave Power and Eletromagnetics Energy**, v. 26, p. 3-17, 1991.

GUÉNIN, E. **Microwave Engineering of Materials: from Mesoscale to Nanoscale**. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LCC, 2016.

IBAMA. **Diretrizes para o uso e descarte de fluidos de perfuração e cascalhos, fluidos complementares e pastas de cimento nos processos de licenciamento ambiental dos empreendimentos de perfuração marítima de poços de exploração e produção de petróleo e gás**. [S.l.]. 2015.

INCOMPLAST. **Características do Policarbonato**. Disponível em: <<http://incomplast.com.br/policarbonato/>>. Acesso em: 23 Novembro 2018.

IPEN. **Características do Polietileno**. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/cd/cbpol/2007/PDF/285.pdf>>. Acesso em: 20 Novembro 2018.

JQ. **Características do PVC.** Disponível em: <<http://www.jq.com.ar/Imagens/Productos/PVC/PVCprop/dtecnicos.htm>>. Acesso em: 20 Novembro 2018.

JQ. **Características do Policarbonato.** Disponível em: <<http://www.jq.com.ar/Imagens/Productos/Policarbonato/dtecnicos/dtecnicos.htm>>. Acesso em: 20 Novembro 2018.

JÚNIOR, I. P. **Secagem por micro-ondas na descontaminação de cascalhos de perfuração.** Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2014.

MITCHELL, F. M.; MISKA, S. Z. **Fundamentals of Drilling Engineering.** [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, 2011.

MOTA, A. C. S. **Propriedades dielétricas e cinética de secagem de cascalhos de perfuração de poços de petróleo e gás utilizando micro-ondas.** Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2018.

PANDA, S. S. et al. Sintering response of austenitic (316L) and ferritic (434L) stainless steel consolidated in conventional and microwave furnaces, v. 54, p. 2179-2183, 2006.

PEREIRA, M. S. **Aplicação de secagem por micro-ondas no tratamento de cascalho de perfuração.** Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2013.

PLASTICS, E. **Características do PEI.** Disponível em: <<https://www.ensingerplastics.com/pt-br/semiacabados/plasticos-de-alto-desempenho/pei>>. Acesso em: 27 Novembro 2018.

PLASTICS, E. **Características do PI.** Disponível em: <<https://www.ensingerplastics.com/pt-br/semiacabados/plasticos-de-alto-desempenho/pi-poliimida>>. Acesso em: 27 Novembro 2018.

PLASTICS, E. **Características do PEEK.** Disponível em: <<https://www.ensingerplastics.com/pt-br/semiacabados/plasticos-de-alto-desempenho/peek>>. Acesso em: 27 Novembro 2018.

RESEARCH GATE. **Características do Poliestireno.** Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/320233735_PROPRIEDADES_MECANICAS_DE_COMPOSITOS_DE_POLIESTIRENO_REFORCADO_COM_CELULOSE_DE_BAGACAO_DE_CANA>. Acesso em: 20 Novembro 2018.

ROBINSON, J. P. et al. Remediation of oil-contaminated drill cuttings using continuous microwave heating. **Chemical Engineering Journal**, v. 152, p. 458-463, 2009.

ROBINSON, P.; KINMAN, S. W.; LESTER, E. H. Microwave Remediation of Hydrocarbon-contaminated Soils-scale Up Using Batch Reactors. **Separation and Purification Technology**, v. 96, p. 12-19, 2012.

SALEMA, A. A.; ANI., F. N. Pyrolysis of oil palm empty fruit bunch biomass pellets using multimode microwave irradiation. **Bioresource Technology**, v. 125, p. 102-107, 2012.

SCHAFFEL, S. B. **A Questão Ambiental na Etapa de Perfuração de Poços Marítimos de Óleo e Gás no Brasil**. UFRJ, Rio de Janeiro. 2002.

SHANG, H. et al. **Treatment of Oil-Contaminated Drill Cuttings by Microwave Heating in a High-Power Single-mode Cavity**. [S.l.]: Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 44, 2005. 6837-6844 p.

SHANG, H. et al. **Microwave Treatment of Oil-contaminates North Sea Drill Cuttings in a High Power Multimode Cavity**. [S.l.]: Separation and Purification Technology, v. 49, 2006. 84-90 p.

SHANG, H. et al. Theoretical study of microwave enhanced thermal decontamination of oil contaminated waste. **Chemical Engineering Technology**, p. 121-130, 2007.

TATA, A.; BEONE, F. Hospital waste sterilization: a technical and economic comparison between radiation and microwaves treatments. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 46, p. 1153-1157, 1995.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2^a. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Clarification of Technology-based Sediment Toxicity and Biodegradation Limitations and Standards for Controlling Synthetic-based Drilling Fluid Discharges**. EUA. 2017.