

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA (PEQ-UFS)

JOSÉ VALDO DA SILVA

**CONTROLE DE PERDA DE CIRCULAÇÃO EM PERFURAÇÃO DE POÇOS
UTILIZANDO MATERIAL FIBROSO DERIVADO DA *Moringa Oleífera* LAM**

São Cristóvão (SE)
(2018)

JOSÉ VALDO DA SILVA

**CONTROLE DE PERDA DE CIRCULAÇÃO EM PERFURAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO UTILIZANDO MATERIAL FIBROSO DERIVADO DA *Moringa Oleífera*
LAM**

Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Francisco da Silva

Coorientador: Dra. Fernanda Rocha Morais Franca

São Cristóvão (SE)
(2018)

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE**

S586c Silva, José Valdo da
Controle de perda de circulação em perfuração de poços de petróleo utilizando material fibroso derivado da *Moringa Oleífera* Lam / José Valdo da Silva; orientador Gabriel Francisco da Silva. – São Cristóvão, 2018.
97 f. : il.

Dissertação (mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Sergipe, 2018.

1. Engenharia química. 2. Moringa Oleífera. 3. Poços de petróleo - Perfuração. I. Silva, Gabriel Francisco da, orient. II. Título.

CDU: 66.0: 582.683.4

JOSÉ VALDO DA SILVA

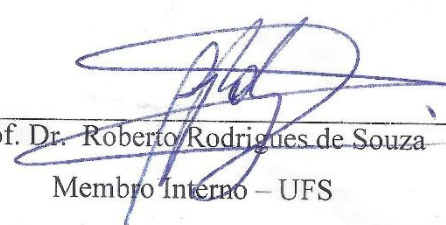
CONTROLE DE PERDA DE CIRCULAÇÃO EM PERFURAÇÃO DE POÇOS DE
PETRÓLEO UTILIZANDO MATERIAL FIBROSO DERIVADO DA *Moringa Oleífera*
LAM

Dissertação de Mestrado aprovada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
da Universidade Federal de Sergipe em 30 de Julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. João Paulo Lobo dos Santos
Membro Externo ao Programa- UFS



Prof. Dr. Roberto Rodrigues de Souza
Membro Interno – UFS



Dra. Fernanda Rocha Morais França – Coorientadora
(UFAL)



Prof. Dr. Gabriel Francisco da Silva – Orientador
(UFS)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos, amigos e para as pessoas que contribuíram de uma maneira significativa para este trabalho ser realizado.

AGRADECIMENTOS

Foram muitos os que me ajudaram a concluir este trabalho. É com o maior reconhecimento e a mais profunda gratidão que agradeço:

Em primeiro lugar aos meus pais e especialmente aos meus irmãos, que acreditaram e me apoiaram durante toda a minha caminhada no mestrado. *Obrigado meus irmãos “se não fosse vocês, a vida não teria a mesma alegria”.*

A minha namorada Everlayne Ferreira Guerra, por esta ao meu lado em todos os momentos, lutando e sonhando juntos, obrigado por me ajudar a supera mais um desafio.

Ao Professor Dr. Gabriel Francisco da Silva, por me acolher no seu grupo de pesquisa, pela disposição em navegar comigo em águas desconhecidas, pelo entusiasmo e incentivo através do compartilhamento de suas ideias, proporcionando assim as condições necessárias para a realização deste trabalho. *Obrigado pela oportunidade!*

A Giselle Holanda Canuto, pela confiança, amizade, sugestões, por acreditar no meu potencial, agradeço profundamente pelo apoio e compartilhamento de informações.

A minha co-orientadora Fernanda Rocha Morais França, pelas críticas, sugestões, por toda a ajuda e dedicação na conclusão deste trabalho.

A Maria Susana Silva, Tayanara Menezes Santos, Diego, Ageu Ícaro e Felipe Abreu por seu conhecimento, pelas críticas, sugestões e, principalmente, pela sincera amizade.

Aos amigos da LTA, pela amizade e troca de informação. Especial agradecimento a Andreia e a Val, pelo conhecimento e generosidade.

A Carla Bery, pelo profissionalismo e por sempre tentar ajudar todos com muito carinho e dedicação. *“Obrigado pelos conselhos!”*

Agradeço, imensamente a Juliane Oliveira Rodrigues, pela paciência, compreensão e dedicação em me ajudar. *Obrigado Juliane “seu apoio foi muito importante”.*

Agradeço, por último, não menos importante, aos engenheiros Romero e ao Zadson gerente geral da ENGEPET assim como a engenheira química Bianca, pela sua confiança e reconhecimento ao abrir aceso a empresa e empresta o equipamento de *“medição de fluido de combate a perda de circulação”*. agradeço profundamente pela confiança e compartilhamento de informações, se não fosse o apoio da ENGEPET este trabalho não teria sido concluído.

A todos que colocaram barreiras para a conclusão dessa pesquisa. Isso me fez trabalhar mais arduamente, contribuindo para meu crescimento profissional e pessoal.

RESUMO

A indústria de petróleo e gás vem apresentando esforços para desenvolver tecnologias e técnicas na perfuração de poços. Diversos desafios são enfrentados pelas empresas de perfuração no Brasil. Dentre estes, o combate à perda de circulação em formações rochosas permeáveis, que é um cenário comum na perfuração dos poços brasileiros. Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo descrever um novo aditivo para fluido base água, projetado para formar uma barreira efetiva e de baixa permeabilidade em zonas de perda de circulação, assim como caracterizar e avaliar a efetividade de materiais fibrosos derivados da *Moringa Oleífera* Lam (MoLAM), no combate a perda de circulação em zonas permeáveis e produtoras. Inicialmente foi realizado a caracterização dos materiais estudados, tais como: Análise Termogravimétrica (TG), Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Em seguida, avaliou-se a invasão do fluido a base água contendo os LCMs derivados da MoLAM e sua capacidade de formação de reboco submetidos a diferentes condições operacionais, em uma coluna de acrílico a pressão de 100 psi, utilizando areia 20/40 e a brita (número 1) como meios filtrantes e os materiais fibrosos derivados da MoLAM, torta, esponja da vagem, caule e vagem sem semente, e os materiais comerciais Fracseal e o Soluflake como meio obturante. O desempenho de cada amostra de LCM foi determinado com base na quantidade de filtrado no meio filtrante, de acordo com o padrão do American Petroleum Institute (API). Os resultados obtidos mostraram que a quantidade de perda de fluido depende do LCM, concentração e distribuição de tamanho de partículas. A partir dos dados obtidos foi possível identificar que entre os quatros LCMs, a torta e a vagem obtiveram melhores resultados para controle de perda por infiltração, apresentando uma invasão de infiltração na rocha entre 4 e 5 cm e apresentaram os melhores resultados no controle de perda no valor de 17ppb para ambas, porém, para o controle de perda parcial ou total os quatros materiais apresentaram resultados positivos formando um plugueamneto total do fluxo no intervalo de 30 minutos na concentração de 20 a 28 ppb, sendo que o material Fracseal foi com 50 ppb e o Soluflake com 35 ppb. Os testes de laboratórios mostraram que a invasão de fluido é bastante reduzida ao utilizar este sistema. Isso traz vários benefícios importantes, tais como, o bloqueio diferencial reduzido, os resultados de permeabilidade de retorno e, portanto, boas indicações de desempenho. Além de ser uma das soluções técnicas potenciais, possuem propriedades ambientais de fontes renováveis.

PALAVRAS-CHAVE: Fluido de perfuração; *Moringa Oleífera* Lam; Perda de circulação.

SUMMARY

The oil and gas industry has been making efforts to develop technologies and techniques for drilling wells. Several challenges are faced by drilling companies in Brazil. Among these, the fight against the loss of circulation in permeable rock formations, which is a common scenario in the drilling of Brazilian wells. In this context, this work aims to describe a new additive for water based fluid, designed to form an effective barrier and low permeability in areas of loss of circulation, as well as characterize and evaluate the effectiveness of fibrous materials derived from Moringa Oleífera Lam (MoLAM), in combating the loss of circulation in permeable and producing zones. Initially the characterization of the studied materials was carried out, such as: Thermogravimetric Analysis (TG), Differential Exploration Calorimetry (DSC) and Scanning Electron Microscopy (SEM). Then, invasion of the water-based fluid containing the MoLAM-derived LCMs and their plaster forming capacity under different operating conditions was evaluated on a 100 psi pressure acrylic column using 20/40 sand and (No. 1) as filter media and fibrous materials derived from MoLAM, pie, pod sponge, stem and seedless pod, and the commercial materials Fracseal and Soluflake as the sealant medium. The performance of each LCM sample was determined based on the amount of filtrate in the filter media, according to the American Petroleum Institute (API) standard. The results obtained showed that the amount of fluid loss depends on the LCM, concentration and particle size distribution. From the data obtained it was possible to identify that between the four LCMs, the pie and the pod had better results to control loss by infiltration, presenting an invasion of infiltration in the rock between 4 and 5 cm and presented the best results in loss control in the value of 17ppb for both, but for the control of partial or total loss the four materials presented positive results forming a total plug of the flow in the interval of 30 minutes in the concentration of 20 to 28 ppb, being the material Fracseal was with 50 ppb and Soluflake at 35 ppb. Laboratory tests have shown that the invasion of fluid is greatly reduced when using this system. This brings several important benefits, such as reduced differential lock, return permeability results and therefore good performance indications. In addition to being one of the potential technical solutions, they have environmental properties from renewable sources.

KEY WORDS: Drilling fluid; Moringa Oleifera Lam; Loss of circulation

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da severidade da perda de circulação em fluido à de base água.	28
Tabela 2 - Classificação da severidade da perda de circulação em fluido de base oleosa.	28
Tabela 3 – Materiais de combate a perda de circulação convencionais	45
Tabela 4 - Fornecedores e materiais utilizados na preparação dos fluidos de perfuração à base água.....	46
Tabela 5 – Meio filtrante utilizado nos experimentos	46
Tabela 6- Formulação do fluido de perfuração à base água	49
Tabela 7 - Concentração de cada LCM para formular mistura individualmente	51
Tabela 8 - Concentração de cada LCM para formular mistura quando usados em combinação	52
Tabela 9 - Concentração de cada LCM para formular mistura individualmente para perdas parcial	54
Tabela 10 - Concentração de cada LCM para formular mistura quando usados em combinação para perdas parcial ou grave.	54
Tabela 11 – Faixa de temperatura dos estágios dos LCMs derivados da MoLAM com os comerciais.....	57
Tabela 12 - Comparação das análises DSC dos LCMs derivados da MoLAM com os comerciais.	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de circulação de poço de Petróleo e Gás.	20
Figura 2 - Trajetória do fluido de perfuração.	23
Figura 3 - Broca de perfuração, jato de fluido e espaço anular.	23
Figura 4 - Perfil de um poço típico.....	24
Figura 5 - Esquema simplificado de fraturas em poços.....	30
Figura 6 - As principais funções do Fluido de Perfuração.	32
Figura 7 – <i>Moringa Oleífera</i> LAM.....	34
Figura 8 – Partes da <i>Moringa Oleífera</i> Lam (a) Vagem, (b) Caule, (c) Esponja da Vagem, ...	36
Figura 9 - Efeito da concentração de materiais de combate a perda quando estão selando fraturas	39
Figura 10 - Técnica de Tamponamento por Agentes de Plugueamento.....	41
Figura 11 - <i>Squeeze</i> de Tampão de LCM	41
Figura 12 - Etapas para a preparação dos materiais	47
Figura 13 – LCMs derivados da MoLAM; (A) vagem; (B) torta; (C) caule e (D) esponja da vagem.....	47
Figura 14 - visão da coluna acrílico montada.....	50
Figura 15 – Coluna de Acrílico vazia (1), válvula de saída do fluido (2), Válvula de controle de ar (3), Manômetro (4), Mangueira de ¼ (5).	51
Figura 16 - Etapas do procedimento de teste.....	53
Figura 17 - As curvas TG/DTG da vagem derivada da MoLAM.	55
Figura 18 - As curvas TG/DTG do caule derivado da MoLAM.	56
Figura 19 - Curvas TG e DTG para a torta derivada da MoLAM.....	56
Figura 20 – AS curvas de DSC da torta, vagem, caule e esponja da vagem derivados da MoLAM.....	58
Figura 21 – Micrografias obtidas por MEV para a vagem “in natura” (a) e (b) magnitude 250X, (c) magnitude 1000X.....	60
Figura 22 - Micrografias obtidas por MEV para caule “in natura” (a) magnitude 250X, (b) magnitude 1000X.	61
Figura 23 - Micrografias obtidas por MEV para a torta “in natura” (a) magnitude 250X, (b) magnitude 1000X.	61
Figura 24 - Micrografias obtidas por MEV para a esponja “in natura” (a) magnitude 30X, (b) magnitude 250X, (c) magnitude 1000X.	62
Figura 25 - Micrografias obtidas por MEV para o Fracseal (a) magnitude 30X, (b) magnitude	

250X, (c) magnitude 1000X.	63
Figura 26 – Sistema utilizando vagem e materiais comerciais.	64
Figura 27 – Sistema utilizando torta e materiais comerciais.	65
Figura 28 - Sistema utilizando caule e materiais comerciais.	66
Figura 29 – Comparação dos LCMs de mesh 100 e 200.	67
Figura 30 - Sistema composto com a vagem e o caule.	68
Figura 31 - Sistema composto com o caule e a torta.	68
Figura 32 – Sistema composto com a torta e a vagem.	69
Figura 33 – Resultados obtidos dos LCMs comerciais e dos derivados da MoLAM.	71
Figura 34 – Resultados do Caso#1 Sistema utilizando caule, <i>Fracseal</i> e <i>Soluflack</i>	72
Figura 35 - Resultados do Caso#2 Sistema utilizando caule, <i>Fracseal</i> e <i>Soluflack</i>	73
Figura 36 - Resultados do Caso#3 Sistema utilizando caule, <i>Fracseal</i> e <i>Soluflack</i>	73
Figura 37 – Resultados obtidos da comparação entre os Caso#1, 2 e 3 com os LCMs comerciais	74
Figura 38 - Caso#1 do sistema utilizando vagem e materiais comerciais.	75
Figura 39 – Caso#2 do sistema utilizando vagem e materiais comerciais.	75
Figura 40 – Caso#3 do sistema utilizando vagem e materiais comerciais.	76
Figura 41- Comparação dos resultados obtidos utilizando os LCMs vagem com os materiais comerciais.	77
Figura 42 – Resultados do Caso#1 sistema utilizando torta, <i>Fracseal</i> e <i>Soluflack</i>	77
Figura 43 - Resultados do Caso#2 Sistema utilizando caule, <i>Fracseal</i> e <i>Soluflack</i>	78
Figura 44 - Resultados do Caso#3 Sistema utilizando caule, <i>Fracseal</i> e <i>Soluflack</i>	78
Figura 45 – Comparação dos resultados obtidos dos LCMs torta, <i>Fracsel</i> e <i>Soluflak</i>	79
Figura 46 – Comparação da efetividade dos mesh 12, 32 e 100.	80
Figura 47 - Sistema composto com o caule e a esponja.	82
Figura 48 – Sistema composto com a combinação dos materiais esponja, torta e vagem.	83
Figura 49 – Sistema composto com o caule e a vagem.	84
Figura 50 – Sistema composto com o caule e a torta	85
Figura 51 - Sistema composto com o caule, esponja, vagem e a torta.	86
Figura 52 – Sistema composto com a esponja e a vagem.	87
Figura 53 – Sistema composto com a esponja e a torta.	88
Figura 54 – Sistema composto com a torta e a vagem.	89
Figura 55 – Solubilidade em HC1 15%.	90

LISTA DE SÍMBOLOS

API - American Petroleum Institute

DSC - Differential scanning calorimetry

ECD - Densidade equivalente de circulação de fluidos

FBA - Fluido base aquoso

HPHT - High Pressure High Temperature

HCl - Ácido Clorídrico

LTA – Laboratório Tecnologias Alternativas

LCM - *Lost Circulation Material*

MoLAM - *Moringa Oleífera* Lam

MEV – Scanning electron microscopy

PPB – Pound Per Barril

PC - Perda de circulação

PSD - Distribuição do Tamanho de Partículas

TG - Thermogravimetric analysis

UFS – Universidade Federal de Sergipe

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	19
3.1	PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO	19
3.2	SISTEMA DE CIRCULAÇÃO E SEGURANÇA DE POÇO	21
3.3	PERDA DE CIRCULAÇÃO	26
3.3.1	Classificação da severidade das perdas	27
3.3.2	Classificação das zonas de perda de circulação.....	30
3.4	FLUIDOS DE PERFURAÇÃO	31
3.4.1	Definição	31
3.4.2	Características e funções	32
3.4.3	Classificação dos fluidos de perfuração	33
3.5	MORINGA OLEÍFERA LAM	34
3.5.1	Origem da <i>Moringa Oleífera</i> Lam.....	34
3.5.2	Componentes da <i>Moringa Oleífera</i> Lam.....	35
3.6	TÉCNICAS E MATERIAIS DE COMBATE À PERDA DE CIRCULAÇÃO.....	37
A)	Materiais lamelares	38
3.7	ESTADO DA ARTE SOBRE MATERIAIS DE COMBATE À PERDA DE CIRCULAÇÃO.....	42
4	MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1	MATERIAIS.....	46
4.1.1	Preparo dos materiais derivados da <i>Moringa Oleífera</i> Lam.....	46
4.1.2	Determinação do diâmetro de partícula dos materiais derivados da <i>Moringa Oleífera</i> Lam	47

4.1.3	Caracterização dos materiais estudados	48
4.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO LCM.....	49
4.2.1	Preparo dos fluidos de combate a perda de circulação em base aquosa (FBA) .	49
4.2.2	Caracterização da faixa de concentração dos materiais fibroso derivado da <i>Moringa Oleífera</i> Lam incorporado aos fluídos de combate a perda de circulação em perfuração de poços de petróleo.....	50
4.2.3	Testes de eficiência dos materiais fibrosos derivados da <i>Moringa oleífera</i> Lam em uma coluna teste de acrílico.	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5.1	Caracterização dos LCMs	55
5.1.1	Análise Termogravimétrica (TG).	55
5.1.2	Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	58
5.1.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	59
5.2	AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO USANDO AREIA 20/40 COMO MEIO POROSO.....	64
5.2.1	Materiais individuais	64
5.2.2	Materiais combinados.....	67
5.2.3	Comparação dos resultados dos materiais individualmente e combinados.....	70
5.3	AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO USANDO BRITA COMO MEIO POROSO..	71
5.3.1	Materiais individuais	71
5.3.2	Comparação dos resultados dos materiais quando usadas individualmente.....	79
5.3.3	Materiais combinados.....	80
5.3.3.1	Caso#1: caule e esponja	81
5.3.3.2	Caso#2: esponja, caule e vagem.....	82
5.3.3.3	Caso#3: caule e vagem.....	83
5.3.3.4	Caso#4: caule e torta	84
5.3.3.5	Caso#5: caule, esponja, vagem e torta	85
5.3.3.6	Caso#6: Esponja e Vagem.....	86
5.3.3.7	Caso#7: Esponja e Torta	87
5.3.3.8	Caso#8: Torta e Vagem.....	88

5.3.4	Solubilidade em Ácido (HCl 15%)	89
6	CONCLUSÃO	90
7	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

A perfuração de poços de petróleo é uma operação que tem evoluído significativamente nas últimas décadas, onde novos materiais e tecnologias são propostas para lidar com as inúmeras condições de perdas de circulação. Para funcionar adequadamente, um fluido de perfuração precisa circular através do poço e voltar a superfície. Porém, durante o percurso podem ocorrer perdas de fluido e consequentemente perdas de circulação. Esse fenômeno é intensificado quando estão presentes zonas que possuem fraturas (Calçada et al., 2015; Mansour et al., 2017).

A perda de circulação (PC) pode ser definida como a perda de fluidos de perfuração na formação, e ocorrem frequentemente quando se perfuram em formações arenosas, cavernosas, vulgares, de alta permeabilidade, naturalmente fraturadas ou fraturas induzidas durante a perfuração. Consequentemente, as ocorrências de PC contribuem diretamente para o acréscimo dos custos das operações de perfuração, e assim, aumentando o tempo improdutivo da sonda (Al-Saba et al., 2014; Feng et al., 2016).

As ocorrências de perda de circulação, definidos como a perda de fluidos de perfuração para formação, são conhecidos como sendo um dos problemas mais importantes a serem prevenidos ou mitigados durante a fase de perfuração. A seriedade das consequências varia dependendo do agravamento da perda. Portanto, a gravidade pode ser classificada com base na taxa de perda em bbls/h, sendo classificada em infiltração (1 a 10 bbls/h), parcial (10 a 100 bbls/h) e grave (100 a 500 bbls/h). Ao identificar o grau de intensidade da perda, medidas corretivas adequadas podem ser tomadas para mitigar ou interromper os danos (Nayberg, 1987; Almagro et al., 2014; Miranda et al., 2017).

As perdas de circulação (PC) em perfuração de poços é um dos desafios mais difíceis enfrentados pelas empresas de petróleo e gás, gerando custos líquidos adicionais e, em circunstâncias extremas, comprometem a conclusão da perfuração (Ghalambor et al., 2014). Aproximadamente 1,8 milhão de bbls de fluidos de perfuração são perdidos por ano (Ofei et al., 2016). Consequentemente, as ocorrências de PC contribuem diretamente para o acréscimo dos custos das operações de perfuração e aumentando o tempo improdutivo (NPT) da sonda.

A indústria de fluidos de perfuração empenha-se para promover sistemas não

invasivos, e o mais comum entre eles é o uso de materiais de combate à perda de circulação, comumente chamado de *Lost Circulation Material (LCM)* (Nayberg, 1987; Almagro et al., 2014; Miranda et al., 2017). Os LCMs, geralmente são misturados com a fluido de perfuração para mitigar a perda de circulação e bloquear o caminho da fluido de perfuração na formação à medida que são encontradas durante a operação. Uma perda de retorno por filtração pode ser usualmente solucionada reduzindo-se a densidade equivalente de circulação do fluido (ECD) ou adicionando-se LCM (Ghalambor et al., 2014; Valverde et al., 2015; Feng et al., 2016).

Tradicionalmente tem-se aplicado o uso de materiais granulados, laminados, misto e fibrosos no Combate a Perda de Circulação (CPC), cujo objetivo consiste na deposição destes materiais sobre a zona onde se encontra a perda, formando uma espécie de rede fibrosa com alta resistência (Nelson, 2006). Nessa técnica, o contato dos materiais geralmente forma um reboco na parede do poço, que pode ser utilizado para selar formações fraturadas. Diversos autores vêm pesquisando LCMs, sendo que uma ampla gama de tratamentos e métodos preventivos usando material de perda de circulação foram experimentados e recomendados ao longo dos anos com diferentes graus de sucesso e eficiência (Almagro et al., 2014; Luzardo et al., 2015; Kulkarni et al., 2016; Miranda et al., 2017; Ramasamy et al., 2017). Como, o sistema proposto nesse trabalho contém partes derivadas da *Moringa Oleífera* Lam e os mesmos são materiais fibrosos e, portanto, apresentam potencial para serem utilizados como materiais de combate a perda de circulação em fluidos de perfuração.

A utilização de derivados de plantas na indústria de petróleo torna-se cada vez mais atrativo, por serem menos tóxico e renováveis. Agências de proteção ambiental regionais e globais da indústria de petróleo e gás vêm se adaptando a essas mudanças e começaram a implementar os regulamentos instruídos pelas agências reguladoras.

Os LCMs obtidos de materiais de resíduos agrícolas apresentam grande potencial de uso, quando adicionado em fluido de perfuração para controle de perda de circulação por infiltração (Amanullah, 2016). Segundo Fidelis et al. (2014) quando comparadas as fibras naturais com às fibras sintéticas e metálicas, as fibras naturais trazem um bom comportamento e assim, apresentam menor custo, são derivadas de fontes renováveis e são biodegradáveis. Portanto o sistema desenvolvido nesse trabalho contém partes derivadas da *Moringa Oleífera* Lam o quais são materiais fibrosos naturais tais como o caule, a vagem, a esponja da vagem e a torta o qual tem potencial para ser usado em fluido de perfuração para controle de perda de circulação em perfuração de poços de

petróleo. No presente trabalho descrevemos a caracterização e a avaliação de novos materiais de circulação perdida fibrosos derivados da MoLAM que são sustentáveis.

No Brasil, a *Moringa Oleífera* Lam (MoLAM) é encontrada na região Nordeste, devido à sua fácil adaptação climática, mesmo quando submetida a condições de seca e elevadas temperaturas, não prejudica seu crescimento e produção (Pereira et al., 2015). A MoLAM apresenta uma diversidade de usos, sendo um importante gênero alimentício, pois além de ser considerada uma planta altamente nutritiva, é possível aproveitar todas as suas partes, tais como: folhas, flores, frutos e o caule (Fuglie et al., 2001; Zhao et al., 2013; Lucena, 2016). Atualmente, vários trabalhos referentes a MoLAM vêm sendo publicados com o objetivo de conhecer o potencial desta planta, sendo os mais pronunciados na área de biodiesel, tratamento de água e alimentos (Bhuptawat et al., 2007; Zhao et al., 2013; De Andrade et al., 2016; Oyeyinka et al., 2016; Pereira et al., 2016). Embora, diversos trabalhos científicos já tenham citado a utilização do óleo derivado da MoLAM e outras partes da planta para diversas aplicações na indústria de petróleo e gás (Makkar et al., 1997; Ferreira et al., 2008; De Andrade et al., 2015; Lucena, 2015). não foram encontrados estudos recentes sobre seu uso como material de combate a perda de circulação em perfuração de poços de petróleo.

Neste trabalho, foi investigada a eficiência do uso de diferentes componentes da MoLAM (caule, vagem sem semente, esponja da vagem e torta) como material de combate à perda de circulação em fluido de perfuração aquosos.

Os fluidos contendo fibras foram testados usando uma coluna de acrílico para avaliar a eficiência de vedação do material fibroso. Os experimentos foram conduzidos em condições de 100 psi de pressão a temperatura de 27°C.

Para fluidos de perfuração base água, avaliou-se diferentes componentes da planta em quatro granulometrias distintas (mesh 12, 32, 100 e 200). A areia 20/40 foi usada como meio de filtrante, simulando a formação porosa com perda parcial por infiltração. Já a brita de classificação número 1 foi utilizada como meio filtrante simulando a formação de perda de circulação classificada como perda parcial ou grave.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o efeito dos materiais fibrosos derivado da *Moringa Oleífera* Lam, em diferentes concentrações no combate às perdas de circulação em perfuração de poços de petróleo com formações rochosas e permeáveis.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparo dos materiais derivados da *Moringa Oleífera* Lam, que serão utilizados nos fluidos;
- Determinar o diâmetro de partícula dos materiais derivados da *Moringa Oleífera* Lam;
- Realizar caracterização físico-química dos materiais utilizando técnicas como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Calorimetria Exploratória diferencial (DSC) e Análise Termogravimétrica (TG);
- Preparo dos fluidos de combate a perda de circulação em base aquosa (FBA);
- Caracterizar a faixa de concentração dos materiais fibrosos derivado da *Moringa Oleífera* Lam incorporado aos fluidos de combate a perda de circulação em perfuração de poços de petróleo;
- Verificar a eficiência dos materiais fibrosos derivados da *Moringa oleífera* Lam no combate a perda de circulação em uma coluna teste de acrílico;
- Realizar a comparação do material derivado da *Moringa Oleífera* Lam com os comerciais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste tópico serão abordados os assuntos referentes à temática da pesquisa, com conteúdo para explanação e entendimento dos resultados.

3.1 PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

Atualmente a perfuração de poços de petróleo e gás, utiliza a perfuração rotativa,

o qual é aplicado rotação e peso, promovendo-se a trituração da rocha com o auxílio de uma broca. O volume ao redor da coluna de perfuração é chamado de espaço anular. Para garantir o bom andamento da perfuração é necessário utilizar um fluido, que deve ser ajustado conforme as características do poço e da formação (pressão, temperatura e geologia da rocha) (Nayberg et al., 1986; Thomas, 2004; Ofei et al., 2017).

Os fluidos são normalmente injetado através da coluna de perfuração, com o auxílio de bombas, sendo que inicialmente, o fluido passa por dentro do tubo de perfuração e ao chegar ao ponto de perfuração, atravessa a broca, através de pequenos orifícios existentes. O mesmo é retornado à superfície sendo expelido por uma válvula, e atravessando a região anular existente entre a parede do poço e o tubo de perfuração, conforme ilustrado na Figura 1 (Ofei et al., 2017).

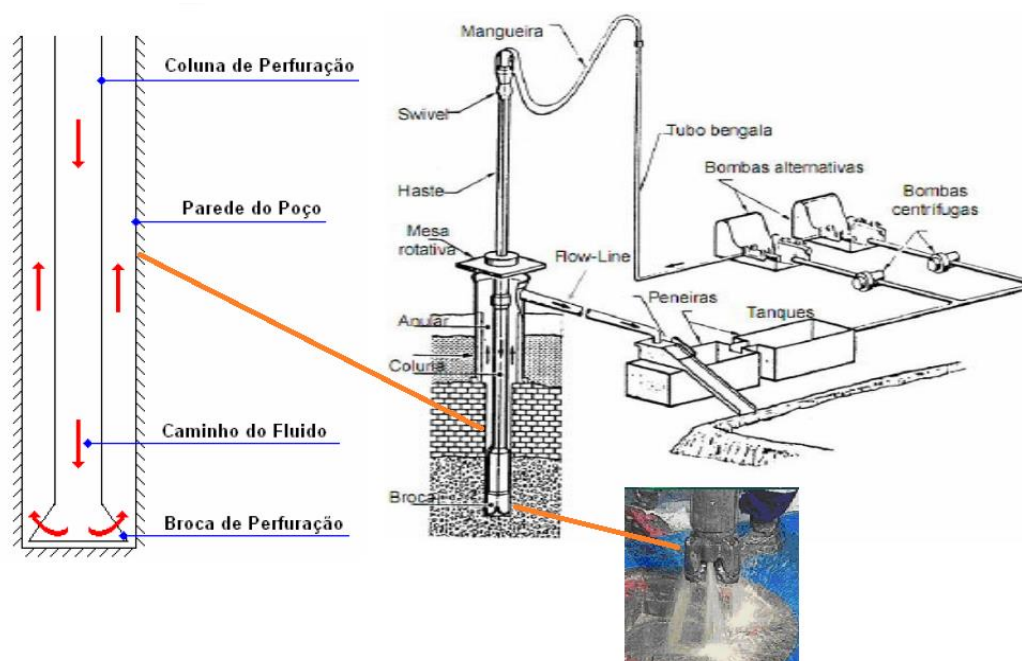


Figura 1 - Sistema de circulação de poço de Petróleo e Gás.
Fonte: Adaptada de Mansano (2004).

Os fluidos (lamas) de perfurações de poços de petróleo, tem a função de transportar à superfície, os cascalhos provenientes do processo de perfuração, suportar as paredes do poço e proteger a formação de produção contra danos, resfriar e lubrificar a broca e facilitar a aquisição de informações sobre a formação que está sendo perfurada (Alsabagh et al., 2014). Outra aplicação importante é a manutenção de um gradiente de pressão verificado ao longo do poço, em que as seções mais críticas são as zonas produtoras, onde a formação rochosa provavelmente será mais porosa. Portanto, o

equilíbrio entre a seção do poço e o reservatório é importante (Thomas, 2004).

Em profundidade estabelecida, a broca e o tubo de perfuração são removidos e logo em seguida uma nova coluna de revestimento é introduzida no poço, com diâmetro inferior ao da broca, iniciando assim, a etapa de cimentação. Ao realizar a cimentação uma nova coluna de perfuração é introduzida, de modo a dar continuação ao procedimento de perfuração. Este procedimento é repetido até a perfuração atingir a região de produção do reservatório quando então é feito os procedimentos de completação do poço. Esses procedimentos que acontecem durante a perfuração e, em especial, a interrupção do bombeamento do fluido são responsáveis por grandes flutuações na pressão do poço. A pressão é responsável por diversos problemas durante a perfuração, desde a ocorrência de danos à rocha reservatório até mesmo fraturas graves que podem levar à perda do poço (Nygaard et al., 2006; Almagro et al., 2014).

Em uma operação de perfuração *overbalanced* ou convencional, independentemente do tipo de fluido utilizado, uma das principais funções é manter a pressão anular de fundo de poço maior que a pressão da formação, salientando que a pressão dentro do poço não deve ultrapassar o valor da pressão de fratura da formação. A diferença de pressão pode ocasionar a penetração do fluido, que circula pela região anular, para dentro da formação rochosa, devido a abertura na formação. Isto pode resultar na perda de pressão hidrostática no fundo do poço e permitir o fluxo de fluidos da formação e possivelmente a perda de controle do poço (Ofei et al., 2017). O material removido durante a perfuração é substituído pelo fluido, que tem, além de outras funções, o papel de restabelecer o equilíbrio instalado anteriormente ao processo de perfuração. Caso esse equilíbrio não seja alcançado, algum tipo de ruptura (fratura – ruptura por tração ou colapso – ruptura por compressão) é gerada. A fratura produz a migração do óleo/gás da rocha reservatório em direção ao anular da coluna perfuração, caracterizando uma situação de taxa de retorno de fluido denominado de (*kick*).

3.2 SISTEMA DE CIRCULAÇÃO E SEGURANÇA DE POÇO

A exploração e produção de petróleo e gás envolvem a perfuração de poços os quais são perfurados usando uma técnica ou uma combinação de duas técnicas de perfuração com base na densidade do fluido de perfuração tais como perfuração sob balanceada convencional e perfuração de pressão gerenciada. Em uma perfuração sob

balanceada convencional, a pressão hidrostática da coluna de fluido de perfuração no poço é mais alta que a pressão dos poros da formação. Esta técnica é relativamente econômica, pois requer menos conhecimentos e detém de um controle mais fácil (Bennion et al., 1998; Rehm et al., 2013; Abimbola et al., 2015).

Ao contrário da perfuração sob balanceada convencional, a perfuração de pressão gerenciada envolve projetar a pressão hidrostática do fluido de perfuração para ser inferior à pressão dos poros da formação que está sendo perfurada, sendo que, durante a perfuração a densidade equivalente do fluido que esta circulação é utilizada para determinar as condições de pressão do fundo do poço. Esta técnica leva a uma redução na possibilidade de perda de circulação e danos à formação (Bennion et al., 1998; Luo et al., 2000; Gough et al., 2008; Abimbola et al., 2014).

O sistema de circulação de fluido de perfuração de poços de petróleo é constituído por equipamentos que permitem a circulação e o tratamento do mesmo. Sendo que, durante a operação o fluido é bombeado através da coluna de perfuração até a broca, e assim, o fluido é retornado até a superfície pelo espaço anular, trazendo-os cascalhos cortados pela broca. Na superfície, o fluido permanece dentro de tanques, após receber o tratamento adequado (Labenski et al., 2003; Fontana et al., 2007).

A trajetória dos fluidos durante as operações de perfuração está apresentada na Figura 2 . O fluido é armazenado em tanques, denominados de tanques de lama, onde também são preparados, sendo succionados por bombas alternativas para o interior da coluna de perfuração até passar pelos jatos de brocas como mostra a Figura 3. Em seguida o fluido retorna pelo espaço anular (espaço entre a coluna de perfuração e a formação geológica) carreando os cascalhos gerados pela perfuração. O fluido misturado aos detritos de perfuração, passa pela linha de retorno ou linha de fluxo, até as peneiras, onde são removidos os detritos. Em seguida, o fluido retorna para os tanques de fluido e o processo de circulação é reiniciado. Antes de ser reiniciado o fluido passa pela fase de tratamento ou condicionamento o qual consiste na eliminação de sólidos ou gás que se incorporam a ele durante a perfuração e, quando necessário, na adição de produtos químicos para ajustes de suas propriedades (Lummus et al., 1986; Labenski et al., 2003).

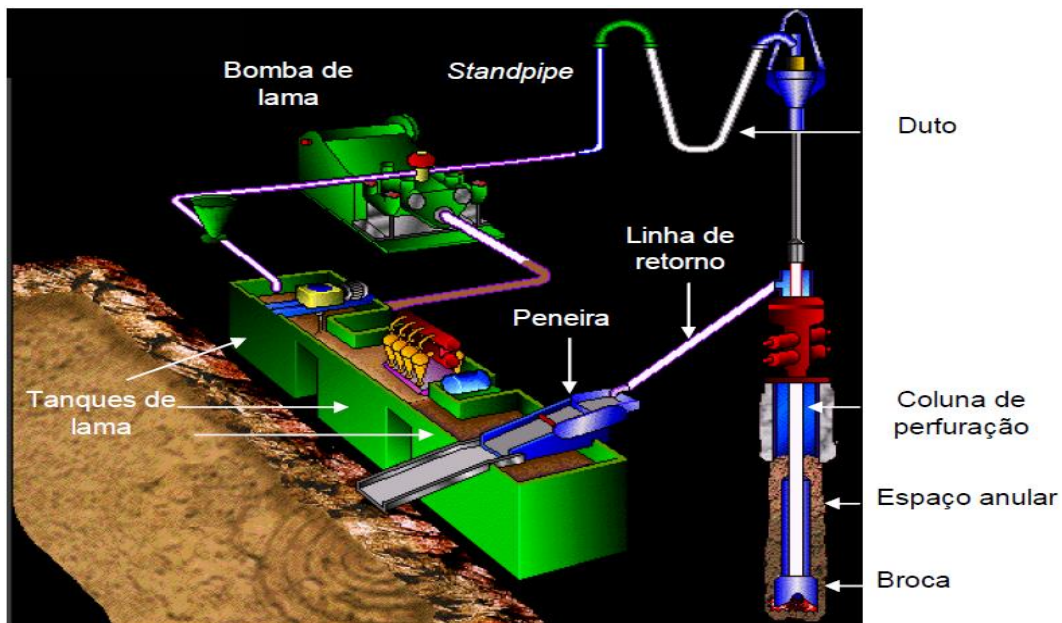


Figura 2 - Trajetória do fluido de perfuração.

Fonte: Amorim (2003).

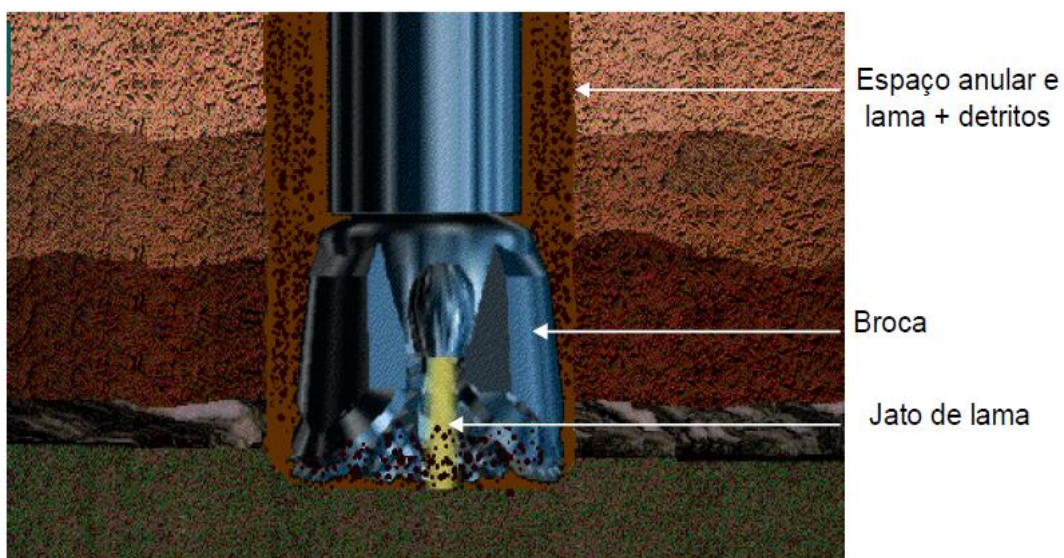


Figura 3 - Broca de perfuração, jato de fluido e espaço anular.

Fonte: Amorim (2003).

Sendo que, durante a perfuração, pode ocorrer a produção indesejada de fluido da formação, o qual pode ser controlado por fluido de perfuração contendo em sua formulação materiais de combate a perda de circulação ou por equipamento de sistema de segurança de controle de poço (ESCP) o qual tem a finalidade de controlar o influxo indesejado. Porém, atualmente, diferentes tipos de equipamentos, como o B.O.P (*Blowout preventer*), dão a possibilidade de reduzir a pressão hidrostática para valores abaixo da pressão do reservatório, o qual controla o influxo de fluido indesejado durante a

perfuração. Perfurar nessas condições tem vários benefícios, sendo que um dos mais importantes é reduzir os danos à formação rochosa, pois os fluidos de perfuração não penetram na formação, acarretando assim, em uma maior produção de óleo (Cai et al., 2012; Khakzad et al., 2013).

No entanto, em ambientes *offshore* que são muito arriscados para aplicar uma perfuração sub balanceada devido à pressão hidrostática comparativamente menor do que a pressão de formação, o qual, se não for realizada de maneira adequada pode ocasionar um *kick*. Sendo que, um poço de petróleo é perfurado em uma forma que se assemelha a um telescópio invertido com o diâmetro maior na parte superior. Primeiro, o orifício é perfurado muito pouco para que a carcaça do condutor possa ser instalada para estabilizar a terra perto da parte superior do poço e facilitar a perfuração do orifício da superfície conforme mostrado na Figura 4. O orifício de superfície é perfurado para a base da zona de água doce ou aquífero o qual é definido como condutor de superfície para então estabelecer um selo através da zona de água quando cimentado, sendo seguido por uma fase intermediária para ajudar a estabilizar as formações e isolar zonas com pressão anormal. Por fim, a fase de produção é perfurado ao longo do intervalo produtivo da formação (Abimbola et al., 2014; Abril et al., 2015).

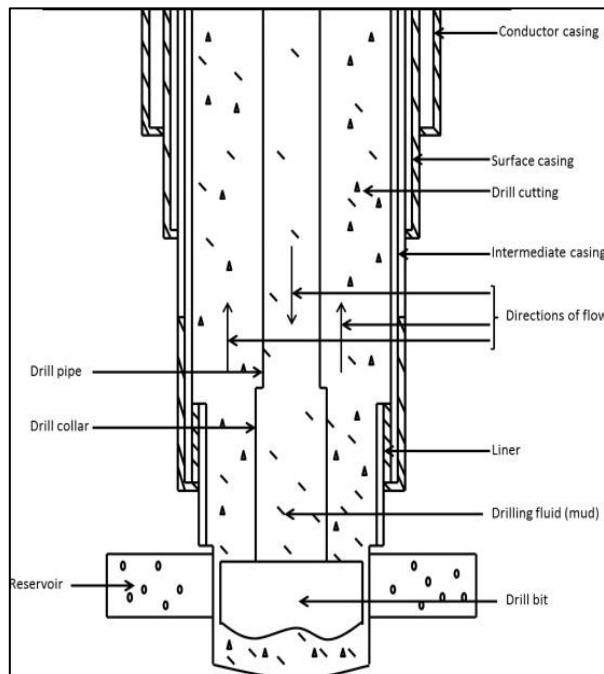


Figura 4 - Perfil de um poço típico.

Fonte: Adaptada de, Abimbola et al. (2015).

A pressão hidrostática da coluna de fluido de perfuração deve levar em consideração o equilíbrio correto entre a pressão no fundo do poço (BHP) e pressão de

fratura de formação (FFP) (Wu et al., 2016). Portanto as fórmulas para se determinar o BHP podem mudar de acordo com os tipos de operações de perfuração. Segundo Rehm et al. (2013) três tipos de operações de perfuração podem ser consideradas sendo elas não circulando, tropeçando e circulando. Sendo que, quando a bomba da plataforma não circula o fluido de perfuração, o BHP estático é definido conforme a Equação 1.

$$\mathbf{BHP}_{static} = P_{dfc} = \rho gh + P_b \quad (1)$$

Em que P_{dfc} é a pressão hidrostática da coluna de fluido de perfuração, ρ é a densidade do fluido de perfuração, g representa a aceleração gravitacional, h é a altura do fluido de perfuração e P_b é a contrapressão da cabeça do poço.

Quando a broca está tropeçando no poço, o BHP dinâmico é definido na Equação 2.

$$\mathbf{BHP}_{dynamic} = P_{sg} = \rho gh + P_{sg} + P_b \quad (2)$$

Em que P_{sg} é a pressão crescente causada por tropeços no poço.

Quando a bomba da plataforma está ligada e circula o fluido de perfuração, o BHP dinâmico é definido pela Equação 3.

$$\mathbf{BHP}_{dynamic} = P_{dfc} + P_{fc} = \rho gh + P_{fc} + P_b \quad (3)$$

Em que P_{fc} é a pressão de fricção devido ao bombeamento do fluido de perfuração através da corrente de perfuração.

O controle de poço durante a perfuração pode ser definido como uma cadeia de procedimentos e técnicas executadas com a finalidade de evitar *kicks* e os fluxos descontrolados de hidrocarbonetos, gás ou água saindo de um poço de petróleo (*blowouts*), sendo que, a segurança durante as operações de perfuração é o aspecto mais importante a ser considerado. Além disso, o risco associado é extremamente difícil de controlar, tais como os danos materiais, de recursos humanos e desastres ambientais, assim como a imagem da empresa que pode ser prejudicada caso alguns desses danos supracitados aconteçam (Bhandari et al., 2015). De acordo com Aird (2009), os procedimentos de métodos de controle podem ser divididos em três níveis.

- Controle primário: A pressão hidrostática exercida pelo fluido de perfuração deve ser mantida superior à pressão de poros das zonas produtoras, sendo que o *kick* ocorre quando esse primeiro controle não é satisfatório.
- Controle secundário: O conjunto de equipamentos de segurança a ser utilizado caso já tenha perdido o controle primário, é o controle secundário o qual deverá ser executado por um conjunto de equipamentos com a finalidade de evitar uma situação de *blowout*.
- Controle terciário: Após o controle secundário algum método especial deve ser introduzido para que o poço se mantenha controlado, caso contrário, um *blowout* irá ocorrer, perdendo assim o controle da formação.

3.3 PERDA DE CIRCULAÇÃO

A perda de circulação é um dos problemas mais desafiadores da indústria de petróleo, sendo definida como a perda de todo o fluido (sólidos e líquidos) para o interior da formação rochosa, ou seja, infiltração parcial ou total. Sendo que, atualmente as companhias de perfurações de poços estão focadas no mecanismos de perda de circulação com base nas propriedades das formações, sendo que, as classificações de perdas de fluidos são derivados de acordo com as formações rochosas, o qual constituem em perdas de circulação por fraturais induzidas ou por fraturais naturais (Messenger, 1981; Ghalambor et al., 2014). Perdas de circulação por fraturais naturais existem em diferentes direções nas rochas do reservatório, essas fraturas cruzam o poço durante a operação de perfuração e causam a perda de fluido de perfuração (Ghalambor et al., 2014). Portanto, essas fraturas, fazem com que os fluidos penetre na formação, levando a perdas de circulação do fluido, e assim, ocasionando um aumento do custo das operações de perfuração como no resultado do tempo não produtivo (NPT) (Feng et al., 2016).

O mecanismo de perda de circulação difere para cada formação, sendo que, a perda de circulação natural ocorre quando se é perfurado um poço onde a formação rochosa apresenta poros grandes, cavidades vulgares, cavernosas e fraturas naturais. Já no caso da perda de circulação artificial ocorre quando a pressão do fluido de perfuração exercida no poço excede a pressão de fratura, neste caso promovendo fraturas hidráulicas e induzidas (Howard et al., 1951; Wang et al., 2008).

As explorações *offshore* atualmente no Brasil são perfuradas a uma profundidade

média de 5500 m, sendo que em uma situação extrema pode superar 7000m. Este cenário inclui reservatórios vazios e zonas de pré-sais assim como calcários fraturados, cujas características geológicas de algumas dessas formações perfuradas podem apresentar fraturais naturais (Calçada et al., 2015).

A perda de fluido de perfuração é a causa mais importante de danos de formação durante o processo de perfuração de poços de petróleo, sendo que durante a perfuração, essa perda pode variar desde uma redução gradual do nível dos tanques de fluido até uma completa perda de retorno do fluido de perfuração (Xu et al., 2017).

As soluções para controle de perdas de circulação (LCSs) que existem na indústria de petróleo baseiam-se principalmente em partículas chamadas *Materiais para perda de circulação* (Lost Circulation Materials – LCMs) adicionadas aos fluidos de perfuração para tapar fraturas ou construir um reboco na zona de perda ou, pelo menos, mitigar as perdas de forma suficiente para recuperar a capacidade de circulação do fluido de poço, e assim continuar a perfuração. As soluções bem-sucedidas e atualmente usadas são baseadas em materiais fibrosos, capazes de criar um selo forte e suficiente para suportar pressão diferencial elevada (Al-Saba et al., 2014; Arshad et al., 2014; Feng et al., 2016).

No entanto, para solucionar efetivamente a perda de circulação com a técnica correta, é necessário saber a severidade das perdas, o tipo da zona de perda de circulação e o histórico da perfuração do poço momentos antes das perdas ocorrerem (Nygaard et al., 2006; Miranda et al., 2017).

3.3.1 Classificação da severidade das perdas

As perdas de circulação ocorrem nos poros ou fissuras das formações rochosas a serem perfuradas, às vezes referidas como "zonas de ladrões", sendo que, os tipos de perda de circulação são classificados de acordo com a sua taxa de gravidade ou perda (bbl/h) (Calçada et al., 2015; Miranda et al., 2017). A classificação relacionada à severidade da perda de circulação é mostrada na Tabela 1 e 2 de acordo com sua base.

Tabela 1 - Classificação da severidade da perda de circulação em fluido à de base água.

Fluido	Perda	Gravidade (bbl/h)	Cenários
Fluido à de base água	Pequeno (infiltração)	> 10	Qualquer tipo de formação (Areias permeáveis)
	Parcial (média)	25-100	Fraldas grossas (cascalho), naturais ou induzidas
	Grave (maciça)	100-500	Faturas, falhas, vugs, Cavernas, formações altamente permeáveis
	Total (completo)	Impossível manter o poço cheio	Faturas, falhas, vugs, cavernas

Fonte: Adaptada de (Nayberg et al., 1986; Calçada et al., 2015)

Tabela 2 - Classificação da severidade da perda de circulação em fluido de base oleosa.

Fluido	Perda	Gravidade (bbl/h)	Cenários
Fluido a base de óleo	Pequeno (infiltração)	> 10	Qualquer tipo de formação (Areias permeáveis)
	Parcial (média)	10-30	Fraldas grossas (cascalho), naturais ou induzidas
	Grave (maciça)	> 30	Faturas, falhas, vugs. Cavernas, formações altamente permeáveis
	Total (completo)	Impossível manter o poço cheio	Faturas, falhas, vugs, cavernas

Fonte: Adaptada de (Nayberg et al., 1986; Calçada et al., 2015)

Tanto para os fluidos base aquosa quanto para os de base oleosa, as perdas por infiltração podem se caracterizar como lentas, sendo em torno de 1 a 25 bbl/h para os de base água e de 1 a 10 bbl/h para os de base óleo. Às vezes, as perdas podem se apresentar na forma de filtração em formações altamente permeáveis, portanto, perdas por infiltração estão associadas à perda de fluido para o interior da formação rochosa, no qual uma fina camada de sólido na parede do poço, chamada de reboco, ainda não esteja formado. Em alguns casos este tipo de perda pode ser confundido também com o volume de cascalhos que são removidos do fluido na superfície. O aspecto mais importante é saber separar as perdas reais das falsas.

Já as perdas parciais são mais volumosas que as perdas por infiltração, sendo que usualmente em fluidos a base óleo esta perda é maior que 10 bbl/h e menor que 30 bbl/h, nos fluidos a base aquosa a perda fica torno de 25 a 100 bbl/h. As mesmas decisões tomadas para perdas por infiltração são tomadas para as perdas parciais, sendo que, o

custo do fluido se torna mais importante na decisão de se continuar a perfurar ou combater a perda. Pode-se então dar continuidade a operação, caso o fluido de perfuração não seja caro e se as pressões estiverem dentro do limite da operação (Almagro et al., 2014; Calçada et al., 2015).

Em casos onde o tipo de perda de circulação encontrada no poço é classificado como grave (maciça), o primeiro passo a ser dado é diagnosticar o problema, pois em alguns casos essa classificação pode ser confundida com perdas parciais, dependendo da quantidade de fluido perdido para formação. Perdas acima de 100 bbl/h para fluido de base água é considerado perda severa. Já para fluido base óleo acima de 30 bbl/h é o suficiente para ação de reparo. Neste caso é essencial saber determinar por que e onde a perda está ocorrendo, o tipo de formação e a profundidade da zona de interesse, tornando-se assim obrigatório recuperar a circulação total do fluido para então evitar uma possível prisão da coluna de perfuração, desmoronamento e até mesmo a ocorrência de influxo de fluidos da formação rochosa para o poço. Para que isso ocorra, pode ser necessário através de bombeamento de um fluido de baixa massa específica e monitorando os volumes necessários para preencher o poço continuamente (Almagro et al., 2014).

Se as perdas persistirem, é necessário o uso de materiais para combater à perda de circulação (*Lost Circulation Materials* – LCM), como material fibroso ou progredir para *plugs*, ou seja, sistemas de cimento sem adição de aditivos, ou fluido com baixa massa específica ou tixotrópicos que são utilizados para combater a perda de circulação se o tratamento convencional não for bem-sucedido. Segundo Calçada et al. (2015), em algumas situações devido à perda de pressão hidrostática, o poço deve ser monitorado continuamente para verificação da ocorrência de influxo de fluidos da formação rochosa para o poço.

Em caso de perdas de circulação total, o fluxo de retorno é interrompido imediatamente. Segundo Arshad et al. (2014), perdas totais normalmente se restringem a longas seções arenosas, grandes fraturas naturais e extensas fraturas induzidas ou formações cavernosas, onde qualquer severidade de perdas resulta em um determinado volume de fluido que nunca é recuperada. Isso causa um aumento direto no custo para as companhias de perfuração de poços de petróleo. Os custos são ainda maiores para os sistemas de fluido de base oleosa. Em caso de perdas totais, o custo do fluido pode até ultrapassar a taxa de aluguel diária para todos os outros serviços e equipamentos. O tratamento é similar ao utilizado para perdas severas. É importante também pode determinar o nível de fluido na região anular após o desligamento das bombas,

especialmente se a pressão de poros da formação e o gradiente de fratura são conhecidos. Sendo que neste caso, primeiramente são utilizados materiais convencionais para combater a perda de circulação, e caso seja necessário, o tratamento progride para a utilização de *plugs* nas zonas de perda.

3.3.2 Classificação das zonas de perda de circulação

Vários tipos de registros de imagem como acústicos, elétricos e ópticos têm sido utilizados para identificar as fraturas e assim caracterizar sistemas de fraturas naturais distinguindo-as das fraturas induzidas (Calçada et al., 2015; Vavik et al., 2016).

Portanto, a classificação generalizada para perda, podem ocorrer em formações naturalmente fraturadas, formações cavernosas ou formações altamente permeáveis devido às fraturas induzidas por perfuração conforme mostra a Figura 5, e detalhadas na Tabela 1 e 2. Em perdas pequenas ou parciais de zonas de circulação, o fluido continua a fluir para a superfície com pouca perda na formação, no entanto, na perda grave ou total de zonas de circulação, o fluido flui para a formação sem retornar à superfície. Se a perfuração continuar durante a perda de circulação total ou grave, é referida como “perfuração cega”, sendo que não é uma prática comum no campo, a menos que a formação acima da zona de perda seja mecanicamente estável, sem remoção de óleo e se for economicamente viável e seguro para a perfuração (Błaz, 2011; Calçada et al., 2015; Miranda et al., 2017).

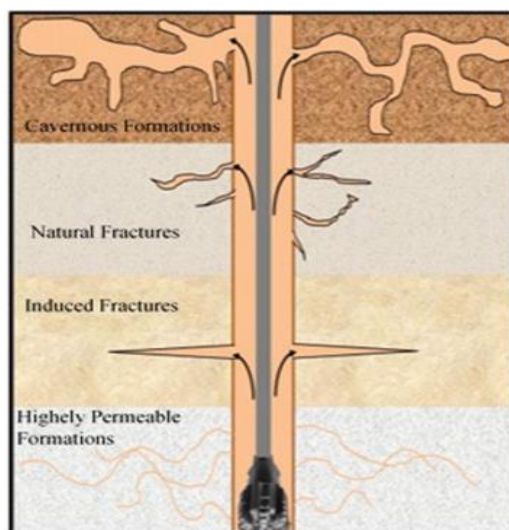


Figura 5 - Esquema simplificado de fraturas em poços.
Fonte: Calçada et al. (2015)

As perdas de fluidos em seções naturalmente fraturadas revelam-se particularmente desafiadoras porque, na maioria dos casos, a largura da fratura não é conhecida. Nesse tipo de perda, o fluido de perfuração ou pasta de cimento é perdido para formações rochosas, que apresentam estruturas altamente permeáveis, inconsolidadas, naturalmente fraturadas, cavernosas ou vugulares (Alsaba et al., 2014).

A perda de circulação através da criação de fraturas induzidas é provavelmente o problema de perda mais comum durante a perfuração. As fraturas induzidas podem ocorrer em qualquer tipo de formação, principalmente as que possuem características frágeis, tais como folhelhos, quando a pressão do poço é alta o suficiente para rachar a formação causando esse tipo de fratura. Os resultados de estudos de caso de campo revelam que esse tipo de perda geralmente ocorre devido ao peso inapropriado do fluido baseado em uma janela operacional imprecisa (Ghalambor et al., 2014).

Segundo Vavik et al. (2016), as zonas de perda de circulação podem ser classificadas em cinco categorias: formações inconsolidadas, formações altamente permeáveis ou porosas (por exemplo, areias maciças, leitos de cascalho, depósitos de recife, etc.), fissuras ou fraturas naturais, fraturas verticais ou horizontais induzidas, formações cavernosas ou vugulares (por exemplo, calcário e dolomito).

3.4 FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

3.4.1 Definição

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e até gases. Os mesmos desempenham uma série de outras funções, além de limitar o potencial de perda de petróleo e gás, estabilizando o poço durante o processo de perfuração e limitando o potencial de danos colaterais na zona de produção (Feng et al., 2016). Esse tipo de fluido deve desempenhar uma série de funções e sua composição deve ser cuidadosamente monitorada e analisada durante as operações de perfuração (Harrison, 2017).

Portanto, o controle preciso e a previsão de um ambiente de janela de densidade de circulação equivalente (ECD), são essenciais para minimizar os riscos de perda de circulação em zonas de baixa pressão e potenciais riscos de segurança (explosão incontrolável) na zona de alta pressão (Feng et al., 2016; Lu et al., 2017).

3.4.2 Características e funções

Os fluidos de perfuração apresentam diversas funções durante a operação de perfuração, portanto, é desejável que o fluido apresente as seguintes características para um bom desempenho: ser estável quimicamente, estabilizar as paredes do poço mecânica e quimicamente, facilitar a separação dos cascalhos na superfície, manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso, ser inerte em relação a danos às rochas produtoras, aceitar qualquer tratamento, físico e químico, ser bombeável, apresentar baixo grau de corrosão e de abrasão em relação à coluna de perfuração e demais equipamentos de sistema de circulação, facilitar as interpretações geológicas do material do poço e apresentar custo compatível com a operação (Souza, 2007; Gray et al., 2014).

Os fluidos de perfuração precisam ser desenvolvidos de modo a consentir uma perfuração rápida e segura. Segundo Souza (2007), os fluidos de perfuração possuem, basicamente, as seguintes funções conforme mostra a Figura 6: facilitar a cimentação e a completação do poço, manter a estabilidade da formação, fazer o controle de filtrado, transmitir potência hidráulica para equipamentos e broca, minimizar os danos à formação produtora, sustentação das paredes do poço, lubrificar e resfriar a broca, limpar o fundo do poço dos cascalhos gerados pela broca e transportá-los até a superfície.

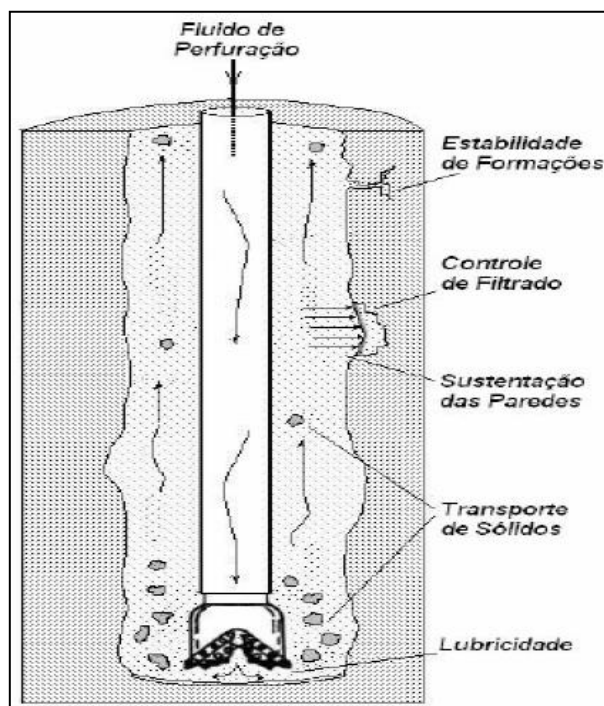


Figura 6 - As principais funções do Fluido de Perfuração.
Fonte: Souza (2007).

O fluido de perfuração deve controlar as pressões da formação (Pf). Segundo Gray et al (2014), os fluidos devem exercer pressão hidrostática (Ph) sobre as formações, de modo a evitar o influxo de fluidos indesejáveis para o poço, obedecendo alguns critérios como:

- Ph = Pf: equilíbrio desejável, porém perigoso;
- Ph < Pf: podem ocorrer desmoronamentos, estreitamento do poço e *kick*;
- Ph > Pf: situação normal para estabilização do poço, o filtrado invade a formação e forma o reboco;
- Ph >> Pf: danos à formação pelo excesso de pressão do fluido, podem ocorrer fraturamento da formação e perda de circulação.

A pressão hidrostática que o fluido exerce sobre a formação é função da massa específica do fluido (ρ) e da profundidade vertical do poço (Δh), conforme mostra a Equação 4.

$$Ph = 0,17\rho\Delta h \quad (4)$$

3.4.3 Classificação dos fluidos de perfuração

Existem três tipos de fluidos de perfuração e sua classificação é feita em função de sua composição, ou seja, com o componente principal que constitui a fase contínua ou dispersante. Esses componentes podem ser classificados em fluidos à base de água, fluidos à base de óleo e fluidos à base de ar ou gás.

Atualmente, existem novos fluidos de perfuração biossintéticos que vêm ganhando espaço no mercado, em que a base é constituída por moléculas orgânicas sintéticas obtidas a partir de matérias primas renováveis. A formulação destes fluidos inclui ésteres, éteres, polioleofinas, glicóis, glicerinas e glicosídeos. Estes fluidos a base óleo biossintéticos são atóxicos, biodegradáveis, e desempenhar as mesmas funções dos fluidos à base de óleo sintéticos convencionais (mineral, diesel e etc) e podem ser utilizados em situações em que os fluidos à base de água sofrem limitações (Gray et al., 2014).

3.5 MORINGA OLEÍFERA LAM

3.5.1 Origem da *Moringa Oleífera* Lam

A *Moringa Oleífera* Lam (MoLAM) pertencem à família das *Moringácea*, encontradas de forma distribuída nas regiões tropicais do mundo, especialmente, nos continentes Asiático e Africano sendo nativa do norte da Índia (Barreto et al., 2009). Adaptam-se nas mais variadas regiões ecológicas como subtropicais secas e úmidas, tropicais secas e florestas úmidas e assim florescendo e produzindo frutos até mesmo nas regiões mais seca a qual se desenvolve melhor crescimento quando a temperatura varia de 26 a 40 °C e com precipitação anual de pelo menos 500 mm (Dalla Rosa, 1993).

É uma árvore de pequeno porte com crescimento rápido podendo atingir até 3,5 m de altura em apenas 9 meses e chega a alcançar 12 m de altura quando adulta conforme mostra a Figura 7. Possui uma copa aberta e habitualmente um único tronco (Jahn, 1988; Oliveira Junior et al., 2013). Esta planta atualmente se tornou típica em muitas regiões tropicais sendo uma importante cultura em países como Etiópia, Filipinas, Sudão, África Oriental, Ocidental e do Sul, Ásia tropical, América Latina, Caribe, Flórida, Ilhas do Pacífico, Ilhas Caribenhas, Peru, Paraguai e Brasil (Oliveira Junior et al., 2013).



Figura 7 – *Moringa Oleífera* LAM.
Fonte: LTA-UFS

Esta espécie foi introduzida no Brasil por volta de 1950 sendo conhecida também como lírio-branco, quiabo de quina ou simplesmente moringa. Caracteriza-se por ser

bastante tolerante à seca, sendo possível seu cultivo em regiões áridas e semi-áridas, as quais possuem precipitações anuais abaixo de 300 mm (Lim, 2012; Pereira et al., 2015). Não carece de fertilidade, desenvolvendo-se em solos pobres e começa a florir 8 meses depois do plantio. Após o plantio, as taxas de produção são verificadas dentro de 3 anos produzindo de 1.000 – 1.600 vagens por ano com uma média de 24.000 sementes. A poda frequente das copas irá manter e aumentar o crescimento das folhas e o controle da altura para facilitar a colheita das vagens (Fuglie, 1999; Fahey, 2005; Pereira et al., 2016). No Brasil é encontrada na região Nordeste, principalmente nos estados do Maranhão, Piauí e Ceará. É uma espécie alógama, que se propaga por sementes e estacas, mesmo em solos pobres. Não necessita muitos cuidados, sendo dessa forma uma cultura bastante viável economicamente para o Brasil.

A MoLAM é amplamente utilizada em diversas áreas como na medicina, na agricultura, na alimentação, nas indústrias produtoras de cosméticos, e até mesmo como lubrificante e biocombustível (De Andrade et al., 2015). Trata-se de uma planta de múltiplo uso, onde quase todas as suas partes são ditas como sendo de valor nutritivo, medicinal e industrial (Makkar et al., 1997; Ferreira et al., 2008; Lucena, 2016).

3.5.2 Componentes da *Moringa Oleífera* Lam

A *Moringa Oleífera* Lam é composta pelas seguintes partes a vagem, o caule, a esponja da vagem, a casca da semente, a torta entre outras, a qual têm sido empregadas há muito tempo para nutrição humana e animal (Jung, 2014). Na Figura 8 podem ser vistos os componentes derivados da MoLAM usados neste projeto.



Figura 8 – Partes da *Moringa Oleífera* Lam (a) Vagem, (b) Caule, (c) Esponja da Vagem, (d) casca da semente, (e) Torta.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Esta árvore apresenta um fruto seco do tipo cápsula loculicida, com três valvas de coloração castanho-médio. O fruto é uma espécie de vagem normal, com comprimento muito variável e podendo ser classificado em três grupos: vagens curtas (comprimento variando entre 15 a 25 cm); vagens médias (comprimento variando entre 25 a 40 cm) e vagens longas (comprimento variando entre 50 a 90 cm). As vagens contêm de 10 a 20 sementes armazenadas em uma polpa branca (Rangel, 1999). As sementes são globóides e aladas, de cor castanho-médio, com alas castanho-claro, bitegumentadas e exabumíneas, contendo em seu interior uma massa branca e oleosa. São inicialmente verdes claros e finos e se tornam mais largos, à medida que vão evoluindo de verde escuro até marrom quando maturados fisiologicamente (Araújo, 2010; Gualberto et al., 2015; Pereira et al., 2016).

Os frutos quando maduros possuem uma polpa branca, já quando está totalmente seco o mesmo apresenta uma polpa de cor marrom claro também conhecido como esponja da vagem.

As sementes possuem cerca de 1,04 cm de comprimento e são acondicionadas no interior das vagens ou frutos em conchas fechadas trialadas que se abrem quando maduras e o núcleo é rodeado por um tegumento que possui três asas com aparência de papel fino e transparente (Gualberto et al., 2015).

O caule da *Moringa Oleífera* Lam é mole, com o peso de 0,19 g/cm³, poroso e amarelado sendo usado principalmente para a fabricação de papel. A madeira da MoLAM

apresenta casca espessa, mole e reticulada, de cor pardo clara externamente e, internamente, cor branca com lenho mole, poroso e com presença de látex. O mesmo contém uma grande quantidade de mucilagem e é rica em arabinose, galactose e ácido glucurônico (Lorenzi et al., 2002).

Levando-se em consideração que depois da extração do óleo da semente de MoLAM, obtém-se um resíduo denominado de torta ou borra, constituído de tegumento também chamado de polpa o qual não é toxica (Oliveira et al., 2012). A polpa é produzida na forma de lascas consistentes, de espessura considerável e cor marrom, podendo ser aproveitado como condicionador de solo e fertilizante ou mesmo como suprimento alimentar animal (Lucena, 2016). Por estas razões, algumas partes desta planta chamaram muita atenção e foram estudadas por suas diversas utilizações e incluindo-a em fluido para controle de perda de circulação.

3.6 TÉCNICAS E MATERIAIS DE COMBATE À PERDA DE CIRCULAÇÃO

Ainda que, utilizando as melhores práticas de perfuração, perdas de circulação podem ocorrer e na tentativa de reduzi-las a um nível aceitável são utilizados materiais de controle de infiltração, materiais LCM e até cimento, associado às técnicas de combate à perda de circulação. No entanto, os materiais de combate a perda de circulação geralmente são misturados com o fluido de perfuração para selar as zonas de perda à medida que são encontradas durante a perfuração, sendo que, uma perda de retorno contínua é um indicativo de perda por filtração ou parcial e a mesma pode ser usualmente solucionada reduzindo-se a densidade equivalente de circulação do fluido (ECD) ou adicionando-se materiais de combate à perda de circulação (Ghalambor et al., 2014; Valverde et al., 2015; Feng et al., 2016).

Segundo Valverde et al. (2015), de acordo com sua natureza física e mecanismo de atuação, os materiais de combate à perda de circulação geralmente são classificados em cinco diferentes grupos: materiais granulares, lamelares, fibrosos, mistos e partículas encapsuladas de absorção.

A) Materiais lamelares

São materiais planos formados de finas camadas, escamas, flocos ou folhas que podem ou não possuir algum grau de rigidez. Eles também são projetados para preencher espaços vazios, formando uma espécie de rede na face da formação rochosa (Nelson, 2006). Materiais mais espessos são mais eficazes em cascalhos compactos e em fraturas de até 0,10 polegadas. Já os mais finos são eficazes em cascalhos médios e fraturas de até 0,06 polegadas (Ian L Everhard et al., 2016). Quando são aplicados em perdas de circulação em formações rochosas permeáveis e porosas os resultados são mais eficazes (Luzardo et al., 2015).

Segundo Clark Jr Roscoe (1957), os materiais lamelares, ou seja, os materiais formados em folhas finas ou flocos tais como a mica, celofane, farelo de trigo, cascas de algodão, cascas de arroz, LCM de borracha, papel desfiado, serradura e óxido de ferro, são materiais usados com uma gama de tamanhos de partículas em fluido de perfuração para controle de perda de circulação.

B) Materiais granulares

Os primeiros esforços para tratar perdas de circulação em perfuração de poços de petróleo pela adição de materiais granulares ao fluido de perfuração foi introduzido por Chapman em 1890, desde então, os LCMs foram amplamente utilizados para este propósito (Valverde et al., 2015).

Os materiais granulares têm o formato característico esférico e são rígidos. Eles formam dois tipos de pontes de preenchimento na formação rochosa: uma na sua superfície e outra dentro da matriz da rocha. A eficiência desses materiais depende primeiramente da distribuição apropriada do tamanho de partícula. Partículas maiores irão atuar em grandes vazios encontrados na formação rochosa, e partículas menores irão preencher, como uma ponte, os espaços vazios menores (Gatlin et al., 1961; Xue et al., 2015). Esse processo continua até que os espaços vazios na rocha se tornem menores que os sólidos presentes no fluido de perfuração.

C) Sistema misto

Formado pela combinação de materiais granulares, floculados e fibrosos, promovendo o aumento da eficiência no controle de perda, pois o mesmo pode fornecer

uma gradação de tamanho de partícula e tipo de atuação em zonas de perda diferentes. Nessa técnica, o contato de dois ou mais matérias geralmente forma um reboco na parede do poço, que pode ser utilizado para selar formações fraturadas (Droger et al., 2014).

Portanto, para descrever os materiais mistos, Howard et al. (1951), realizaram uma série de experimentos comparando a capacidade de selamento de fraturas variando vários tipos de materiais de combate à perda de circulação aplicando-os em fluido de perfuração, como ilustra a Figura 9. Os mesmos concluíram que materiais mistos são mais efetivos que materiais lamelares ou granulares ao selar fraturas maiores.

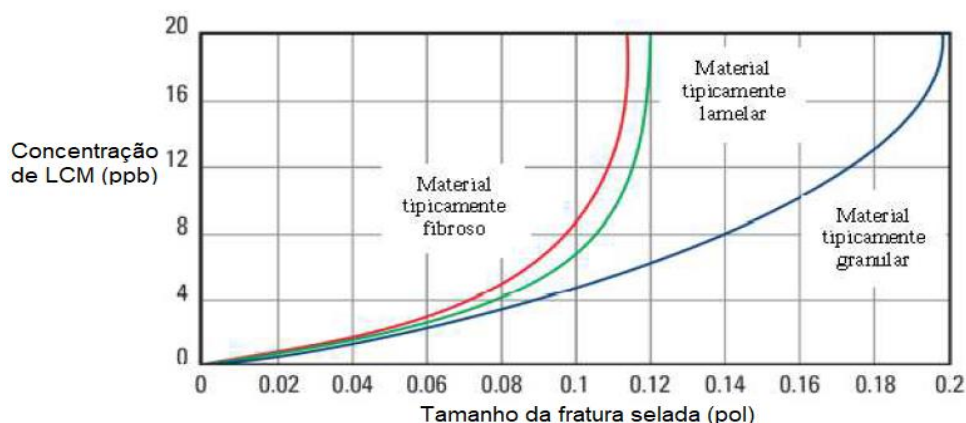


Figura 9 - Efeito da concentração de materiais de combate a perda quando estão selando fraturas
Fonte: adaptado de, Howard et al. (1951)..

D) Partículas encapsuladas de absorção

Consistem em partículas bentônicas encapsuladas por um revestimento polimérico insolúvel em água, por meio de qual uma pequena abertura é perfurada. Quando a bentonita encapsulada é bombeada para o poço, água proveniente do fluido infiltra para dentro do buraco da cápsula. A bentonita incha e rompe o revestimento polimérico, sendo que a bentonita inchada então sela os vazios na zona de perda de circulação (Walker, 1987).

E) Materiais fibrosos

Os materiais fibrosos são os melhores para controlar perdas de circulação em formações rochosas porosas e altamente permeáveis, porque os mesmos são capazes de formar uma película em forma de rede nas aberturas dos poros. Os materiais fibrosos possuem um pequeno grau de rigidez e são descritos como materiais capazes de formar

uma ligação ou uma rede na superfície, ou no interior das formações onde ocorrem as perdas de circulação. Logo, a película formada reduz o tamanho dessas aberturas na formação, e assim, permitindo que partículas presentes no fluido rapidamente se depositem, formando um reboco. Os fluidos carregados de fibra podem demonstrar boas propriedades de enchimento de fratura, sendo que, o tamanho e o formato das partículas são fatores de maior relevância em seu desempenho do que a composição do material em si. Os materiais fibrosos mais eficazes são capazes de selar formações arenosas e leitos de cascalho compactos (Luzardo et al., 2015).

As fibras naturais podem ser obtidas a partir de plantas ou animais. As fibras à base de plantas, como o cânhamo, o kenaf, o linho, o bambu, a juta e o sisal ganharam muito interesse comercial, e eles foram utilizados como material de combate à perda de circulação. As fibras obtidas a partir de fontes animais, como seda e lã, também são utilizadas como agentes de reforço. Os polímeros biodegradáveis, tais como ésteres de celulose, polihidroxialatosatos e polímeros de amido, podem ser reforçados com estas fibras de base biológica para produzir compostos ecológicos ambientalmente benéficos (Droger et al., 2014; Fidelis et al., 2014).

Acrescentando aos tipos de materiais de combate à perda de circulação já utilizados é listado por Ramos (2012) quatro técnicas utilizadas em campo: solução por hesitação, tamponamento por agentes de plugueamento no fluido, bombeio sob pressão de material em uma formação (*Squeeze*) de Tampão de LCM e *Squeeze* com cimento para perdas severas e cimentos (Puro, prolongado, tixotrópico).

TÉCNICA 1: Solução por Hesitação

Incide na retirada de determinados tubos da coluna de perfuração para observar por gravidade a perda de circulação. Sendo que, este procedimento pode resolver as perdas parciais, devido às fraturas induzidas verticais, pois se a pressão é liberada, a fratura irá fechar e curar, e resistirá praticamente a mesma pressão que antes de ser fraturado. Essa técnica pode ser uma alternativa para retirar toda a coluna, enquanto se prepara um combate mais efetivo.

TÉCNICA 2: Tamponamento por Agentes de plugueamento no Fluido

LCMs utilizados para controlar perdas por infiltração e perdas parciais, tais como serragem, calcário, plástico, casca de pino. Essa técnica pode ser bem sucedida em

todos os tipos de zona de perda. O tamanho e a concentração do material utilizado deve ser ajustado para a gravidade das perdas. A Figura 10 ilustra essa técnica, onde é possível observar materiais LCM na frente da fratura.

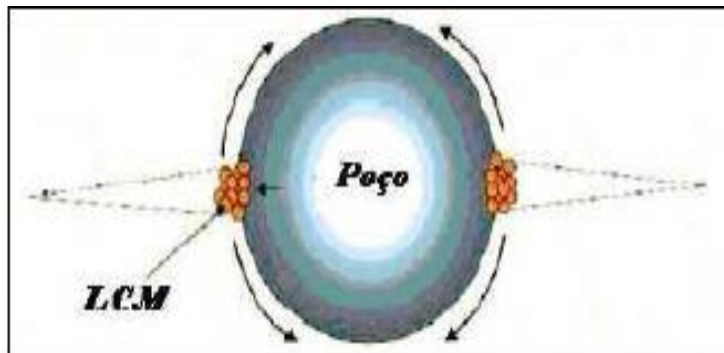


Figura 10 - Técnica de Tamponamento por Agentes de Plugueamento.
Fonte: Ramos, 2012.

TÉCNICA 3: *Squeeze* de Tampão de LCM e *Squeeze* com cimento para perdas severas

O *Squeeze* de Tampão de LCM consiste em squeezezar para a zona de perda um tampão carregando diferentes tipos de materiais de perda de circulação. O tipo e o tamanho do material de combate à perda dependerão da gravidade da mesma. Esta técnica é ilustrada na Figura 11. O *Squeeze* com cimento para perdas severas é uma técnica que podem converter uma solução temporária para um permanente. A desidratação da pasta de cimento deixa a fratura plugada por conta do alto teor de sólidos e a cura de cimento vai sanar a perda permanentemente.

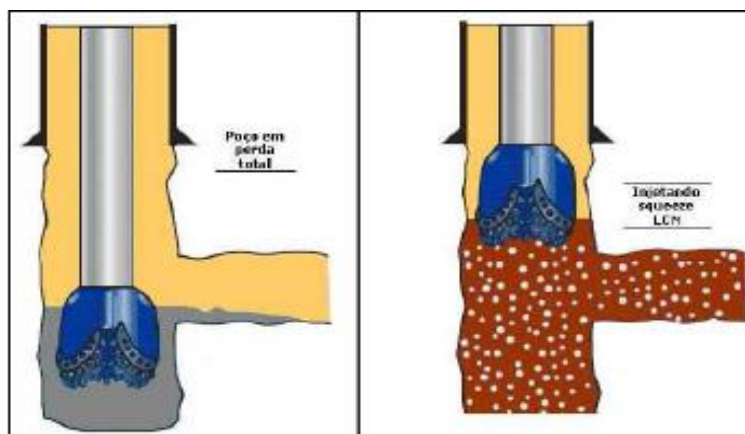


Figura 11 - *Squeeze* de Tampão de LCM .
Fonte: Ramos, 2012.

TÉCNICA 4: Cimentos (Puro, prolongado, tixotrópico)

A facilidade de alterar as propriedades da pasta de cimento torna essa técnica uma ferramenta muito útil para combater a perda de circulação. Podendo ser usada em caso de perdas completas de cascalhos, fraturas horizontais e verticais, naturais ou induzidas. São utilizados sistemas de cimento leve, cimento-bentonita ou atapulgita, cimento Portland, este último é o mais utilizado associado com LCM, areia de faturamento hidráulico e ele puro.

3.7 ESTADO DA ARTE SOBRE MATERIAIS DE COMBATE À PERDA DE CIRCULAÇÃO

Ghosh et al. (1999) escreveram sobre a experiência de perfuração horizontal no reservatório de calcário de Panna Field, na Índia. Os autores indicaram que materiais lamelares de carbonato de cálcio em flocos foram bombeadas com sucesso para combater os problemas de perdas de circulação o qual usou uma concentração de 20 ppb para minimizar a invasão de filtração.

Whitfill (2008) recomenda-se a concentração de 20 ppb de LCM composto de carbono de cálcio de tamanho fino e grafite ao fluido de base oleosa para controle de perda de circulação em poços de petróleo.

Fang et al. (2009) avaliaram a aplicação do LYSORB 218 como partículas encapsuladas de absorção para controle de perda de circulação em perfuração de poços de petróleo o qual é composto por um polímero superabsorvente, biodegradável, capaz de absorver várias vezes o seu peso na água do mar. O LYSORB 218 foi avaliado em fluido a base aquoso em aplicações offshore. O melhor resultado foi obtido na concentração de 20 ppb, nesta concentração o LCM demonstrou que tem eficiência no controle de perdas de circulação em fraturas induzidas e naturais.

Allin et al. (2010), avaliaram o BARACARB 600 como um material granular de combate a perda de circulação. As partículas de LCM foram adicionadas a um fluido a base aquosa o qual obteve melhores resultados com uma concentração de 80 ppb. O material de combate a perda BARACARB 600 é um carbonato de cálcio de tamanho comercialmente disponível da Halliburton Energy Services. O BARACARB 600 podem

ser usados para bloquear o fluxo de fluido em fraturas, vugs ou fissuras na coluna de cimento e na parede do poço.

Scott et al. (2012) utilizaram um fluido base aquoso contendo uma mistura de LCM com 30 ppb de RGM e 20 ppb de mármore. As adições dos LCMs foram realizadas diariamente durante 8 dias de perfuração, o qual obteve um controle das perdas de circulação com sucesso.

Atualmente o carbonato de cálcio é um dos LCM mais utilizados em fluido de perfuração, e sua principal vantagem é o fato de ser solúvel em soluções ácidas, permitindo a sua remoção das paredes do poço. No entanto, as partículas de carbonato de cálcio apresentam resistência à compressão relativamente baixa e quando usadas isoladamente não obtém uma capacidade de vedação eficaz. Para melhorar o seu desempenho Fekete et al. (2013) fez aplicação do LCM de carbonato de cálcio sob a forma de misturas com outro tipo de partícula, como a grafite, que apresenta melhores propriedades mecânicas. Os autores obtiveram melhores resultados com uma concentração de 25 ppb.

Al-Saba et al. (2014) avaliaram três tipos de LCM para selar fraturas, o desempenho do LCM convencional comumente utilizado foi avaliado em diferentes concentrações e PSD. Foram realizados ensaios com os três tipos de LCM tais como grafite, carbonato de cálcio CaCO_3 , e fibras celulósicas, foram testadas individualmente em duas concentrações diferentes (15 e 50 ppb). As concentrações obtidas foram de 30 ppb para o grafite, 33 ppb para o carbonato de cálcio CaCO_3 e 50 ppb de concentração de fibras celulósicas.

Ziheng Yao et al. (2015) estudaram um LCM de esponja reticulada (tamanho como fino, médio e grosseiro) como material fibroso, o qual consiste em muitas peças pequenas de pedaços de borracha de espuma ou cunhas de espuma. Os resultados mostraram a capacidade de vedação e bloqueio das perdas de fluido com concentrações de 50 a 80 ppb de esponja reticulada ao fluido base aquoso.

As partículas granulares quando usadas isoladamente no caso de formações altamente permeáveis com grandes fraturas ou vugs, podem muitas vezes falhar, visando estes problema Luzardo et al. (2015) utilizaram uma combinação de LCM de diferentes tipos de materiais, como materiais granulares, flocos e fibrosos, que penetrarão em fraturas, formações vugulares e zonas extremamente permeáveis e selarão de forma eficaz obtendo um controle efetivo de fluido indesejado.

Razavi et al. (2016) avaliaram o grafite como material granular no combate a

perda de circulação. O LCM foi testado em uma amostra fraturada de arenito com uma concentração de 30 ppb em um fluido a base aquoso. Mostrando-se a capacidade de vedação e bloqueio do fluido no tempo de 30 minutos.

Segundo Ian L Everhard et al. (2016), as cascas de nozes, xisto expandido, carbonato de cálcio, coque de petróleo e grafite são materiais granulares de alta resistência e rigidez com uma gama de tamanhos de partículas que podem ser otimizados para preencher fraturas de diferentes tamanhos e formações de alta porosidade.

Kulkarni et al. (2016), apontaram que um tamanho selecionado do LCM em uma concentração específica pode resolver o problema de perda de circulação. Os autores obtiveram resultados com uma concentração de 40 ppb de fibras de polipropileno o qual foram adicionados ao fluido de base oleosa e a mistura foi cuidadosamente misturada com uma espátula. A mistura uniforme foi então vertida em uma célula de vidro, sendo testado no meio filtrante brita, o qual foi mantido durante 30 minutos em uma pressão de 100 psi.

Amanullah (2016), desenvolveu um LCM natural fibroso derivados da semente de data natural *eco-friendly* como matéria-prima para ajudar a combater problemas de perdas de circulação severa encontrados durante a perfuração e cimentação de poços de petróleo. Foram utilizadas duas concentrações diferentes, 10 ppb e 30 ppb, em cada barril de fluido para avaliar o desempenho de selagem e bloqueio. Os testes foram realizados incorporando LCM com partículas de tamanho médio e com concentração de 10 e 30 ppb em um fluido base aquoso. Os resultados mostram claramente a capacidade efetiva de vedação e bloqueio do fluido com LCM em uma concentração de 30 ppb.

Wu (2016), desenvolveu um polímero termoplástico e fibras inorgânicas (EPIFB), para reduzir a perda de circulação em perfuração de poços. Os autores avaliaram o EPIFB em fluido a base aquoso e em fluido a base oleosa com o peso da lama de 16,6 libras por galão. Os melhores resultados obtidos foram nas concentrações de 10 a 20 ppb, sendo que, a concentração de 20 ppb se mostrou eficiente para selar fissuras e rachaduras em poços de petróleo.

Ramasamy et al. (2017), avaliaram um novo material fibroso natural para a aplicação na indústria de perfuração, foi desenvolvido usando resíduos de árvores conhecida como data de palmeiras (*Phoenix canariensis*). O LCM fibroso está disponível em grande quantidade todos os anos no Reino da Arábia Saudita e na Região do Oriente Médio. O material natural fibroso foi incorporado em fluido base aquoso, esse fluido contendo fibras foram testadas com a concentração de 10 e 30 ppb e os testes de

enchimento dos poros foram realizados em condições semelhantes. Uma vedação total foi alcançada com uma concentração de fibras de 30 ppb, como resultado, nenhuma perda de fluido foi observada com esta concentração. Portanto, recomenda-se 30 ppb de material fibroso a ser utilizado no fluido de controle de perda de circulação em perfuração de poços de petróleo.

Nasiri et al. (2017) estudaram a aplicação combinada dos LCMs RIPI-LQC grosso e Quick Seal em fluido a base aquoso. Os melhores resultados foram obtidos nas concentrações de 5 a 20 ppb, o qual resultaram em uma perda baixa de circulação em perfuração de poços de petróleo.

Na Tabela 3, está apresentada uma lista de materiais comerciais, sua distribuição de tamanho de partícula e a concentração comumente utilizada.

Tabela 3 – Materiais de combate a perda de circulação convencionais

Material	Tipo	Descrição	Concentração (Kg/m³)	Maior fratura Selada (mm)
Feno de pradaria	Fibroso	Partículas de 3/8 pol	4,2	1,27
serragem	Fibros	Partículas de ¼ pol	3,5	2,79
Casca	Fibroso	Fibras de 3/8 pol	3,5	2,03
Feno de pradaria	Fibroso	Partículas de 3/8 pol	4,2	1,27
Madeira triturada	Fibroso	Fibras de ¼ pol	2,8	0,76
Serragem	Fibroso	Partículas de 1/16 pol	7	0,51
Casca de noz	Granular	50% - 10 + 100 mesh	7	5,08
Plástico	Granular	50% - 10 + 100 mesh	7	5,08
enxofre	Granular	50% - 10 + 100 mesh	42	3,56
Casca de noz	Granular	50% -30 + 100 mesh	7	3,56
Perlita expandida	Granular	50% - 3/16 +10 mesh	21	2,79
Celofane	Lamelar	Flocos de ¾ pol	2,8	2,79
Casca de semente de algodão	Granular	Fina	3,5	1,52
Celofane	Lamelar	Flocos de ½ pol	2,8	1,27

Fonte: adaptado de Howard et al. (1951).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido nas instalações do Laboratório de Tecnologias Alternativas (LTA) do Núcleo de Engenharia de Petróleo (NUPETRO/UFS), no Laboratório de Instrumentação Multiusuário NPGQ do Departamento de Química (DQI/UFS) e no Laboratório de Fenômeno de Transporte do Departamento de Engenharia Química (DEQ/UFS).

Este capítulo está dividido em dois itens principais. O item 4.1 apresenta os materiais utilizados na parte experimental. O item 4.2 descreve as metodologias utilizadas nas etapas dos procedimentos experimentais.

4.1 MATERIAIS

Para a preparação dos fluidos de combate a perda de circulação em perfuração de poços de petróleo, foram utilizados os seguintes produtos, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Fornecedores e materiais utilizados na preparação dos fluidos de perfuração à base água.

ADITIVO	FUNÇÃO	QUANTIDADE UTILIZADA	FORNECEDOR
ÁGUA	Fase continua	350ml	LTA/UFS
GOMA XANTANA	Viscosificante	2,0ppb	LTA/UFS
CMC BV AS	Redutor de iltrado	2,0ppb	Denver – Esp. uímicas
FORMIATO DE SÓDIO	Inibidor	8,38 a 10,48ppb	Reagen SA
ÓXIDO DE MAGNÉSIO	Alcalinizante	0,32 a 0,52ppb	Newpark Drilling luids
AMIDO	Redutor de iltrado	6,0ppb	LTA/UFS
LCM da MoLAM	Obturante	17 a 28ppb	LTA/UFS
FRACSEAL	Obturante	17 a 28ppb	Drilchem Loss Control
SOLUFLAKE	Obturante	17 a 28ppb	Baker Hughes

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Os experimentos foram realizados em uma coluna de acrílico contendo meio filtrantes conforme mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Meio filtrante utilizado nos experimentos

NOME DO MEIO FILTRANTE	FORNECEDOR
Areia 20/40	LTA – Laboratório
Brita	de Tecnologias Alternativas

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

4.1.1 Preparo dos materiais derivados da *Moringa Oleífera* Lam

As fibras derivadas da MoLAM foram obtidas conforme mostrado no diagrama de fluxo da Figura 12.

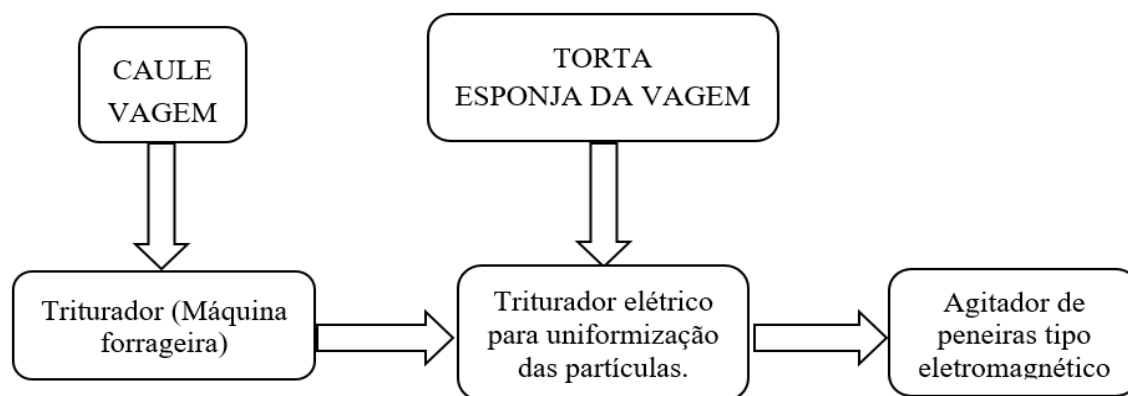


Figura 12 - Etapas para a preparação dos materiais

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Neste trabalho a parte do caule da árvore, a esponja da vagem e a vagem sem semente foram coletadas e secadas sob o sol e o ar, enquanto que a torta da MoLAM foi obtida através da extração do óleo da semente com a casca via extração mecânica (prensa extratora). O óleo foi obtido como produto e a torta considerada subproduto, porém neste trabalho o interesse foi no subproduto. A primeira etapa do preparo foi a trituração do caule e da vagem em uma máquina forrageira da marca Garthen, modelo GP1500. Em seguida, todos os materiais (caule, vagem, esponja e torta) passaram, separadamente, em um triturador elétrico da marca *TecMill*, modelo TE – 633, para sua devida fragmentação, até obter um perfil homogêneo proporcionando fibras com diferentes tamanhos e proporções que são peneirados em um agitador do tipo eletromagnético da marca BERTTEL, e armazenados de acordo com sua faixa de tamanho conforme mostra a Figura 13.

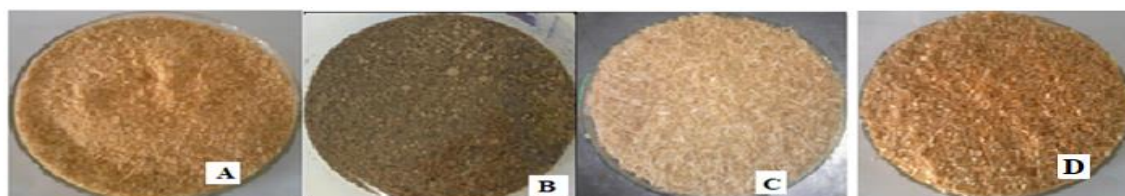


Figura 13 – LCMs derivados da MoLAM; (A) vagem; (B) torta; (C) caule e (D) esponja da vagem.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

4.1.2 Determinação do diâmetro de partícula dos materiais derivados da *Moringa Oleífera* Lam

Neste experimento foram estudados quatro diferentes granulometrias de LCM derivadas da MoLAM a saber 12, 32, 100 e 200 mesh. O método utilizado para determinar

a distribuição do tamanho das partículas (PSD) foi por análise de peneira Tyler. As amostras de tratamentos com LCM foram peneiradas através de uma série de peneiras empilhadas utilizando um agitador mecânico de peneiramento da marca BERTTEL. A percentagem em peso acumulada retida para cada tamanho de peneiro foi calculada a partir do peso medido retido em cada peneiro e depois plotada em relação aos tamanhos de peneiro.

4.1.3 Caracterização dos materiais estudados

Na caracterização das partes derivadas da *Moringa Oleífera* Lam é necessária à investigação de suas características fundamentais, para que se possam determinar suas propriedades físicas, definindo assim, os seus potenciais de aplicação em cada mesh estudado.

❖ Análise Termogravimétrica (TG)

Neste ensaio o equipamento utilizado é do modelo DTG – 50H da marca Shimadzu. Cerca de 2 a 3 gramas de amostra foram acondicionadas em cadinhos de alumínio, em uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$, na faixa de temperatura de 30 até $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, para então determinar a temperatura máxima em que a amostra mantém suas propriedades originais.

❖ Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

As análises de calorimetria diferencial de varredura (DSC) foram realizadas em um equipamento Shimadzu, modelo DSC-60, que mede as temperaturas e o fluxo de calor associado com as transições dos materiais em função da temperatura e do tempo. A amostra foi submetida a um intervalo de temperatura ambiente até $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, a uma taxa de $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$. Aproximadamente 10 mg de amostra foram utilizadas neste ensaio para determinar as temperaturas e o fluxo de calor associado com as transições dos materiais em função da temperatura e do tempo.

❖ Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Neste ensaio as características morfológicas da torta, da vagem, da esponja da

vagem e do caule da *Moringa Oleífera* Lam foram estudadas. Em um microscópio eletrônico de varreduras, as amostras são colocadas sobre um porta amostra em fitas de carbono e sob vácuo, e são bombardeadas por feixes de elétrons que interagem com os átomos da amostra. A partir da interação entre o feixe de elétrons e do material estudado são produzidas partículas e radiação que são usadas para formar uma imagem ampliada do mesmo.

4.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO LCM

Esta seção apresenta o preparo e formulação do desempenho dos LCMs derivados da MoLAM, bem como os fluidos de perfuração utilizados neste estudo.

4.2.1 Preparo dos fluidos de combate a perda de circulação em base aquosa (FBA)

Para avaliar a influência dos LCMs no meio filtrante, preparamos os fluidos de teste a base água apresentados na

Tabela 6. O composto à base de água foi preparado adicionando primeiramente a água em um béquer acoplado a um misturador (modelo Hamilton-Beach), e então adicionada separadamente os demais aditivos, com agitação de 5-7 minutos e velocidade de 5000 rpm. Ao final da adição dos aditivos, os diferentes materiais fibrosos derivados da MoLAM foram inseridos individualmente em uma concentração total de 17 a 28 ppb (Tabela 6), para avaliar sua eficiência no controle a perda de circulação por infiltração.

Tabela 6- Formulação do fluido de perfuração à base água

ADITIVO	FUNÇÃO	QUANTIDADE UTILIZADA
ÁGUA	Fase continua	350ml
GOMA XANTANA	Viscosificante	2,0 ppb
CMC BV AS	Redutor de filtrado	2,0 ppb
FORMIATO DE SÓDIO	Inibidor	8,38 a 10,48 ppb
ÓXIDO DE MAGNÉSIO	Alcalinizante	0,32 a 0,52ppb
AMIDO	Redutor de filtrado	6 ppb
VAGEM DA MoLAM	Obturante	17 a 28ppb
CAULE DA MoLAM	Obturante	17 a 28ppb
TORTA DA MoLAM	Obturante	17 a 28ppb
ESPONJA DA VAGEM DA MoLAM	Obturante	17 a 28ppb

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

4.2.2 Caracterização da faixa de concentração dos materiais fibroso derivado da *Moringa Oleífera* Lam incorporado aos fluídos de combate a perda de circulação em perfuração de poços de petróleo.

Para a formulação de tratamentos de LCM em diferentes concentrações, utilizaram-se quatro LCM derivados da MoLAM, incluindo torta, vagem sem semente, caule e esponja da vagem. O sistema contendo os LCMs foram testados com concentrações mínimas de 5 ppb, como recomendado por Gray et al. (2014). Neste estudo foram realizados testes contendo concentrações superiores a este valor (5ppb), com acréscimo de 2,0 ppb, até que se obtivesse um controle total da invasão de fluido no meio filtrante, por infiltração (areia 20/40) e por perda parcial ou grave (brita), o qual foi definido no tempo de 30 min em uma pressão de 100psi.

4.2.3 Testes de eficiência dos materiais fibrosos derivados da *Moringa oleífera* Lam em uma coluna teste de acrílico.

Para avaliar o potencial dos LCMs utilizou-se um aparelho de teste composto por uma coluna de acrílico transparente (Arbizu et al., 2006), conforme mostra a Figura 14. Na Figura 15, está representado as características da coluna de acrílico.



Figura 14 - visão da coluna acrílico montada
Fonte: Elaborada pelo próprio autor

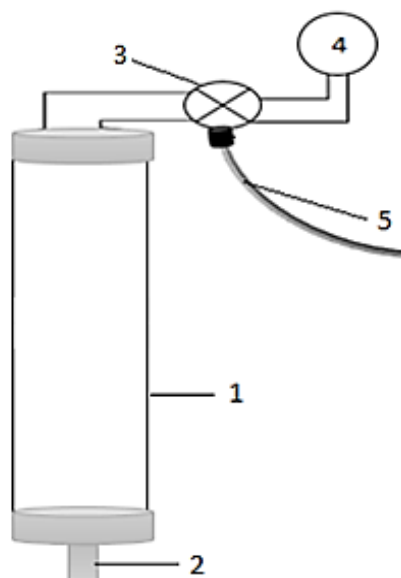


Figura 15 – Coluna de Acrílico vazia (1), válvula de saída do fluido (2), Válvula de controle de ar (3), Manômetro (4), Mangueira de ¼ (5).

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

❖ Ensaio de filtração usando areia 20/40 como leito poroso

Para avaliar o desempenho dos LCMs nas concentrações de 17 ppb foram testados os três materiais derivados da *Moringa Oleífera* Lam (torta, vagem sem semente e caule) e os materiais comerciais FracSeal e o Soluflack. Os testes foram realizados incorporando LCM fibroso em partículas com tamanho base, em um fluido base água, de composição já apresentada na Tabela 6.

Para estudar o efeito da distribuição de tamanho de partícula (PSD) na eficiência de vedação, para cada LCM derivado da MoLAM, foram testados 3 casos com concentrações de 17 ppb na formulação do fluido base. A Tabela 7 mostra a porcentagem da concentração total de cada LCM na formulação, quando usado individualmente, e a Tabela 8 mostra quando usado em combinação. O parâmetro de avaliação segue os padrões utilizados por Arbizu et al. (2006) e Labenski et al. (2003) de que um bom LCM deve ter invasão menor que 5cm de fluido no filtrante (areia 20/40), em um teste de 30 minutos, realizado com uma pressão de 100psi.

Tabela 7 - Concentração de cada LCM para formular mistura individualmente

Tipo	Mesh	
	100	200
Caso#1	50%	50%
Caso#2	0	100%
Caso#3	100%	0

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Os testes em laboratório para os materiais usados individualmente foram realizados conforme a Tabela 7, sendo que, para o “caso #1” utilizou-se 50% (8,5 lb/bbl) mesh 100 e 50% (8,5 lb/bbl) mesh 200. No “caso #2” utilizou-se 100% (17 lb/bbl) mesh 200 e por fim no “caso #3” utilizou-se 100% (17 lb/bbl) mesh 100. Os mesmos procedimentos foram seguidos para realizar os testes quando usados em combinação. Conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8 - Concentração de cada LCM para formular mistura quando usados em combinação

Tipo LCM	Mesh	% da concentração total das misturas		
		Vagem/Caule	Caule/Torta	Vagem/Torta
		Caso #4	Caso #5	Caso #6
Vagem	100	20,5	-	18,0
	200	26,5	-	35,0
Caule	100	18,0	20,5	-
	200	35,0	26,5	-
Torta	100	-	18,0	20,5
	200	-	35,0	26,5

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Um conjunto de testes foi preliminarmente realizado usando LCMs em diferentes concentrações e distribuição de tamanho de partícula em um aparelho (Figura 13), no qual consiste de uma célula de volume de 500 ml. O fluido contendo o LCM a ser avaliado é então adicionado sobre o meio filtrante (areia 20/40 ou brita) e submetido a um diferencial de pressão de no máximo 150 psi, limitado à resistência doacrílico. Este procedimento simula o escoamento através do meio filtrante entre poço e formação, forçando a invasão do fluido no meio filtrante. As etapas desse ensaio estão ilustradas na Figura 16. O objetivo principal desses testes é servir de fase de triagem para excluir o material que não estabelece um selo.

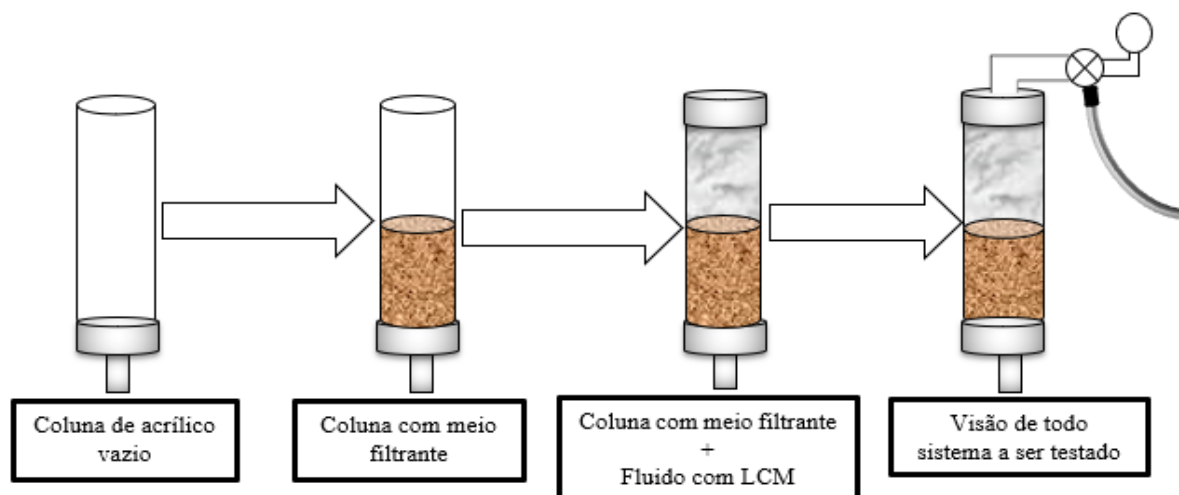


Figura 16 - Etapas do procedimento de teste

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

❖ Avaliação experimental usando brita como leito poroso

Para o ensaio dos quatros LCMs derivados da MoLAM, foi montado um leito com britas dentro do tubo de acrílico. Este meio filtrante é adequado para simular formações permeáveis ou zonas depletadas, classificadas como perdas parciais ou graves, onde o desempenho dos materiais foi avaliado e classificados de acordo com a formação de um plugueamento total no meio poroso. Para avaliar o desempenho dos LCMs nas concentrações entre 20 a 28 ppb, no fluido base aquoso, foram testados quatro materiais derivados da *Moringa Oleífera* Lam (torta, vagem sem semente, caule e esponja da vagem), e os materiais FracSeal e o Soluflack. Desta forma, os testes foram realizados incorporando LCM fibroso em partículas com tamanho base, em fluido de perfuração aquoso, composição já apresentada anteriormente na Tabela 6.

A avaliação do sistema LCM baseia-se na interrupção do fluxo ao longo do teste. Os LCMs que obtiveram sucesso no teste, em uma configuração específica, conseguiram reduzir a vazão para zero, sendo que, para estudar o efeito da distribuição de tamanho de partícula (PSD) na eficiência de vedação em perdas parciais ou graves, foram testadas quatro formulações diferentes para cada tipo de LCM e concentração total. A Tabela 9 mostra a porcentagem da concentração total de cada LCM na formulação quando usado individualmente, e a Tabela 10 mostra quando usado em combinação com outros materiais. O parâmetro de avaliação segue os padrões recomendado por Miranda et al. (2017) e Błaż (2011) de manter o bloqueio total de fluido no filtrante (brita), em um teste de 30 minutos, realizando com uma pressão de 100 psi.

Tabela 9 - Concentração de cada LCM para formular mistura individualmente para perdas parcial

Tipo LCM	Mesh	% da concentração total, se utilizada individualmente		
		Caso#1	Caso#2	Caso#3
Caule	12	12	10	10
	32	10	12	3
	100	3	3	12
Vagem	12	9	7	7
	32	7	9	7
	100	7	7	9
Torta	12	12	10	10
	32	10	12	3
	100	3	3	12

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Tabela 10 - Concentração de cada LCM para formular mistura quando usados em combinação para perdas parcial ou grave.

Tipo LCM	Mesh	% da concentração total, se utilizada em combinação							
		Caule/ Esponja	Esponja/ Caule &Vagem	Caule/ Vagem	Caule/ Torta	Caule/Esponja/ Vagem & Torta	Esponja/ Vagem	Esponja/ torta	Torta/ Vagem
		Caso#1	Caso#2	Caso#3	Caso#4	Caso#5	Caso#6	Caso#7	Caso#8
Caule	12	8	5	8	7	1	-	-	-
	32	5	5	7	5	5	-	-	-
	100	2	-	-	4	-	-	-	-
Esponja	12	2	2	-	-	2	4	-	-
	32	2	2	-	-	2	4	5	-
	100	2	2	-	-	-	2	4	-
Vagem	12	-	2,5	4	-	-	-	-	-
	32	-	3	5	-	1	11	-	15
	100	-	2	2	-	5	5	-	3
Torta	12	-	-	-	4	-	-	4	-
	32	-	-	-	3	2	-	4	4
	100	-	-	-	3	2	-	3	6

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

Neste ensaio, foram realizados testes com fluido base aquosa (FBA), ambos sem conter os LCMs, em seguida foram realizados testes com os LCMs derivados da MoLAM adicionado aos fluidos conforme mostra a

Tabela 6. Foram feitos testes contendo os LCMs comerciais Fracseal e soluftrak, e por fim, foram feitos testes com os 6 ppb de amido de milho em fluido base aquoso (FBA) com os LCMs derivados da MoLAM. Com base nestes estudos foi avaliada a eficiência de cada LCM na formação do plugueamento total, fluxo de fluido através do leito e a formação de sedimentos da vedação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS LCMs

5.1.1 Análise Termogravimétrica (TG).

As curvas TG/DTG da vagem, caule e torta estão representadas nas Figuras 17, 18 e 19, respectivamente. Para este trabalho, todas as análises dos materiais foram feitas logo após a trituração, e só em seguida foram feitas a triagem dos mesh.

Analisando as curvas TG e DTG para os três LCMs derivados da MoLAM, podemos concluir que a perda de massa dos materiais ocorre em três estágios. O primeiro estágio, para os três LCMs, inicia em temperatura de 30°C e termina próximo de 100°C, associado à eliminação de água. Nesta faixa de temperatura a vagem obteve uma perda de massa de 9,01%, o caule 7,11% enquanto a perda de massa para a torta foi de 5,40%.

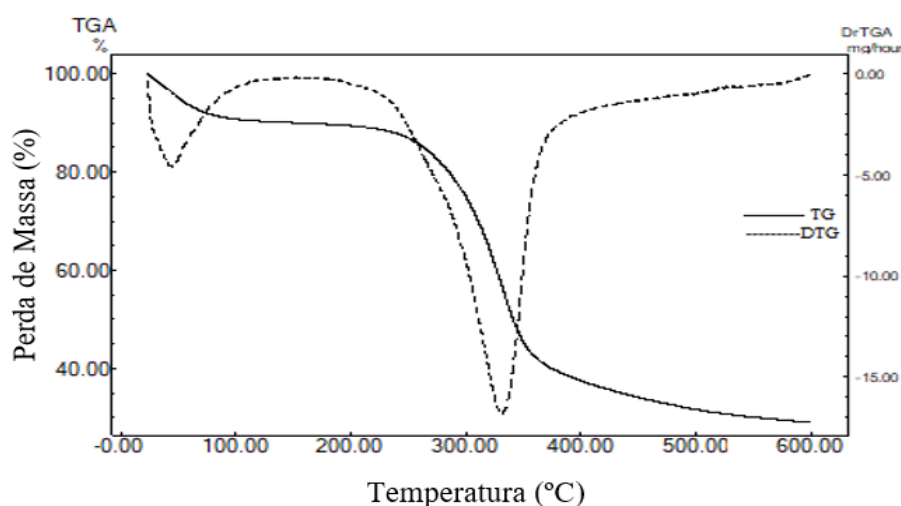


Figura 17 - As curvas TG/DTG da vagem derivada da MoLAM.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Dos eventos apresentados na Figura 17, foi possível determinar a temperatura em que ocorre o segundo estágio para a vagem o qual inicia em 210°C e termina em 383°C, representando uma perda de 34,21% da massa total da amostra. Este evento está associado à decomposição dos extrativos e da celulose, constituintes do material. Já no terceiro estágio ocorre a degradação mássica da amostra o qual inicia em 333°C e termina em 600°C, representando uma perda de 26,30% da massa total da amostra, associado à decomposição da hemicelulose e da lignina presente no material.

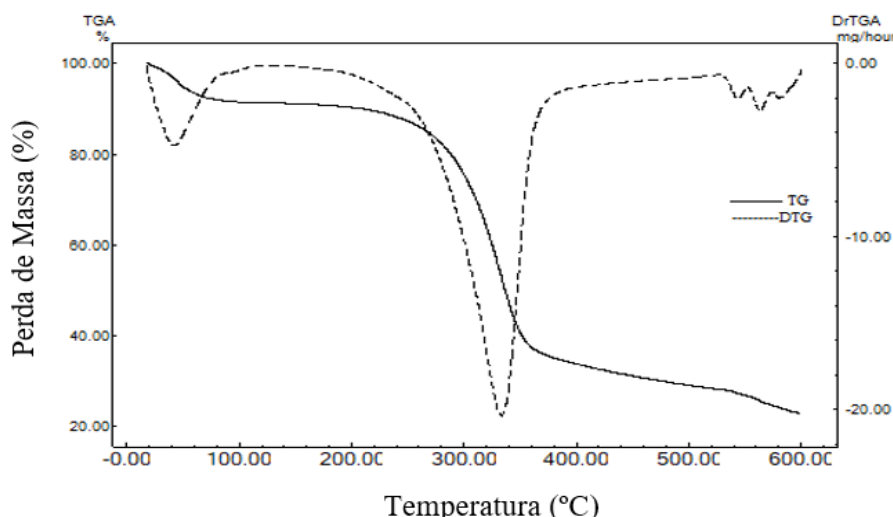


Figura 18 - As curvas TG/DTG do caule derivado da MoLAM.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 18 apresenta as curvas TG/DTG do caule e a partir dessas curvas foi possível determinar o segundo estágio o qual inicia em 199°C e termina em 334,71°C, representando 36,56% de perda de massa da amostra, associado à decomposição da celulose, constituintes da amostra e por fim o terceiro estágio inicia em 348,73°C e termina em 600°C, onde ocorre a degradação mássica máxima do caule representando 30,16% da massa total da amostra, estando associado à decomposição da lignina e da hemicelulose.

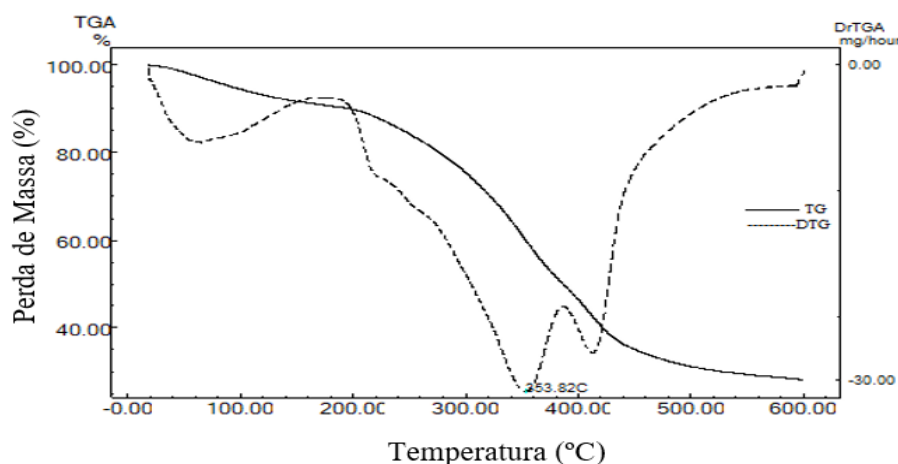


Figura 19 - Curvas TG e DTG para a torta derivada da MoLAM.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Já para a torta (Figura 19), observa-se o segundo estágio que inicia em 198,51°C e termina em 348,13°C, representando 29,98% de perda de massa total da amostra, podendo ser associado à decomposição dos extrativos e da celulose, constituintes da amostra. O terceiro estágio inicia em 348°C e termina em 600°C que é o intervalo onde

ocorre à degradação mássica máxima da amostra, representando 61,61% da massa total, sendo atribuída, principalmente, à degradação do óleo para a torta, a decomposição da hemicelulose e da lignina.

A degradação mássica das amostras estudadas é caracterizada pela eliminação da água adsorvida sobre as partículas das biomassas trituradas, da decomposição da matéria orgânica volátil presente (Araújo et al., 2010), degradação das proteínas, carboidratos, hemicelulose, celulose e lignina.

Os materiais utilizados no controle PC devem ser capazes de responder positivamente a problemas referentes à estabilidade dos seus aditivos, quando submetidos à altas temperaturas. Existe uma parcela de poços perfurados caracterizados como HPHT (*High Pressure High Temperature*) onde as temperaturas internas são consideradas altas, como por exemplo, os poços do pré-sal brasileiro. Dessa forma, torna-se necessário desenvolver novos materiais com alta resistência à temperatura que sejam capazes de combater a PC. Desta forma, os LCMs devem apresentar características físicas e químicas que sejam adequadas a tal aplicabilidade. Com isso, a MoLAM torna-se um possível material a ser utilizado em combate a perda de circulação, visto que suas degradações ocorrem em temperaturas próximas à 20°C e com degradação mássica máxima próxima a 400°C. É possível observar na Tabela 11, que entre os LCMs comerciais, os derivados da MoLAM obtiveram características positivas, dentre elas na faixa de temperaturas de 300 e 600 °C, obtendo uma perda de massa igual ou menor quando comparados com outros produtos comerciais.

Tabela 11 – Faixa de temperatura dos estágios dos LCMs derivados da MoLAM com os comerciais.

Amostra	Faixa de Temp. 1º estágio	Perda Mássica Total	Faixa de Temp. 2º estágio	Perda Mássica Total	Faixa de Temp. 3º estágio	Perda Mássica Total	Autor
Vagem	30-100°C	9,0 %	198-348°C	34,21%	348-600°C	26,3061, 61%	Este trabalho
Caule	30-100°C	7,11%	198-348°C	36,56%	348-600°C	30,16%	Este trabalho
Torta	30-100°C	5,4%	198-348°C	29,98%	348-600°C	61,61%	Este trabalho
Fibra de unta	64,7°C	10,52%	282,3 °C	9,38%	345,2°C	65,3%	Das et al. (2000)
Fibra de coco	50-100°C	5,4%	265-282 °C	19,6%	327 °C	40,1%	Leão et al. (2015) Tomczak et al. (2007)
Casca de noz	30-184°C	5%	184-310°C	11%	310-383°C	39%	Medrano et al. (2016)
Serragem de pinheiro	30-150°C	-	200-500°C	74,48%	> 500°C	-	(Mishra et al., 2018)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

5.1.2 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Os resultados obtidos das análises DSC das amostras são mostrados na Figura 20, o qual observa-se, para a torta a 49,60 °C um primeiro pico de fusão que podem ser atribuídos à liberação da água adsorvida que estão presa ao material, ocorrendo posteriormente um evento exotérmico a 417,08 °C, que pode ser atribuído aos resíduos de óleo que foram vaporizados ou uma possível oxidação polimérica. Nas amostras feitas com a vagem é possível observar um pico a 49,60 °C que pode ser atribuído a vaporização da água intersticial ainda presente da fibra e um segundo evento endotérmico discreto que ocorre a 423,68°C. Esse pico de decomposição ou dissociação pode ser atribuído a frações de lignina poliméricas presentes na amostra. Nas amostras do caule são observados vários eventos de fusão, apresentando instabilidade, que pode ser atribuído aos diversos componentes da composição da biomassa, embora o pico a 98,03 °C, seja a de fusão e um segundo evento endotérmico que ocorre a 400 °C atribuído a decomposição da hemicelulose presente no material e por fim nas amostras da esponja são observados eventos de fusão, que pode ser atribuído aos diversos componentes da composição da biomassa, ocorrendo um pico a 50 °C seja a de fusão, o qual podem ser atribuídos à liberação da água adsorvida que estão presa no material e posteriormente um segundo evento exotérmico discreto que ocorreu a 420 °C atribuído a decomposição da hemicelulose e a frações de lignina poliméricas presente no material.

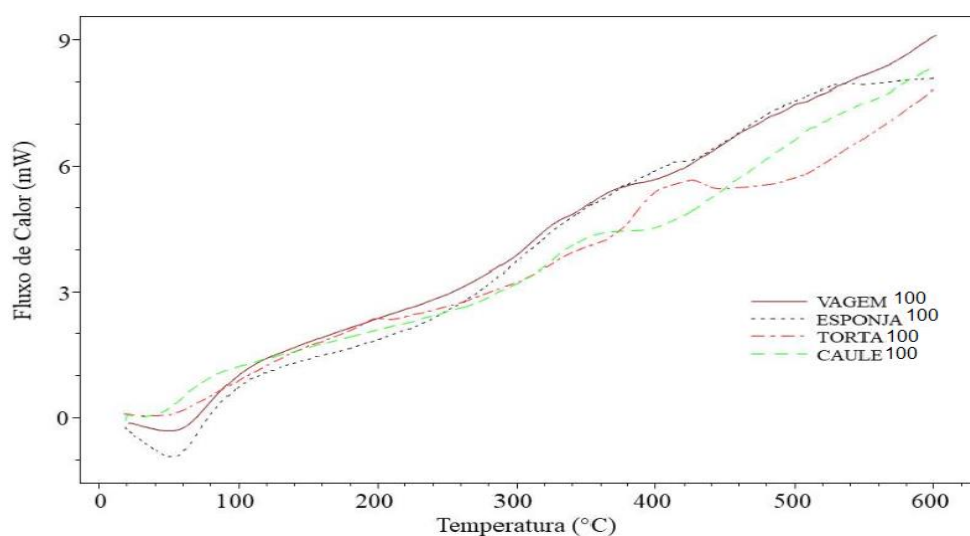


Figura 20 – AS curvas de DSC da torta, vagem, caule e esponja da vagem derivados da MoLAM.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) é uma técnica termoquímica para determinar a propriedade do fluxo de calor da biomassa. A análise DSC mede a propriedade da biomassa por diferença de peso do porta-referência e do porta-amostras. Assim, as técnicas termoquímicas DSC medem o fluxo de calor da biomassa em relação à temperatura e ao tempo. Correlacionando as amostras in naturas derivadas do MoLAM com os materiais da literatura conforme mostra a Tabela 12. Pode-se afirmar que os resultados das análises DSC são obtidos através de dois eventos, o primeiro evento estabelece que a curva passou na região endotérmica e o segundo evento na região exotérmica. Podemos concluir que o primeiro evento ocorreu na faixa de temperatura de 30 a 150°C devido à evaporação das moléculas de água adsorvidas, o que significa processo endotérmico. Na zona de temperatura de 150 a 600 °C, o evento observado foi devido à degradação de compostos de celulose, hemicelulose e lignina presentes na amostra. Podemos observar que a degradação de compostos para os LCMs derivados da MoLAM estão na faixa de temperaturas superiores aos comerciais, mostrando a eficiência para serem utilizados em poços HPHT. Os resultados obtidos das análises de DSC coincidiram com eventos térmicos observados durante os testes de TG que foram conduzidos nas mesmas condições dinâmicas.

Tabela 13 - Comparação das análises DSC dos LCMs derivados da MoLAM com os comerciais.

Material	Primeiro evento Tp (°C)	Segundo evento Tp (°C)	Autor
Vagem	49,60	423,68	Este trabalho
Torta	49,60	417,08	Este trabalho
Caule	98,03	400,0	Este trabalho
Esponja da Vagem	50	420	Este trabalho
Casca de arroz	150	320	Rosa et al. (2012)
Casca de noz	56	236	Medrano et al. (2016)
Serragem de pinheiro	100	150 a 500	Mishra et al. (2018)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor

5.1.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A morfologia dos materiais “in natura” derivados da MoLAM assim como do material comercial Fracseal foi investigada por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV). As Imagens foram obtidas usando magnificações de 30, 250 e 1000 vezes. As micrografias de cada material indicaram a presença de poros assimétricos e

estrutura de poros abertos e sua área superficial.

❖ Vagem

Pode-se observar na Figura 21, que o LCM vage apresenta características morfológicas bastante heterogêneas, havendo mudanças na morfologia dos materiais em termos de tamanho e formação de poros, assim como uma estrutura irregular, apresentando uma característica densa. A vagem apresenta-se com poros menos aglomerados e com estrutura planar. É visível na Figura 21a e 21b a presença de deformação na superfície, ou seja, a geometria do LCM e sua estrutura plana. observa-se como as partículas se aglomeram contendo pequenos espaços entre as partículas, e uma estrutura irregular e heterogênea que possibilitam condições favoráveis para serem utilizados em fluido de combate a perda de circulação. A figura 21c na magnitude 1000X, mostra claramente a forma e a distribuição de tamanho dos poros, com uma matriz heterogênea, e relativamente, com poucos poros, pode-se observar que nem todas as partículas possui poros internos, sendo que, quando ampliadas, mostram que estas partículas podem formar dobras e por possuir estruturas planas e com poucos poros faz com que essas fibras formem aglomerações bem menores impedindo a passagem do fluido e que não ocorra rompimento das fibras. Tal estrutura facilita o processo de adsorção, permitindo a conclusão de que o material tem um perfil morfológico adequado para retenção de fluido e formação de um reboco na parede do poço.

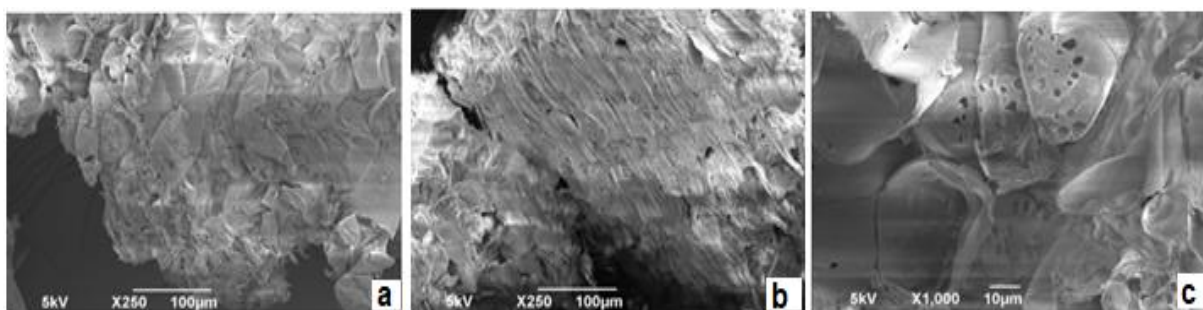


Figura 21 – Micrografias obtidas por MEV para a vagem “in natura” (a) e (b) magnitude 250X, (c) magnitude 1000X.

❖ Caule

Na Figura 22a e 22b pode-se observar que o material apresenta características morfológicas distribuídas com heterogeneidade e, relativamente, com pouco poros. É

visível a presença de deformações na superfície do tecido vegetal, contendo espaços disponíveis que possibilitam a condições favoráveis para adsorção.

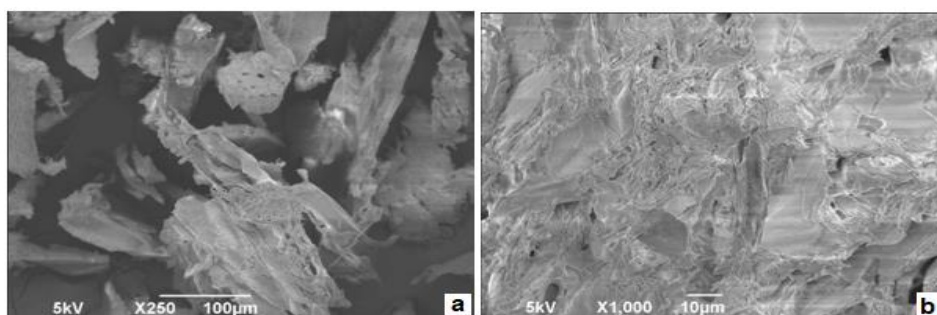


Figura 22 - Micrografias obtidas por MEV para caule “in natura” (a) magnitude 250X, (b) magnitude 1000X.

A Figura 22a mostra deformação na superfície, ou seja, a geometria do LCM com áreas esponjosas e uma estrutura irregular e heterogênea, o qual, observa-se como as partículas se aglomeram contendo espaços entre si. A figura 22b na magnitude 1000X mostra claramente a superfície do caule “*in natura*” com poucos poros. Pode-se verificar que a superfície da fibra é bastante rugosa e apresenta poucos poros, admitindo que o material tem um perfil morfológico adequado para retenção de fluido de perfuração em combate a perda de circulação.

❖ Torta

Após analisar os resultados obtidos da microscopia eletrônica de varredura da torta derivada da MoLAM apesar de não ter sofrido nenhuma modificação química, constata-se pela Figura 23a e 23b, que o material apresenta uma matriz com distribuição heterogênea relativamente com poucos poros. Tal característica se justificar por se tratar da semente integral totalizando uma grande diversidade de componentes que constituem a fibra em estudo, como celulose, hemicelulose e lignina.

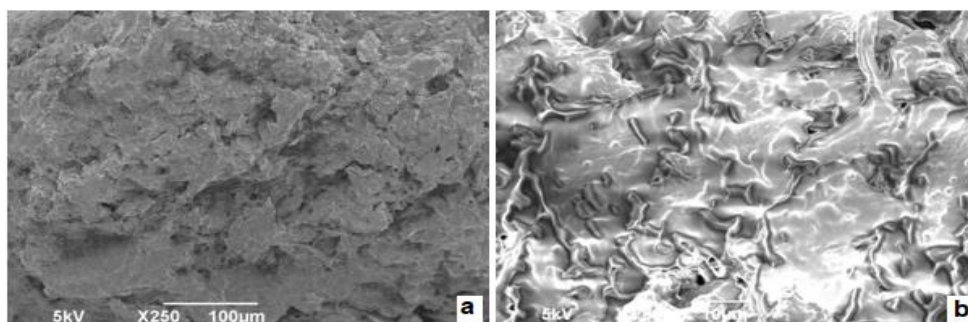


Figura 23 - Micrografias obtidas por MEV para a torta “in natura” (a) magnitude 250X, (b) magnitude 1000X.

E visível na Figura 23a a presença de algumas deformações na superfície, bem como a deformação das partículas, quando a amostra foi submetida a prensagem, originando a torta mecânica, as fibras ficam mais arredondadas, dando uma aparência de várias estrias, diferenciando-se dos demais materiais que possuem uma estrutura irregular. Estas partículas não conseguem se juntar e fechar todos os espaços entre si. A Figura 23b, em ampliação, mostram que estas partículas possuem estruturas com praticamente nenhuns poros internos, fazendo com que essas fibras formem aglomerações bem menores impedindo a passagem do fluido

❖ Esponja

Figs. 24 a -c são imagens de micrografias obtidas por MEV da esponja da vagem “*in natura*” sob várias ampliações. A Figura 24a mostra claramente a formato das partículas e a distribuição dos poros obtidos da esponja da vagem.

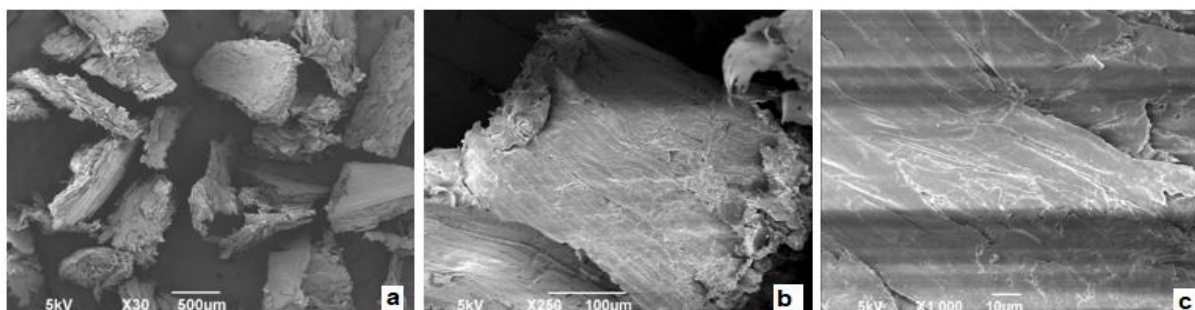


Figura 24 - Micrografias obtidas por MEV para a esponja “*in natura*” (a) magnitude 30X, (b) magnitude 250X, (c) magnitude 1000X.

Observa-se, na Figura 24a na magnitude 30X que algumas macros fibrilas permanecem separadas, enquanto que outras se aglomeram, observa-se também o formato irregular das partículas, que facilita o fechamento dos espaços deixado entre si após uma determinada pressão. A Figura 24b mostra a morfologia, chamadas de feixes de microfibras nos pontos de cada partícula contendo espaços disponíveis que possibilitam as condições favoráveis para adsorção de fluido.

A micrografia analisada com aumento de 1000X demonstrada na Figura 24c permitiu visualizar a superfície da esponja da vagem. Este material possui uma superfície plana, lisa e sem poros, a quantidade de poros presentes neste material apresentam-se com tamanhos muitos pequenos e encontra-se nas extremidades das partículas, e estes contribuem para aumentar a resistência da superfície e, conseqüentemente, para reter maior quantidade de fluidos, contendo espaços disponíveis, cuja característica possibilita

inferir que o adsorvente possui condições favoráveis para a adsorção de fluidos nos interstícios.

❖ Fracseal

As micrografias analisadas com diferentes aumentos, permitiu visualizar as características do material comercial *Fracseal* apresentando características morfológicas bastante heterogêneas, onde foi comprovado pela Figura 25a e 25b que as partículas se aglomeram contendo pequenos espaços entre si, e uma estrutura irregular e heterogênea que possibilitam condições favoráveis para serem utilizados em fluido de combate a perda de circulação. Já na Figura 25c permitiu visualizar a superfície LCM *Fracseal*, este material possui uma superfície plana e lisa sem poros, a quantidade de poros presentes neste material apresentam-se com tamanhos muitos pequenos, e estes contribuem para aumentar a resistência da superfície e, conseqüentemente, para reter maior quantidade de fluidos, admitindo que o material tem um perfil morfológico adequado para retenção de fluido de perfuração em combate a perda de circulação.

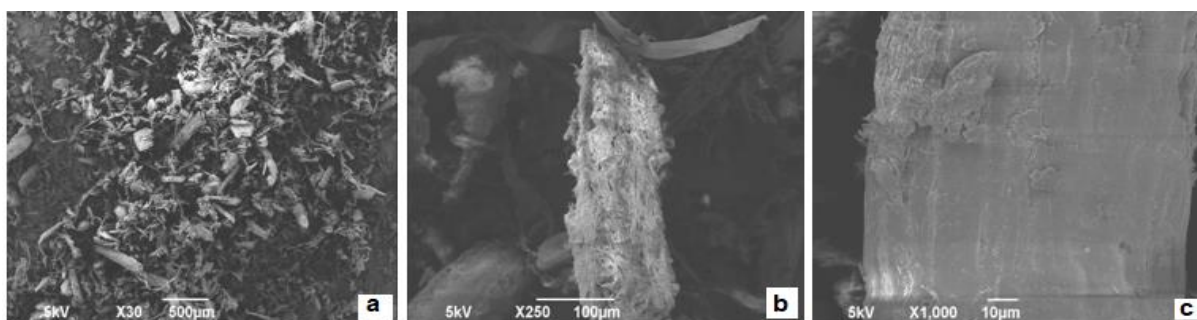


Figura 25 - Micrografias obtidas por MEV para o Fracseal (a) magnitude 30X, (b) magnitude 250X, (c) magnitude 1000X.

Ao comparar os LCMs derivados da MoLAM com o LCM comercial, observa-se que apresentam características morfológicas bastante heterogêneas, havendo mudanças na morfologia dos materiais em termos de geometria da partícula, de tamanho e formação de poros. Para os LCMs da MoLAM, assim como o *Fracseal*, são visíveis a presença de deformação na superfície, sendo que, apresentam relativamente poucos porosos e com geometria irregular. Tal estrutura justifica o processo de adsorção, permitindo confirmar que os materiais derivados da MoLAM têm um perfil morfológico adequado para retenção de fluido no combate a perda de circulação em poços de petróleo.

5.2 AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO USANDO AREIA 20/40 COMO MEIO POROSO

5.2.1 Materiais individuais

Os resultados obtidos dos testes em laboratório usando o meio filtrante areia 20/40, permitiu a medição da eficiência de cada material em diferentes granulometrias. O material de combate a perda de circulação derivado da MoLAM consiste em uma mistura de LCM de granulometria classificada como intermediária o qual foi comparado com a eficiência dos LCMs comerciais *FracSeal* e *SoluFlake*. A filtração foi limitada a apenas 15cm / 30min, ou seja, uma vez que a invasão dentro da coluna de acrílico ultrapassar os 15 cm, significa que a invasão de fluido no leito foi completa e o LCM não foi satisfatório para o teste.

O sistema foi primeiro avaliado contendo a calcita media como LCM na concentração de 30 ppb, porém com esta concentração não houve formação de reboco ficando fora dos padrões considerado por Labenski et al. (2003) e Arbizu et al. (2006) de 5cm de infiltração em um tempo de 30 minutos, Este material apresentou uma perda total do fluido em 7,5 minutos. Portanto o mesmo não foi correlacionado no gráfico.

a) Vagem

A Figura 26 mostra a invasão do fluido no meio filtrante a cada intervalo de tempo de 2,5 minutos. Os testes foram realizados com uma concentração total de 17 ppb, conforme a Tabela 7.

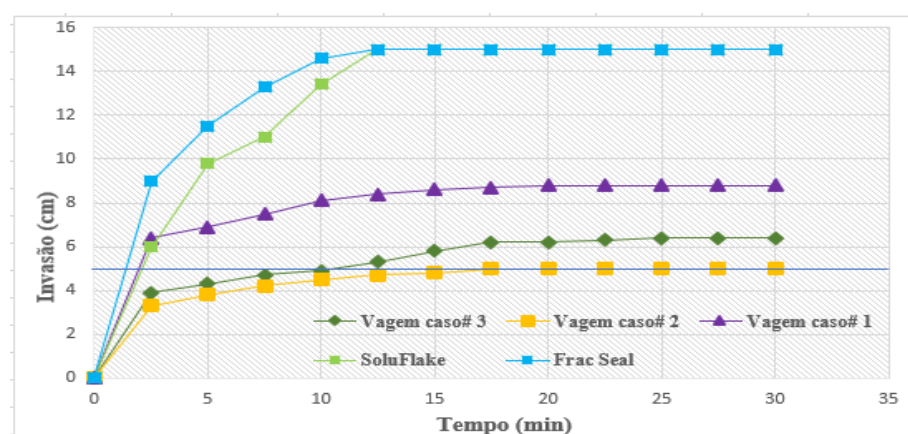


Figura 26 – Sistema utilizando vagem e materiais comerciais.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Pode ser visto na Figura 26 que, para o LCM vagem, houver uma perda de

filtrado muito discreta e pequena através do meio poroso. Este material em diferentes granulometrias apresentou comportamento superior aos materiais comerciais *FracSeal* e *SoluFlake*. Os resultados obtidos para a “vagem caso #1” com a concentração contendo 50% do mesh 100 e 50% do mesh 200 obtiveram uma invasão de 8,7cm conseguindo manter o plugueamento total do fluido em um tempo de 20 minutos. Já a “vagem caso #3” de 100% mesh 100, a invasão foi de 6,5cm de infiltração com a formação do reboco em um tempo de 17,5 minutos, em ambos os casos, a invasão ficou acima do recomendado por Arbizu et al. (2006) e Labenski et al. (2003) que é de 5cm em um tempo de 30 minutos, Por fim, os testes realizados para a “vagem caso #2” de 100% mesh 200, obteve o melhor resultado com a invasão de 5cm de infiltração, e assim, conseguindo manter o fluido constante em um tempo de 17,5 minutos, e uma formação de reboco fino e espesso, Já os materiais comerciais obteve a invasão total de 15cm a partir do tempo de 12,5 minutos.

a) Torta

Na Figura 27, o comportamento do LCM torta, o qual demonstrou um controle da invasão do fluido no meio filtrante de 4,6cm considerado menor em relação aos LCMs *FracSeal* e *SoluFlake*. Para este teste foi observado um plugueamento total e controle de perda de circulação a partir do tempo de 17,5 minutos.

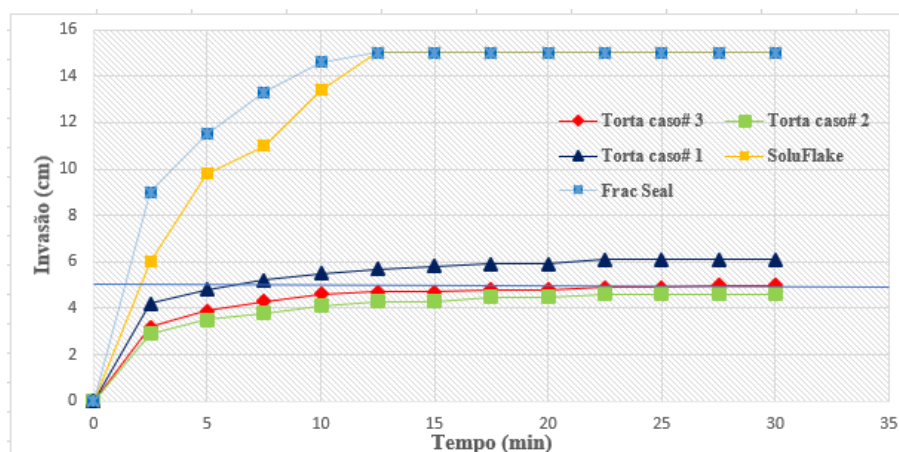


Figura 27 – Sistema utilizando torta e materiais comerciais.
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O sistema foi primeiro avaliado para a “torta caso#1”, o qual consistiu em uma perda de filtrado considerado pequena (6cm). Já para a “torta caso#3” apresentou resultado mais positivo, obtendo a invasão de fluido no meio filtrante dentro dos padrões

considerado por Labenski et al. (2003) e Arbizu et al. (2006) de 5cm de infiltração em um tempo de 22,5 minutos, e por fim os resultados obtidos na “torta caso#2” obteve uma invasão de 4,6cm de infiltração, conseguindo manter o fluido constante e controlar a perda com a formação de reboco em um tempo de 17,5 minutos. Este material apresentou comportamento satisfatório em relação ao caso 1 e 2, assim como, os fluidos contendo os LCMs comerciais que obtiveram uma perda completa a partir de um tempo de 12,5 minutos, conforme mostra a Figura 27. Portanto, no teste da “torta caso#2” o LCM foi capaz de manter constante o fluxo em um tempo considerado pequeno para a perfuração de poços de petróleo, sendo que, após a aplicação do diferencial de pressão de 100 psi a uma concentração de 17ppb, foi observada formação de um reboco espesso e de baixa permeabilidade, fazendo com que o fluido não penetrasse no meio poroso.

b) Caule

Após a aplicação do diferencial de pressão em um tempo de 30 minutos e aplicando as concentrações do LCM classificado como caule derivado da MoLAM no fluido de base água, verificou-se a invasão do fluido no meio filtrante simulando uma perda de circulação em poços de petróleo, conforme mostra a Figura 28.

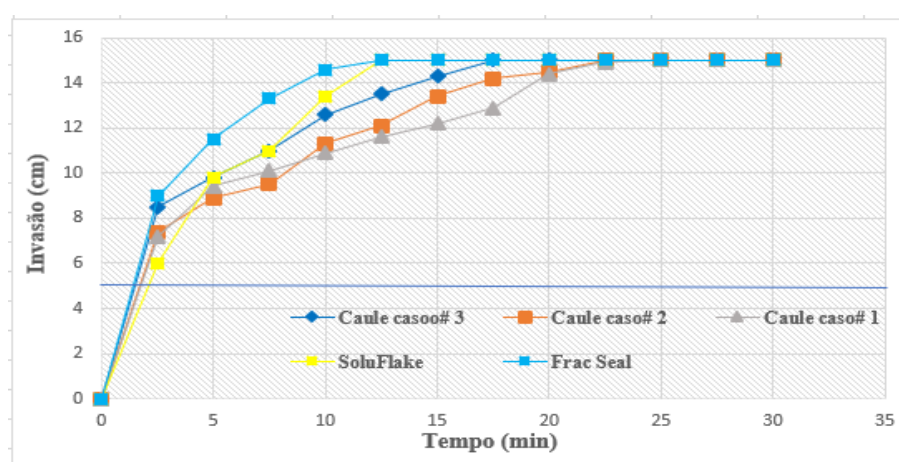


Figura 28 - Sistema utilizando caule e materiais comerciais.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O sistema contendo o LCM classificado como o caule foi avaliado em três granulometrias conforme a Tabela 7. Todos os casos falharam ao controlar a perda por infiltração. A Figura 28 mostra os resultados obtidos para o sistema contendo este material, apresentou o mesmo comportamento que o fluido a base água contendo os LCMs FracSeal e o SoluFlake, sendo inadequado para ser usado no campo no controle

de perda de circulação por infiltração com esta concentração.

c) Comparativo

Segundo Błaz (2011), para cada tipo de rocha porosa deve-se selecionar o tipo e tamanho apropriado de material para então vedar os poros e assim controlar a perda de fluido durante a perfuração de poços de petróleo, sendo que, quanto menor a granulometria maior eficiência em perdas por infiltração, já para perdas parciais e graves o ideal é uma granulometria maior. Portanto, os resultados obtidos dos estudos experimentais usando o meio filtrante areia 20/40, permitiram a medição da eficiência das granulometrias 100 e 200 mesh, conforme mostra a Figura 29.

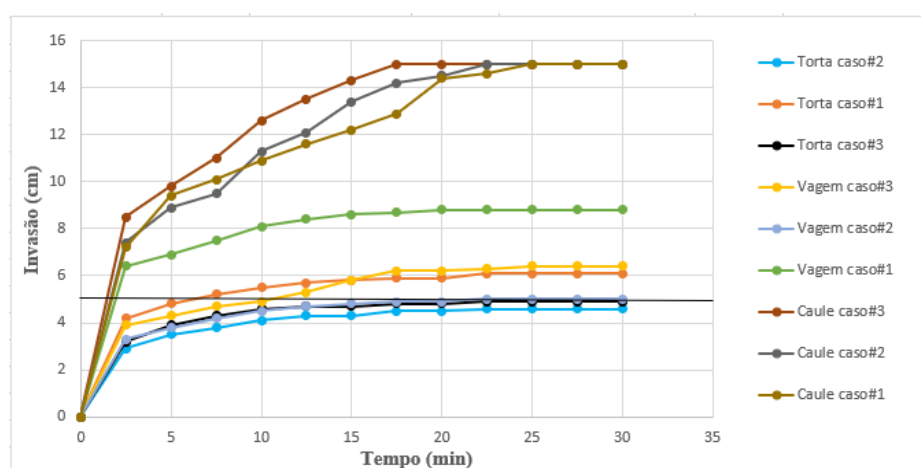


Figura 29 – Comparação dos LCMs de mesh 100 e 200.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Comparando os resultados obtidos dos mesh 100 e 200, pode-se concluir que os LCMs torta e vagem derivados da MoLAM com granulometria de mesh 200 obtiveram os melhores resultados de invasão e de plugueamento total do fluido no meio filtrante areia 20/40. Comprovando o já citado por Błaz (2011), quanto menor a granulometria mais eficiência no controle de perda por infiltração em poços de petróleo.

5.2.2 Materiais combinados

A avaliação de desempenho dos LCMs derivados da MoLAM, usados em combinação, consiste em um sistema composto por uma mistura de produtos fibrosos.

Os testes realizados para o “caso#4” são formados pela combinação dos LCMs vagem nas concentrações 20,5%(3,5 lb/bbl) mesh 100 e 26,5%(4,5 lb/bbl) mesh 200 com

as concentrações do caule de 18%(3 lb/bbl) mesh 100 e 35,0%(6 lb/bbl) mesh 200, mostrado na Figura 30. Também foram utilizadas estas combinações de concentração para o “caso#5” formado pela combinação do caule com a torta e para o “caso#6” formado pela combinação da vagem com a torta, conforme mostram as Figura 31 e Figura 32.

No fluido à base água estudado, o sistema composto com a vagem e a torta representado no “caso#6” demonstrado na Figura 32 foi capaz de formar um plugueamento e controlar o fluxo de fluido em um tempo de 12,5 minutos, sendo este tempo o menor quando comparados com a utilização dos materiais derivados da MoLAM de forma individual.

Caso#4: Vagem e Caule

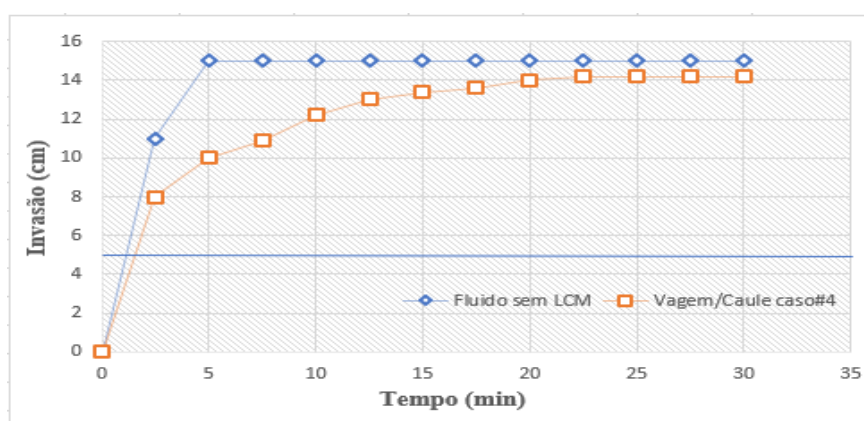


Figura 30 - Sistema composto com a vagem e o caule.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Caso#5: Caule e Torta

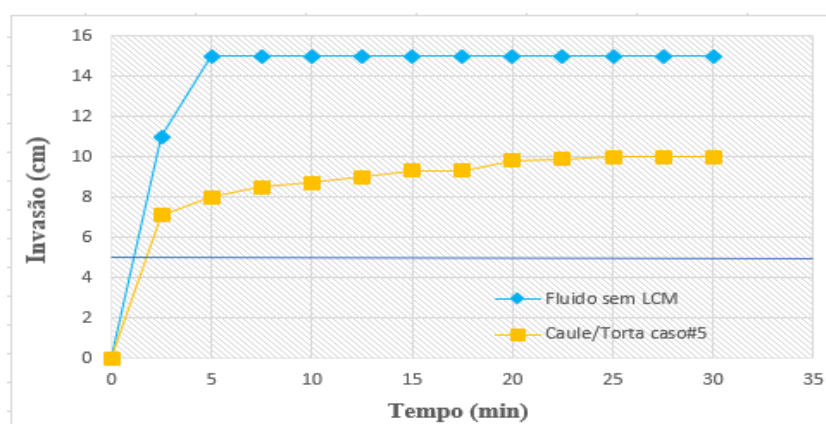


Figura 31 - Sistema composto com o caule e a torta.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Caso#6: Torta e Vagem

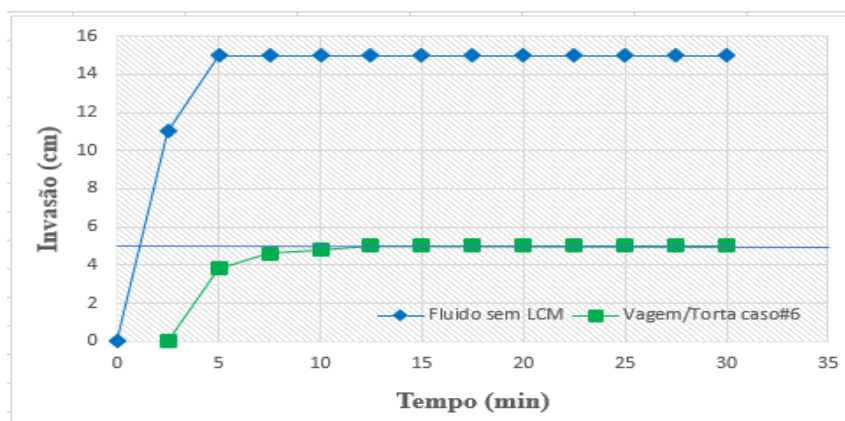


Figura 32 – Sistema composto com a torta e a vagem.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Como os materiais são moídos para granulometrias menores (mesh 100 e 200), parte da porosidade em massa é perdida, conforme demonstrados nos resultados das análises térmicas. Assim, a resistência tende a diminuir à medida que o tamanho de partícula diminui. Nota-se que muitas vezes LCMs são usados em combinação com misturas de duas ou mais partículas diferentes para suprir esta deficiência (Kumar et al., 2011).

O desempenho dos materiais usados no “caso #4”, demonstrado na Figura 30, não obteve resultado positivo. Tal fato pode ser atribuído ao diâmetro de poro do LCM classificado como “caule”, conforme mostra os dados obtidos da análise do MEV, assim como sua caracterização físico-química. Já a Figura 31 demonstra que a combinação do caule com a torta pode interromper a perda de circulação em um tempo de 20 minutos com uma invasão de 10cm no meio filtrante, o que pode ser atribuído a maior eficiência da torta para este caso. Os testes realizados com a combinação dos materiais torta e vagem (Figura 32) mostraram os melhores resultados obtendo um plugueamento total do fluido em um tempo de 12,5 minutos, consideravelmente pequeno.

Pode-se concluir neste estudo, que os LCMs derivados da MoLAM torta e a vagem obtiveram resultados positivos com uma concentração de 17ppb, podendo ser uma alternativa no controle de perda por infiltração em perfuração de poços de petróleo, enquanto que o caule e os materiais comerciais obtiveram resultados inferiores semelhante ao fluido base água sem LCM.

5.2.3 Comparação dos resultados dos materiais individualmente e combinados

A Figura 33 mostra a eficiência da distribuição de tamanho de partícula (PSD) de mesh 100 e 200 usando uma concentração total de 17ppb com os LCMs torta, a vagem e o caule, assim como os comerciais Fracseal e o Soluflake. Durante os testes pode-se avaliar que nem todos os produtos derivados da MoLAM podem ser usados para controle de perda de circulação em perfuração de poços de petróleo com esta concentração.

Os resultados mostram claramente a capacidade efetiva de vedação e bloqueio dos LCMs torta e vagem, com mesh de tamanho 200. Nos testes realizados com material individual, os que obtiveram melhores resultados na formação de reboco e uma invasão dentro dos padrões considerados pelos autores Labenski et al. (2003) e Arbizu et al. (2006) foram os sistemas contento 100% de torta com mesh 200 (infiltração de 4,6cm), seguido pelo mesh 200 da vagem com uma infiltração de 5cm. Já para o caule, assim como os LCMs comerciais, não houve efetividade no combate a perda por infiltração.

Quando usados os materiais combinados, os menores valores de perda de fluido e um plugueamento efetivo foram observados para o “caso#6” (torta/vagem) na concentração de 8ppb para a torta e 9ppb para a vagem, conforme mostra a Figura 32. A medida que a quantidade de partículas com diâmetro de poros diferentes aumenta nas misturas, a perda de fluido diminuiu. Os dados obtidos pela análise MEV, justificam que os materiais com diâmetros de poros menores, são empregados na adsorção de moléculas de dimensões pequenas. Todavia, diâmetros de poro obtido do caule foi próximo do mesoporos, os quais são empregados na adsorção de moléculas grandes, assim, pode-se observar que o “caso#4” e “caso#5” não foram suficientes para formar uma vedação no limite de 5cm em um tempo de 30 minutos.

Neste estudo, em todos os testes realizados com os LCMs torta e vagem derivados da MoLAM os resultados foram superiores aos LCMs comerciais *Fracseal* e o *Soluflake*, justificando a eficiência desses materiais na perda de fluido por infiltração, conforme mostra a Figura 33.

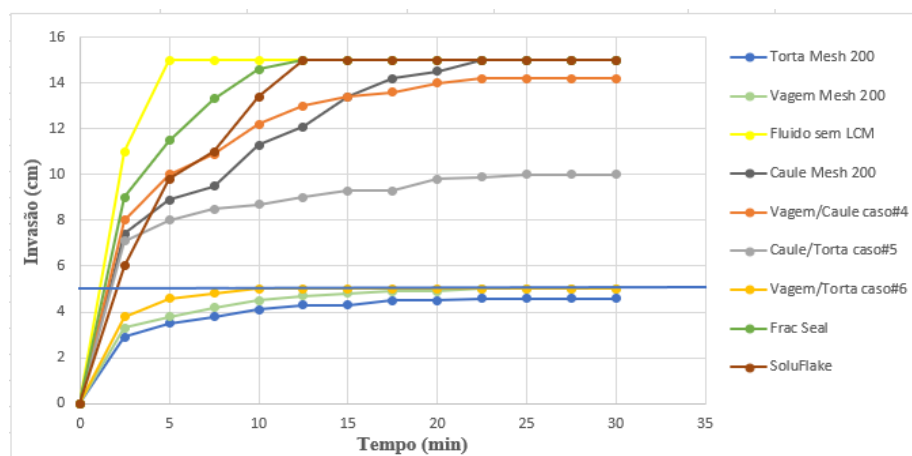


Figura 33 – Resultados obtidos dos LCMs comerciais e dos derivados da MoLAM.

5.3 AVALIAÇÃO DA INFILTRAÇÃO USANDO BRITA COMO MEIO POROSO

5.3.1 Materiais individuais

O material fibroso desenvolvido a partir de partes da árvore MoLAM, foi avaliado através da eficiência de vedação por teste de entupimento dos poros sob condições constante de pressão de 100psi durante um tempo de 30 minutos. O teste de obstrução de poros é o teste padrão da indústria para validar material de combate a perda de circulação (*Lost Control Material*) (Ramasamy et al., 2017). O desempenho dos materiais é apresentado na maioria dos casos em gráficos, onde o volume coletado versus o tempo é plotado (Miranda et al., 2017). O sucesso do LCM derivado da MoLAM numa configuração de severidade classificada como parcial ou total foi obtido quando o fluxo através da matriz permeável (brita) foi interrompido, ou seja, o volume recolhido (a partir daquele instante) permanece constante com o tempo. Sendo que, os resultados obtidos dos testes em laboratório usando o meio filtrante brita, permitiram a medição da eficiência de cada material em diferentes granulometrias juntamente com o amido de milho (6 ppb). O material de combate a perda de circulação derivado da MoLAM consiste em uma mistura de materiais fibrosos, o qual foi comparado com a eficiência dos LCMs comerciais *FracSeal* e *SoluFlake*. A filtração foi limitada a apenas 200ml/30min, ou seja, uma vez que a invasão dentro da coluna de acrílico ultrapassar os 200 ml significa que a invasão de fluido no leito foi completa e o LCM não foi satisfatório para o teste.

a) Caule

Os resultados obtidos dos testes em laboratório, usando o LCM caule derivado da MoLAM, permitiu a medição da eficiência do mesmo em perda parcial ou grave. O sistema foi avaliado em três configurações mantendo a concentração total de 25 ppb e variando as granulometrias do material conforme mostrado na Tabela 9.

Os resultados do caso#1 (mesh 12 (12 lb / bbl), mesh 32 (10 lb / bbl) e mesh 100 (3 lb / bbl)) são apresentados na Figura 34. Pode-se observar que este LCM obteve o controle do fluxo mantendo uma perda de fluido de 51,6 ml em um tempo de 30 minutos. Este material apresentou comportamento superior em relação ao fluido contendo o LCM comercial FracSeal (50 lb / bbl) e ao fluido com ausência do LCM de combate a perda. Seguindo os padrões de avaliação utilizados por Miranda et al. (2017) e de manter o bloqueio total de fluido no filtrante (brita) em um teste de 30 minutos realizando com uma pressão de 100 psi.

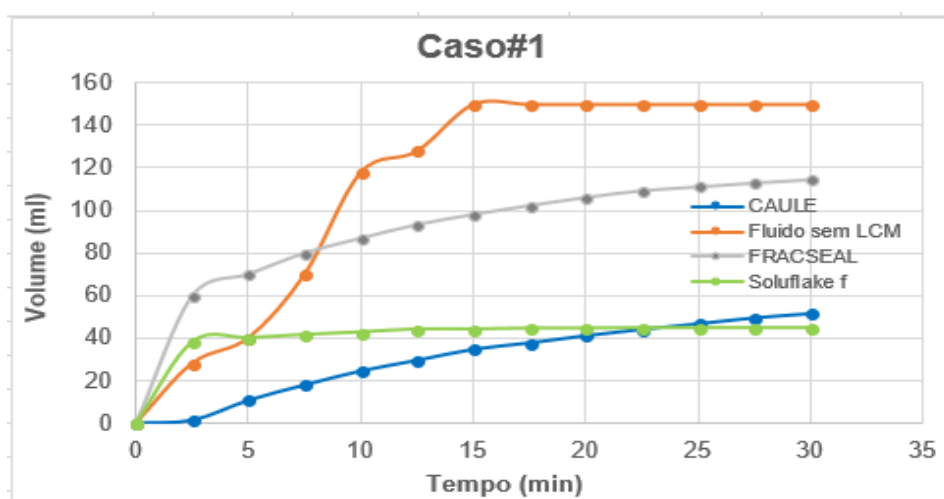


Figura 34 – Resultados do Caso#1 Sistema utilizando caule, Fracseal e Soluflake
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

O caso#2 consistiu de uma mistura de caule em diferentes granulometrias (mesh 12, 32 e 100) e concentrações (10ppb, 12ppb e 3ppb), conforme descrito na Tabela 9. Como pode-se observar na Figura 35, o fluxo foi interrompido em 30 minutos. Esta configuração obteve desempenho inferior ao caso#1, porém ainda mais eficiente que o FracSeal (50 ppb) e ao fluido sem adição de LCM.

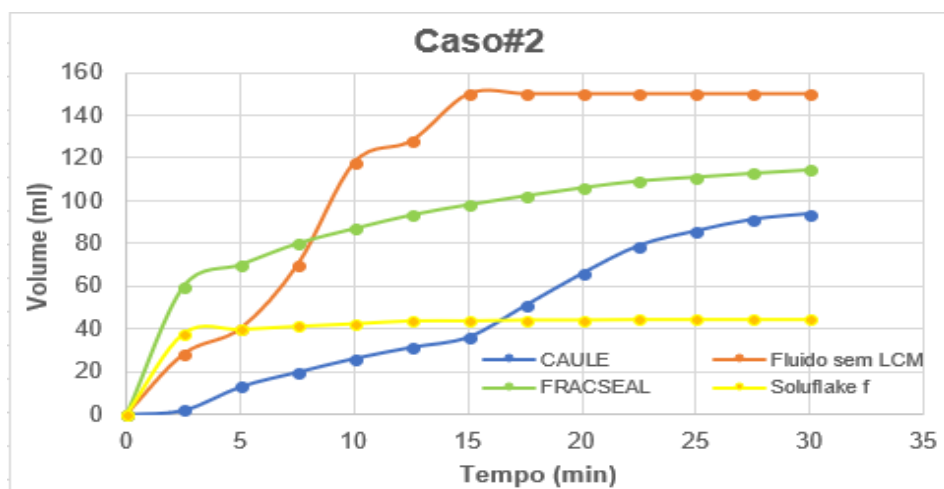


Figura 35 - Resultados do Caso#2 Sistema utilizando caule, Fracseal e Soluflake
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Para o sistema contendo a configuração de granulometrias (mesh 12, 32 e 100) e concentrações (10ppb, 3ppb e 12ppb) descrita no caso#3, os resultados obtidos não foram satisfatórios, com o sistema apresentando praticamente o mesmo comportamento que o fluido com ausência do LCM conforme mostra a Figura 36, ficando fora dos padrões de avaliação utilizados por Miranda et al. (2017) e Błaż (2011) de manter o bloqueio total de fluido no filtrante (brita) em um teste de 30 minutos realizando com uma pressão de 100 psi, sendo inadequado para ser usado em campo no controle de perda de circulação com estas concentrações.

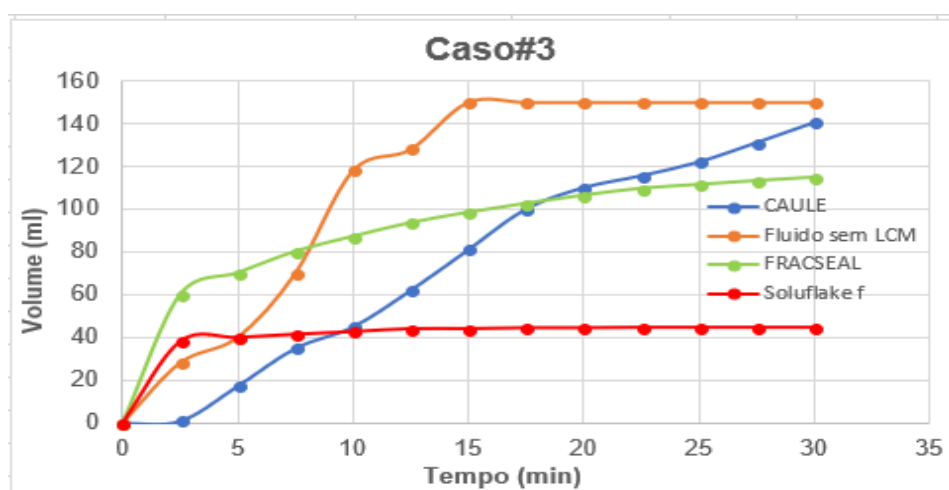


Figura 36 - Resultados do Caso#3 Sistema utilizando caule, Fracseal e Soluflake
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Comparando-se as diferentes configurações descritas em caso#1, caso#2 e caso#3, pode-se concluir que o melhor resultado foi obtido para o “caso#1” com a concentração da granulometria (mesh 12 com 12 ppb) seguido do “caso#2” com a

granulometria (mesh 32 com 12 ppb), sendo que os testes foram conduzidos nas mesmas condições experimentais tanto para o LCM fibroso (caule) derivados da MoLAM como para os materiais comerciais e ao fluido com ausência do LCM conforme mostra a Figura 37, e assim, reforçando a tese de Błaż (2011), que para cada tipo de rocha porosa deve-se selecionar o tipo e o tamanho apropriado de material para então vedar os poros. Sendo que, para perdas parciais ou graves o ideal é uma granulometria com maior diâmetro.

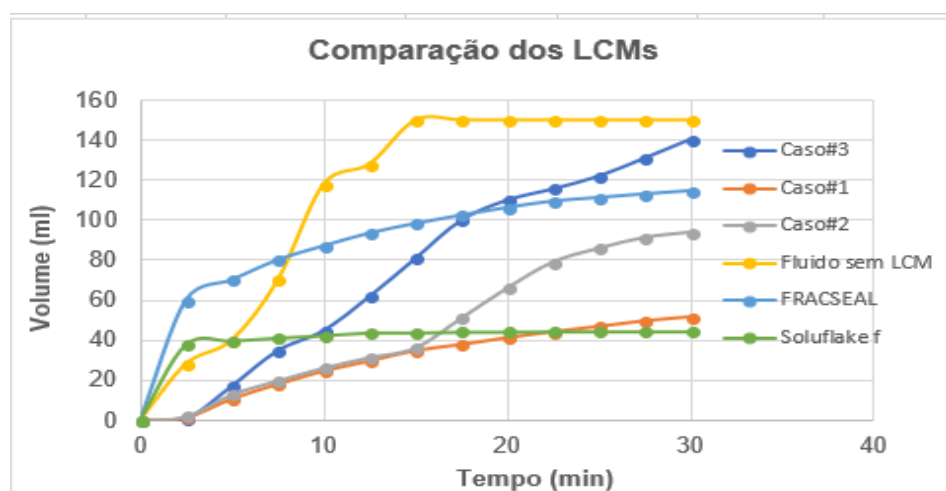


Figura 37 – Resultados obtidos da comparação entre os Caso#1, 2 e 3 com os LCMs comerciais

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

b) Vagem

Após a aplicação do diferencial de pressão de 100 psi foi observada a percolação do tampão que penetrou apenas 3 cm no leito de britas, seguido da formação de um reboco de baixíssima permeabilidade.

Os resultados mostram que, embora os LCMs comerciais Soluflake na concentração de 35 ppb e o Fracseal na concentração de 50 ppb seja capaz de controlar a perda de fluido, para o LCM derivados da MoLAM cerca de 8% (13ml) do volume total do fluido (200 ml) usado no experimento foi perdido através do meio filtrante “brita” na concentração de 23 ppb. Pode ser visto para “caso#1” demonstrado na Figura 38 que a combinação do amido de milho (6 ppb) com a vagem em diferentes granulometrias (mesh 12, 32 e 100) e concentrações (9ppb, 7ppb e 7ppb), obteve uma perda total de 13 ml em um tempo de 27,5 minutos mantendo um plugueamento total do fluido, ficando dentro dos padrões de avaliação recomendados por Miranda et al. (2017) e Błaż (2011) de manter o bloqueio total de fluido no filtrante em um teste de 30 minutos realizando com uma pressão de 100 psi.

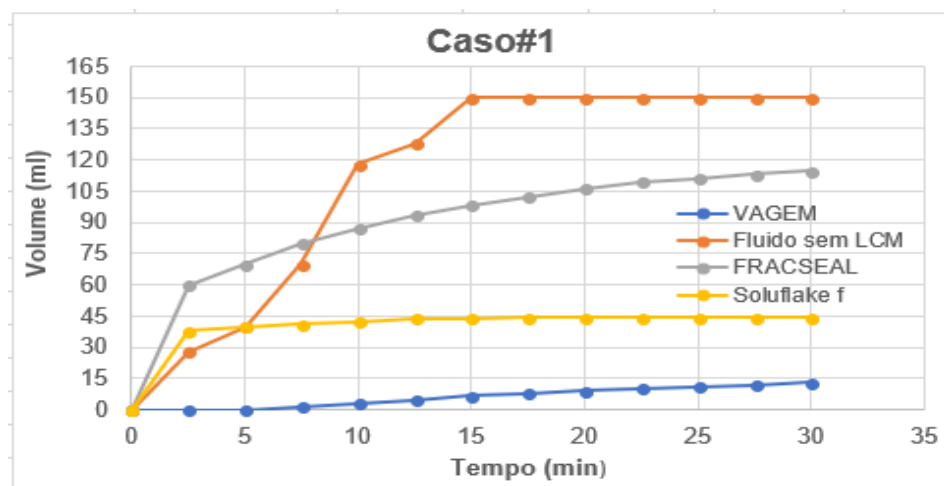


Figura 38 - Caso#1 do sistema utilizando vagem e materiais comerciais.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A Figura 39 mostra a invasão do fluido no meio filtrante “caso#2” consistindo de uma mistura de vagem em diferentes granulometrias (mesh 12, 32 e 100) e concentrações (7ppb, 9ppb e 7ppb), conforme descrito na Tabela 9. Como pode-se observar na Figura 39, o fluxo foi interrompido em 25 minutos com uma perda de fluido de 14,7 ml. Esta configuração apresentou uma perda de fluido menor em relação ao fluido base contendo os LCMs comerciais FracSeal, Soluflak e ao fluido com ausência do LCM. Correlacionando com o “caso#1”, observa-se que o “caso#2” obteve uma maior perda, porém com um tempo menor, podendo ser atribuído a esta configuração a concentração ao tamanho das partículas, ambos os casos com a concentração total de 23 ppb.

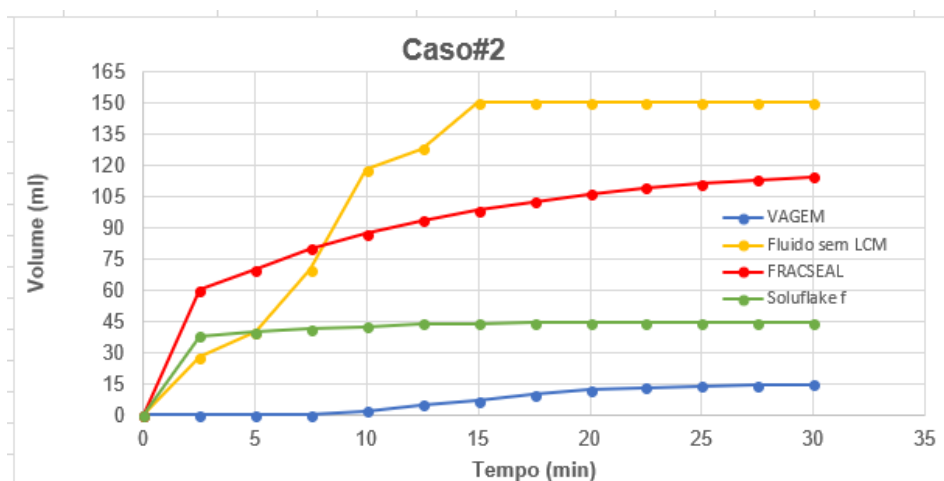


Figura 39 – Caso#2 do sistema utilizando vagem e materiais comerciais.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os testes realizados para o “caso#3” mostram a eficiência do plugueamento conduzido pela incorporação de LCM vagem, em diferentes granulometrias (mesh 12, 32 e 100) e concentrações (7ppb, 7ppb e 9ppb). Os resultados mostram a capacidade efetiva

de bloqueio em um tempo de 27,5 minutos com uma perda de 16 ml. Esta configuração obteve desempenho inferior ao caso#1 e 2, porém ainda mais eficiente que o FracSeal (50 ppb), Soluflake (35 ppb) e fluido sem adição de LCM. Para este sistema, a maior concentração está no mesh 100, o qual pode ser atribuído a quantidade maior de perda de fluido para este sistema, conforme mostra a Figura 40.

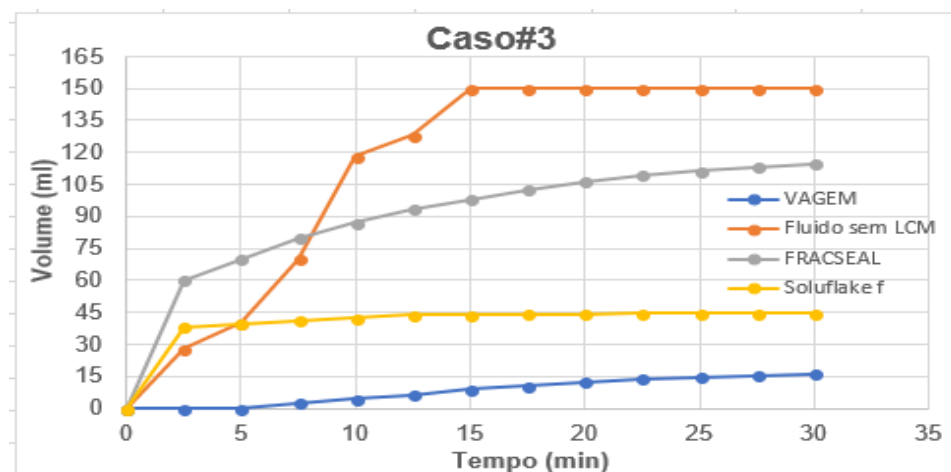


Figura 40 – Caso#3 do sistema utilizando vagem e materiais comerciais.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Através dos testes com LCM vagem, nas diferentes configurações descritas em caso#1, caso#2 e caso#3, pode-se concluir que o melhor resultado foi obtido para o “caso#1” com a concentração da granulometria (mesh 12 com 9 ppb), seguido do “caso#2” com a granulometria (mesh 32 com 9 ppb). Já para o “caso#3”, a maior concentração foi para a granulometria (mesh 100 com 9 ppb), sendo que os testes foram conduzidos nas mesmas condições experimentais tanto para o LCM fibroso (caule) derivados da MoLAM como para os materiais comerciais e ao fluido com ausência do LCM, e assim, reforçando a tese de Błaż (2011) que para cada tipo de rocha porosa deve-se selecionar o tipo e o tamanho apropriado de material para então vedar os poros. É evidente que este LCM desempenha resultados superiores aos comerciais, conforme mostrado na Figura 41. Portanto, indicando que é uma alternativa viável ou substituto confiável dos LCMs baseados em testes realizados em laboratórios.

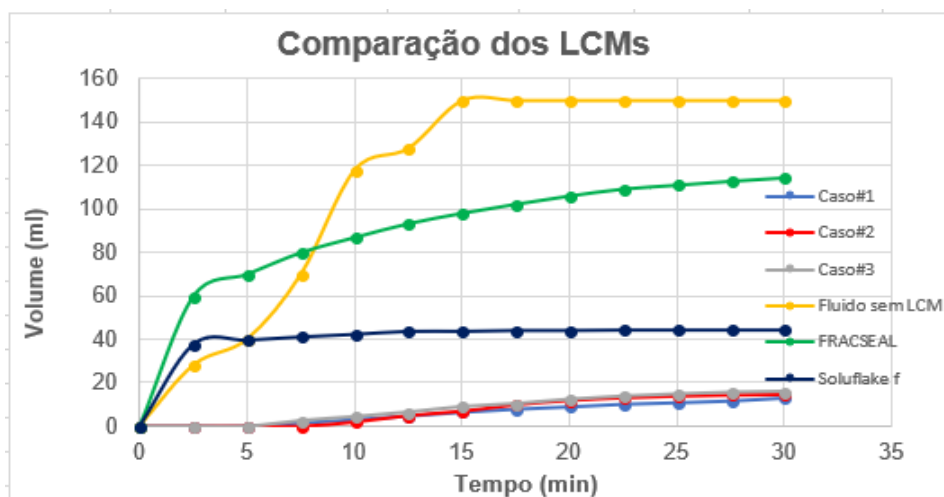


Figura 41- Comparação dos resultados obtidos utilizando os LCMs vagem com os materiais comerciais.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

c) Torta

A Figura 42 mostra as concentrações e invasão de fluidos contendo LCM torta derivado da MoLAM em diferentes granulometrias (mesh 12, 32 e 100) e concentrações (12ppb, 10ppb e 3ppb) no meio filtrante brita, com uma pressão de 100 psi durante um tempo de 30 minutos. Os resultados obtidos nesta configuração mostram que houve uma perda de 82,4 ml, equivalente a 33% do fluido total usado nos experimentos, porém ainda mais eficiente que o FracSeal (50 ppb), Soluflake (35 ppb) e fluido sem adição de LCM.

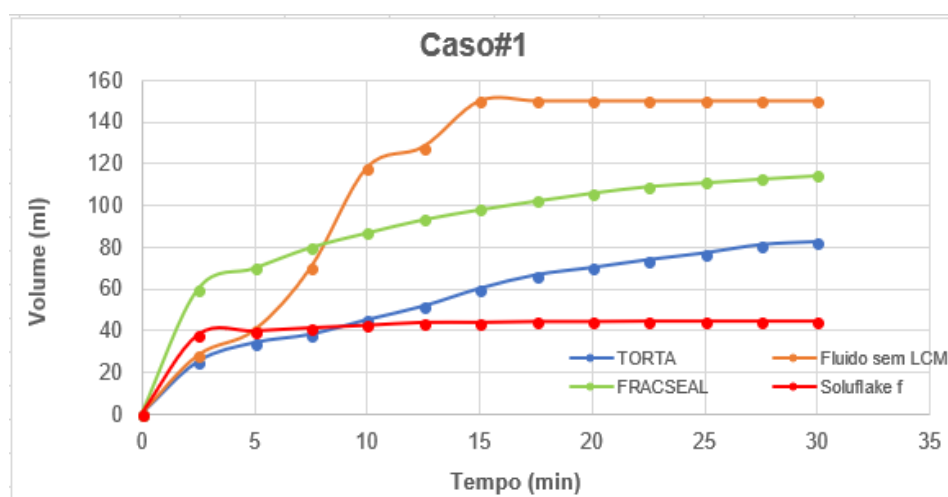


Figura 42 – Resultados do Caso#1 sistema utilizando torta, Fracseal e Soluflake

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Portanto o “caso#2”, demonstrado na Figura 43 na configuração das granulometrias (mesh 12, 32 e 100) e concentrações (10ppb, 12ppb e 3ppb). O fluxo foi interrompido em 30 minutos obtendo uma perda de fluido de 116,8 ml, enquanto que o

fluido comercial fracseal obteve uma perda de 114,6 ml, demonstrando que, o tamanho da granulometria tem influência no plugueamento total do fluido.

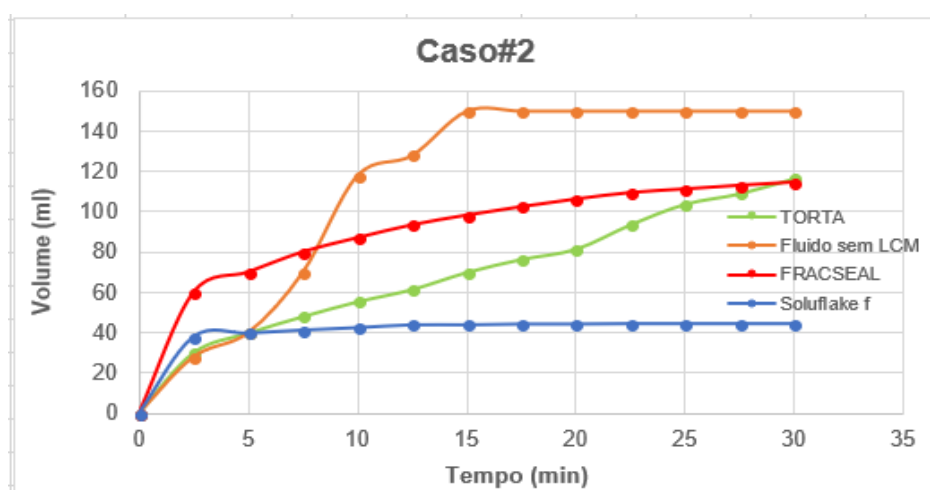


Figura 43 - Resultados do Caso#2 Sistema utilizando caule, *Fracseal* e *Soluflake*
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os resultados obtidos no “caso#3” no sistema contendo a configuração das granulometrias (mesh 12, 32 e 100) e concentrações (10ppb, 3ppb e 12ppb), obteve uma perda total de fluxo 119,6 ml em um tempo de 30 minutos. Como pode-se observar na Figura 44, que o “caso#3” obteve uma perda de fluido superior em relação ao “caso#1 e 2” assim como os materiais comerciais Fracseal e Soluflake, porém ainda mais eficiente que o fluido sem adição de LCM.

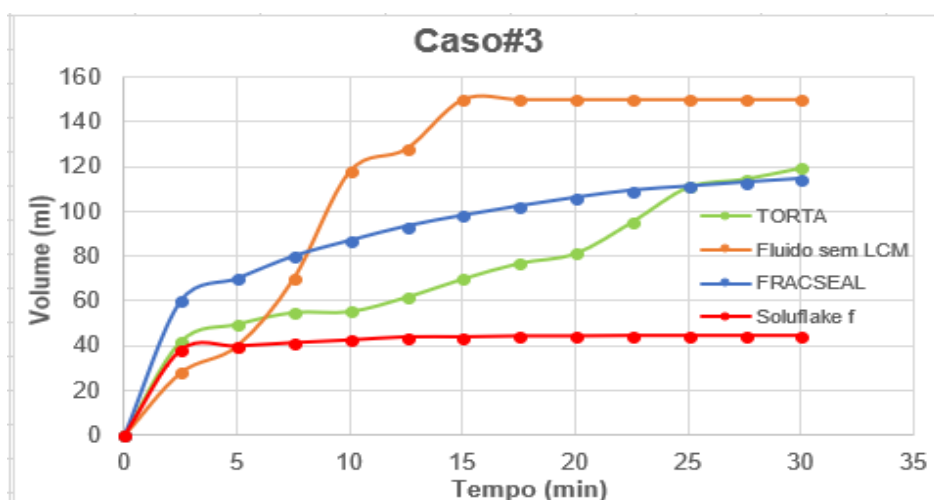


Figura 44 - Resultados do Caso#3 Sistema utilizando caule, *Fracseal* e *Soluflake*
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Comparando os resultados obtidos das granulometrias (12, 32 e 100), pode-se concluir que este LCM com granulometria de mesh 12 obteve os melhores resultados de

controle de fluxo seguido do mesh 32, porém o mesh 100 não apresentou um resultado positivo (Figura 45). Este resultado reforça o supracitado por Błaż (2011), de que, quanto maior a granulometria mais eficiência no controle de perda classificada como parcial ou grave.

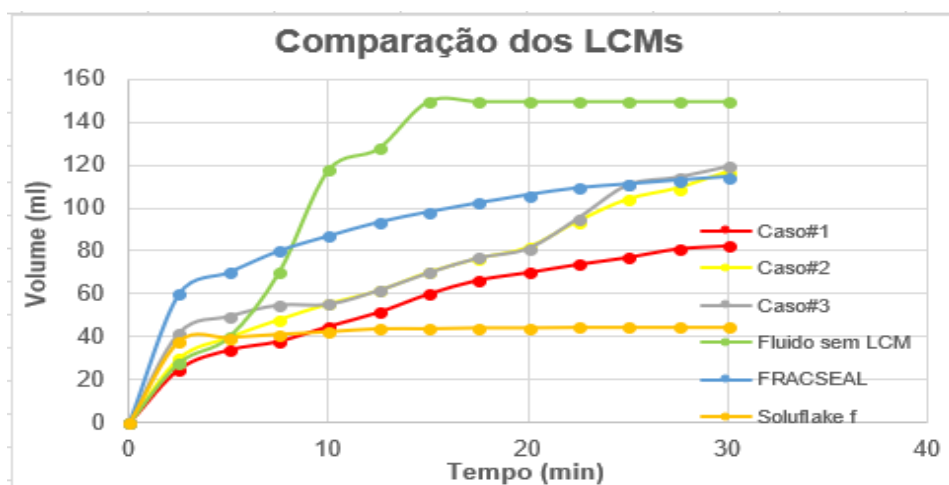


Figura 45 – Comparação dos resultados obtidos dos LCMs torta, Fracsel e Soluflak
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

5.3.2 Comparação dos resultados dos materiais quando usadas individualmente

A Figura 46 compara os resultados obtidos dos ensaios dos materiais (caule, vagem e torta) derivados da MoLAM nos “caso#1, 2 e 3”, com concentrações diferentes. Durante os testes pode-se avaliar que nem todos os produtos derivados da MoLAM podem ser usados individualmente para controle de perda de circulação em perfuração de poços de petróleo com a concentração total de 25 ppb para o caule e a torta e 23 ppb para a vagem, conforme mostrado na Tabela 9. Podendo ser observado que para o caule e a torta ambos com concentração total de 25 ppb, obtiveram uma perda de fluido superior aos testes realizados com a vagem. Sendo que, após os testes pode-se avaliar que a vagem com concentração de 23 ppb considerada menor em relação ao caule e a torta, obteve um bom desempenho nos três “casos#”, demonstrando-se que o tamanho e concentração da granulometria influencia em relação ao meio filtrante. O qual podem ser justificadas através das caracterizações dos materiais.

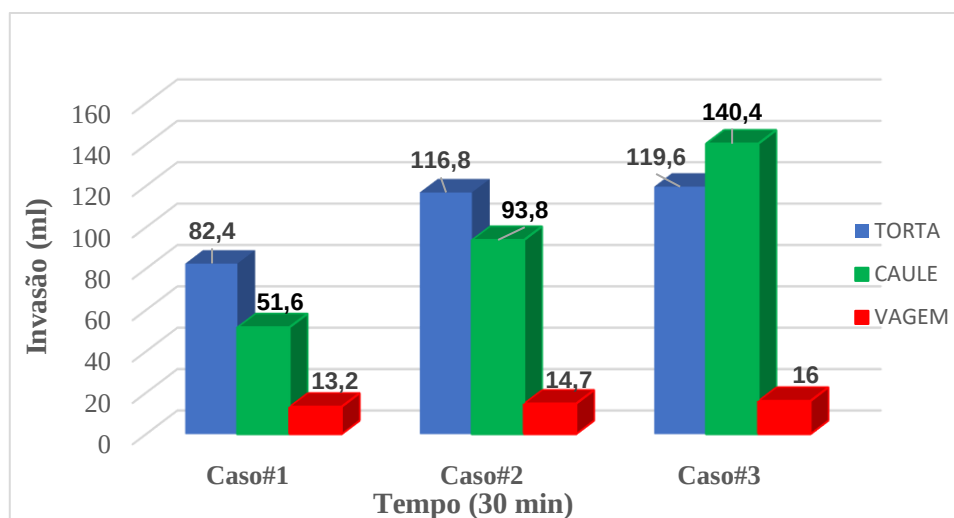


Figura 46 – Comparação da efetividade dos mesh 12, 32 e 100.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os resultados mostram claramente a capacidade efetiva de vedação e bloqueio de concentração de cada granulometria. Como pode-se observar na Figura 46, que os melhores resultados para os três materiais foram para o caso#1 que obteve maior concentração na granulometria (mesh 12), seguido pelo caso#2 com maior concentração da granulometria (mesh 32) e por fim o caso#3 com maior concentração para a granulometria (mesh 100). Isso reforça o supracitado por Błaż (2011), de que, quanto maior a granulometria mais eficiência no controle de perda classificada como parcial ou grave.

5.3.3 Materiais combinados

Comumente tem sido amplamente aclamado que as partículas de LCM devem ser grandes e uniformes, de modo a evitar perdas de fluidos após serem acondicionadas, mas não alterem significativamente as propriedades do fluido e possam ser removidas facilmente. Se a densidade da partícula LCM (se usada isoladamente ou em mistura) for semelhante à densidade do fluido base, haverá acomodação de partículas (Kumar et al., 2011). Quando partículas maiores eram as únicas partículas dentro da mistura, a perda de fluido aumentava devido a dois fatores: partículas maiores se acumulam na face da fratura, o que resultou na criação de um meio poroso muito permeável, e não tendo partículas finas para preencher os poros menores entre as partículas maiores, por outro lado, à medida que os materiais são triturados para tamanhos menores de partículas, parte da porosidade em massa é perdida, assim, a resiliência diminui conforme o tamanho das

partículas diminui. Sendo que, para suprir esta deficiência em perdas parciais ou grave, muitas vezes, os LCMs são usados em combinação com duas ou mais partículas de materiais diferentes misturadas.

A combinação de partículas de diferentes LCMs em um fluido base água pode melhorar a capacidade de obstrução em perfurações de poços de petróleo. Os resultados obtidos nas combinações de partículas de diferentes LCMs derivados da MoLAM e a distribuição de PSD na eficiência de vedação, estão caracterizados em 8 “casos#” que incluem quatros LCMs (torta, vagem sem semente, caule e esponja da vagem) derivados da MoLAM em diferentes granulometrias (mesh 12, 32 e 100), conforme mostra a Tabela 10, obtendo resultados positivos em todos os “casos#”. Segundo (Chengyuan et al., 2013), a combinação desses LCMs pode produzir um efeito sinérgico e aumentar consideravelmente a capacidade do plugueamento total do fluido durante a perfuração.

Para entender o efeito da combinação dos materiais fibrosos desenvolvido a partir de partes da árvore MoLAM, foi avaliado através da eficiência de vedação por testes de entupimento dos poros sob condições constante de pressão de 100psi durante um tempo de 30 minutos. Os resultados dos materiais foram agrupados em gráficos, em termos da concentração (20 a 29 ppb) variando para cada granulometria. O eixo x representa os intervalos de tempo 2,5 minutos utilizados nos testes e o eixo y representa a perda de fluido medida em ml. O desempenho global dos LCMs derivados da MoLAM quando usados em combinações em termos de pressão de vedação e perda de fluido é apresentado na Fig. 36 - 43 para cada “caso#”.

5.3.3.1 Caso#1: caule e esponja

A Figura 47 mostra o efeito da distribuição e concentração de PSD, usando uma combinação dos materiais caule e esponja, na concentração total de 21 ppb para formar um plugueamento total do fluido. Os resultados do “caso#1” foram obtidos através da combinação dos LCM caule na concentração das granulometrias (mesh 12 (8 ppb), mesh 32 (5 ppb) e mesh 100 (2 ppb)) com o LCM esponja na concentração (mesh 12 (2 ppb), mesh 32 (2 ppb) e mesh 100 (2 ppb)). Nesta configuração o controle de perda ocorreu em um tempo de 25 minutos, com uma perda total de 38 ml, obtendo uma perda menor de fluxo em relação ao fluido contendo o LCM comercial FracSeal (50 ppb), Soluflak (35 ppb) e ao fluido com ausência do LCM. Demonstrando que a combinação do PSD tem

uma enorme influência no controle de perda classificada como parcial ou grave.

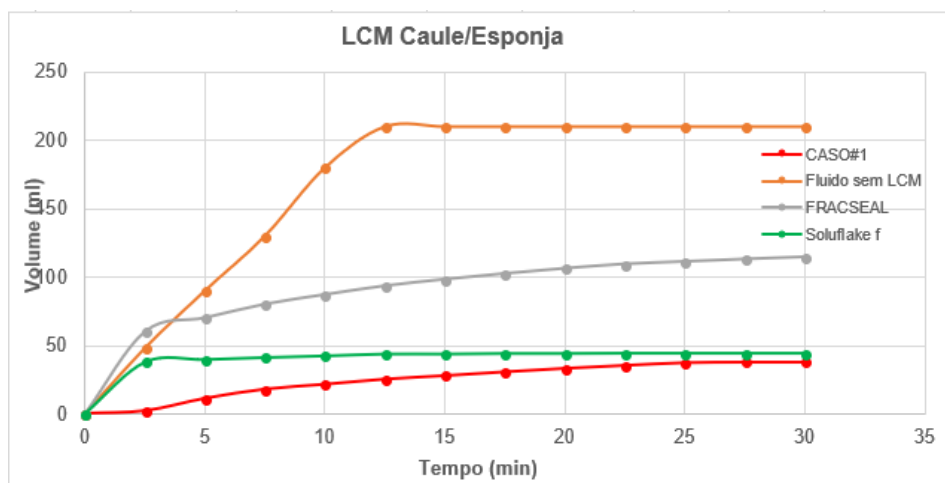


Figura 47 - Sistema composto com o caule e a esponja.
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Nesta configuração as partículas finas preencheram os poros menores entre as partículas maiores, por outro lado, as partículas maiores ajudaram a manter a resiliência. A combinação desses LCMs produziu um efeito sinérgico e aumentou a capacidade de controle de fluxo na formação mantendo-se nos padrões de avaliação recomendados por Miranda et al. (2017) e Błaz (2011) de manter o bloqueio total de fluido no filtrante em um teste de 30 minutos realizando com uma pressão de 100 psi, podendo-se ser justificadas também através das análises do MEV, o qual mostra que ambos possui pouco espaços vazios entre as partículas.

5.3.3.2 Caso#2: esponja, caule e vagem

Os materiais de combate a perda de circulação usado no “caso#2” é um sistema consistido por uma mistura de materiais fibrosos derivados da MoLAM. O sistema foi avaliado na combinação de três LCMs esponja, caule e vagem na concentração total de 23 ppb. Os resultados obtidos através da mistura da esponja em diferentes granulometrias (mesh 12 (2ppb), mesh32 (2ppb) e mesh100 (2 ppb)), com o LCM caule nas granulometrias (mesh 12 (5ppb) e mesh32 (5 ppb)) e por fim o LCM vagem nas granulometrias (mesh12 (2 ppb), mesh32 (3 ppb) e mesh100 (2 ppb)), conforme descrito na Tabela 10, mostra que o fluxo foi interrompido em um tempo de 27,5 minutos com uma perda total de 28 ml, conforme mostra a Figura 48. Esta configuração obteve desempenho superior ao caso#1, porém ainda mais eficiente que o FracSeal (50 ppb),

Soluflake (35 ppb) e fluido sem adição de LCM.

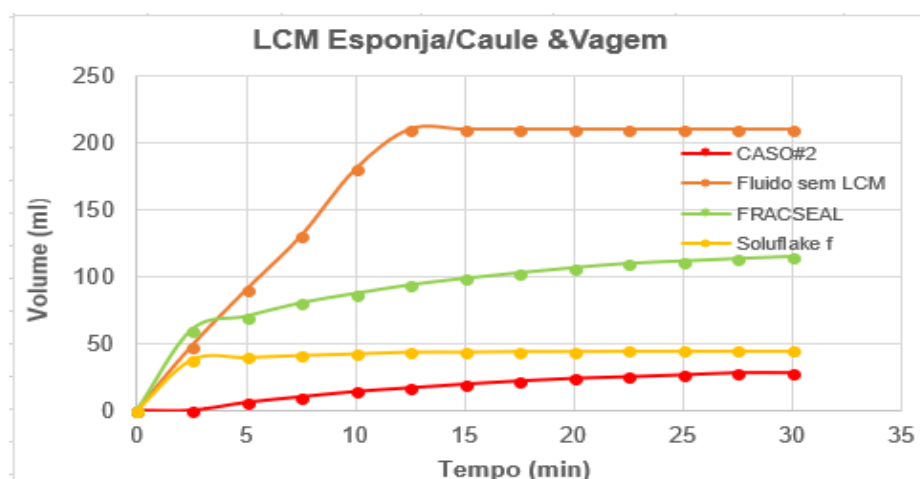


Figura 48 – Sistema composto com a combinação dos materiais esponja, torta e vagem.
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os resultados obtidos na combinação dos três materiais fortalece o supracitado por Kumar et al. (2011) de que as partículas finas preencheram os poros menores entre as partículas maiores, podendo ser atribuído também a eficiência do LCM caule, o qual obteve maior concentração. Os resultados obtidos das análises de microscopia eletrônica de varredura justificam o efeito positivo desta configuração, o qual mostra que as partículas dos LCMs possuem pouco poros e poucos espaços vazios entre as partículas após acomodação, sendo que os espaços e poros são preenchidos pela combinação das granulometrias dos materiais.

5.3.3.3 Caso#3: caule e vagem

Após a aplicação do diferencial de pressão de 100 psi em um tempo de 30 minutos e aplicando as concentrações dos materiais caule e vagem derivado da MoLAM, pode-se verificar a invasão do fluido no meio filtrante (brita) simulando uma perda de circulação parcial, conforme mostra a Figura 49. O sistema composto pela combinação dos LCMs caule e vagem sem semente derivado da MoLAM na concentração total de (26 ppb), consistiu de uma mistura de caule em diferentes granulometrias (mesh 12 e 32) e concentrações (8ppb e 7ppb) com o LCM vagem nas granulometrias (mesh 12, 32 e 100) e concentrações (4ppb, 5ppb e 2ppb), podendo ser visto na Figura 49, que o mesmo interrompeu o fluxo nessa configuração em um tempo de 30 minutos obtendo uma perda total de 51,4 ml de fluido. Nesta configuração ocorreu uma perda de fluido maior em relação ao “caso# 1 e 2”, porém ainda mais eficiente se compararmos aos fluidos contendo

o LCM FracSeal e ao fluido sem adição de LCM.

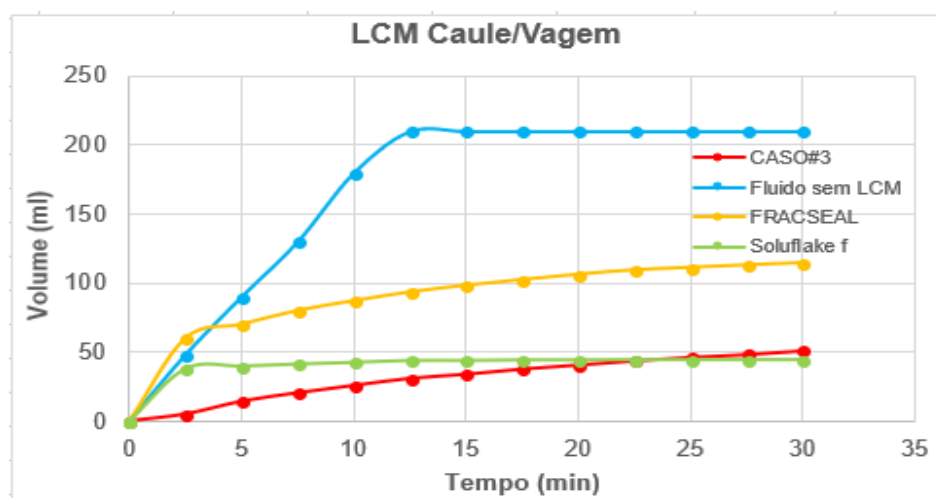


Figura 49 – Sistema composto com o caule e a vagem.
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Neste sistema contendo os LCMs caule e vagem, obteve uma perda maior de fluido que podem ser justificadas por ambos possuírem configuração e formato de partículas diferentes e assim não poderem preencher os espaços e poros vazios. Pode-se observar através das análises do MEV que os formatos das partículas dificultam a acomodação e fechamento dos espaços vazios.

5.3.3.4 Caso#4: caule e torta

Os resultados obtidos dos testes em laboratório, usando o meio filtrante brita, permitiu a medição da eficiência da combinação do LCM caule e torta derivados da MoLAM, conforme mostra a Figura 50. O sucesso desta combinação, numa configuração de severidade de perda classificada como parcial, foi obtido na concentração total de 29 ppb, sendo que, para o “caso#4” o sistema foi composto pelo caule de granulometrias (mesh 12 e 32) e concentrações (12ppb e 6ppb) em combinação com a torta de granulometrias (mesh 32 e 100) e concentrações (6ppb e 5ppb), com esta combinação de concentração de LCMs, o fluxo foi interrompido em 27,5 minutos, obtendo uma perda total 18 ml, e assim, atingindo os padrões de avaliação recomendados por Miranda et al. (2017) e Błaż (2011) de manter o bloqueio total de fluido no filtrante em um teste de 30 minutos realizando com uma pressão de 100 psi.

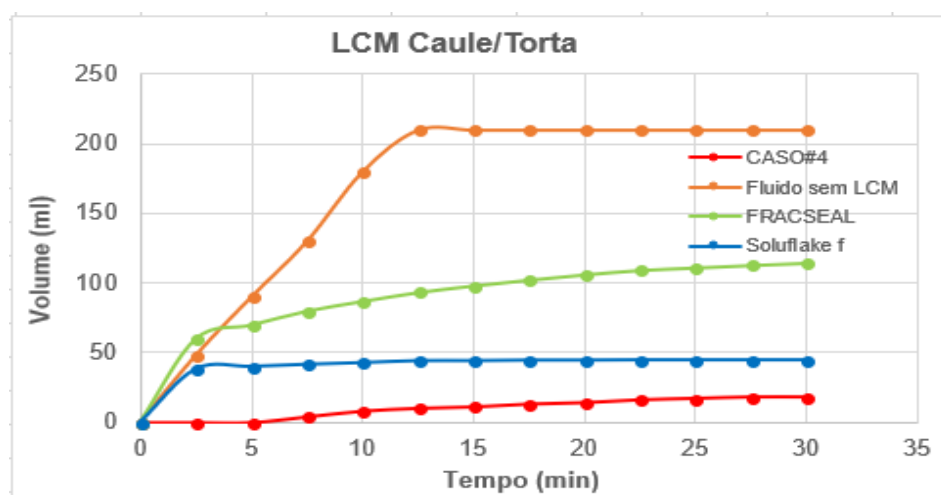


Figura 50 – Sistema composto com o caule e a torta

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Para esta configuração a perda de fluxo foi menor em relação ao caso# (1, 2 e 3), porém ainda mais eficiente que o FracSeal (50 ppb), Soluflake (35 ppb) e fluido sem adição de LCM. Podendo está relacionado a eficiência deste sistema a maior concentração do LCM caule na granulometria do mesh 12, nestes sistemas as partículas finas preencheram os poros menores entre as partículas maiores, por outro lado, as partículas maiores ajudaram a manter a resiliência. Isto pode ser confirmado através dos resultados do MEV, demonstrando que quase não há poros nas partículas e os espaços vazios deixados entre estas são preenchidos pela torta, que praticamente não existem poros em suas partículas, logo as partículas menores da torta preenchem os poros e espaços deixado pelo o caule.

5.3.3.5 Caso#5: caule, esponja, vagem e torta

O “caso#5” consistiu de uma mistura de LCMs tais como: caule, esponja, vagem e torta em diferentes granulometrias. Como pode-se observar na Figura 51, a eficiência da associação desses LCMs em um fluido base. Nesta configuração a concentração total de 20 ppb consistiu na mistura dos materiais caule nas granulometrias (mesh 12 (1 ppb) e mesh 32 (5 ppb)), com a esponja (mesh 12 (2 ppb) e mesh 32 (2 ppb)), com a vagem (mesh 32 (1 ppb) e mesh 100 (5 ppb)) e por fim com o LCM torta (mesh 32 (2 ppb) e mesh 100 (2 ppb)), conforme descrito na Tabela 10. Observa-se na Figura 51, que o fluxo foi interrompido em um tempo de 30 minutos com uma perda de fluxo 6 ml formando um plugueamento total do fluido. Demonstrando que a combinação do PSD com mais de um LCM, tem uma enorme influência no controle de perda classificada como parcial ou grave, obtendo uma perda de fluxo menor em relação aos casos# (1 a 4), assim como, os

fluidos contendo os materiais comerciais e ao fluido sem conter LCM. Portanto, a obstrução do fluido aumenta quando a quantidade de partículas com diâmetro de poros diferentes aumentou na mistura.

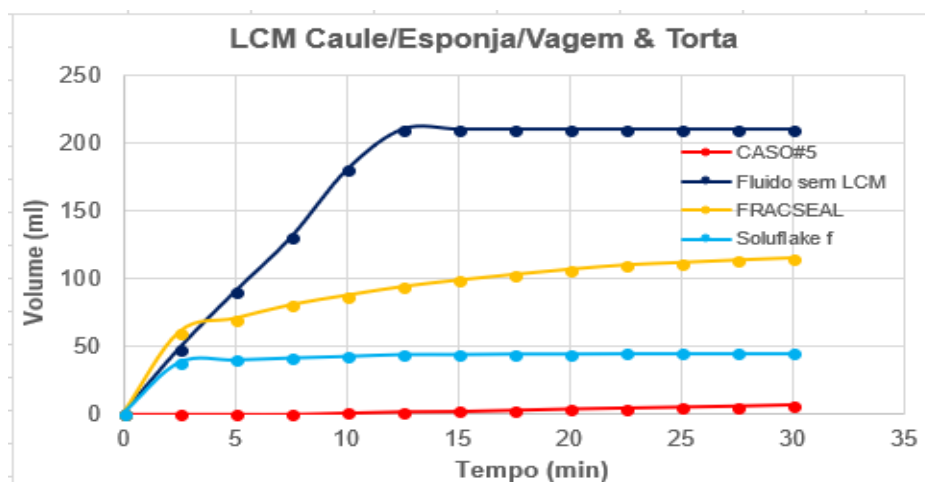


Figura 51 - Sistema composto com o caule, esponja, vagem e a torta.
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os resultados obtidos na combinação dos quatros materiais fortalecem o já citado por Kumar (2011), de que as partículas finas preencheram os poros menores entre as partículas maiores, porém não basta ser granulometrias pequenas ou grandes, mas ter geometria que possam preencher todos espaços entre as granulometrias, o qual pode ser confirmado através dos resultados do MEV, demonstrando os espaços vazios quando usados individualmente, no entanto, a eficiência neste caso pode ser atribuído a eficiência da combinação do PSD dos LCMs, obtendo uma perda de fluxo menor utilizando uma concentração menor em relação aos casos#(1 a 4).

5.3.3.6 Caso#6: Esponja e Vagem

O sistema contendo a combinação dos LCMs vagem e esponja, classificado como o “caso#6”, foi avaliado com uma concentração total de 26 ppb, conforme mostra a Tabela 10, os resultados obtidos com a combinação do LCM vagem nas granulometrias (mesh 32 e 100) e concentrações (11 ppb e 5 ppb) com o LCM esponja na concentração das granulometria (mesh 12, 32 e 100) e concentrações (4 ppb, 4 ppb e 2 ppb), pode ser observado na Figura 52. Os resultados obtidos com esta configuração apresentou uma perda total de 26 ml em um tempo de 25 minutos formando um plugueamento do fluxo, obtendo desempenho inferior ao caso#4 e 5”, porém ainda mais eficiente aos os caso# (1, 2 e 3) e aos teste com FracSeal (50 ppb), Soluflake (35 ppb) e fluido sem adição de LCM.

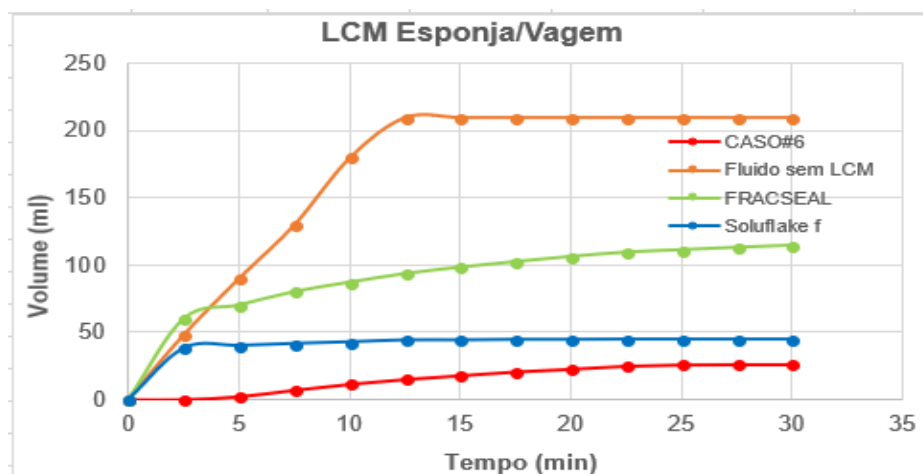


Figura 52 – Sistema composto com a esponja e a vagem.
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Os resultados obtidos para o “caso#6” confirma os supracitados nos casos acima de formar um plugueamento total do fluido, porém para este caso a eficiência está na forma de como as partículas podem se agrupar, ou seja, a geometria das partículas, conforme mostram os resultados do MEV. Como pode-se observar para os dois materiais que nas partículas praticamente não existem poros vazios, e assim, influenciando na formação do reboco.

5.3.3.7 Caso#7: Esponja e Torta

A Figura 53 mostra os resultados obtidos dos testes com a combinação dos LCMs torta e esponja derivados da MoLAM, consistindo em um sistema composto por uma mistura de materiais fibrosos na concentração total de 25 ppb. O sistema foi avaliado mantendo a concentração da esponja nas granulometrias (mesh12 (10 ppb) e mesh32 (5 ppb)) com a concentração da torta nas granulometrias (mesh32 (5 ppb) e mesh100 (5 ppb)), nesta configuração, o plugueamento total do fluxo ocorreu após uma perda de 2 ml em um tempo de 22,5 minutos, obtendo uma menor perda de fluxo em relação aos casos# (1 a 6).

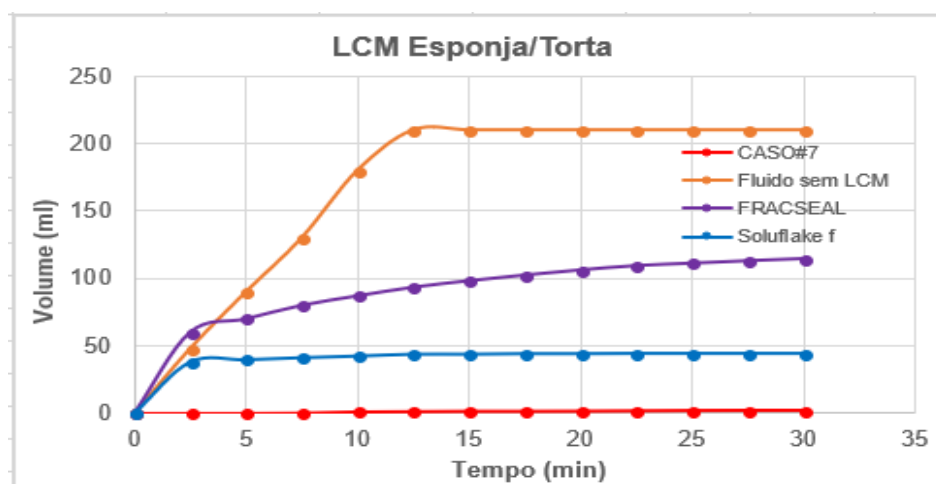


Figura 53 – Sistema composto com a esponja e a torta.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

A eficiência desta combinação de LCMs está relacionada a maior concentração da esponja, o que ajuda a manter a resiliência das partículas maiores e assim produzindo um efeito sinérgico com as granulometrias da torta, aumentando consideravelmente a capacidade da formação de um plugueamento total no meio filtrante. No entanto, os LCMs torta possuem maior facilidade de preencherem os poros e espaços vazios entre as partículas maiores deixado pela esponja, por possuir uma geometria circular, além de praticamente não existirem poros vazios nas partículas da torta. Estes resultados podem ser observados através das Análises de Microscopia Eletrônica de Varredura.

5.3.3.8 Caso#8: Torta e Vagem

O desempenho da combinação dos LCMs torta e vagem usados no “caso#8” na concentração total de 28 ppb, pode ser visto na Figura 54. Este sistema consistiu de uma mistura do LCM torta em diferentes granulometrias (mesh3 2 e 100) e concentrações (4 ppb e 6ppb) com as concentrações da vagem nas granulometrias (mesh3 2 e 100) e concentrações (15 ppb e 3ppb). Como pode-se observar que o fluxo foi interrompido em 20 minutos obtendo uma perda total de 2 ml de fluido. Ficando dentro dos padrões de avaliação recomendados por Miranda et al. (2017) e Błaż (2011) de manter o bloqueio total de fluido no filtrante em um teste de 30 minutos realizado com uma pressão de 100 psi.

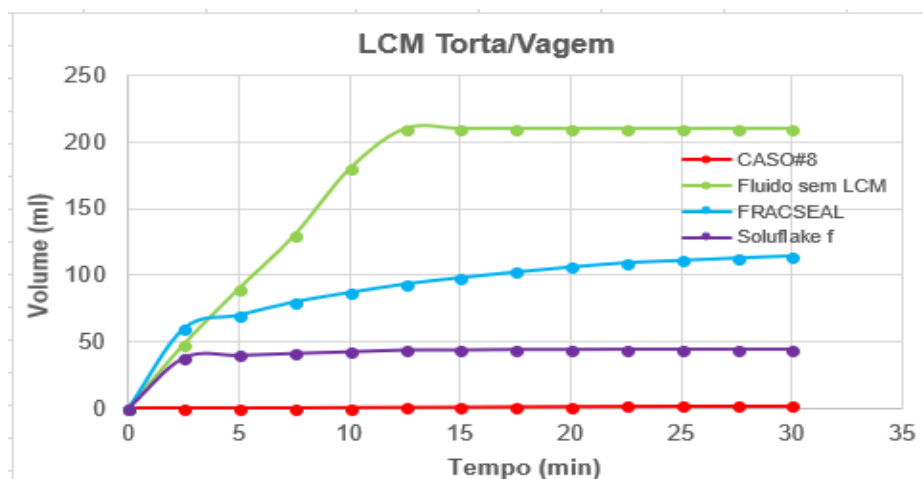


Figura 54 – Sistema composto com a torta e a vagem.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

Nesta configuração os resultados obtidos foram iguais ao “caso#7”, porém neste sistema a concentração foi maior, em contrapartida o controle do fluxo ocorreu em um tempo considerado menor. A eficiência para este caso está relacionada à maior concentração da vagem, a qual possui um formato de partículas que podem ser agrupadas com as partículas das tortas. Podendo ser justificada através das análises do MEV, demonstrando que a vagem possui pequenos espaços vazios entre as partículas e poucos poros vagos, os quais são preenchidos pela torta, que praticamente não existem poros livres e tem maior facilidade de preencher os espaços entre as partículas do LCM vagem devido ao seu formato arredondado.

5.3.4 Solubilidade em Ácido (HCl 15%)

Os testes de solubilidade foram realizados somente com o tampão (plug) retirado do teste com materiais em combinação do caso#5 onde contém os quatros LCMs derivados da MoLAM.

Para os testes de solubilidade em ácido, uma amostra de aproximadamente 15 gramas do reboco formado no teste de filtração foi utilizado para determinar a solubilidade em HCl 15%. Os LCMs derivados da MoLAM mostraram-se totalmente reativo ao ácido, porém cinética lenta. Essa mesma amostra demorou cerca de 1 hora e 41 minutos para ser quase que totalmente solubilizada (85%) em HCl 15% e na temperatura (ambiente) de 25 °C, sendo que, após duas horas de exposição a uma solução 15% HCl se mostrou totalmente solubilizada. A Figura 55 ilustra o resultado final do ataque ácido.

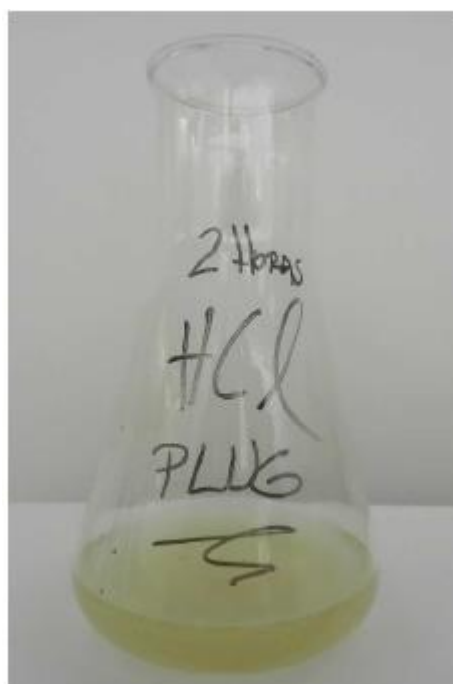


Figura 56 – Solubilidade em HCl 15%.
Fonte: Elaborada pelo próprio autor.

6 CONCLUSÃO

O estudo desenvolvido comprova o potencial de uso dos materiais fibrosos derivado da *Moringa Oleífera* Lam, no combate às perdas de circulação em perfuração de poços de petróleo com formações rochosas e permeáveis.

Todos os materiais investigados derivados da MoLAM apresentaram degradação mássica máxima entre 300 °C e 600 °C. Dentre os materiais avaliados a torta apresentou melhores resultados da estabilidade térmica. Nas análises de MEVs todos os materiais investigados apresentaram potencial para serem usados em fluidos de combate a perda de circulação, por apresentar poucos poros nas partículas e propriedades físicas que ajudam o acoplamento de duas ou mais partículas na formação de reboco na parede do poço.

Relacionando a perda mássica com a porosidade, observou-se, que os LCMs derivados da MoLAM apresentaram bom rendimento com reduzida perda mássica, demonstrando que em altas temperaturas (348-600°C) a degradação mássica máxima foram mantidas em quase 62% da massa total, sendo que para o LCM vagem foi 26,30%, caule 30,16% e pôr fim a torta com 61,61%. Destacando melhor rendimento para vagem obtendo uma perda total próximo de 26% de sua massa, o qual pode ser associado a resistência da decomposição da celulose, hemicelulose e da lignina presente no material

tornando-se uma alternativa para serem usados em perfurações HPHT.

Os fluidos com LCMs de MoLAM formam rapidamente uma barreira de permeabilidade ultra-baixa para a invasão de fluidos, sendo que, quando usados para controle de perda por infiltração os LCMs torta e a vagem usados individualmente apresentaram os melhores resultados, entre todos os materiais testados.

No controle por infiltração, o LCM da torta com o mesh 200 foi o mais eficaz em limitar a invasão, obtendo o valor de 4,6 cm em baixa pressão (100psi) seguido pela vagem com 5 cm. Já o caule apesar de ser um material fibroso, quando usado individualmente não conseguiu limitar a invasão do fluido a 5 cm.

Os resultados obtidos utilizando materiais combinados para controlar perdas de circulação por infiltração usando areia 20/40 como meio poroso, mostraram que os LCM da torta com a vagem obtiveram os melhores desempenhos para o combate à perda de circulação por infiltração, uma vez que apresentaram um desempenho positivo, obtendo-se uma invasão considerada baixa, ou seja, abaixo de 5 cm de infiltração.

Porém quando utilizados para controle de perda parcial ou total os LCMs de MoLAM formam rapidamente um plugueamento total de fluidos, sendo que, os LCMs vagem e torta usados individualmente para este cenário apresentaram os melhores resultados, entre todos os materiais testados, porém quando usados em combinação com dois ou mais LCMs todos os quatro materiais apresentaram resultados positivos em todos os testes.

No controle de perda de circulação classificada como parcial ou total, quando usado LCM individualmente, a vagem foi o mais eficaz formando um plugueamento total de fluxo em 27,5 minutos com uma perda de 13ml, seguido pelo caule obtendo o controle total em 30 minutos com uma perda de 51,6 ml de fluido. Já a torta apesar de ser um material fibroso, quando usado individualmente não apresentou bons resultados comparado com a vagem e o caule obtendo uma perda de 82,4 ml, porém ainda mais eficiente que o LCM comercial fracseal.

Os resultados obtidos de materiais combinados derivados da MoLAM mostraram que todos os LCMs podem ser usados para controlar perda de circulação parcial, sendo que, através dos testes pode-se ver que a perda total de fluido foi muito pequena, o qual pode ser comprovada no caso#7 (esponja e torta) obtendo controle total de fluido em 22,5 minutos com uma perda de 2 ml seguido pelo caso#8 (torta e vagem) com o controle total de fluxo em 20 minutos alcançando uma perda de 2ml, no entanto, a maior perda de fluido obtida com os testes em combinação foi para o caso#3 alcançando uma perda total

de 51,4 ml em 30 minutos, porém ainda mais eficiente que o FracSeal (114,6 ml) e Soluflake (44,5 ml) e fluido sem adição de LCM. Concluindo-se que todos os LCMs derivados da MoLAM utilizados em combinação para controlar perda de circulação parcial ou total utilizando a brita como meio poroso apresentaram melhores desempenho que os LCMs comerciais tanto na concentração de LCM como na quantidade de perda de fluido em um tempo de 30 minutos.

Podemos concluir que os quatros materiais derivados da MoLAM mostrou-se totalmente reativo ao ácido, sendo que, após duas horas de exposição a uma solução 15% HCl se mostrou totalmente solubilizada. Apresentando potencial para ser usado em fluido de combate a perda de circulação por ser um LCM facilmente removível.

Por fim, pode-se afirmar que todos os LCMs derivados da MoLAM quando usados em combinação apresentaram potencial para serem utilizadas como aditivos nos fluidos à base água para controle de perda de circulação parcial ou total em poços de petróleo. Já para perda por infiltração os melhores resultados foram com os LCMs torta e vagem ficando dentro dos padrões considerados pela indústria (5cm), porem com concentrações de 17ppb, consideradas menores que os LCMs comerciais. Entre as características mais importantes podem-se relacionar-se a estabilidade térmica, por não serem tóxicos e serem de fontes renováveis.

7 REFERÊNCIAS

ABIMBOLA, M.; KHAN, F.; KHAKZAD, N. Dynamic safety risk analysis of offshore drilling. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 30, p. 74-85, 2014. ISSN 0950-4230.

ABIMBOLA, M.; KHAN, F.; KHAKZAD, N.; BUTT, S. Safety and risk analysis of managed pressure drilling operation using Bayesian network. **Safety science**, v. 76, p. 133-144, 2015. ISSN 0925-7535.

ABRIL, C.; CASTAÑEDA, C.; GOMEZ, C. Process Safety: Beyond Personal Safety in Drilling. SPE Latin American and Caribbean Health, Safety, Environment and Sustainability Conference, 2015. Society of Petroleum Engineers.

AIRD, P. Drilling & Well Engineering : Introduction to Well Control. 2009 2009.

AL-SABA, M. T.; NYGAARD, R.; SAASEN, A.; NES, O.-M. Lost circulation materials capability of sealing wide fractures. SPE Deepwater Drilling and Completions Conference, 2014. Society of Petroleum Engineers.

ALLIN, M. G.; DENNIS JR, J. L.; WHITFILL, D. L. **Lost circulation compositions**: Google Patents 2010.

ALMAGRO, S. P. B.; FRATES, C.; GARAND, J.; MEYER, A. Sealing Fractures: Advances in Lost Circulation Control Treatments. **Oilfield Review**, v. 26, n. 3, p. 4-13, 2014.

ALSABA, M.; NYGAARD, R.; HARELAND, G. Review of lost circulation materials and treatments with an updated classification. AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, TX, Apr, 2014. p.15-16.

ALSABAGH, A. et al. Investigation of some locally water-soluble natural polymers as circulation loss control agents during oil fields drilling. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 23, n. 1, p. 27-34, 2014. ISSN 1110-0621.

AMANULLAH, M. Characteristics, behavior and performance of ARC Plug-A date seed-based sized particulate LCM. SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, 2016. Society of Petroleum Engineers.

AMORIM, L. V. Melhoria, proteção e recuperação da reologia de fluidos hidroargilosos para uso na perfuração de poços de petróleo. **Campina Grande, PB: Curso de**, 2003.

ARAÚJO, C. S. et al. Characterization and use of Moringa oleifera seeds as biosorbent for removing metal ions from aqueous effluents. **Water Science and Technology**, v. 62, n. 9, p. 2198-2203, 2010. ISSN 0273-1223.

ARAÚJO, M. D. S. Manejo de espécies florestais para produção de madeira, forragem e restauração de áreas degradadas. **Caicó: Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte**, 2010.

ARBIZU, A.; REID, P.; SANTOS, H. Field results of ultra-low invasion drilling fluids demonstrate reduced wellbore instability, reduced mud losses, wellbore strengthening and improved well productivity. PaperAADE-06-DF-HO-15 presented at the AADE 2006 Fluids Conference, Houston, 2006.

ARSHAD, U. et al. Engineered Fiber-Based Loss Circulation Control Pills to Successfully Combat Severe Loss Circulation Challenges During Drilling and Casing Cementing in Northern Pakistan. SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, 2014. Society of Petroleum Engineers.

BARRETO, M. B. et al. Constituintes químicos voláteis e não-voláteis de *Moringa oleifera* Lam., Moringaceae. **Revista Brasileira de Farmacognosia, João Pessoa**, v. 19, n. 4, p. 893-897, 2009.

BENNION, D.; THOMAS, F.; BIETZ, R.; BENNION, D. **Underbalanced Drilling: Praises and Perils. SPEDC 13 (4): 214–222.** SPE-52889-PA. DOI: 10.2118/52889-PA. 1998

BHANDARI, J.; ABBASSI, R.; GARANIYA, V.; KHAN, F. Risk analysis of deepwater drilling operations using Bayesian network. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 38, p. 11-23, 2015. ISSN 0950-4230.

BHUPTAWAT, H.; FOLKARD, G.; CHAUDHARI, S. Innovative physico-chemical treatment of wastewater incorporating *Moringa oleifera* seed coagulant. **Journal of Hazardous Materials**, v. 142, n. 1, p. 477-482, 2007. ISSN 0304-3894.

BŁAŻ, S. Zapobieganie zanikom płuczek w formacje skalne w procesie wiercenia. **Nafta-Gaz**, v. 67, n. 3, p. 182-191, 2011. ISSN 0867-8871.

CAI, B. et al. Performance evaluation of subsea blowout preventer systems with common-cause failures. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 90, p. 18-25, 2012. ISSN 0920-4105.

CALÇADA, L. et al. Evaluation of suspension flow and particulate materials for control of fluid losses in drilling operation. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 131, p. 1-10, 2015. ISSN 0920-4105.

CHENGYUAN, X. et al. **High-strength high-stability pill system to prevent lost circulation: IPTC 2013.**

CLARK JR ROSCOE, C. **Plugging well casing perforations:** Google Patents 1957.

CUNHA, G. D. C. et al. Applications of magnetic hybrid adsorbent derived from waste biomass for the removal of metal ions and reduction of 4-nitrophenol. **Journal of Environmental Management**, v. 213, p. 236-246, 2018/05/01/ 2018. ISSN 0301-4797.

DALLA ROSA, K. **Moringa oleifera: a perfect tree for home gardens.** Agroforestry Information Service, 1993.

DAS, S. et al. Effect of steam pretreatment of jute fiber on dimensional stability of jute composite. **Journal of applied polymer science**, v. 76, n. 11, p. 1652-1661, 2000. ISSN 1097-4628.

DE ANDRADE, L.; FRANÇA, F.; RAMOS, A.; DA SILVA, G. INFLUÊNCIA DA ATIVIDADE ANTIOXIDANTE EM DIFERENTES PERCENTUAIS DE DIESEL/BIODIESEL UTILIZANDO O COMPOSTO ADITIVO OBTIDO A PARTIR DA MORINGA OLEIFERA LAM. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 850-856, 2015. ISSN 2359-1757.

DE ANDRADE, L. C. T.; FRANÇA, F. R. M.; RAMOS, A. L. D.; DA SILVA, G. F. Avaliação da estabilidade do biodiesel produzido a partir da moringa oleifera lam. **Scientia Plena**, v. 12, n. 5, 2016. ISSN 1808-2793.

DROGER, N. et al. Degradable fiber Pill for lost circulation in fractured reservoir sections. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 2014. Society of Petroleum Engineers.

FAHEY, J. W. Moringa oleifera: A Review of the Medical Evidence for Its Nutritional, Therapeutic, and Prophylactic Properties. Part 1. **Trees for life Journal**, v. 1, n. 5, 2005.

FANG, C. C.; THAEMLITZ, C. J. **Method and biodegradable super absorbent composition for preventing or treating lost circulation**: Google Patents 2009.

FEKETE, P. O. et al. Wellbore Stability Management in Depleted and Low Pressure Reservoirs. SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition, 2013. Society of Petroleum Engineers.

FENG, Y.; GRAY, K. A parametric study for wellbore strengthening. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 30, p. 350-363, 2016. ISSN 1875-5100.

FERREIRA, P. M. P.; FARIAS, D. F.; OLIVEIRA, J. T. D. A.; CARVALHO, A. D. F. U. Moringa oleifera: bioactive compounds and nutritional potential. **Revista de Nutrição**, v. 21, n. 4, p. 431-437, 2008. ISSN 1415-5273.

FIDELIS, M. E. A.; DE ANDRADE SILVA, F.; TOLEDO FILHO, R. D. The influence of fiber treatment on the mechanical behavior of jute textile reinforced concrete. Key Engineering Materials, 2014. Trans Tech Publ. p.469-474.

FONTANA, P.; WATKINS, L.; ARONSTAM, P. **Drilling system and method for controlling equivalent circulating density during drilling of wellbores**: Google Patents 2007.

FUGLIE, L. J. The miracle tree: Moringa oleifera, natural nutrition for the tropics. 1999.

FUGLIE, L. J.; FUGLIE, J. **The miracle tree: The multiple attributes of Moringa**. 2001

GATLIN, C.; NEMIR, C. E. Some effects of size distribution on particle bridging in lost circulation and filtration tests. **Journal of Petroleum Technology**, v. 13, n. 06, p. 575-

578, 1961. ISSN 0149-2136.

GHALAMBOR, A.; SALEHI, S.; SHAHRI, M. P.; KARIMI, M. Integrated workflow for lost circulation prediction. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, 2014. Society of Petroleum Engineers.

GHOSH, K. et al. Horizontal drilling experience in the Panna field. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference, 1999. Society of Petroleum Engineers.

GOUGH, G.; GRAHAM, R. A.; MACBEATH, J. Offshore Underbalanced Drilling—The Challenges at Surface. IADC/SPE Drilling Conference, 2008. Society of Petroleum Engineers.

GRAY, G.; DARLEY, H.; CAENN, R. **Fluidos de perfuração e completção**: Rio de Janeiro: Elsevier 2014.

GREGG, S.; SING, K. **Adsorption, surface area and porosity, London, New York, Paris, San Diego, San Francisco, San Paulo**: Sydney, Tokyo, Toronto, Academic Press Inc 1982.

GUALBERTO, A. F. et al. Características, propriedades e potencialidades da moringa (*Moringa oleifera* Lam.): Aspectos agroecológicos. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 5, p. 19-25, 2015. ISSN 1981-8203.

HARRISON, M. F., A.; THURIERE, A.; MORGENTHALER, M. A novel approach to the analysis of non-aqueous fluids for drilling. **American Association of Drilling Engineers**, 2017.

HOWARD, G. C.; SCOTT JR, P. An analysis and the control of lost circulation. **Journal of Petroleum Technology**, v. 3, n. 06, p. 171-182, 1951. ISSN 0149-2136.

IAN L EVERHARD; JUAN ESPINOZA; IAIN MALEY; MONTIEL, A. Drilling on the Coast of Tabasco Mexico: Battling Wellbore Instability in a Narrow Pressure Window. **AADE American Association of Drilling Engineers** v. AADE-16-FTCE-53, 2016.

JAHN, S. A. A. Using Moringa seeds as coagulants in developing countries. **Journal-American Water Works Association**, v. 80, n. 6, p. 43-50, 1988. ISSN 0003-150X.

JUNG, I. L. Soluble extract from *Moringa oleifera* leaves with a new anticancer activity. **PloS one**, v. 9, n. 4, p. e95492, 2014. ISSN 1932-6203.

KHAKZAD, N.; KHAN, F.; AMYOTTE, P. Quantitative risk analysis of offshore drilling operations: A Bayesian approach. **Safety science**, v. 57, p. 108-117, 2013. ISSN 0925-7535.

KULKARNI, S. D.; JAMISON, D. E.; TEKE, K. D.; SAVARI, S. Managing Suspension Characteristics of Lost-Circulation Materials in a Drilling Fluid. **SPE Drilling & Completion**, v. 30, n. 04, p. 310-315, 2016. ISSN 1064-6671.

KUMAR, A.; SAVARI, S. Lost circulation control and wellbore strengthening: looking

beyond particle size distribution. AADE-11 NTCE-21, AADE National Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, USA, 2011. p.12-14.

LABENSKI, F.; REID, P.; SANTOS, H. Drilling fluids approaches for control of wellbore instability in fractured formations. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, 2003. Society of Petroleum Engineers.

LEÃO, R.; LUZ, S.; ARAUJO, J.; NOVACK, K. Surface treatment of coconut fiber and its application in composite materials for reinforcement of polypropylene. **Journal of natural fibers**, v. 12, n. 6, p. 574-586, 2015. ISSN 1544-0478.

LIM, T. Moringa oleifera. In: (Ed.). **Edible medicinal and non medicinal plants**: Springer, 2012. p.453-485.

LORENZI, H.; MATOS, F. J.; FRANCISCO, J. M. **Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. 2002. ISBN 8586714186.

LU, S. et al. The Missing Pressure Factor in Deepwater SBM. **American Association of Drilling Engineers**, 2017.

LUCENA, D. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas. **Revista Matéria**, v. 21, n. 1, p. 72-82, 2015. ISSN 1517-7076.

LUCENA, D. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas. **Revista Matéria**, v. 21, n. 1, p. 72-82, 2016. ISSN 1517-7076.

LUMMUS, J. L.; AZAR, J. J. Drilling fluids optimization: a practical field approach. 1986.

LUO, S.; LI, Y.; MENG, Y.; ZHANG, L. A new drilling fluid for formation damage control used in underbalanced drilling. IADC/SPE Drilling Conference, 2000. Society of Petroleum Engineers.

LUZARDO, J. et al. Alternative Lost Circulation Material for Depleted Reservoirs. OTC Brasil, 2015. Offshore Technology Conference.

MAKKAR, H.; BECKER, K. Nutrients and antiquality factors in different morphological parts of the Moringa oleifera tree. **The Journal of Agricultural Science**, v. 128, n. 3, p. 311-322, 1997. ISSN 1469-5146.

MANSANO, R. B. **Engenharia de perfuração e completção em poços de petróleo**. PETROBRÁS. Florianópolis: 48 p. 2004.

MANSOUR, A. et al. Smart Lost Circulation Materials for Productive Zones. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2017. Society of Petroleum Engineers.

MEDRANO, J. A. L. et al. Particle pyrolysis modeling and thermal characterization of pecan nutshell. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 126, n. 2, p. 969-979,

2016. ISSN 1388-6150.

MESSENGER, J. Lost Circulation, A Practical Approach to Preventing, Assessing, and Solving Lost Circulation Problems. **Penn-Well Publishing Co., Tulsa, OK**, 1981.

MIRANDA, C. et al. Materials for Controlling Severe Lost Circulation-Laboratory Evaluation. SPE Latin America and Caribbean Petroleum Engineering Conference, 2017. Society of Petroleum Engineers.

MISHRA, R. K.; MOHANTY, K. Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**, v. 251, p. 63-74, 2018/03/01/ 2018. ISSN 0960-8524.

NASIRI, A. et al. Experimental and field test analysis of different loss control materials for combating lost circulation in bentonite mud. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 44, p. 1-8, 2017. ISSN 1875-5100.

NAYBERG, T. Laboratory study of lost circulation materials for use in both oil-based and water-based drilling muds. **SPE Drilling Engineering**, v. 2, n. 03, p. 229-236, 1987. ISSN 0885-9744.

NAYBERG, T.; PETTY, B. Laboratory study of lost circulation materials for use in oil-base drilling muds. SPE Deep Drilling and Production Symposium, 1986. Society of Petroleum Engineers.

NELSON, E. B., GUILLOT, D. Well Cementing. **Schlumberger**, v. second edition, 2006.

NYGAARD, G.; NÆVDAL, G. Nonlinear model predictive control scheme for stabilizing annulus pressure during oil well drilling. **Journal of Process Control**, v. 16, n. 7, p. 719-732, 2006. ISSN 0959-1524.

OFEI, T. N.; BAVOH, C. B.; RASHIDI, A. B. Insight into ionic liquid as potential drilling mud additive for high temperature wells. **Journal of Molecular Liquids**, v. 242, p. 931-939, 2017. ISSN 0167-7322.

OFEI, T. N.; BENDARY, A.; MOHAMED, R. Formulating Water-Based Muds for High Temperature Wellbores Using Potassium Formate Brine and Synthetic Polymers: A Design of Experiment Approach. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, 2016. Society of Petroleum Engineers.

OLIVEIRA, D. S. et al. Obtenção do biodiesel através da transesterificação do óleo de Moringa Oleífera Lam. **Holos**, v. 1, 2012. ISSN 1518-1634.

OLIVEIRA JUNIOR, A. M. D. et al. Utilização de sementes de moringa oleífera lam como alternativa para produção de biodiesel. **Revista GEINTEC-Gestão, Inovação e Tecnologias**, v. 3, n. 2, p. 012-025, 2013. ISSN 2237-0722.

OYEYINKA, A. T.; OYEYINKA, S. A. Moringa oleifera as a food fortificant: recent trends and prospects. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, 2016.

ISSN 1658-077X.

PENHA, R. S. et al. Casca de arroz Quimicamente Tratada como Adsorvente de Baixo Custo para a Remoção de Íons Metálicos (Co^{2+} and Ni^{2+}). **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 3, p. 588-604, 2016. ISSN 1984-6835.

PEREIRA, F. S. G. et al. Moringa oleifera as sustainable source for energetic biomass. **International Journal of Chemistry**, v. 7, n. 2, p. 177, 2015. ISSN 1916-9701.

PEREIRA, F. S. G. et al. Produção de biodiesel metílico com óleo purificado de Moringa oleifera lamarck. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 3, p. 873-888, 2016. ISSN 1984-6835.

RAMASAMY, J.; AMANULLAH, M. Novel Fibrous Lost Circulation Materials Derived from Deceased Date Tree Waste. SPE Kingdom of Saudi Arabia Annual Technical Symposium and Exhibition, 2017. Society of Petroleum Engineers.

RANGEL, M. S. Moringa oleifera: uma planta de uso múltiplo. **Embrapa Tabuleiros Costeiros-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 1999.

RAZAVI, O. et al. Optimum particle size distribution design for lost circulation control and wellbore strengthening. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 35, p. 836-850, 2016. ISSN 1875-5100.

REHM, B. et al. **Managed pressure drilling**. Elsevier, 2013. ISBN 0127999876.

ROSA, S. M. et al. Chlorine-free extraction of cellulose from rice husk and whisker isolation. **Carbohydrate Polymers**, v. 87, n. 2, p. 1131-1138, 2012. ISSN 0144-8617.

SALAZAR-RABAGO, J. J. et al. Biosorption mechanism of Methylene Blue from aqueous solution onto White Pine (*Pinus durangensis*) sawdust: effect of operating conditions. **Sustainable Environment Research**, v. 27, n. 1, p. 32-40, 2017. ISSN 2468-2039.

SCOTT, P. D. et al. Size degradation of granular lost circulation materials. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition, 2012. Society of Petroleum Engineers.

SOUZA, C. E. C. D. **Ensaio sobre os Mecanismos de Ação de Aditivos Poliméricos em Fluidos de Perfuração**. 2007. Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ/IQ, 2007, Tese de Doutorado.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de engenharia do petróleo**, Editora Interciência. Petrobrás. Rio de Janeiro, 2004.

TOMCZAK, F.; SYDENSTRICKER, T. H. D.; SATYANARAYANA, K. G. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part II: Morphology and properties of Brazilian coconut fibers. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 7, p. 1710-1721, 2007/07/01/ 2007. ISSN 1359-835X.

VALVERDE, E.; REITSMA, R.; HUTCHINGS, T. Radio Frequency Identification

(RFID)-Enabled Circulation Sub Precisely Spots Loss-Circulation Material in Critical Interval. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2015. Society of Petroleum Engineers.

VAVIK, D.; SANGESLAND, S.; SHAYEGH, M. Loss of Circulation an Indication of Hydrocarbon Influx? , SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition, 2016. Society of Petroleum Engineers.

WALKER, C. O. **Encapsulated water absorbent polymers as lost circulation additives for aqueous drilling fluids**: Google Patents 1987.

WANG, H. et al. Best practice in understanding and managing lost circulation challenges. **SPE Drilling & Completion**, v. 23, n. 02, p. 168-175, 2008. ISSN 1064-6671.

WHITFILL, D. Lost circulation material selection, particle size distribution and fracture modeling with fracture simulation software. IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, 2008. Society of Petroleum Engineers.

WU, Q. **Engineering plastic/inorganic fiber blends as lost circulation materials**: Google Patents 2016.

WU, S. et al. A DBN-based risk assessment model for prediction and diagnosis of offshore drilling incidents. **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, v. 34, p. 139-158, 2016. ISSN 1875-5100.

XU, C.; KANG, Y.; YOU, L.; YOU, Z. Lost-Circulation Control for Formation-Damage Prevention in Naturally Fractured Reservoir: Mathematical Model and Experimental Study. 2017/6/1/ 2017.

XUE, S. et al. Application of a Novel Temporary Blocking Agent in Refracturing. SPE Asia Pacific Unconventional Resources Conference and Exhibition, 2015. Society of Petroleum Engineers.

ZHAO, S.; ZHANG, D. Supercritical fluid extraction and characterisation of Moringa oleifera leaves oil. **Separation and Purification Technology**, v. 118, p. 497-502, 2013. ISSN 1383-5866.

ZIHENG YAO et al. Tackling Lost Circulation Challenges for Drilling the Depleted and Naturally Fractured Formations in Bakken
AADE American Association of Drilling Engineers, v. AADE-15-NTCE-02, 2015.