

# EFEITO DA SALINIDADE NA TENSÃO INTERFACIAL DO SISTEMA ÓLEO/ÁGUA EM CONDIÇÕES ISOBÁRICAS E INCREMENTO GRADUAL DA TEMPERATURA

Camilo Andrés Guerrero Martin<sup>1\*</sup>; Erik Montes Páez<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Macromoléculas. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Endereço, Cidade Universitaria. Rio de Janeiro, Brasil.

<sup>2</sup> Escuela de Ingeniería de Petróleos. Universidad Industrial de Santander (UIS). Carrera 27 Calle 9. Bucaramanga, Colombia.

\*E-mail: camilo.guerrero@poli.ufrj.br

## RESUMO

O estudo da tensão interfacial é importante devido a que define os principais parâmetros nos processos de recuperação avançada de petróleo. O artigo procura determinar experimentalmente as características específicas dos reservatórios carbonados e o comportamento da tensão interfacial em sistemas contaminados com carbonato de cálcio e cloreto de sódio e as características específicas dos reservatórios carbonados. O trabalho foi desenvolvido no equipamento *Drop Shape Analyzer DSA 100HP* e foram propostas duas configurações do sistema n-alcano/água (a primeira com fluidos puros e a segunda com cloreto de sódio dissolvido na água com uma concentração de 3%). Em quanto às condições de operação, foram realizadas a pressão atmosférica constante e quatro temperaturas diferentes. Os resultados obtidos foram processados mediante análise estatístico. Foram obtidas duas equações de reta onde em um dos casos se conseguiu um ajuste ótimo com dados obtidos na literatura e modelos numéricos, entanto, através das correlações evidenciou-se uma significativa diferença dentre ambos sistemas, mostrando assim que o sistema que contem salmoura apresenta menor valor de tensão interfacial.

**Palavras chave:** Tensão interfacial, Condições Isobáricas e Aumento de Temperatura, Sistema óleo/água, Sistema óleo/água/cloreto de sódio.

## EFEITO DE LA SALINIDAD EN LA TENSIÓN INTERFACIAL DEL SISTEMA HIDROCARBURO/AGUA EN CONDICIONES ISOBÁRICAS E INCREMENTO GRADUAL DE LA TEMPERATURA

## RESUMEN

La importancia del estudio de la tensión interfacial radica en que ésta determina parámetros claves en los procesos de recobro mejorado, el presente artículo busca determinar experimentalmente el comportamiento de la tensión interfacial en sistemas contaminados con carbonato de calcio o cloruro de sodio, características propias de yacimientos carbonatados. Este trabajo fue desarrollado en el equipo *Drop Shape Analyzer DSA100HP* y fueron propuestos dos configuraciones de sistema n-alcano/agua (la primera con los fluidos puros y la segunda con cloruro de sodio disuelta en el agua con una concentración de 3%). Como condiciones de operación se mantuvo presión atmosférica constante y se incrementó gradualmente la temperatura, los resultados obtenidos fueron procesados mediante análisis estadístico. De este modo se consolidaron dos ecuaciones de recta en donde una de ellas tiene un ajuste óptimo con datos extraídos de la literatura y modelos numéricos, por otra parte las correlaciones evidenciaron una diferencia significativa entre ambos sistemas, constatando así que o sistema en presencia de salmuera tiene menor valor de tensión interfacial.

**Palabras clave:** Tensión Interfacial, Condiciones Isobáricas y Aumento Gradual de Temperatura, Sistema hidrocarburo/agua, Sistema hidrocarburo/agua/cloruro de sodio.

**Cita:** Guerrero, C.A. e Montes, E. (2017). Efeito da salinidade na tensão interfacial do sistema óleo/água em condições isobáricas e incremento gradual da temperatura. *Revista Fuentes: El reventón energético*, 15 (2), 117-124.



## EFFECT OF THE SALINITY IN THE INTERFACIAL TENSION OF THE HYDROCARBON/WATER SYSTEM IN ISOBARIC CONDITIONS AND GRADUAL INCREASE OF TEMPERATURE

### ABSTRACT

The interfacial tension is an important property in the enhanced oil recovery processes. And determinate different parameters in the Enhanced Recovery Processes, this paper is addressed in determine experimentally the interfacial tension behavior in systems who has calcium carbonate or sodium chlorate, characteristic of the carbonate reservoirs. This work was carried out in the Drop Shape Analyzer DSA100HP equipment, where was proposed two systems n-alkane/water (one with pure fluids and other with three percent of sodium chloride). Maintaining constant the pressure and gradually increase the temperature, these results are then processed through a statistical analysis obtained values of interfacial tension for each thermal point. In such a way the results achieve two equations, where once that is perfectly adjusted to the literature and which were validated using the comparison with other authors, finding values of angle coefficient whose relative error percentage is entirely satisfactory, similarly was presented a setting optimum to be matched with theoretical values extracted from numerical methods. According of these ideas, the correlations have a significant difference between both systems, the system who have contamination have a lower interfacial tension value.

**Keywords:** Interfacial Tensions, Isobaric Conditions and Gradual Increase of Temperature, hydrocarbon/water System, hydrocarbon/water/Sodium chloride System.

### INTRODUÇÃO

Na atualidade tem sido difícil a incorporação de novas reservas de óleo, por esse motivo que a recuperação terciária é um dos principais focos de pesquisa implementando aplicações de programas piloto em diferentes países do mundo. (Aya C, Navarro S, 2009) (Martin, et al, 2014) O fator de recuperação é determinado como o produto da eficiência de barrido e a eficiência de deslocamento, onde esta última é uma eficiência de recuperação microscópica determinada pelo balance dos fenômenos capilares, viscosos e de molhabilidade.

O fator mais importante para o aumento da eficiência de deslocamento é o número capilar, definido como a divisão das forças viscosas e as forças capilares, sendo assim que a maiores valores das forças viscosas maior será o potencial para deslocar o óleo residual (Montes, et al, 2008).

Uma das estratégias para alterar o número capilar é modificando a preferência da molhabilidade da formação para que esta seja mais hidrofílica, também é possível modificar o número capilar através da redução da tensão interfacial, a varia diretamente com a diminuição da tensão interfacial. Determinar o valor da tensão interfacial com precisão é preponderante devido a que define a pressão necessária para otimizar o processo de recuperação. (Paez, et al, 2009).

Em pesquisas e testes anteriores foi observado que o aumento da pressão não altera significativamente os

resultados, também porque no caso dos testes da gota pendente registrados na literatura foram feitos a pressão atmosférica (Zeppieri, Rodríguez & López de Ramos, 2001) e devido a que em modelos computacionais da tensão interfacial entre os hidrocarbonetos e a água os resultados obtidos concluem que a pressão de confinamento pode não ser considerada (Mejía, 2009). Por isso se considerou fazer as avaliações a pressão atmosférica.

### MÉTODOS EXPERIMENTAIS

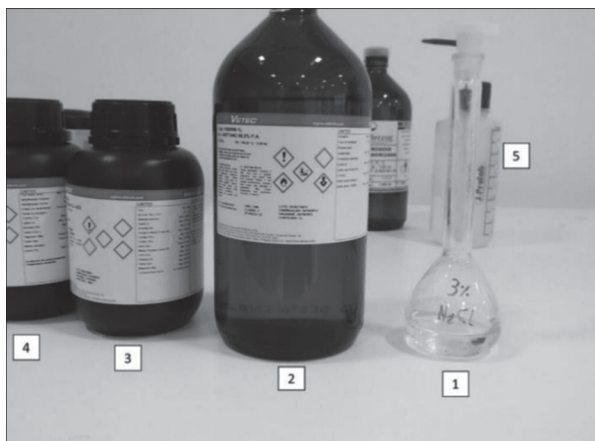
O desenho experimental consiste no contraste dos resultados de dois sistemas: o primeiro é um hidrocarboneto (Decano) em contato com água sem contaminante (C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>-H<sub>2</sub>O) e o segundo, um hidrocarboneto em contato com água e cloreto de sódio (C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>-H<sub>2</sub>O-NaCl). O composto denominado como contaminante nesta pesquisa foi o NaCl. As análises foram realizadas a pressão constante (14,7 psi) e quatro temperaturas definidas (26° C, 40° C, 60° C, 80° C).

As especificações assim como a repetitividade dos testes são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Desenho experimental

Número	Descrição
1	Salmoura
2	n-decano 99+% Vetec
3	Solvente comum
4	Solvente comum
5	Água destilada

A Figura 1 e a Tabela 2 detalham os materiais utilizados para os ensaios realizados no laboratório, é importante destacar que os materiais 4 e 5 (Tabela 2) são usados na higienização do equipamento.



**Figura 1.** Materiais usados para testes experimentais.

**Tabela 2.** Relação de materiais usados para testes experimentais.

Temperatura (° C)	Medições $C_{10}H_{22}/H_2O/NaCl$	Medições $C_{10}H_{22}/H_2O$
26° C	10	10
40° C	10	10
60° C	10	10
80° C	10	10

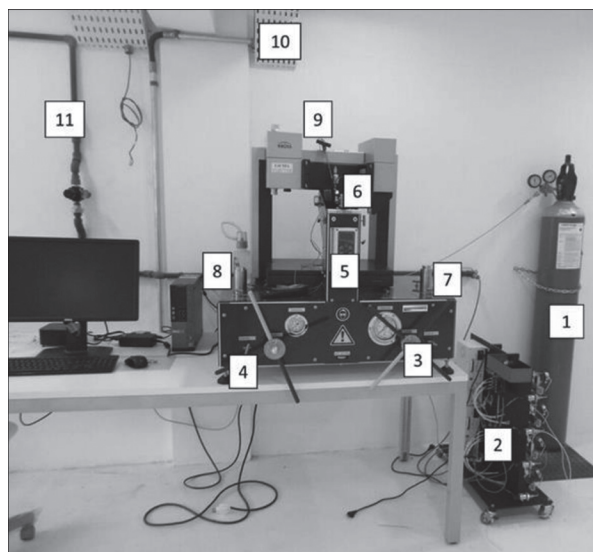
## EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTO

Os testes foram feitos no equipamento *DSA100HP* (Figura 2) da empresa alemã *Kruss* que pertence ao Laboratório de recuperação avançada de petróleo L-RAP da Universidade Federal do Rio de Janeiro, o qual permite o cálculo da tensão interfacial de fluidos usando o método da gota pendente

O equipamento consiste de dois reservatórios manuais de aço inoxidável com capacidade de 60 mL (“7 e 8” na Figura 2), desenhada para suportar 690 bar de pressão.

As células foram testadas em uma série de ensaios onde comparando com outros autores (Zeppieri, et al., 2001) (Jennings & Newman, 1971), os resultados foram ótimos. No caso da medição da tensão interfacial o *DSA100HP* tem um rango que vai desde 0.01 até 200 (mN/m), resolução de 0.01 (mN/m), precisão de 0.3 (mN/m), também permite calcular a tensão interfacial

em condições dinâmicas ou estáticas e é utilizada a equação de Young-Laplace para correção dos resultados.



**Figura 2.** Equipamento usado para a medição da tensão interfacial: 1. Cilindro de Nitrogênio. 2. Células de descarga. 3. Célula de pressão fluido 4. Célula de pressão fluido 5. Medidor y calibrador de temperatura 6. Unidade de observação microscópica 7. Célula de confinamento fluido 8. Célula de confinamento fluido 9. Tubo capilar 10. Duto de escape 11. Duto alimentador da célula.

O teste experimental começa enchendo cada um dos reservatórios (*Liquid drop* e *Liquid Cell*) com os fluidos componentes do sistema (Figura 3), a seguir se procede a abrir o fluxo mediante a abertura das válvulas A e E, nesse ponto os líquidos serão injetados mediante ação manual dos pistões (*PG drop* e *PG cell*).

O fluido será transferido desde o reservatório (*Liquid Drop*, neste caso o decano), a través de um tubo capilar (Capillary Tube CT – A), levando em consideração que a válvula B deve estar aberta e a válvula C fechada. Por último o n-alcano estará pronto para ser visualizado junto com a água (Figura 3), que percorre o caminho desde o *liquid cell* até a célula de visualização, cumprindo as condições de abertura da válvula F e fechamento da válvula G.

Quando os dois fluidos são misturados no tubo capilar que desemboca na célula de visualização (Equipado com uma câmara de alta resolução), procede-se a elaboração de bolhas homogêneas as quais são supervisionadas, calibradas e calculadas mediante o *Software Kruss* (Figura 4), sendo quantificado um IFT provisional que deverá ser corrigido levando em consideração as densidades dos fluidos a determinadas temperaturas.

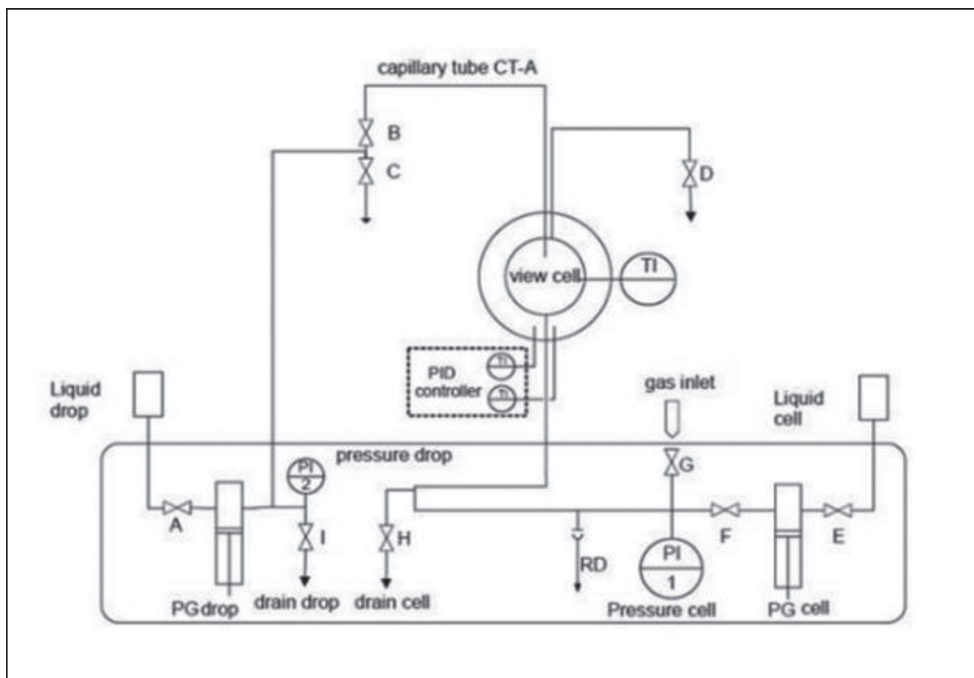


Figura 3. Esquema Drop Shape Analyzer

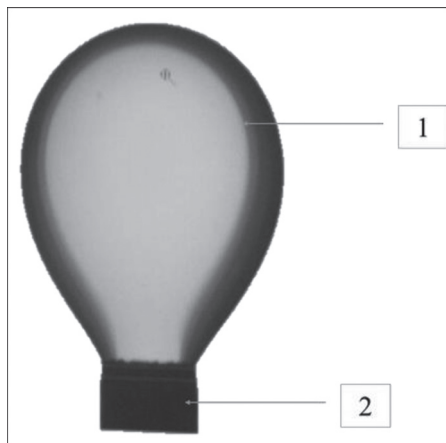


Figura 4. Imagens do software Kruss, 1. Zona de contato para o cálculo da IFT, 2. Boquilla DAS

### ANÁLISE ESTATÍSTICO E TRATAMENTO DE DADOS PARA O SISTEMA C10H22/H2O

O DSA fornece um valor numérico como resultado da medição da tensão interfacial, o qual deverá ser corrigido, para isso é indispensável conhecer a variação da densidade de cada um dos componentes com o incremento da temperatura do sistema. As Figuras 5 e 6 mostram a variação proporcional da temperatura e densidade (propriedades objetivo) da água e do n-alcano.

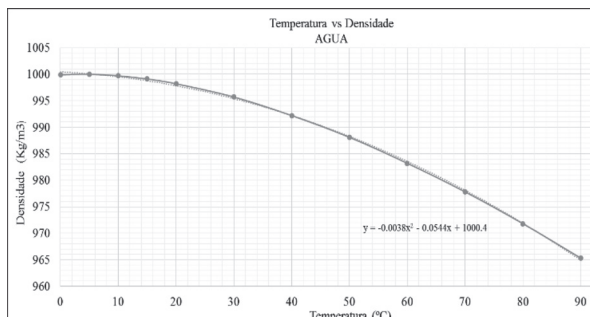


Figura 5. Variação da densidade da água com a temperatura

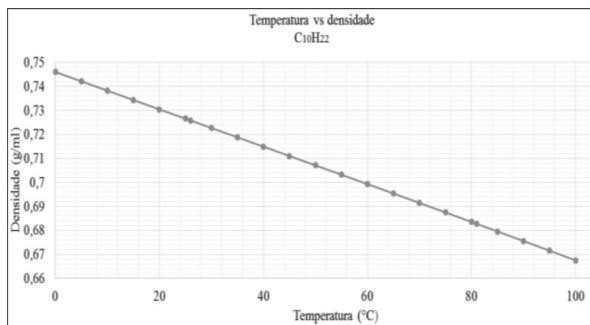


Figura 6. Variação de um n-alcano com a temperatura.

O valor da tensão interfacial corrigida é expressada pela seguinte equação:

$$IFT_{Real} = (Densidade_{H_2O} - Densidade_{Alcano}) * IFT_{medio} \quad (1)$$

Quando a correção é feita, procede-se a analisar estatisticamente o conjunto de dados, eliminando assim todos os valores que estejam 4 pontos percentuais fora da média, como é evidenciado na (Tabela 3 e Figura 7).

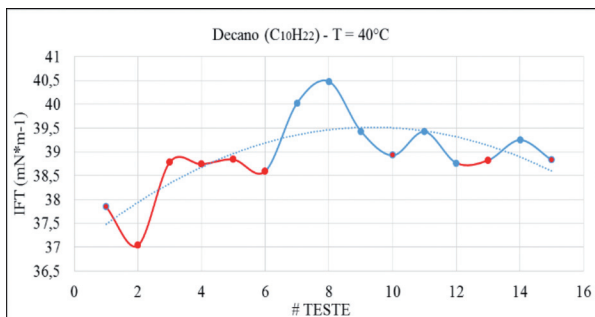


Figura 7. Eliminação dos valores que ficaram 4 pontos percentuais fora da média.

Tabela 3. Análise estatístico dos dados

n	10	Número de dados
Média	40,619	Média aritmética
D	1,848462104	Desviarão padrão
Mínimo	35,556	Valor mínimo
Mediana	41,085	Mediana ou Quartil 2
Máximo	41,761	Valor máximo dos dados

A seguir, os dados que resultaram após da depuração são consolidados e a análise estatística é feita de novo, levando em consideração que os pontos afastados deveram ser retirados novamente (Figura 8).

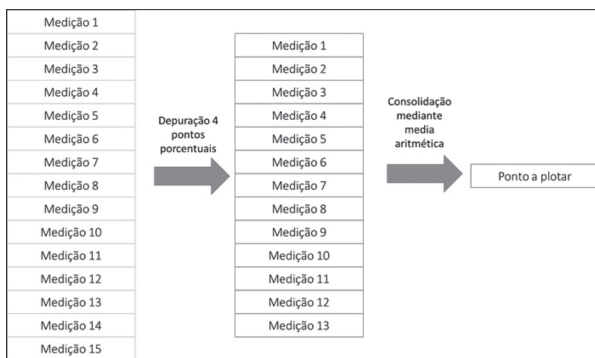


Figura 8. Fluxo de trabalho no tratamento de dados.

## ANÁLISE ESTATÍSTICO E TRATAMENTO DE DADOS PARA O SISTEMA C10H22/H2O/NaCl

O procedimento é similar ao tratamento de um sistema que não está contaminado, a única diferença radica em que a curva da densidade com respeito ao tempo

muda segundo a porcentagem de salmoura presente no sistema, tal e como e evidenciado (Figura 9). A Figura 10 mostra detalhadamente a concentração de salmoura no sistema de interesse.

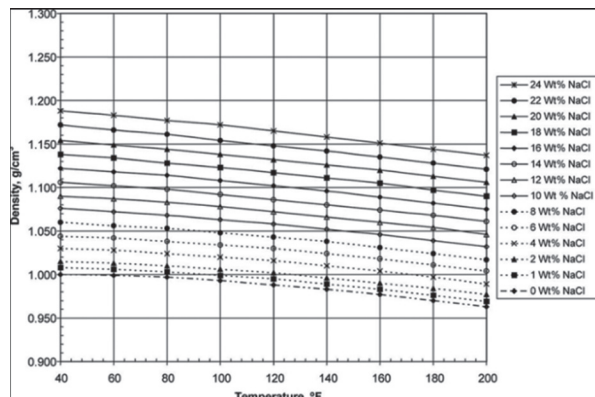


Figura 9. Variação da densidade em relação à concentração da salmoura dissolvida em água.

Fonte: Deffeyes, 2008

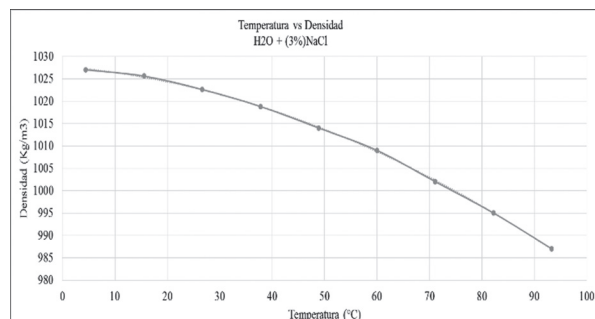


Figura 10. Variação da densidade com a temperatura no sistema H<sub>2</sub>O/NaCl.

## ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DO ERRO

A fim de evitar o fenômeno de propagação do erro, é indispensável conhecer o número de dígitos significativos a ser considerados na análise, empregando uma determinada metodologia (Figura 11). Para esta finalidade é utilizado o método gráfico devido a que foi projetado para estimar os parâmetros do desvio das retas Este método apresenta uma elevada porcentagem de sucesso, o qual vai depender das discordâncias derivadas do uso de valores com várias casas decimais e que são refletidos nas escalas dos gráficos. (Brito Cruz & Fragnito, 1997).



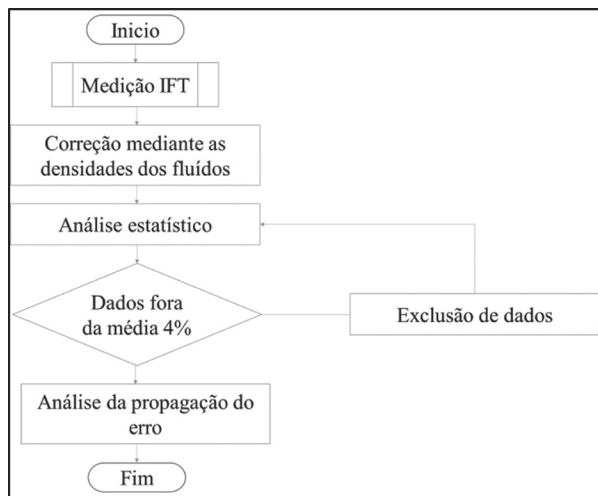


Figura 11. Metodologia para a correta medição e tratamento de valores de IFT obtidos a través do DAS

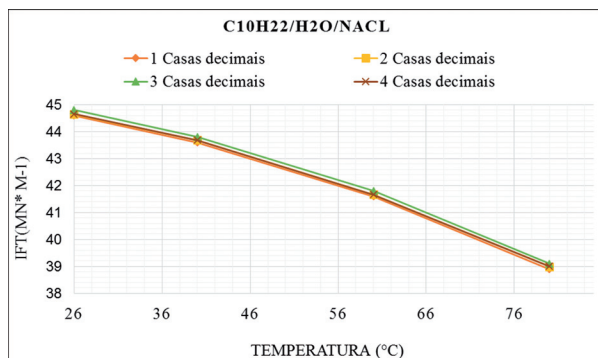


Figura 12. Análise da propagação do erro para o sistema C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>/H<sub>2</sub>O/NaCl.

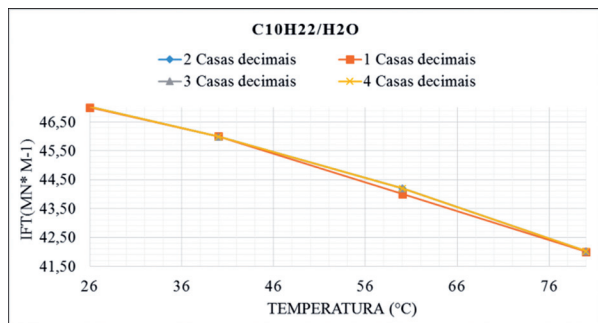


Figura 13. Análise da propagação do erro para o sistema C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>/H<sub>2</sub>O

A Figura 12 mostrou que a trajetória da função que utiliza valores com três e quatro casas decimais apresentou uma grande discrepância quando comparada com a função que emprega valores com apenas uma casa decimal. Na Figura 13 observa-se uma tendência similar, podendo-se perder objetividade quando se avalia a função empregando valores com três e quatro

casas decimais. Por este fato, nosso grupo de trabalho utilizou valores com dois casas decimais.

## OBSERVAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 4 e na figura 14, são mostrados os valores da tensão interfacial de cada um dos sistemas avaliados a diferentes temperaturas, as considerações mais importantes no desenvolvimento dos experimentos e a análise do produto final:

Tabela 4. Valores da IFT vs Temperatura para cada sistema.

Temperatura (°C)	IFT (γ/mN* m <sup>-1</sup> ) C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> /H <sub>2</sub> O/NaCl	IFT (γ/mN* m <sup>-1</sup> ) C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> /H <sub>2</sub> O
26	42,18	47,02
40	40,38	45,99
60	39,30	44,19
80	36,01	42,02

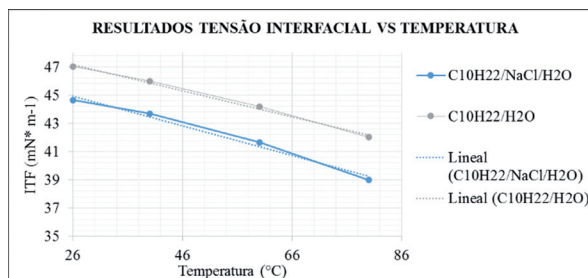


Figura 14. Valores da tensão interfacial para diferentes temperaturas.

O comportamento de cada um dos sistemas (C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>/H<sub>2</sub>O/NaCl e C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>/H<sub>2</sub>O) foi representado mediante uma equação lineal empregando os valores avaliados e analisados dos experimentos(Tabela 4 e Figura 14). Os coeficientes e o fator de correlação da equação para cada sistema são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Componentes da equação lineal: y = ax + b, (a) Coeficiente angular (b) Intercepto (R<sup>2</sup>) factor de correlação.

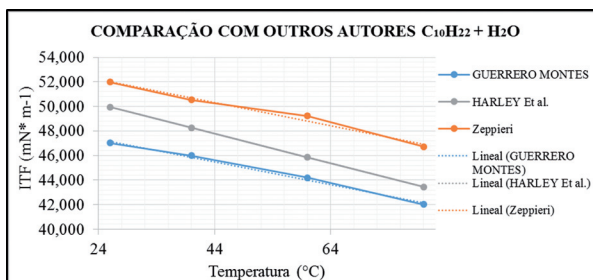
Sistema	a (nN*m <sup>-1</sup> *°C <sup>-1</sup> )	b (mN*m <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> /H <sub>2</sub> O/NaCl	-0,0927	49,5810	0,9939
C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> /H <sub>2</sub> O/	-0,0962	43,9880	0,9779

- Durante os testes se comprovou que a tensão interfacial decresce com o tempo, como foi demonstrado por diferentes autores (Ling, et al, 2012),( Zeppieri, et al., 2001), (Zeppieri, et al., 2009), (Goebel & Lunkenheimer, 1997), (Jennings

& Newman, 1971) isto devido a que a bolha quando exposta a um ambiente perde massa por causa da evaporação o que ocasiona que as forças intermoleculares diminuam.

- Comprova-se que o sistema com salmoura (NaCl) apresenta menores valores para a tensão interfacial que o sistema que não tem contaminante, isto é devido a que a diferença de densidades do sistema  $C_{10}H_{22}/H_2O$  é menor que do sistema  $C_{10}H_{22}/H_2O/NaCl$ .
- Os resultados obtidos corroboram que o valor da tensão interfacial para o sistema estudado diminui em relação ao incremento da temperatura, é importante levar em consideração esta relação inversamente proporcional para que possa ser utilizada na formulação de métodos de recuperação avançada de petróleo. O comportamento da tensão interfacial *versus* a temperatura é escalável a condições de superfície ou condições de reservatório.

A Figura 15 mostra a comparação dos valores obtidos por (Jennings & Newman, 1971) e Zeppieri e colaboradores (2001) com nosso equipe de trabalho.



**Figura 15.** Comparação com outros autores sistema  $C_{10}H_{22}/H_2O$

A Tabela 6 mostra os erros relativos percentuais (Erp) dos coeficientes angulares para cada equação lineal avaliada (Figura 15), os Erp's foram considerados ótimos devido a que não ultrapassaram os 5 pontos percentuais.

**Tabela 6.** Comparação da equação da reta com seu respectivo Erro Relativo percentual.

RETA	a ( $nN*m^{-1}*°C^{-1}$ )	b ( $mN*m^{-1}$ )	Erp (%)
GuerreroMontes	-0,0927	49,58	-
Zeppieri et al. 2001	-0,0893	53,87	3,8074
Jennings & Newman, 1971	-0,1205	53,0800	0,0023

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

- O sistema  $C_{10}H_{22}/H_2O/NaCl$  apresentou valores mais baixos de tensão interfacial comparando com o sistema ao sistema  $C_{10}H_{22}/H_2O$ , por este motivo pode-se concluir que quando um sistema é menos denso, apresenta menor valor de tensão interfacial.
- A correlação para o sistema puro teve valores de erros relativos percentuais de 3,80% e 0,0023%. Permitindo concluir que os resultados obtidos são altamente confiáveis e as inferências feitas a partir destes análises são totalmente válidos.

## REFERENCIAS

1. Aya, C. L. D., & Navarro, S. F. M. (2009). Estudio de la técnica toe to heel steamflood, thsf: una nueva opción para el recobro de crudo pesado. *Revista Fuentes*, 7(1).
2. De Brito Cruz, C. H., & Fragnito, H. L. (1997). Guia para Física Experimental Caderno de Laboratório, Gráficos e Erros. Campinas, UNICAMP.
3. Deffeyes, K. S. (2008). Hubbert's peak: the impending world oil shortage (New Edition). Princeton University Press.
4. Goebel, A. & Lunkenheimer, K. (1997). Interfacial tension of the water/n-alkane interface. *Langmuir*, 13(2), 369-372.
5. Jennings Jr, H. Y. & Newman, G. H. (1971). The effect of temperature and pressure on the interfacial tension of water against methane-normal decane mixtures. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 11(02), 171-175.
6. Ling, K., & He, J. (2012). A new correlation to calculate oil-water interfacial tension. In SPE Kuwait International Petroleum Conference and Exhibition. *Society of Petroleum Engineers*.
7. Martín, C. A. G., García, R. E. P., Niño, J. C. L., & Lombana, H. B. (2014). Optimización de la metodología para el cálculo de porosidad a través de saturación de fluidos. *Revista Fuentes*, 12(2).
8. Mejía Buitrago, S. M. (2009). Determinación

- de la tensión interfacial agua-decano bajo confinamiento por técnicas de simulación molecular (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
9. Páez, E. G. M., Rodríguez, H. D. P., Aya, C. L. D., Navarro, S. F. M., & Ortiz, W. B. (2009). Aplicación de Nuevas Tecnologías Para la Recuperación de Crudo Pesado en Yacimientos Profundos. *Revista UIS Ingenierías*, 8(1).
10. Zeppieri, S., Ramírez, Y., Molina, J., & López de Ramos, A. L. (2009). Estudio experimental de la tensión interfacial transitoria para sistemas alcanos-agua-Tritón X-100 empleando la técnica de la gota emergente. *Información tecnológica*, 20(6), 125-135.
11. Zeppieri, S., Rodríguez, J., & López de Ramos, A. L. (2001). Interfacial tension of alkane+ water systems. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 46(5), 1086-1088.

---

**Recepción:** 18 de abril de 2017

**Aceptación:** 8 de junio de 2017