



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA-CT  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DA MOLHABILIDADE DE SOLUÇÕES DE  
TENSOATIVOS EM AÇO INOXIDÁVEL**

André Ezequiel Gomes do Nascimento

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lins de Barros Neto (DEQ-UFRN)

Coorientadora: Profa. Dra. Maria Carlenise Paiva de A. Moura (DEQ-UFRN)

Natal / RN  
Setembro / 2009

**André Ezequiel Gomes do Nascimento**

**AVALIAÇÃO DA MOLHABILIDADE DE SOLUÇÕES DE  
TENSOATIVOS EM AÇO INOXIDÁVEL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, sob a orientação do Professor Dr. Eduardo Lins de Barros Neto e da Professora Dra. Maria Carlenise Paiva de Alencar Moura.

Natal / RN  
Setembro / 2009

Divisão de Serviços Técnicos  
Catalogação da Publicação na Fonte  
UFRN / Biblioteca Setorial de Engenharia Química

Nascimento, André Ezequiel Gomes do.

Avaliação da molhabilidade de soluções de tensoativos em aço inoxidável / André Ezequiel Gomes do Nascimento. – Natal, 2009.

89 f. : il.

Orientador: Eduardo Lins de Barros Neto.

Coorientadora: Maria Carlenise Paiva de Alencar Moura.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

1. Aço inoxidável - Escoamento – Dissertação. 2. Soluções de tensoativos - Transporte – Dissertação. 3. Molhabilidade das superfícies – Dissertação. 4. Ângulo de contato – Dissertação. I. Barros Neto, Eduardo Lins de. II. . Moura, Maria Carlenise Paiva de Alencar. III. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. IV. Título.

RN/BSPPGEQ

CDU 691.714.018.8 (043.3)

**NASCIMENTO, André Ezequiel Gomes do** – Avaliação da Molhabilidade de Soluções de Tensoativos em Aço Inoxidável. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Natal/RN, Brasil.

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

**Coorientadora:** Profa. Dra. Maria Carlenise Paiva de Alencar Moura

---

**RESUMO:** Com o crescente aumento da industrialização, provocado pela globalização do planeta, tornou-se cada vez mais comum a busca por materiais de alta resistência e durabilidade para os mais diversificados ramos de atividades. Assim, a produção e procura por materiais que atendam estas exigências tornou-se cada vez maior com o passar dos anos. Logo, um dos materiais que vêm preenchendo bem os requisitos necessários para esta aplicação é o aço inoxidável, devido às suas diversas características aplicáveis aos diferentes ramos da indústria. O interesse das companhias de petróleo por reservas de óleos pesados vem apresentando aumento constante durante as últimas décadas. As propriedades reológicas destes óleos impedem o seu transporte em sistemas convencionais de fluxo. A partir deste problema surge a necessidade do desenvolvimento de tecnologias que permitam melhorar o escoamento e transporte, reduzindo os custos de operação, para, assim, viabilizar a produção de óleo no reservatório. Diante disto, surge o transporte através de sistemas contendo tensoativos, que reduzem as tensões interfaciais, facilitando o escoamento do óleo através do duto, reduzindo as perdas de carga por atrito. Para verificar estas interações estudou-se a molhabilidade das superfícies, que é representada pela medida do ângulo de contato de soluções de tensoativo com placas planas de aço inoxidável 304. Foram utilizadas soluções de KCl, tensoativos e misturas de tensoativos com cadeia carbônica linear e aromática de grupos etoxilados variando de 3 a 100. Para determinação da molhabilidade foi utilizado o goniômetro DSA 100, Krüss. A fim de observar a influência da rugosidade na molhabilidade, a placa de aço inoxidável foi usinada e polida com diferentes lixas de referência de 100 até 1200. Os resultados obtidos mostraram que lixar e polir a placa resulta em diminuição da molhabilidade. Quanto às soluções de tensoativos, estas apresentaram melhor molhabilidade em aço inoxidável do que as soluções de KCl testadas. Também foi observado que a mistura de tensoativos é uma opção considerável, uma vez que apresentou ângulos de contato satisfatórios para uma boa molhabilidade na placa de aço inoxidável. Outro fato observado é que a etoxilação também interfere na molhabilidade, reduzindo o ângulo de contato com a redução da etoxilação. Isto nos leva a concluir que tensoativos com maior etoxilação, sendo mais hidrofóbicas, diminuem a interação da água com o duto e, conseqüentemente, o atrito com o mesmo, melhorando assim o escoamento.

**Palavras chaves:** Ângulo de contato, Molhabilidade, Aço inoxidável, Tensoativos.

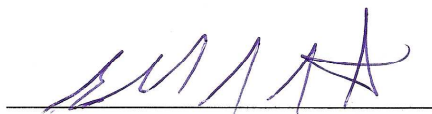
---

André Ezequiel Gomes do Nascimento

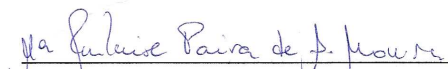
**AVALIAÇÃO DA MOLHABILIDADE DE SOLUÇÕES DE TENSOATIVOS EM AÇO  
INOXIDÁVEL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Aprovado em 04 / Setembro / 2009



Prof. Dr. Eduardo Lins de Barros Neto  
Orientador - UFRN



Prof. Dra. Maria Carlenise Paiva de A. Moura  
Co-orientadora - UFRN



Prof. Dr. Clodomiro Alves Junior  
Membro Interno - UFRN



Prof. Dr. Humberto Neves Maia de Oliveira  
Membro Externo - UFERSA

**NASCIMENTO, André E. G.** – Evaluation of wetting of surfactant solutions in Stainless Steel. Qualification of Master, UFRN, Program of Post-Graduation in Chemical Engineering, Natal / RN, Brazil.

**Advisor:** Prof. Dr. Eduardo Lins de Barros Neto

**Co-Advisor:** Profa. Dra. Maria Carlenise Paiva de Alencar Moura

## ABSTRACT

---

With the increasing industrialization of the planet caused by globalization, it has become increasingly common to search for highly resistant and durable materials for many diverse branches of activities. Thus, production and demand for materials that meet these requirements have constantly increased with time. In view of this, stainless steel is presented as one of the materials which are suitable applications, due to many features that are interesting for several segments of the industry. Concerns of oil companies over heavy oil reservoirs have grown steadily for the last decades. Rheological properties of these oils impair their transport in conventional flow systems. This problem has created the need to develop technologies to improve flow and transport, reducing operation costs so as to enable oil production in the reservoir. Therefore, surfactant-based chemical systems are proposed to optimize transport conditions, effected by reduction of interfacial tensions, thereby enhancing the flow of oil in ducts and reducing load losses by friction. In order to examine such interactions, a study on the wettability of metallic surfaces has been undertaken, represented by measuring of contact angle of surfactant solutions onto flat plates of 304 stainless steel. Aqueous solutions of KCl, surfactants and mixtures of surfactants, with linear and aromatic hydrocarbon chain and ethoxylation degrees ranging between 20 to 100, have been tested. The wettability was assessed by means of a DSA 100 krüss goniometer. The influence of roughness on the wettability was also investigated by machining and polished the stainless steel plates with sandpapers of references ranging between 100 of 1200. The results showed that sanding and polishing plates result in decrease of wettability. As for the solutions, they have provided better wettability of the stainless steel than the KCl solutions tested. It was also been concluded that surfactant mixtures is an option to be considered, since they promote interactions that generate satisfactory contact angles for a good wettability on the stainless steel plate. Another conclusion refers to the influence of the ethoxylation degree of the nonionic surfactant molecules on wettability. It has been observed that contact angles decrease with decreasing ethoxylation degrees. This leads us to conclude that molecules with higher ethoxylation degree, being more hydrophobic, decrease the interaction of water with the ducts, thereby reducing friction and improving the flow.

**Keywords:** Contact angle, Wettability, stainless Steel, Surfactants.

*Eu te amo, ó Senhor, força minha. O Senhor é a minha rocha, a minha fortaleza e o meu libertador; o meu Deus, o meu rochedo, em quem me refúgio; o meu escudo, a força da minha salvação, e o meu alto refúgio (Salmo 18:1-2). Ó Senhor, Senhor nosso, quão admirável é o teu nome em toda a terra, tu que puseste a tua glória dos céus! (Salmo 8:1).*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Deus, criador do céu e da terra, por seu imerso amor e misericórdia tem concedido saúde, força, paciência e sabedoria para a realização dessa dissertação.

Aos meus pais, familiares e amigos pelos princípios transmitidos, pois eles foram as minhas grandes referências.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e ao corpo docente que o compõe pelos ensinamentos técnicos e científicos. Aos professores Eduardo Lins de Barros Neto e Maria Carlenise Paiva de Alencar Moura pela disponibilidade e empenho na orientação deste trabalho.

Ao NUPEG-PRH14/UFRN pelo suporte laboratorial para a realização dos experimentos no Laboratório de Tecnologia de Tensoativos.

Ao suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa concedida.



## Sumário

Índice de figuras	xi
Índice de tabelas	xiii
Introdução.....	2
Aspectos teóricos.....	6
2.1. Molhabilidade.....	6
2.2. Ângulo de contato.....	8
2.2.1. Influência da rugosidade.....	11
2.3. Tensoativos.....	13
2.3.1. Definição.....	13
2.3.2. Objetivo do tensoativo.....	13
2.3.3. Grupos polares e apolares presentes no tensoativo.....	14
2.3.4. Mecanismo de ação dos tensoativos.....	15
2.3.5. Classificação dos tensoativos.....	16
2.3.5.1. Iônicos.....	17
2.3.5.1.1. Catiônicos.....	17
2.3.5.1.2. Aniônicos.....	17
2.3.5.1.3. Anfóteros.....	18
2.3.5.2. Não-iônicos.....	18
2.3.6. Propriedades dos tensoativos.....	19
2.3.6.1. Micelização.....	19
2.3.6.2. Concentração micelar crítica (c.m.c.).....	22
2.3.6.2.1. Fatores que afetam a concentração micelar crítica (c.m.c.).....	23
2.3.6.3. Balanço hidrofílico/lipofílico (BHL).....	24
2.3.6.3.1. Aplicação do BHL.....	25
2.3.6.4. Ponto de Krafft.....	27
2.3.6.5. Ponto de turbidez.....	28
2.3.6.6. Adsorção.....	29
2.3.6.7. Solubilidade.....	30
2.4. Aço inoxidável.....	31
Estado da arte.....	34
Metodologia experimental.....	38
4.1. Reagentes.....	38

4.1.1. KCl .....	38
4.1.2. Água .....	38
4.1.3. Tensoativos .....	38
4.1.3.1. Tensoativos com anel aromático e etoxilados .....	39
4.1.3.2. Tensoativos de cadeia linear e etoxilados .....	40
4.2. Equipamentos .....	42
4.3. Material Avaliado .....	42
4.3.1. Aço inoxidável .....	42
4.4. Concentração micelar crítica (c.m.c.) .....	43
4.5. Molhabilidade .....	43
4.5.1. Processos de usinagem e polimento .....	48
4.5.1.1. Usinagem Manual .....	48
4.5.1.2. Usinagem em torno mecânico de alta rotação .....	49
4.5.2. Molhabilidade das soluções de KCl .....	49
4.5.3. Molhabilidade das soluções de tensoativos não-iônicos .....	49
Resultados e discussões .....	52
5.1. Avaliação da molhabilidade do aço através de medidas de ângulo de contato para os processos de usinagem .....	52
5.1.1. Processos de usinagem .....	52
5.1.2. Processo de usinagem por lixas em série .....	54
5.2. Avaliação da molhabilidade do aço através de medidas de ângulo de contato .....	59
5.2.1. Medidas de ângulo de contato com solução de KCl .....	59
5.2.2. Medidas de ângulo de contato com solução de tensoativos não-iônicos (nonilfenol etoxilado) .....	60
5.2.3. Medidas de ângulo de contato com soluções de tensoativos não-iônicos de cadeia linear (álcool láurico etoxilado) .....	61
5.2.4. Avaliação do ângulo de contato de tensoativos não-iônicos de cadeia aromática e linear com diferentes graus de etoxilação .....	63
5.2.5. Medidas de ângulo de contato com soluções de tensoativos não-iônicos de cadeia aromática e linear com mesmo grau de etoxilação .....	64
5.2.6. Medidas de ângulo de contato com soluções de misturas de tensoativos não-iônicos de cadeia aromática .....	65
5.2.7. Medidas de ângulo de contato entre a solução de KCl e tensoativos não-iônicos de cadeia aromática .....	66

5.2.8. Medidas de ângulo de contato entre a solução de KCl e tensoativos não-iônicos de cadeia linear .....	67
Conclusões.....	69
Referências bibliográficas .....	71

## Lista de Figuras

Figura 2.1. Comportamento da molhabilidade através de medidas de ângulo de contato. ....	8
Figura 2.2. Representação das tensões superficiais a partir do ângulo de contato. ....	9
Figura 2.3. Molécula de tensoativo. ....	13
Figura 2.4. Cadeia carbônica com mais de 10 carbonos e anel aromático. ....	14
Figura 2.5. Orientação dos tensoativos na interface de um sistema. ....	16
Figura 2.6. Representação esquemática dos tipos de tensoativos. ....	17
Figura 2.7. Representação esquemática de agregação molecular em solução aquosa. ....	20
Figura 2.8. Propriedades afetadas pela formação de micelas. ....	21
Figura 2.9. (a) micela inversa e (b) micela direta. ....	22
Figura 2.10. Representação esquemática de ação dos tensoativos. ....	23
Figura 2.11. Representação dos tensoativos de baixo e alto BHL. ....	24
Figura 2.12. Diagrama de fase de um tensoativo iônico próximo ao ponto de Krafft. ....	27
Figura 2.13. Curva de solubilidade para tensoativo não-iônico em função da temperatura. ....	28
Figura 2.14. Representação das atividades de moléculas anfifílicas. ....	29
Figura 2.15. Relação de temperatura/solubilidade para tensoativos iônicos típicos. ....	30
Figura 4.1. Goniômetro DSA 100 (Krüss). ....	44
Figura 4.2. Gota de líquido sobre a superfície do aço inoxidável. ....	45
Figura 4.3. Molhabilidade do aço inoxidável em água destilada pelos métodos do ajuste do círculo e tangente. ....	46
Figura 4.4. Molhabilidade do aço inoxidável em tensoativo não-iônico pelos métodos do ajuste do círculo e tangente. ....	47
Figura 4.5. Molhabilidade do aço inoxidável em tensoativos não-iônicos pelos métodos do ajuste do círculo e tangente. ....	47
Figura 5.1. Molhabilidade do aço inoxidável à água destilada após processos de usinagem e polimento. ....	53
Figura 5.2. Molhabilidade do aço inoxidável no processo de lixação em lixas de série. ....	54
Figura 5.3. Ângulo de contato da água no aço inoxidável no processo de lixação em lixas de série. ....	55
Figura 5.4. Representação do cálculo da rugosidade R, como função das alturas, $y_i$ , em relação à linha superficial x, no espaço de medida $\ell_m$ , para n medidas. ....	56
Figura 5.5. Representação da compactação dos grãos em uma lixa quadrada de lado $\iota$ . ....	57
Figura 5.6. Relação entre o cosseno do ângulo de contato da água sobre uma superfície. ....	58

Figura 5.7. Molhabilidade do aço inoxidável em soluções de KCl representada por medidas de ângulo de contato.....	59
Figura 5.8. Molhabilidade do aço inoxidável em soluções de tensoativos não-iônicos com cadeia aromática representada por medidas de ângulo de contato. ....	60
Figura 5.9. Molhabilidade do aço inoxidável em tensoativos não-iônicos com cadeia linear representada por medidas de ângulo de contato. ....	62
Figura 5.10. Comparação da molhabilidade do aço inoxidável em soluções de tensoativos não-iônicos de cadeia aromática e linear com diferentes graus de etoxilação representada por medidas de ângulo de contato.....	63
Figura 5.11. Comparação da molhabilidade do aço inoxidável em soluções de tensoativo não-iônico de cadeia aromática e linear com mesmo grau de etoxilação representada por medidas de ângulo de contato. ....	64
Figura 5.12. Molhabilidade do aço inoxidável em misturas de tensoativos não-iônicos de cadeia aromática representada por medidas de ângulo de contato. ....	65
Figura 5.13. Comparação da molhabilidade do aço inoxidável em soluções de KCl e tensoativos não-iônicos de cadeia aromática representado por medidas de ângulo de contato. ....	66
Figura 5.14. Comparação da molhabilidade do aço inoxidável em soluções de KCl e tensoativos não-iônicos de cadeia linear representado por medidas de ângulo de contato. ....	67

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Classificação dos tensoativos. ....	14
Tabela 2.2. Grupos polares. ....	15
Tabela 2.3. Faixas de BHL e suas aplicações. ....	25
Tabela 2.4. Valores dos grupos hidrofílicos e lipofílicos usados no cálculo do BHL. ....	26
Tabela 4.1. Especificações dos tensoativos não-iônicos com anel aromático e etoxilados. ....	39
Tabela 4.2. Valores das tensões superficiais e pontos de turbidez para os tensoativos não-iônicos com anel aromático. ....	40
Tabela 4.3. Especificações dos tensoativos não-iônicos com cadeia linear e etoxilados. ....	41
Tabela 4.4. Valores das tensões superficiais e pontos de turbidez para os tensoativos não-iônicos de cadeia linear. ....	41
Tabela 4.5. Equipamentos utilizados durante os procedimentos experimentais. ....	42
Tabela 4.6. Composição química do aço inoxidável austenítico 304 (em %). ....	42
Tabela 4.7. Concentrações micelares críticas (c.m.c.) para os tensoativos utilizados. ....	43

---

---

**CAPÍTULO 1**  
**INTRODUÇÃO**

---

---

# Introdução

Com o crescente aumento da industrialização provocado pela globalização do planeta, tornou-se cada vez mais comum a busca por materiais de alta resistência e durabilidade para os mais diversificados ramos de atividades. Assim, a produção e procura por materiais que atendam estas exigências tornou-se cada vez maior com o passar dos anos. Desenvolver produtos com tecnologia que atendam estas exigências tem se tornado um grande desafio para as indústrias. Logo, um dos materiais que vêm preenchendo bem os requisitos necessários para esta aplicação é o aço inoxidável, devido às suas diversas características aplicáveis aos diferentes ramos da indústria.

O aço inoxidável está presente em muitas áreas da vida cotidiana e novas aplicações são encontradas a cada dia nos mais diferentes campos. As razões do crescimento e da atratividade para aplicações diversas residem na ampla faixa de requisitos que este material é capaz de atender (Barbosa et al., 2003).

Particularmente, no Brasil, o potencial e as perspectivas de aplicação dos aços martensíticos, na exploração de petróleo, em plataformas "offshore", são elevados, em razão de a Petrobras dominar a tecnologia e ser uma das líderes mundiais da exploração de petróleo em águas profundas e ultra-profundas (Mariano et al., 2006). Logo, tornam-se necessários estudos mais específicos para o desenvolvimento de tecnologias que agreguem valores economicamente viáveis e que possam vir a solucionar problemas oriundos da exploração do óleo pesado até a superfície.

Trabalhos envolvendo estudos em aço inoxidável vêm aumentando proporcionalmente com as mais recentes descobertas nos mais diversos campos da ciência e tecnologia. Assim, estudos para avaliação da molhabilidade de aço inoxidável vêm ganhando destaque no cenário mundial. A molhabilidade é uma propriedade utilizada para avaliar a relação de hidrofiliabilidade e/ou hidrofobicidade de um dado material, através de medidas de ângulo de contato. As pesquisas nesta área aumentaram bastante no mundo inteiro, visando observar a molhabilidade do aço inoxidável em tubulações para escoamento de petróleo pesado, como forma de diminuir as perdas de carga geradas pelo acúmulo deste tipo de óleo nas paredes dos tubos revestidas com este material (Santos, 2003).



O interesse das companhias de petróleo por reservas de óleos pesados vem apresentando crescente aumento durante as últimas décadas. As propriedades reológicas destes óleos, no entanto, impedem o seu transporte em sistemas convencionais de fluxo. Nestes sistemas, as perdas de carga geradas pela alta viscosidade dos óleos pesados podem ser reduzidas a valores comparáveis ao fluxo monofásico aquoso.

Ao longo do tempo, reservatórios de petróleo vão diminuindo sua produção, não só pela redução do volume de óleo no reservatório e queda de pressão, mas também pela mudança gradual das propriedades físico-químicas do óleo, por exemplo, viscosidade e densidade. Esta mudança dificulta o escoamento do óleo contido no reservatório até os tanques de armazenamento; desta maneira, sua produção se torna cada vez mais difícil e gera um alto custo de produção. A partir deste problema surge a necessidade do desenvolvimento de tecnologias que permitam melhorar o escoamento e transporte, reduzindo os custos de operação, viabilizando a produção de óleo no reservatório (Santos et al., 2007).

Diante disto surge o transporte através de sistemas contendo tensoativos, que reduzem as tensões interfaciais, facilitando o escoamento do óleo através do duto e reduzindo as perdas de carga por atrito.

Como é importante que o fluido escoe no duto sem interagir com suas paredes, neste trabalho sistemas contendo tensoativos foram utilizados visando avaliar suas interações com as paredes de dutos revestidos por aço inoxidável.

A presente dissertação divide-se em sete capítulos. Neste primeiro capítulo, apresenta-se uma introdução geral descrevendo o desenvolvimento tecnológico devido à globalização do planeta e como consequência a busca por novos materiais que apresentem diferentes características para diversas aplicações do cotidiano. Dentro deste contexto destaca-se o aço inoxidável pelas diversas aplicações e características. É abordado o problema do transporte de petróleo pesado nas tubulações, que ficam incrustadas por este tipo de óleo. Enfatizando que uma possível solução para diminuir este problema seria a injeção de uma solução de tensoativos na tubulação de petróleo, ajudando a melhorar o escoamento. Este capítulo finaliza-se com a idéia de que para ocorrer um bom escoamento são necessários estudos de molhabilidade de tensoativos em aço inoxidável através de medidas de ângulo de contato.

No Capítulo 2 descrevem-se tópicos em relação à molhabilidade de superfícies, tensoativos e aços inoxidáveis, tais como: definição de molhabilidade e ângulo de contato,

classificação e propriedades dos tensoativos e definição e características dos diferentes tipos de aço inoxidável.

No Capítulo 3 estão listados alguns trabalhos encontrados na literatura relacionados à molhabilidade de superfícies.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia experimental utilizada para o desenvolvimento experimental e obtenção dos resultados, relacionando os equipamentos e reagentes que foram empregados no decorrer do trabalho.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados e discussões, mostrando os gráficos e análise dos dados obtidos experimentalmente.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

No Capítulo 7 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas na construção e elaboração deste trabalho.