

Monografia de Graduação

ESTUDO DO EFEITO DAS TENSÕES INTERFACIAIS EM SISTEMAS ÁGUA/TENSOATIVO/ÓLEOS PESADOS

Antonia Beatriz Viana Oliveira

Natal, fevereiro de 2010

Antonia Beatriz Viana Oliveira

ESTUDO DO EFEITO DAS TENSÕES INTERFACIAIS EM SISTEMAS ÁGUA/TENSOATIVO/ÓLEOS PESADOS

Relatório do trabalho final de curso apresentado a banca examinadora do Departamento de Engenharia Química (DEQ) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) como pré-requisito para obtenção do conceito na disciplina trabalho e conclusão de curso (DEQ0300) no período letivo de 2009.2.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lins de Barros Neto.

Natal/RN,
Fevereiro/2010

OLIVEIRA, Antonia Beatriz Viana Oliveira – Estudo do efeito das tensões interfaciais em sistemas água/tensoativo/óleos pesados. Monografia, UFRN, Programa de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lins de Barros Neto

Co-orientador: Prof. Dr. Afonso Avelino Dantas Neto

RESUMO: O coreflow é uma nova técnica promissora para transportar óleo pesado, caracterizado pela formação de um fino anel de água que lubrifica o óleo que se encontra na parte central da tubulação. Uma forma de solucionar o problema de adesão do óleo nas paredes da tubulação é a utilização de tensoativos como lubrificante das tubulações. Esses agentes químicos reduzem a tensão interfacial, aumentando a mobilidade dos óleos e modificam a superfície das tubulações, tornando-a oleofóbica. Sendo assim, esse trabalho tem como objetivo estudar o efeito dos tensoativos em sistemas compostos de água, óleo pesado e tensoativo, no intuito de aplicá-los no sistema de escoamento de óleo pesado do tipo coreflow. Para os testes de tensão interfacial utilizou – se um óleo mineral de alta viscosidade com propriedades semelhantes ao petróleo e tensoativos não-iônicos. Os tensoativos T1 e T5 obtiveram tensões de 3,8 e 8,9 mN/m respectivamente. E para os tensoativos T6 e T10 pertencentes à outra linha de tensoativos, os valores são 7 e 18 mN/m, respectivamente. O conhecimento do comportamento da tensão interfacial é de grande importância para o transporte de óleos pesados.

Palavras-chave: Óleo pesado, tensoativo, tensão interfacial.

ABSTRACT

Coreflow is new promising technique for heavy oil transport in which a thin ring of water in tube wall greases the oil found at central region of the pipeline. A new approach in order to solve the problem of oil adhesion on wall pipeline is based on use of surface-active molecules (surfactants) as lubricant of pipelines. These molecules reduce the surface tension increasing the oil mobility modifying the pipeline surfaces. In this work we investigate the effect of using surface-active molecules using systems of water, heavy oil as well as the surface-active molecule in order to transport the heavy oil in this system called coreflow. Experiments in which surface tension were assayed used mineral oil like petroleum with non-ionic surface-active molecules. Surface-active molecules T1 and T5 showed surface tension of 3.8 and 8.9 mN/m, respectively. Surface-active molecules T6 and T10, belonging to another line, showed surface tension of 7 and 18 mN/m, respectively. Knowledge of interfacial tension behavior plays a role on transport of heavy oil.

Key-words: Heavy oil, surface-active molecules, interfacial tension.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que foi fundamental em todos os momentos durante a realização desse trabalho, e quem me fortaleceu para vencer os vários obstáculos enfrentados durante a graduação.

A minha mãe e à minha família que me deram todo apoio necessário para que eu seguisse em frente com os meus objetivos.

Agradeço a ANP (Agência Nacional do Petróleo) pelo apoio financeiro e ao Nupeg (Núcleo de Pesquisa de Petróleo e Gás Natural/UFRN) pela estrutura física e suporte a essa pesquisa.

Aos meus colegas bolsistas de graduação Ênio e Israel, pela grande força na realização dos experimentos e a doutoranda Paula Katherine, que me acompanhou durante todo o trabalho e quem me deu apoio técnico e teórico para a realização do mesmo.

Agradeço também aos professores Eduardo Lins e Afonso pela oportunidade de trabalhar no Laboratório do Nupeg.

Sumário

1. Introdução.....	14
2. Objetivos.....	16
3. Relevância do trabalho	18
4. Aspectos teóricos	20
4.1. Tensoativos.....	20
4.1.1. Definição.....	20
4.1.2. Classificação	21
4.2. Micelização	23
4.3. Adsorção na interface	24
4.4 - Tensão Superficial/Interfacial.....	25
5. Método experimental	29
5.1. Reagentes.....	29
5.2. Equipamentos.....	30
5.2.1. Viscosidade do óleo	30
5.2.2. Ponto de fulgor do óleo	31
5.2.3. Densidade do óleo	32
5.2.4. Tensão interfacial	32
6. Resultados e discussões	36
6.1. Caracterização do óleo	36
6.2. Tensão interfacial dos tensoativos etoxilados de cadeia linear.....	36
6.3. Tensão interfacial dos tensoativos etoxilados com anel aromático	38
7. Conclusões.....	41
8. Bibliografia.....	43

Lista de Figuras

Capítulo IV

Figura 4.1. Molécula Tensoativa. -----	20
Figura 4.2. Distribuição de Tensoativo em Água -----	20
Figura 4.3. Representação esquemática dos tipos de tensoativos -----	21
Figura 4.4. Cloreto de distearildimônio -----	22
Figura 4.5. Exemplo de tensoativo aniônico: lauril sulfato de sódio -----	22
Figura 4.6. Molécula do cocoamidopropil betaína -----	23
Figura 4.7. Formação do agregado micelar -----	23
Figura 4.8. Representação das atividades de moléculas anfífilas -----	25
Figura 4.9. Representação esquemática das forças moleculares em um líquido -----	26

Capítulo V

Figura 5.1. Reômetro Mars Thermo Scientific -----	30
Figura 5. 2. Semi automatic Pensky-Martens -----	31
Figura 5.3. Tensiômetro K100 -----	32
Figura 5.4. Tensiômetro DAS 100 -----	33
Figura 5.5. Perfil da gota -----	33

Capítulo VI

Figura 6.1. Curvas de tensão óleo – tensoativos de cadeia linear e etoxilados -----	37
Figura 6.2. Curvas de tensão óleo – tensoativos etoxilados com anel aromático -----	39

Lista de Tabelas

Capítulo V

Tabela 5.1. Tensoativos de cadeia linear etoxilados -----	29
Tabela 5.2. Tensoativos de cadeia linear com anel aromático -----	29
Tabela 5.3. Equipamentos utilizados na pesquisa -----	30

Capítulo VI

Tabela 6.1. Características do óleo mineral -----	36
Tabela 6.2. Valores finais das tensões interfaciais dos ----- tensoativos etoxilados com cadeia linear.	38
Tabela 6.3. Valores finais das tensões interfaciais dos ----- tensoativos etoxilados com anel aromático	39

Capítulo I

INTRODUÇÃO

1

1. Introdução

O mercado mundial do petróleo passa por constantes variações de preços devidos não só aos interesses dos países exportadores como das ofertas do petróleo e dos custos econômicos envolvidos na sua exploração e produção. Em alguns casos, quando um reservatório é descoberto, o mesmo é descartado pois, após uma avaliação técnica e econômica conclui – se que o seu aproveitamento não é viável, devido ao alto custo para recuperar o óleo, que geralmente é pesado.

Apesar de existir dados de reservas de óleos pesados da ordem de trilhões de barris ao redor do mundo, este tipo de petróleo ainda é pouco explorado devido à falta de investimentos em tecnologia e capacitação profissional para a sua exploração. Visto que as reservas de óleos leves tendem a diminuir com o decorrer dos anos surge, então, a necessidade de se recuperar o óleo pesado.

Durante o transporte do petróleo são envolvidos muitos gastos com tubulações e energia, bem como perdas em incrustações. Uma nova técnica promissora de transporte de fluidos é o método conhecido como *core – flow*, caracterizado pela formação de um fino anel de água que lubrifica o óleo que se encontra na parte central da tubulação (Obregón, 2001). Todavia, um dos problemas operacionais relaciona-se à aderência do óleo sobre a superfície da tubulação, podendo diminuir a eficiência no processo. Uma forma de solucionar esse problema de adesão do óleo é a utilização de materiais hidrofílicos e/ou oleofóbicos como revestimento interno das tubulações.

Esse trabalho é justificado pela presença de grandes jazidas de óleo pesado na nossa região, adicionando os tensoativos o escoamento do óleo é facilitado no interior dos tubos, conseqüentemente, há um ganho na produção e uma diminuição dos custos de energia com o sistema de bombeio. Dessa forma torna-se mais viável a exploração dessas jazidas.

Capítulo II

OBJETIVOS

2

2. Objetivos

O propósito deste trabalho é estudar a influência da etoxilação dos tensoativos na redução da tensão interfacial entre um óleo pesado e as soluções de tensoativos para posterior aplicação no transporte de óleos pesados, seja na forma coreflow ou emulsionado.

Os objetivos específicos são:

- Escolher o óleo a ser estudado e caracterizá-lo;
- Seleção dos tensoativos;
- Obter curvas de tensão interfacial entre as soluções de tensoativo e o óleo.

Capítulo III

RELEVÂNCIA DO TRABALHO

3

3. Relevância do trabalho

O conhecimento e o estudo das tensões interfaciais são fatores muito importantes para serem aplicados ao transporte de óleos pesados. Observando as propriedades dos tensoativos de diminuir as tensões interfaciais, aumentando conseqüentemente a mobilidade do óleo, percebe – se que sua aplicação no setor de transporte de óleo na indústria petrolífera, diminuiria os gastos com energia e produção.

Capítulo IV

ASPECTOS TEÓRICOS

4

4. Aspectos teóricos

4.1. Tensoativos

4.1.1. Definição

Tensoativos são moléculas anfifílicas, ou seja, possuem afinidade por substâncias polares e apolares, na qual a extremidade polar é hidrofílica e a apolar, hidrofóbica. A estrutura da molécula do tensoativo pode ser representada pela Figura 4.1.

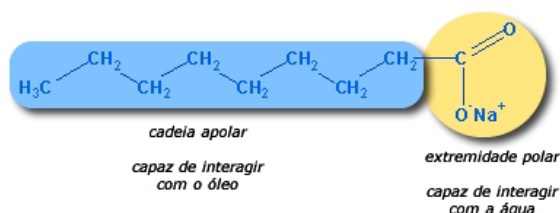


Figura 4.1. Molécula Tensoativa.

Dentre as propriedades que os tensoativos apresentam estão a capacidade de formar bolhas e espumas na superfície de um líquido e redução da tensão superficial ou interfacial ao se adsorver nas superfícies ou interfaces líquido-líquido, líquido-gás e sólido-líquido.

A parte hidrofóbica é geralmente composta por uma cadeia hidrocarbônica que tem pouca afinidade com água, sendo projetada para fora da superfície, enquanto o segmento hidrófilo fica voltado internamente para a água (Figura 4.2).

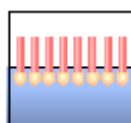


Figura 4.2. Distribuição de Tensoativo em Água.

Dentre os grupos apolares e hidrófobos presentes, destacam-se as cadeias carbônicas com mais de 10 átomos de carbono e os anéis aromáticos. Nos grupos polares iônicos, a afinidade com a água provém da presença de cargas na molécula, já nos grupos polares não iônicos, a afinidade com a água provém da formação de pontes de hidrogênio com a porção hidrófila.

4.1.2. Classificação

Os tensoativos podem ser classificados de acordo com a região polar ou hidrofílica, em: tensoativos iônicos (catiônicos, aniônicos e anfóteros) e tensoativos não-iônicos. A Figura 4.3 expressa de forma esquemática esta classificação.

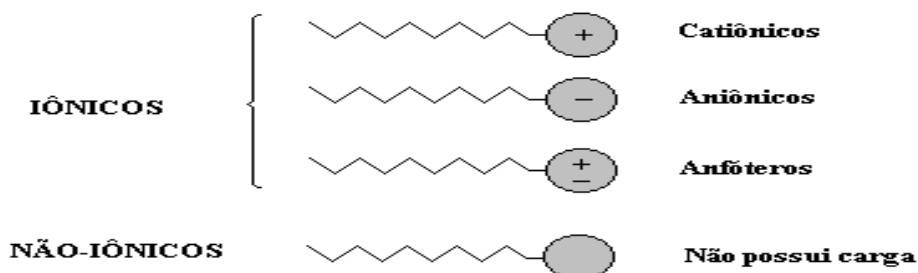


Figura 4.3. Representação esquemática dos tipos de tensoativos.

4.1.2.1 Tensoativos catiônicos

Os tensoativos catiônicos possuem, em solução aquosa, um ou vários grupos ionizáveis que produzem íons carregados positivamente na superfície ativa. Estes tensoativos são normalmente utilizados para tratamentos de água, formulação de desinfetantes e cosméticos, devido a sua efetiva ação microbiológica. Exemplos comuns deste tipo de tensoativo são os sais de amônio quaternários de cadeia longa, como mostra a Figura 4.4.

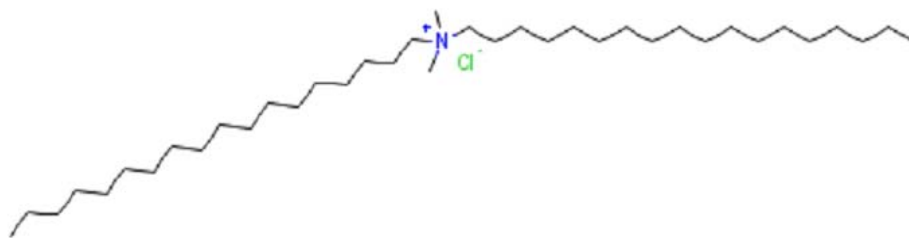


Figura 4.4. Cloreto de distearildimônio.

4.1.2.2 Tensoativos aniônicos

Os tensoativos aniônicos possuem, em solução aquosa, um ou vários grupos ionizáveis que produzem íons carregados negativamente na superfície ativa. Os tensoativos mais difundidos deste grupo são os sabões, aminas, compostos sulfonados e os sulfonatos. Na Figura 4.5 pode - se observar um exemplo de uma molécula tensoativa aniônica.

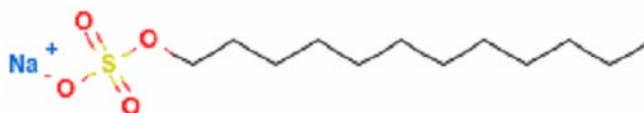


Figura 4.5. Exemplo de tensoativo aniônico: lauril sulfato de sódio.

4.1.2.3. Tensoativos não – iônicos

Os tensoativos não-iônicos são constituídos por substâncias cujas moléculas, em solução aquosa, não se ionizam. A solubilidade destes tensoativos em água deve-se à presença, em suas moléculas, de grupamentos funcionais que possuem forte afinidade pela água. Exemplos comuns deste tipo de tensoativo são o nonilfenol etoxilado, os álcoois graxos etoxilados e o propileno glicol etoxilado.

4.1.2.4. Tenssoativos anfóteros

Os tenssoativos anfóteros possuem em sua estrutura tanto o radical ácido como o radical básico. Esse composto, quando em solução aquosa, exibe características aniônicas ou catiônicas, dependendo das condições de pH da solução. Os exemplos mais importantes deste tipo de tenssoativo são as betaínas e os fosfolipídeos. A estrutura molecular do cocoamidopropil betaína é usada como exemplo, como mostra a Figura 4.6.

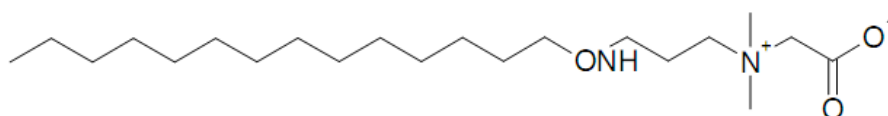


Figura 4.6. Molécula do cocoamidopropil betaína.

4.2. Micelização

Uma das propriedades fundamentais dos tenssoativos é a propriedade de adsorção nas interfaces (limite entre duas fases imiscíveis) ou superfícies de um dado sistema. As propriedades físico - químicas dos tenssoativos, na sua grande maioria, não variam significativamente, mesmo em baixas concentrações. No entanto, para uma dada concentração específica de tenssoativo, conhecida como Concentração Micelar Crítica (CMC), ocorre uma mudança brusca nestas propriedades. Abaixo da CMC, as moléculas de tenssoativo estão presentes na forma de monômeros dispersos e acima, estão presentes na forma de agregados (micelas). Este processo de formação é conhecido como micelização, representado na Figura 4.7.

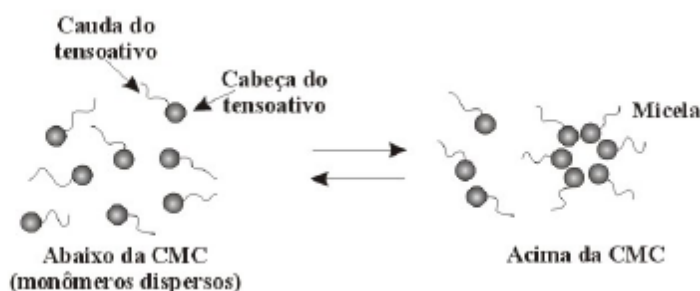


Figura 4.7. Formação do agregado micelar.

Em soluções aquosas, as moléculas dos tensoativos atuam na forma de monômeros, orientando-se preferencialmente nas interfaces, reduzindo a tensão interfacial. A parte hidrofóbica é repelida pela fase aquosa, enquanto os grupos polares são atraídos por forças eletrostáticas. (Toral, 1973 apud Silva, 2008).

Com o aumento da concentração do tensoativo, a tensão interfacial é reduzida até um valor determinado, a partir do qual por mais que se acrescente mais tensoativo, as propriedades do líquido não serão alteradas, pois a interface está saturada. Assim, dependendo do tipo de tensoativo, as moléculas em excesso formarão agregados moleculares na fase aquosa ou na fase oleosa, denominados micelas e o seu aparecimento se dará numa concentração conhecida como concentração micelar crítica (CMC).

Nas micelas formadas na fase oleosa, as moléculas de tensoativo mantêm em seu interior a parte polar da molécula, ficando a parte apolar voltada para o meio oleoso. Segundo Silva (2008), a presença de micelas na fase oleosa cria locais favoráveis para o alojamento de substâncias polares, como por exemplo, a água, que fixando – se no interior da micela, comporta-se como se fosse solúvel em óleo, esta é a chamada micela inversa.

Do mesmo modo, se as micelas forem formadas na fase aquosa, as moléculas de tensoativos se agruparão de forma inversa, mantendo a parte apolar no interior da micela e a parte polar em contato com a água, conhecida como micela direta.

4.3. Adsorção na interface

Os tensoativos têm a propriedade de adsorção nas interfaces, reduzindo significativamente a tensão interfacial. Isto é explicado pela existência de duas regiões com afinidades diferentes, as quais se direcionam de acordo com as suas características. Na Figura 4.8 é mostrada a adsorção em diferentes situações, tais como: a) interface ar/água, b) interface água/óleo, c) formação de estrutura organizada, d) adsorção sobre sólidos não apolares, e) formação de bicamadas e f) micelas.

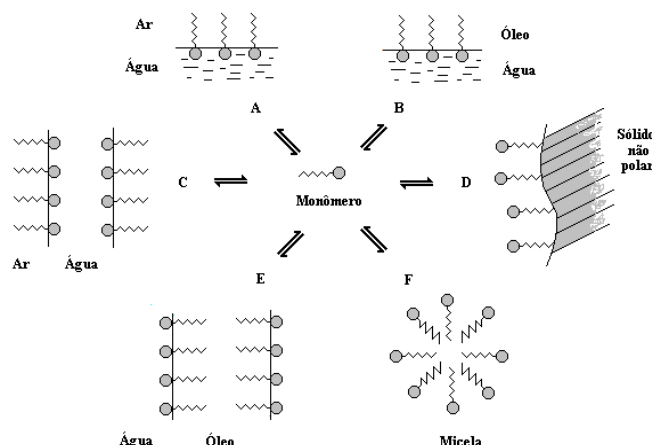


Figura 4.8. Representação das atividades de moléculas anfífilas.

O termo “interface” indica o limite entre as duas fases imiscíveis, e o termo “superfície” indica uma interface onde uma fase é líquida e a outra é gasosa, geralmente ar. A quantidade mínima de trabalho para criar a interface é chamada de energia interfacial livre, medida por unidade de área, quando a tensão superficial entre as duas fases é determinada (Santos, 2007).

4.4 - Tensão Superficial/Interfacial

A tensão superficial ocorre entre dois fluidos (gás-líquido ou líquido-líquido) ou entre um fluido e um sólido (sólido-gás ou sólido-líquido).

A noção de tensão superficial aplica-se também à superfície de separação entre duas substâncias quaisquer, sendo então denominada tensão interfacial. Ao contrário da tensão superficial de um líquido, a tensão interfacial de um par de substâncias pode ser negativa; neste caso a energia potencial de coesão diminui à medida que a área da interface aumenta, e este aumento se produz espontaneamente por ser a adesão entre as moléculas mais intensa do que a coesão entre elas. Por exemplo, certos óleos minerais flutuando sobre água tendem a espalhar-se até constituírem uma película monomolecular (o que sugere um processo para medir o número de Avogadro).

Para muitos fins práticos é desejável que as tensões superficiais e interfaciais sejam tão baixas quanto possível; é o caso dos lubrificantes (que devem espalhar-se por

todos os pontos das superfícies deslizantes); dos detergentes (que devem insinuar-se entre duas substâncias para separar uma da outra); e de drogas medicinais.

Moléculas de uma substância em sua fase líquida atraem umas as outras. Uma molécula de um líquido será atraída por outras moléculas ao seu redor e, na média, não experimentará nenhuma força resultante. Quando o líquido está em contato com outro meio (que pode ser líquido, vapor ou sólido), as forças de atração sobre as moléculas situadas na superfície do líquido ou perto dela, não estarão mais em equilíbrio e estas sofrerão uma força resultante, normalmente na direção da superfície para o líquido, caso a atração entre as moléculas no líquido forem mais fortes do que do líquido e o meio (que é o caso do contato entre o líquido e seu vapor), representado na Figura 4.9. Devido a este efeito, o líquido tenderá a assumir um formato que apresente uma área mínima de superfície, que no caso de uma gota de água em queda livre no vácuo, será uma esfera. Devido a esta tendência espontânea de se contrair, a superfície do líquido se comporta como uma membrana de borracha sob tensão.

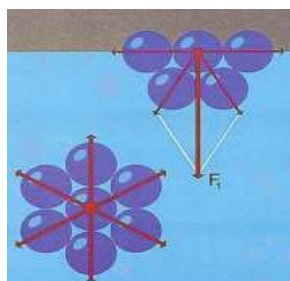


Figura 4.9. Representação esquemática das forças moleculares em um líquido.

A tensão superficial é uma quantidade fundamental que caracteriza as propriedades superficiais de um determinado líquido. A superfície na qual a tensão superficial é aplicada é tri-dimensional, com uma espessura muito pequena e suas propriedades variam daquela das fases que esta separa.

Uma das substâncias utilizadas para avaliar as tensões superficiais/interfaciais são os tensoativos, os quais possuem a capacidade de diminuição da tensão superficial e interfacial em sistemas compostos de água e óleo, como pode - se observar,

[...] A adição de um agente ativo superficialmente, como um sabão ou um detergente, ou qualquer molécula com uma extremidade polar e a outra formada por uma cadeia hidrocarbônica longa, aos sistemas separados de óleo e água, abaixa pronunciadamente as tensões superficiais. Estes aditivos são chamados de agentes emulsificantes. A tensão interfacial é abaixada devido à adsorção dos agentes ativos na interface com a extremidade polar na água, e a cadeia hidrocarbônica no óleo (Castellan, 1972).

Capítulo V

MÉTODO EXPERIMENTAL

5

5. Método experimental

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Tensoativos, localizado no NUPEG II – Centro de Tecnologia.

5.1. Reagentes

O óleo escolhido para os testes de tensão interfacial foi o 500 PS da AGECOM, um óleo de base parafínica de origem mineral e de cor clara.

Estudou – se dois grupos de tensoativos não – iônicos etoxilados, um de cadeia linear, Tabela 6.1, e o outro apresenta um anel aromático , descrito na Tabela 6.2.

Tabela 5.1. Tensoativos de cadeia linear etoxilados.

Tensoativo	PM (g/mol)	BHL
T1	494	12,1
T2	538	12,9
T3	582	13,4
T4	626	13,9
T5	1198	16,9

Tabela 5.2. Tensoativos de cadeia linear com anel aromático.

Tensoativo	PM (g/mol)	BHL
T6	1024	16,4
T7	1119	16,4
T8	1559	17,1
T9	1999	17,8
T10	4639	19

5.2. Equipamentos

Os equipamentos utilizados para a realização deste trabalho estão listados abaixo:

Tabela 5.3. Equipamentos utilizados na pesquisa.

Equipamento	Marca	Modelo
Balança Analítica	Gehaca	AG200
Placa aquecedora	Tecnal	TE0181
Reômetro	MARS	Thermo Scientific
Semi automatic Pensky-Martens	Petrotest	PM4
Tensiômetro	Kruss	DSA 100
Tensiômetro	Kruss	K 100
Agitador homogeneizador	Tecnal	Turratec TE – 102
Compressor	Schuz	CL 200BR

5.2.1. Viscosidade do óleo

A viscosidade do óleo foi medida no reômetro MARS Thermo Scientific (Figura 5.1), equipamento acoplado a um banho termostático e um computador, onde são coletados os dados experimentais, sendo a temperatura da amostra mantida em 25 °C.



Figura 5.1. Reômetro Mars Thermo Scientific.

Utilizou - se aproximadamente 12 mL do óleo para a medida. Os valores de viscosidade obtidos são interpretados através de uma avaliação gráfica da variação da taxa de cisalhamento de 0 a 4000s⁻¹ pela tensão de cisalhamento (Pa), variando com a viscosidade de cada fluido.

Os sistemas podem apresentar comportamentos: Newtoniano ou Não-Newtoniano (plástico ideal, pseudoplástico ou dilatante) de acordo com o tipo de curva de fluxo (tensão cisalhamento x taxa de cisalhamento). No primeiro caso temos a relação linear calculando-se pela tangente do ângulo formado e no segundo caso aplicar-se-á o modelo reológico mais adequado.

5.2.2. Ponto de fulgor do óleo

O ponto de fulgor é a menor temperatura na qual um líquido combustível ou inflamável libera vapores em quantidade suficiente para que a mistura vapor-ar, sobre sua superfície, produza uma chama a partir de uma fonte de ignição. Os vapores liberados a essa temperatura não são, no entanto, suficientes para dar continuidade a combustão. A pressão atmosférica influi diretamente nesta determinação.

A análise do ponto de fulgor do óleo mineral foi realizada segundo a norma ASTM D93, pelo método A, em sistema fechado, respectivamente, utilizando-se 70,0mL da amostra no equipamento Semi automatic Pensky-Martens, mostrado na Figura 5.2.



Figura 5.2. Semi automatic Pensky-Martens.

5.2.3. Densidade do óleo

A densidade do óleo foi feita seguindo o método do bastão, no tensiômetro K100 da Kruss, representado na Figura 5.3. Este equipamento possui uma balança onde é acoplado um gancho que segura um bastão de peso conhecido. O bastão é submerso em 40 mL do líquido, conhecida a massa do corpo e o volume da parte submersa, determina-se assim a densidade do líquido, relacionando o peso com o empuxo.



Figura 5.3. Tensiômetro K100.

5.2.4. Tensão interfacial

O tensiômetro mostrado na Figura 6.4 é um dispositivo utilizado para medições de tensão superficial, interfacial e ângulo de contato. Neste trabalho a função desejada foi a medida de tensão interfacial.

O equipamento consiste de uma cubeta e uma seringa onde são colocadas as soluções e substâncias a serem estudadas. A solução de tensoativo é colocada na cubeta e o óleo, na seringa. O procedimento se dá com o auxílio do computador onde são feitos os ajustes necessários antes do início das medidas e são coletados os dados. As medidas seguem o método da gota ascendente.

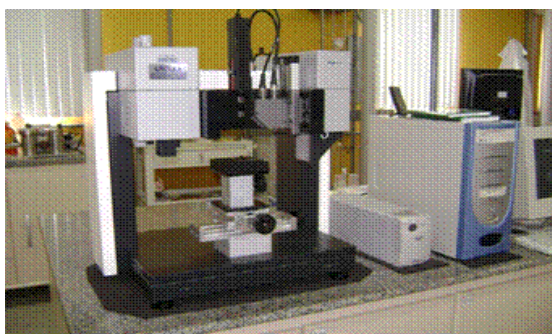


Figura 5.4. Tensiômetro DAS 100.

O método da gota ascendente parte do princípio de que se uma gota de líquido é pendurada em uma agulha de seringa, ela assumirá um tamanho e uma forma característica podendo, então, ser medida a tensão interfacial. Para isso, ela precisa estar em equilíbrio hidromecânico, que é o equilíbrio entre o empuxo e a força normal do líquido. As equações utilizadas para representar este método seguem o mesmo princípio do método da gota pendente.

A equação de Laplace-Young (1) descreve o perfil da gota no equilíbrio hidromecânico, conforme Figura 5.5:

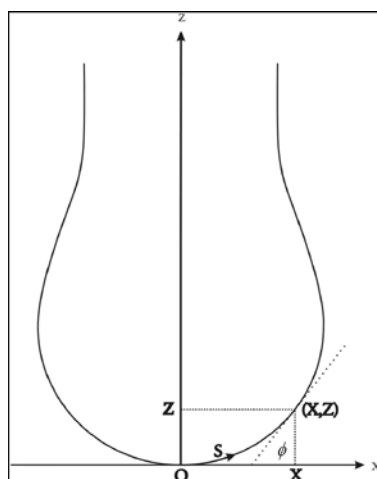


Figura 5.5. Perfil da gota.

$$\frac{d\phi}{d} = \frac{2}{S} \cdot K_a - \frac{Z \cdot \Delta P \cdot g}{e \cdot \sigma} - \frac{s \cdot \phi}{X} \quad (1)$$

Onde:

ϕ : ângulo de contato entre a tangente no ponto (x,z) e o eixo x;

S: comprimento do arco ao longo do perfil da gota;

K_{apex} : curvatura principal no ápice;

$\Delta\rho$: diferença na densidade entre o líquido da gota e os seus arredores;

g: aceleração gravitacional;

σ : tensão superficial/interfacial.

Essa equação (1) resulta nas seguintes:

$$\frac{d\phi}{d} = \frac{2}{S} - \frac{Z}{B} - \frac{s \cdot \phi}{X} \quad (2)$$

$$\frac{dX}{dS} = c \cdot o(\phi) \quad (3)$$

$$\frac{dZ}{dS} = s \cdot e(\phi) \quad (4)$$

Onde: B é um parâmetro para determinar a forma do perfil da gota.

Nas condições limites, onde: $x = z = S = \phi = 0$, vale a equação (5):

$$\frac{s \cdot e(\phi)}{X} = \frac{1}{B} \quad (5)$$

As equações (2), (3), (4) e (5) são conhecidas como fundamentais para o método da gota pendente.

Capítulo VI

RESULTADOS E DISCUSSÕES

6

6. Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos obtidos durante o período da pesquisa bem como as discussões dos mesmos.

6.1. Caracterização do óleo

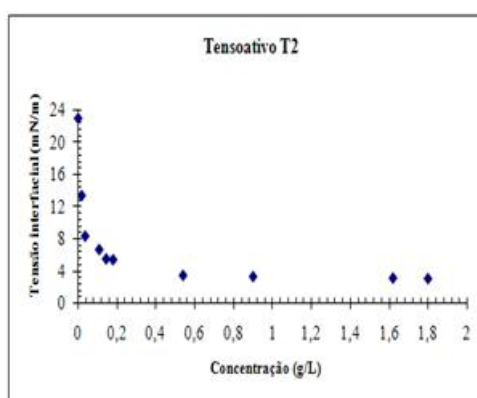
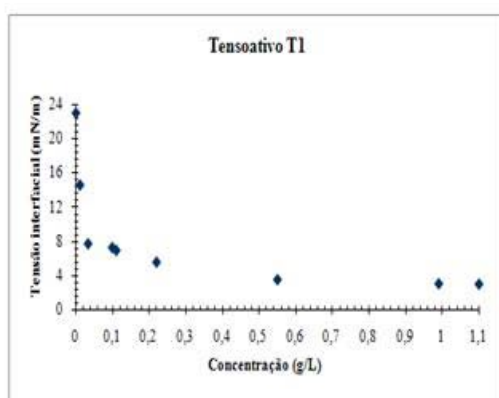
O óleo mineral estudado apresentou as seguintes características mostradas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1. Características do óleo mineral.

Densidade (g/mL)	0,88
Viscosidade (cp)	79
Ponto de fulgor (°C)	220

6.2. Tensão interfacial dos tensoativos etoxilados de cadeia linear

As soluções de tensoativos foram estudadas em várias concentrações até obter – se a estabilização da tensão interfacial. A seguir serão apresentados os resultados obtidos da tensão interfacial entre os tensoativos de cadeia linear e o óleo.



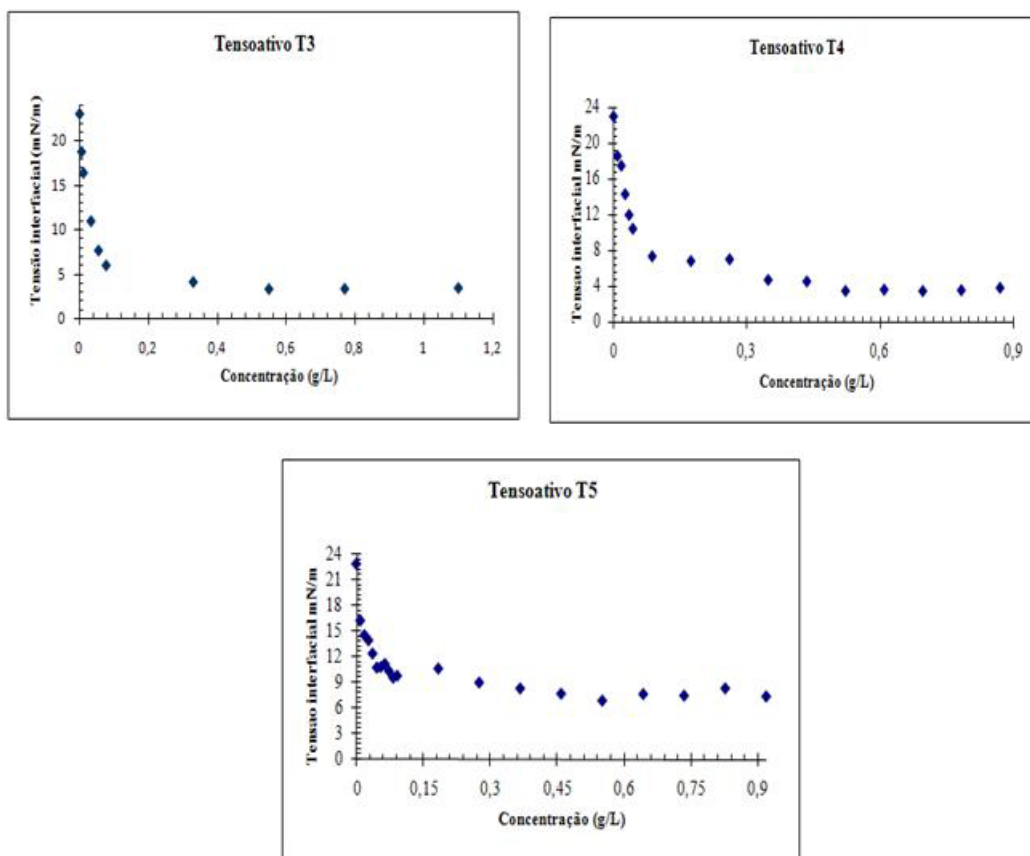


Figura 6.1. Curvas de tensão óleo – tensoativos de cadeia linear e etoxilados.

Ao analisar a Figura 6.1 pode – se verificar que os tensoativos T1, T2, T3, T4 e T5 pertencentes à linha de tensoativos etoxilados com cadeia linear reduzem a tensão interfacial de maneira distinta, por exemplo, no T1 a tensão final é 2,92 mN/m, enquanto que para T5 é 7,38 mN/m. Isto é justificado pelo grau de etoxilação do tensoativo, o T1 diminui mais a tensão interfacial por possui menor etoxilação que o T5, de maior etoxilação.

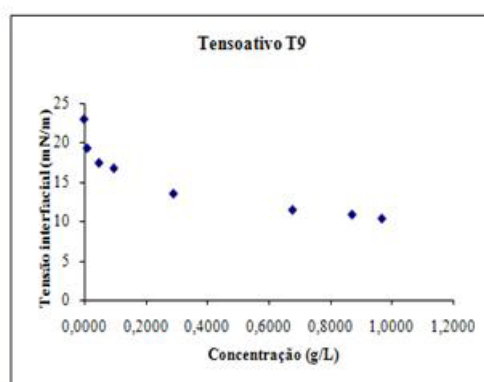
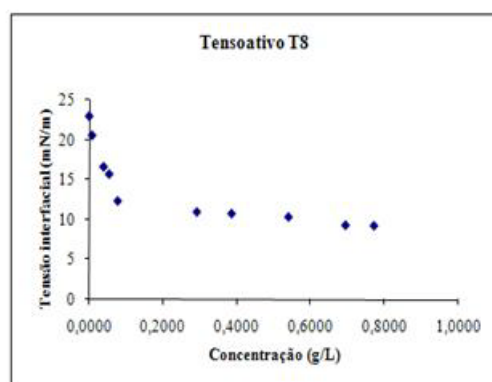
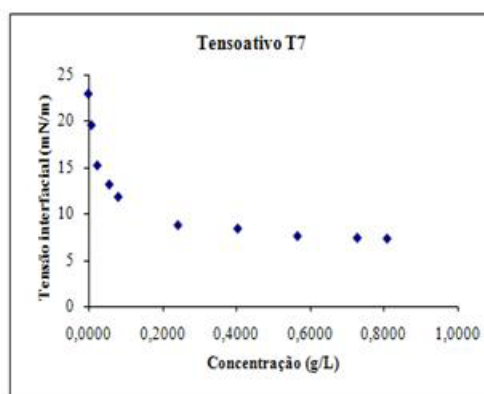
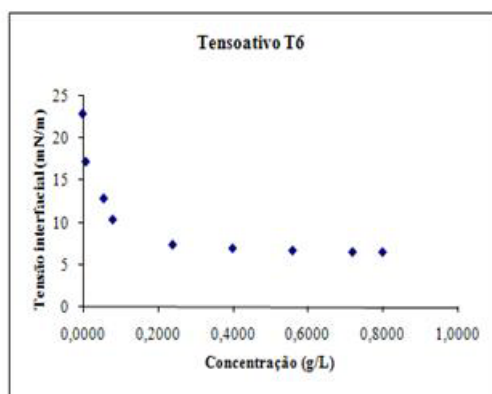
À medida que aumenta a etoxilação do tensoativo, sua cabeça que é polar, tem mais afinidade com a fase aquosa que aqueles de menor etoxilação e isto faz com que o tensoativo penetre mais na fase aquosa. Desta forma, as forças intermoleculares da cabeça do tensoativo são maiores que as da cauda com o óleo, fazendo com que a tensão interfacial em concentrações muito acima da CMC diminua menos que para os tensoativos de menor etoxilação estudados. A Tabela 6.2 mostra os valores das tensões interfaciais finais obtidas.

Tabela 6.2. Valores finais das tensões interfaciais dos tensoativos etoxilados com cadeia linear.

Tensoativo	Tensão interfacial (mN/m)
T1	2,92
2	2,97
T3	3,44
T4	3,49
T5	7,38

6.3. Tensão interfacial dos tensoativos etoxilados com anel aromático

As soluções de tensoativos foram estudadas em várias concentrações até obter – se a estabilização da tensão interfacial. A seguir serão apresentados os resultados obtidos da tensão interfacial entre os tensoativos etoxilados com anel aromático.



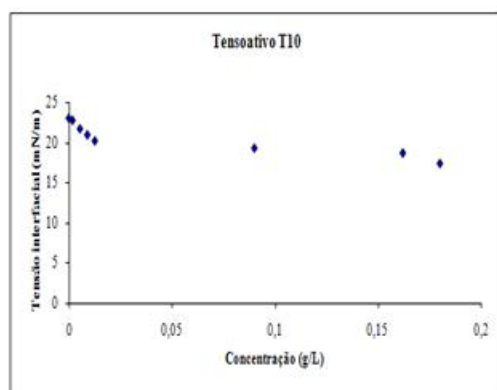


Figura 6.2. Curvas de tensão óleo – tensoativos etoxilados com anel aromático.

Os tensoativos etoxilados com anel aromático em sua estrutura, representado pelos tensoativos T6 ao T10 na Figura 6.2 acima, apresentam o mesmo comportamento dos anteriores. O T6, com menor etoxilação, reduziu consideravelmente a tensão para 6,6 mN/m, por outro lado, para o T10 de maior etoxilação, esta redução foi pouco expressiva, obtendo o valor de 17,31 mN/m.

A tensão interfacial está intimamente relacionada ao número de unidades de óxido de eteno (grau de etoxilação) presentes na estrutura do tensoativo. Quanto maior a cadeia etoxilada mais afastada estará a cabeça do tensoativo da interface para compensar o balanço de forças, ocupando uma menor área interfacial, e desta forma produzindo uma maior tensão interfacial. Ao contrário, quanto menor a cadeia etoxilada mais próximo estará da interface a parte polar do tensoativo ocupando uma área interfacial maior e, conseqüentemente, menor tensão. A Tabela 6.3 apresenta os valores das tensões interfaciais finais.

Tabela 6.3. Valores finais das tensões interfaciais dos tensoativos etoxilados com anel aromático.

Tensoativo	Tensão interfacial (mN/m)
T6	6,6
T7	7,32
T8	9,24
T9	10,42
T10	17,31

Capítulo VII

CONCLUSÕES

7

7. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos pôde – se observar que a influência da etoxilação na redução da tensão interfacial foi a mesma tanto para os tensoativos de cadeia linear quanto para os de anel aromático.

A água foi substituída pelas soluções de tensoativos com a finalidade de se atingir a estabilidade do filme destas soluções com o óleo. Notou – se uma estabilidade da tensão interfacial entre os tensoativos e o óleo.

Entre os tensoativos estudados os que apresentaram melhor redução na tensão foram o T1 e o T6, com valores de 2,92 mN/m e 6,6 mN/m, respectivamente.

A partir daí pode – se escolher uma faixa de tensões interfaciais e fazer testes dentro desta faixa com a finalidade de encontrar a estabilidade do filme interfacial, e então aplicar ao método core – flow, contribuindo desta forma para o aumento da eficiência no transporte de óleos pesados por este método.

Capítulo VIII

BIBLIOGRAFIA

8

8. Bibliografia

Artigo intitulado “Tensão superficial – sua natureza e efeitos”, de João Paulo Medeiros Ferreira(ano desconhecido), nº43.

CASTELLAN, G. W. *Físico – Química*. Ao Livro Técnico S.A., v1, Rio de Janeiro, 1972.

OBREGÓN, R. M. *Hidrodinâmica do escoamento bifásico óleo - pesado água em um tubo horizontal*. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, S.P. – Brasil,2001.

PAULINO, L. C. *Estudo de sistemas microemulsionados utilizando água do mar na recuperação avançada d petróleo*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: DEQ/PPGEQ, 2007.

RODRIGUES, O. M. H. *Forma da Interface e Gradiente de Pressão no Padrão Líquido – Líquido Anular Vertical*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, S.P. – Brasil,2002.

ROSSI, C. G. F. T.; DANTAS, T. N. de C.; NETO, A. A. D.; MACIEL, M. A.M. Tensoativos: uma abordagem básica e perspectivas para aplicabilidade industrial. Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra, Seropédica, RJ: EDUR, v. 25, n.1-2, p. 73-85, 2006.

SANTOS, F. K. G.; ALVES, J. V. A.; DANTAS, T. N. C.; DANTAS NETO, A. A.; DUTRA JÚNIOR, T. V.; BARROS NETO, E. L. Determinação da concentração micelar crítica de tensoativos obtidos a partir de óleos vegetais para uso na recuperação avançada de petróleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS NATURAL, 4, 2007, Campinas. *Artigo Técnico*. Campinas: 2007.v.4, 9 p.

SILVA, P. K. L. *Remoção de óleo da água de produção por flotação em coluna utilizando tensoativos de origem vegetal*. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: DEQ/PPGEQ, 2008.

SILVA, R. C. R. *Alteração da Molhabilidade de superfícies internas de tubulações utilizadas no transporte de óleos pesados via core-flow*. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, S.P. – Brasil, 2003.

Tensão interfacial. Disponível em:

<<http://www.algosobre.com.br/fisica/tensao-interfacial.html>>. Acesso em agosto de 2008.



TORAL, M. T. *Fisico-Química de superfícies y sistemas dispersos*. Bilbao, Urmo
Esparteo, 1973.