

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**  
**CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MATERIAIS, PROCESSOS E**  
**COMPONENTES ELETRÔNICOS.**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE MEDIDAS DE TENSÃO**  
**SUPERFICIAL**

**ANDERSON MATHEUS ALVES**

**SÃO PAULO – SP**  
**2015**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**  
**CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MATERIAIS, PROCESSOS E**  
**COMPONENTES ELETRÔNICOS**

**ANDERSON MATHEUS ALVES**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE MEDIDAS DE TENSÃO**  
**SUPERFICIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso ao Curso  
Materiais Processos e Componentes  
Eletrônicos para obtenção do título de  
Tecnólogo em Materiais Processos e  
Componentes Eletrônicos.

Orientador

Prof. Me. Carlos Takeo Akamine

**São Paulo – SP**  
**2015**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me dar forças nos momentos difíceis para que pudesse concluir o trabalho.

Ao meu professor orientador Carlos Takeo Akamine, por me estender a mão em um momento difícil que eu me encontrava e pela ajuda e confiança para a elaboração, desenvolvimento e finalização deste trabalho.

A todos os professores do curso Materiais, Processos e Componentes Eletrônicos da Fatec-SP por terem me passado toda a base de conhecimento necessário para a realização deste trabalho, em especial os professores: João Mongelli Neto, Paulo Jorge Brazão Marcos, Roberto Katsuhiro Yamamoto e Francisco Tadeu Degasperi.

À minha família por me dar apoio para que eu não fraquejasse na minha caminhada durante o curso.

Aos meus amigos e colegas do curso, em especial, Felipe Ramalho Ferreira da Silva, Gabriel Fávero do Poço, Fabrício Marcolino Alves, Thaís Silva Moreira Leite, Nathália Araújo da Silva, Vanessa Cristina Pereira da Silva, Gabriel Fernandes e Douglas Ribeiro Gomes, que estiveram comigo em todos os dias de estudos necessários para que eu chegasse até o final do curso.

À minha namorada Larissa do Nascimento Sousa por me ajudar a editar este trabalho, pela compreensão, apoio e carinho.

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”

(Antoine Laurent de Lavoisier)

## RESUMO

Este trabalho consistiu em desenvolver procedimento para medidas de tensão superficial em diferentes materiais como água, glicerina, glicose e surfactantes / tensoativos. Foi possível observar a combinação entre os materiais, para estudar a mudança da tensão superficial à medida que variamos as substâncias. A tensão superficial é um fenômeno mais estudado em líquidos e a água é muito citada para a explicação desta propriedade.

Há vários métodos de fazer a medição e os mais usados neste trabalho foram a Lei de Tate e o método do Anel. Também é citado um pouco do método do ângulo de contato.

Além de mostrar a variação de tensão superficial, durante o trabalho são apresentados alguns problemas que podem afetar as medições e consequentemente as deixando incoerentes no processo de metodologia. Após os testes é possível identificar onde os conceitos de tensão superficial e energia de superfície são usados na tecnologia. Por fim é usado um teste estatístico chamado teste t pareado para saber se as medições são estatisticamente iguais e se estão coerentes, além de se saber qual é o método mais confiável a ser utilizado.

**Palavras-chaves:** Tensão Superficial. Teste t. Lei de Tate. Método do anel.

## ABSTRACT

The objective of this project was to develop a method to measure surface tensions in different materials like water, glycerine, glucose and surfactants. It was possible to observe the combination between the materials, to study the change of surface tension as we vary the substances. The surface tension is a phenomena studied specifically in liquids and the water is often mentioned to explain his properties.

There are a lot of methods to measure this tension and the most used in this project were the Tate Law and the Ring method. Also is mentioned the Contact Angle method.

Besides to show the variation of surface tension, during the project are exhibited some problems that can affect the measures and consequently those becoming incoherent in the methodology process. After the tests is possible to identify where the surface tension and surface energy concepts are used in the technology. Lastly is used the statistic test called t-test paired to know if the measures are statistically the same and if they are coherent, besides to know what method are the most reliable to be used.

**Keywords:** Superficial tensions. T-tes. Tate Law. Ring method.

## **Lista de Tabela**

Tabela 1: Composição das soluções .....	29
Tabela 2: Média da tensão superficial dos diferentes líquidos. ....	32
Tabela 3: Média da tensão superficial das soluções .....	38
Tabela 4: Tensão superficial média das soluções. ....	39
Tabela 5: Diferença, desvio padrão e média da diferença entre os métodos .....	41

## Lista de Figuras

Figura 1: Tratamento de superfície da Poliacrilonitrila (PAN) com diferentes plasmas.....	3
Figura 2: Tempo de envelhecimento do polipropileno (PP) após o tratamento de superfície com plasma.Fonte: [7].....	4
Figura 3: Localização dos alvéolos nos pulmões.Fonte: [11] [20].....	5
Figura 4: Tensão na superfície da água.Fonte: [2] .....	6
Figura 5: Lagarto basilisco-verde.Fonte: [16] .....	7
Figura 6: Inseto sobre a superfície da água.Fonte: [17] .....	8
Figura 7: Clipe suspenso pela tensão superficial.Fonte: [18].....	8
Figura 8: Agulha suspensa pela tensão superficial. ....	9
Figura 9: Força superficial contrária a força peso da seção transversal da agulha.Fonte: [19]..	9
Figura 10: Tensoativos tendem a ficar na superfície da água.Fonte: [5].....	10
Figura 11: Molhabilidade entre um líquido e um sólido após injeção de um surfactante.Fonte: [5] .....	11
Figura 12: Esquema de um surfactante.Fonte: [5].....	11
Figura 13: Junção da água e óleo intermediado pelo surfactante.Fonte: [5] .....	12
Figura 14: Forças atuantes em uma gota de um líquido no seu decaimento de um tubo de diâmetro “d”.Fonte: [10] .....	14
Figura 15: Fotos em alta velocidade de uma gota caindo e perda de massa. Fonte: [10] .....	16
Figura 16: A película tem duas faces sendo que cada face atua uma força de tensão superficial. ....	20
Figura 17: Ângulo de contato da superfície da gota. Fonte: [14] .....	21
Figura 18: Superfície hidrofóbica versus superfície hidrofílica. Fonte: [8] .....	21
Figura 19: Pipeta, pera de sucção, balança e béquer para as medições das massas das gotas.	24
Figura 20: Arranjo experimental para o método do anel.....	27
Figura 21: Desenho do esquema do método da película. ....	28
Figura 22: Tensão superficial do surfactante.....	30
Figura 23: Tensão superficial da glicerina. ....	31
Figura 24: Tensão superficial glicose.....	31
Figura 25: Quociente com a glicose. ....	33
Figura 26: Quociente com a glicerina.....	33
Figura 27: Quociente com o detergente.....	33
Figura 28: Tensão Superficial da Solução 1.....	35



Figura 29: Tensão superficial da solução 2. ....	35
Figura 30: Tensão superficial da solução 3. ....	35
Figura 31: Tensão superficial da solução 4. ....	36
Figura 32: Tensão superficial da solução 5. ....	36
Figura 33: Tensão superficial da solução 6. ....	36
Figura 34: Tensão superficial da solução 7. ....	37
Figura 35: Tensão superficial da solução 8. ....	37
Figura 36: Região crítica e região de aceitação. ....	42
Figura 37: Região crítica e região de aceitação com valores definidos.....	43

## Sumário

1. Objetivo.....	1
2. Introdução.....	2
2.1Aplicação .....	2
2.1.1 Tratamento de superfícies a plasma .....	3
2.1.2 Alvéolos Pulmonares.....	4
3. A teoria da tensão superficial .....	6
3.1Surfactantes / Tensoativos. ....	10
4. Métodos de medição de tensão superficial .....	13
4.1 Método da gota (Lei de Tate). ....	13
4.2 Método do Anel (película).....	18
4.3Ângulo de contato .....	20
5. Metodologia.....	23
5.1 Montagens para a Lei de Tate .....	23
5.2Montagens para o método do anel (Película).....	26
6. Resultados e Discussões .....	29
6.1 Resultados para a Lei de Tate .....	30
6.2 Resultados para o método do anel .....	39
6.3 Resultados unificados .....	41
7. Considerações Finais .....	44
8. Trabalhos futuros.....	46
9. Referências .....	47
10. Anexos.....	50

## **1. Objetivo**

Os objetivos principais desse trabalho são o desenvolvimento de método de medidas de tensão superficial; medir a tensão superficial individualmente dos líquidos usados e também de várias misturas e estudá-las; comparar as medidas obtidas com teste estatístico.

Além dos objetivos principais, durante o trabalho são apresentados alguns problemas que podem aparecer durante as medições dos dois métodos envolvidos no trabalho, que podem prejudicar as medições. Além disso, é possível observar onde no cotidiano o fenômeno de tensão superficial está presente.

Quando se fala em tensão superficial, normalmente o termo energia de superfície também está associado. Podemos entender que tensão superficial em líquidos equivale à energia de superfície em sólidos. O método do ângulo de contato, apesar de não estar na prática nesse trabalho acadêmico, foi citado brevemente e é possível identificar as energias livres de superfície envolvidas no processo. Definindo tensão superficial em poucas palavras, diz-se que seria uma força atuante sobre a superfície de um líquido por unidade de comprimento na qual essa força está distribuída. Com relação à energia de superfície, em poucas palavras, diz-se que seria o trabalho necessário para aumentar a área do sólido/líquido.

## **2. Introdução**

Quando se fala em líquido, a água é a primeira ideia que vem à mente para ser utilizada como estudo de maneira geral. As moléculas de um líquido interagem entre si de várias formas, e as mais conhecidas, quando as suas cargas negativas e positivas não estão bem distribuídas, são as de atração e de repulsão elétrica.

Ao colocar um líquido em um recipiente como um copo, por exemplo, as forças de atração impedem que as moléculas se espalhem pelo espaço. Voltando ao exemplo, este ocupará um volume determinado, formando assim uma superfície bem definida entre ele e o ar. Nessa película invisível e bem definida que é formada ocorre a tensão superficial. Ressalta-se que ao doar energia a esse líquido, por energia térmica (calor), a tensão superficial tende a diminuir devido ao fato de que as moléculas ficarão em constante movimento dentro deste líquido e em sua superfície, consequentemente, quebrando a película que estava em sua superfície. [1]

### **2.1Aplicação**

Quando se fala em tensão superficial, no cotidiano, tem-se diversos exemplos, desde o mais simples aos mais tecnológicos e complexos, como por exemplo, uma máquina de lavar roupas, na maioria das vezes durante a lavagem aumenta-se a temperatura da água para conseguir um melhor desempenho de limpeza sobre as roupas. Essa atitude nada mais é do que a diminuição da tensão superficial da água para que a mesma possa entrar nas fibras dos tecidos, e diminui-se a tensão superficial mais ainda quando acrescentamos algum tipo de sabão (surfactante) para poder melhorar ainda mais o desempenho da lavagem. Outro exemplo, mais complexo, na própria técnica de ângulo de contato onde usamos o método da goniometria para determinar o ângulo de contato de uma gota de água deionizada com relação a um substrato, antes e depois de uma corrosão por plasma. Com relação aos filmes finos que se depositam sobre um substrato de silício ou outro tipo de superfície, são feitos aquecimentos sobre esse substrato e o filme fino para que o filme ganhe uma melhor aderência sobre o substrato, nisso se usa o princípio de que com o aumento da temperatura, diminui-se a tensão superficial. Os seres humanos, no corpo possuem uma técnica que envolve tensão superficial, onde está relacionada com o sistema respiratório: os pulmões produzem surfactantes para uma melhor condição de respiração.

### 2.1.1 Tratamento de superfícies a plasma

O tratamento de superfícies de materiais com plasma tem como objetivo modificar a característica de uma superfície para que possa melhorar a molhabilidade ou até criar uma super hidrofobia. Com relação à molhabilidade, é possível ter uma boa adesão de outros materiais sobre essa superfície. [6] [7]

É possível construir um gráfico Ângulo de contato versus Tempo de tratamento a plasma. Na tecnologia, diversos tipos de polímeros são submetidos a tratamentos para terem uma boa adesão de novos materiais sobre sua superfície, como a introdução de tintas sobre a superfície, por exemplo. O polímero PAN (Poliacrilonitrila) foi submetido a um tratamento a plasma no qual era usada água deionizada para medir o ângulo de contato, como está ilustrado no gráfico a seguir. [6]

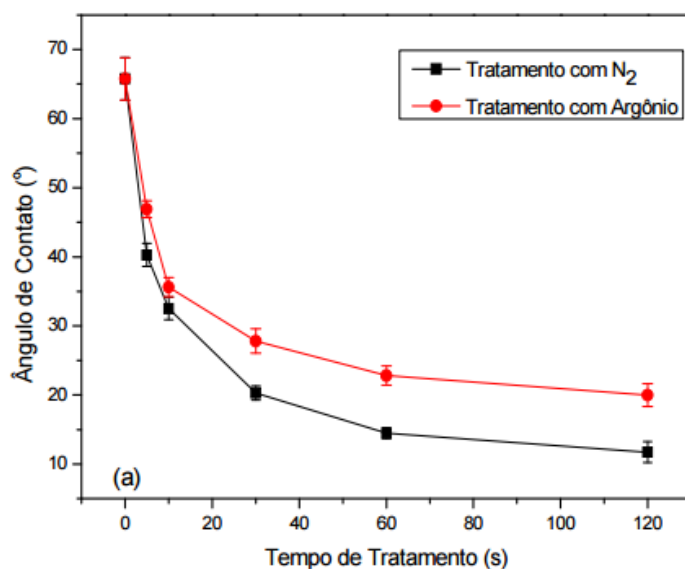


Figura 1: Tratamento de superfície da Poliacrilonitrila (PAN) com diferentes plasmas.

Fonte: [6]

No mercado, há diversas maneiras de tratamento de superfície de materiais. Mais especificadamente em polímeros, o uso das técnicas de tratamento não é irreversível na maioria dos casos, talvez em questão de horas, dias ou meses, a superfície do polímero tende a voltar ao normal e consequentemente o ângulo de contato aumenta quando se fala em molhabilidade. Esse fato é devido à tendência das cadeias poliméricas na superfície do polímero a buscar uma estabilidade entre elas. [6].

Seguindo a linha de raciocínio do trecho acima, depois de um tratamento de superfície a plasma em polímeros, foi pego o Polipropileno (PP) para ilustrar na figura a seguir que com o tempo, na superfície do material, no caso o polímero, o ângulo de contato entre a superfície e o líquido vai aumentando em função do tempo de envelhecimento (aumenta quando se fala em molhabilidade). [7]

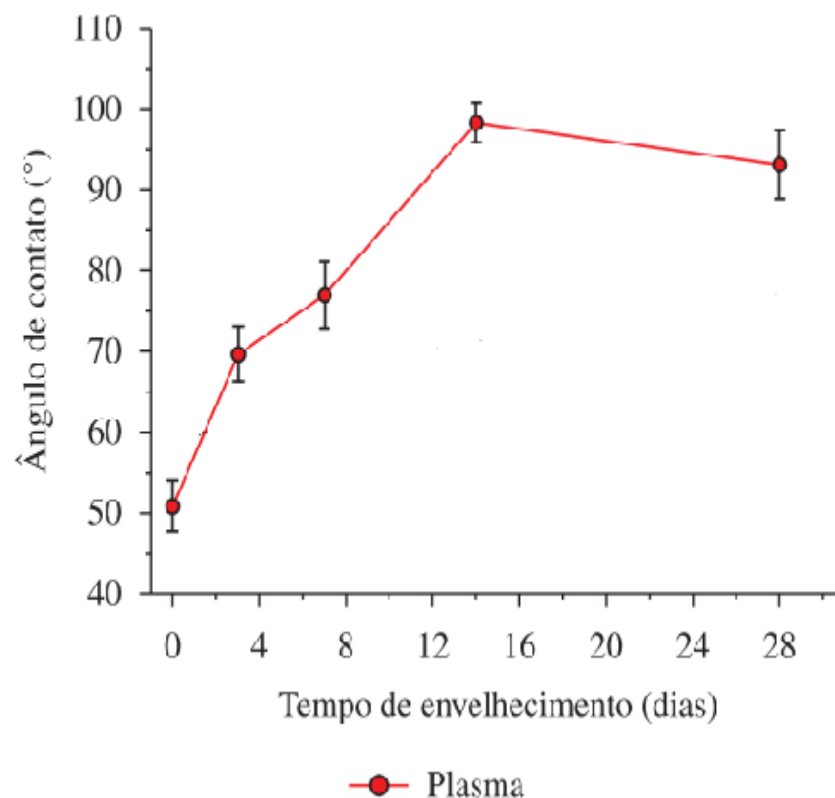


Figura 2: Tempo de envelhecimento do polipropileno (PP) após o tratamento de superfície com plasma. Fonte: [7]

### 2.1.2 Alvéolos Pulmonares

No sistema respiratório, especificamente nos pulmões, onde estão localizados os alvéolos pulmonares, as células alveolares produzem uma substância chamada de surfactante pulmonar, na maioria das vezes composta por fosfolipídios. Essa substância auxilia durante o processo de respiração responsável pela absorção de oxigênio que tem no ar. A absorção é feita através da diminuição de tensão superficial situada nas paredes dos alvéolos. Os fosfolipídios possuem uma característica semelhante a um sistema anfifílico, possuem uma

parte hidrofóbica e uma parte hidrofílica. A imagem a seguir mostra a localização dos alvéolos.

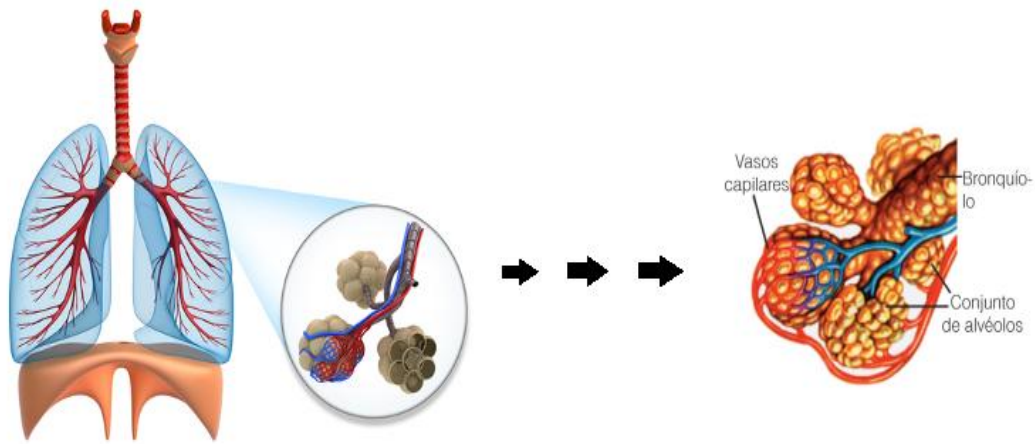


Figura 3: Localização dos alvéolos nos pulmões. Fonte: [11] [20]

Durante o ciclo respiratório, os fosfolipídios ficam em contato com as paredes internas dos alvéolos formando uma fina camada que possibilita a permeabilidade das moléculas de oxigênio. Para esse processo ser eficiente, a tensão superficial deve ser abaixo de  $10 \text{ mN/m}$ , sendo somente possível com a compressão da fina camada de fosfolipídios na superfície. Quando é feita a compressão dos surfactantes, as cadeias hidrocarbônicas dos tensoativos ficam mais próximas umas das outras, aumentando a densidade da fina camada, contudo, representará um maior número de defeitos na membrana pelicular, reduzindo assim, a tensão superficial. Consequentemente facilitará a difusão de oxigênio para os vasos capilares.

Caso o corpo não produza uma quantidade necessária de surfactante pulmonar, haverá problemas com o sistema respiratório. Essa doença denomina-se Síndrome do Desconforto Respiratório (SDR), que afeta bebês prematuros e que, na maioria dos casos, torna-se fatal. [11]

### 3. A teoria da tensão superficial

Para explicar esse fenômeno, deve-se ter em mente que as forças que atuam nas moléculas da superfície e as que atuam nas moléculas internas do líquido, são diferentes. Considerando a água dentro de um recipiente como exemplo, as moléculas abaixo da superfície têm uma distribuição de forças radial, ou seja, tem atração por todos os lados. Assim, uma anulará a outra tendo uma resultante igual a zero, já as que estão na superfície possuem forças de atração abaixo e dos lados apenas, fazendo com que se tornem mais coesas e tendem a ir para o interior do líquido e fiquem mais próximas umas das outras formando a chamada tensão superficial. [2]

A figura a seguir irá nos mostrar as estruturas no centro e na superfície do líquido:

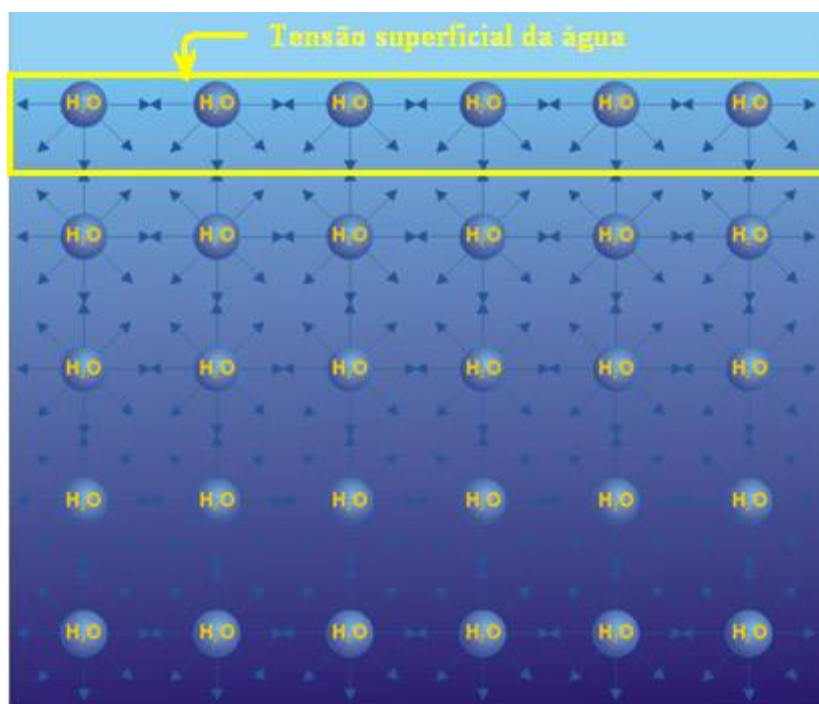


Figura 4: Tensão na superfície da água. Fonte: [2]

Na natureza, existem alguns animais que usam o artifício da tensão superficial a seu favor, como por exemplo, o Lagarto basilisco-verde também conhecido como “Lagarto Jesus Cristo” pelo fato deste andar sobre as águas como mostra a figura a seguir:





Figura 5: Lagarto basilisco-verde.Fonte: [16]

Para conseguir esta ação, este animal usa uma somatória de recursos que são a tensão superficial, massa pequena, patas traseiras em forma de concha para a captura de ar e exerce a atividade de correr em “alta velocidade”. Dá-se ênfase para a tensão superficial e as patas em forma de concha para a captura de ar uma vez que o ar é menos denso que a água e tende a ficar na superfície tornando possível existência da força empuxo, consequentemente tornando possível ele correr sobre a água, uma vez que possui uma massa pequena e apesar da ajuda da tensão superficial o lagarto rompe essa tensão então necessita de outros recursos já citados para poder correr sobre as águas.

Alguns insetos também se aproveitam da tensão superficial, já que possuem uma massa relativamente bem pequena e uma delicadeza ao tocar a superfície da água como pode ser observado na imagem a seguir:



Figura 6: Inseto sobre a superfície da água.Fonte: [17]

Em uma experiência simples pode-se comprovar essa tensão que está sobre a superfície da água, pegando um simples clipe de papel ou uma agulha e colocando delicadamente sobre a água, observa-se que esses dois objetos estarão suspensos sobre a superfície da água como estará ilustrado na figura abaixo:

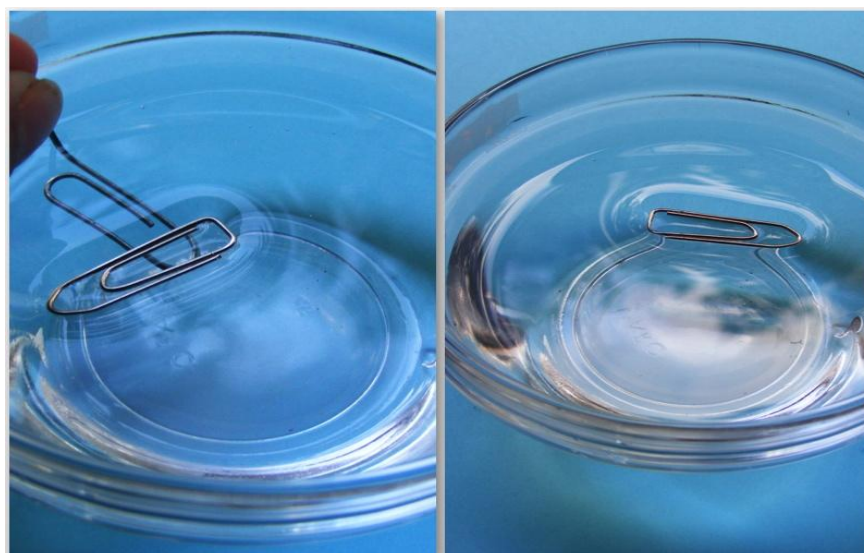


Figura 7: Clipe suspenso pela tensão superficial.Fonte: [18]

Até mesmo com uma agulha ou outros objetos de massa pequena é possível ver a tensão superficial em ação neles:



Figura 8: Agulha suspensa pela tensão superficial.

Na imagem a seguir, tem-se uma simples demonstração da força peso contrária força de tensão superficial, é possível observar a simplicidade da imagem que no caso pode ser entendida como a seção transversal de uma agulha que não rompe a tensão superficial, ou seja, a força peso será equilibrada pela resultante das forças de tensão superficial, no caso contrário de a força peso ser maior que a força de tensão superficial, teria o rompimento da película na superfície onde as moléculas estão mais coesas, conseqüentemente a agulha afundaria, veja a simples imagem a seguir:

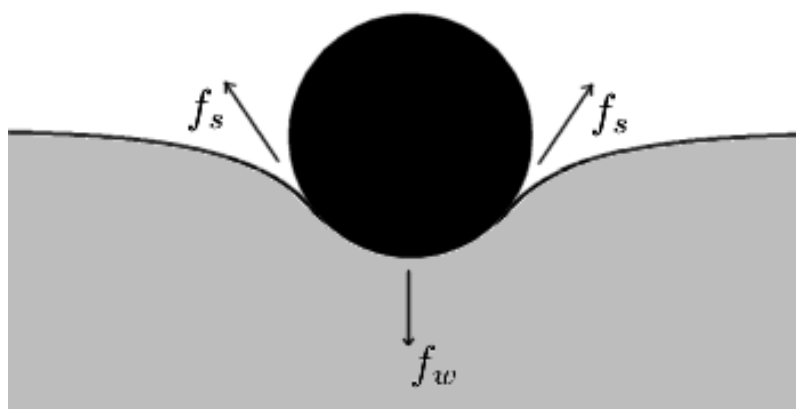


Figura 9: Força superficial contrária a força peso da seção transversal da agulha. Fonte: [19]

### 3.1 Surfactantes / Tensioativos.

Os surfactantes, também conhecidos como tensoativos, são compostos que reduzem a tensão superficial de um líquido, ou entre dois líquidos, ou entre um líquido e um sólido.

Os surfactantes na maioria das vezes são compostos orgânicos que são anfifílicos, ou seja, contêm os grupos hidrofóbicos e os grupos hidrofílicos. Obtendo essa informação, surfactantes contem um insolúvel em água e uma componente solúvel também em água (ou óleo). [3] [4]

Quando se insere um surfactante em água, por exemplo, o mesmo tende a ficar na superfície entre a água e o ar onde a parte solúvel interage com as moléculas de água e a parte insolúvel tende a ficar na superfície da água devido às repulsões internas que receberão dentro do líquido exercidas pelas moléculas de água. Se possuem partes hidrofóbicas do surfactante na superfície do nosso líquido, quer dizer que a parte hidrofílica está interagindo com as moléculas de água abaixo da superfície e conseqüentemente tem-se uma chamada redução da tensão superficial da água ou chamados defeitos na membrana que compõe a tensão superficial. Para que o surfactante chegue à interface do líquido, depende também do seu coeficiente de difusão. A figura a seguir mostra a interação do surfactante com a água. [5]

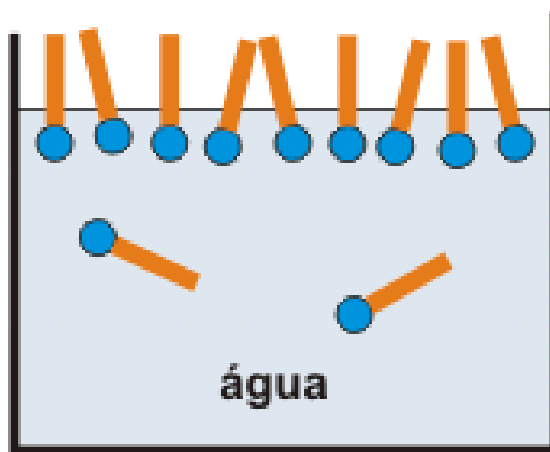


Figura 10: Tensioativos tendem a ficar na superfície da água. Fonte: [5]

A "cauda" parte apolar da molécula dos surfactantes é constituída pelas cadeias carbônicas. Quanto maior for a cadeia, maior será a tendência de adsorção das moléculas na superfície ar-água acarretando uma maior redução da tensão superficial. Quando acrescenta-se uma pequena quantidade de surfactante sobre a água, as moléculas anfifílicas formam uma fina camada sobre a superfície da água com espessura igual à da própria molécula anfifílica. [5] [11]

A figura a seguir mostra o aumento de “molhabilidade” entre um sólido e um líquido quando se insere um surfactante:



Figura 11: Molhabilidade entre um líquido e um sólido após injeção de um surfactante.Fonte: [5]

A figura a seguir mostrará um esquema para se entender melhor um surfactante.

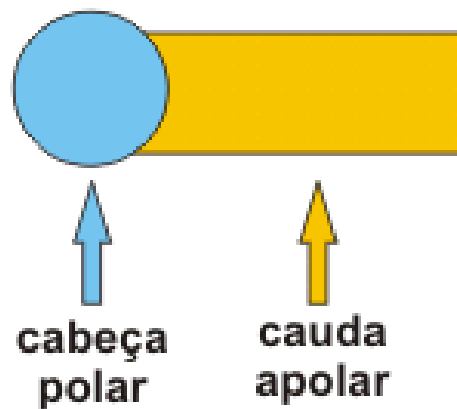


Figura 12: Esquema de um surfactante.Fonte: [5]

Como já citado, a parte polar interage com a água e a parte apolar tem interação com óleo ou outros materiais que têm configurações apolares. Quando há a junção dos dois produtos, o surfactante faz com que a junção da água e do óleo seja possível sendo ele o intermediador dessa junção, como mostra a figura seguinte:

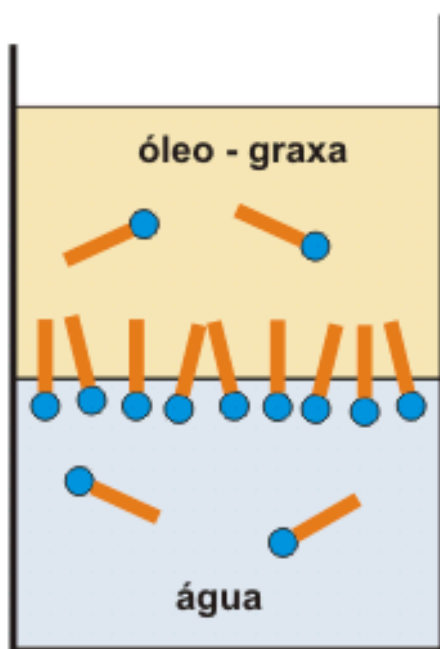


Figura 13: Junção da água e óleo intermediado pelo surfactante.Fonte: [5]

#### **4. Métodos de medição de tensão superficial**

Existem outros métodos de medição de tensão superficial além dos métodos da gota e película/anel que são usados neste trabalho. Pode-se citar outros como a equação de Laplace, capilar e o da placa de Wilhelmy. O próprio método do ângulo de contato da gota (Goniometria) faz uma relação entre as energias de superfície do sólido, sólido – líquido e a tensão superficial do líquido nos dando duas equações denominadas equação de Young, Dupré e Young – Dupré; esta segunda nos dá o trabalho de adesão ( $W_a$ ) de um líquido sobre uma superfície sólida. Denomina-se trabalho de adesão o trabalho que se realiza para separar interfaces.

Se para líquidos tem diversos métodos de medição de tensão superficial, para sólidos também tem alguns métodos para a medição de energia de superfície. Tomamos como exemplo a equação de Fowkes que usa um modelo geométrico e a equação de Wu que usa um modelo harmônico. Na literatura, pode-se conseguir valores de energia de superfície já tabelados de alguns materiais, como metais por exemplo.

##### **4.1 Método da gota (Lei de Tate).**

A Lei de Tate é um dos métodos mais conhecidos para a medição de tensão superficial de um líquido, é também conhecido como o método do peso da gota. Esse método envolve a separação de duas superfícies, a força que mantém as duas superfícies juntas de uma gota é dependente do comprimento do tubo por onde a gota sai multiplicada pela tensão superficial.

A unidade usada para quantificar a tensão superficial é força por unidade de comprimento, considerando o sistema internacional (S.I) é dada por N/m. A figura a seguir mostrará as forças que atuam em uma gota.

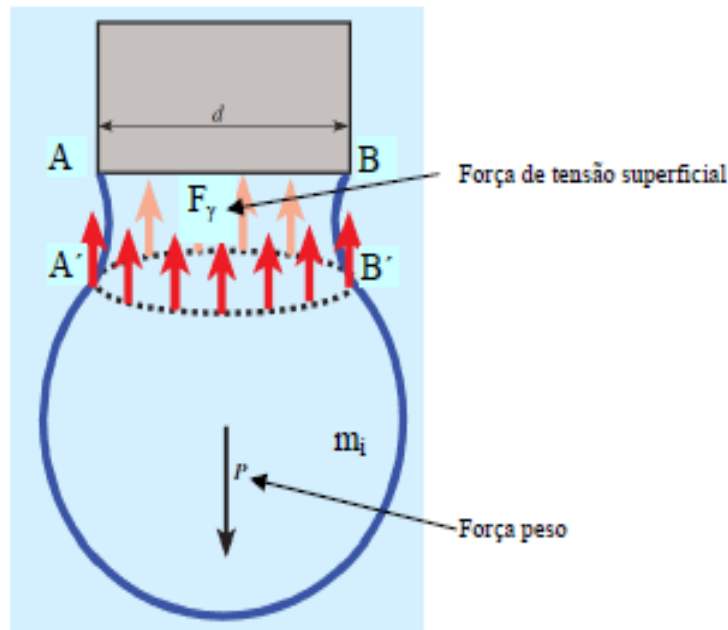


Figura 14: Forças atuantes em uma gota de um líquido no seu decaimento de um tubo de diâmetro “d”.Fonte: [10]

Como já citado, a força que sustenta a gota ( $F_\gamma$ ) em um tubo de diâmetro “d” é dependente do produto tensão superficial do líquido ( $\gamma$ ) e comprimento do tubo por onde a gota é gerada (Linhas AB), demonstrando isso em equação ficará: [10]

$$F_\gamma = 2\pi r\gamma \text{ (Eq. 1)}$$

Observa-se que as gotas de líquidos terão massa diferente quando comparadas entre si; isso é devido à tensão superficial de cada líquido ser diferente, assim quando cada gota de cada líquido for pingada através de uma pipeta, cada gota dos diferentes líquidos terá seu momento de se desprender da pipeta, tem-se a conclusão que, quanto maior a tensão superficial de um líquido, maior será a massa que essa gota comportará.

O momento em que a gota se desprende do tubo em termos de física significa que a força peso (P) da gota se igualou a força que sustenta a gota no tubo ( $F_\gamma$ ), em termos de equação ficará [10]:



$$F\gamma = P = m.g \quad (\text{Eq. 2})$$

Igualando as (Eq. 1) e (Eq. 2), pode-se tirar uma equação final onde é denominada Lei de Tate:

$$2\pi r\gamma = m.g \rightarrow \gamma = \frac{m.g}{2\pi r} (\text{Eq. 3})$$

A equação 3 mostra um cálculo de tensão superficial com uma massa ideal ( $m_i$ ) da gota de um líquido, então levando isso em consideração se faz uma pequena modificação na fórmula de Tate: [10]

$$\gamma = \frac{m_i.g}{2\pi r} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Quando acontece o rompimento da gota com o tubo, observa-se que esse rompimento não acontece bem no extremo do tubo e sim abaixo, em A'B', acarretando uma perda de massa da gota, demonstrando assim que na teoria aplica-se a equação 3.1 para uma massa ideal ( $m_i$ ) sendo que na prática tem-se uma massa real ( $m_r$ ) podendo gerar grandes erros experimentais. A figura a seguir, ilustrará essa perda de massa da gota que ocorre durante o procedimento. [10]

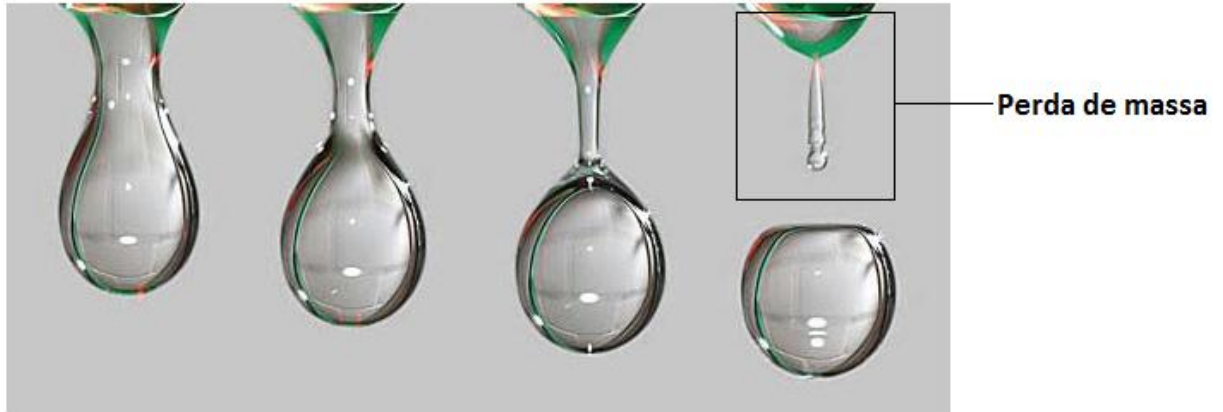


Figura 15: Fotos em alta velocidade de uma gota caindo e perda de massa. Fonte: [10]

Seguindo o raciocínio, devido à perda de massa foi acrescentado um fator de correção ( $f$ ) que tem seus valores tabelados, para poder corrigir essa perda e ter um resultado de tensão superficial mais coerente. Na prática, o peso da gota que será obtido, vai ser sempre menor que o peso da gota ideal e que cerca de 40% da massa da gota fica ligada ao tubo, tem-se uma nova equação relacionando o fator de correção ( $f$ ): [10]

$$mr = m_i \cdot f \rightarrow m_i = \frac{mr}{f} \quad (\text{Eq. 4})$$

Substituindo a (Eq. 4) na (Eq. 3.1), tem-se que:

$$\gamma = \frac{mr \cdot g}{f 2\pi r} \quad (\text{Eq. 5})$$

Além do fator de correção ( $f$ ), é possível minimizar ainda mais o erro experimental, fazendo a medida da massa de um número maior de gotas juntas e dividindo pelo número de gotas usada na medição da massa, dessa forma tem-se uma leve modificação na (Eq. 5), então: [10]

$$\gamma = \frac{\frac{mrt}{n} \cdot g}{f 2\pi r} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Para ajudar na leitura das equações e entendimento, foram descritas as nomenclaturas de cada termo das equações já descritas a seguir:

$\gamma$  = Tensão superficial

mrt = massa real total

g = aceleração da gravidade

f = fator de correção

r = raio do tubo

mr = massa real

mi = massa ideal

Fy = Força de tensão superficial

n = número de gotas

Apesar da dedução para poder chegar na (Eq. 5.1), ela não é utilizada nesse trabalho, entretanto é utilizada para chegar à outra equação que é usada neste trabalho acadêmico. Sendo assim, observa-se que a nova equação demonstrará que a tensão superficial de um líquido é proporcional à massa, e essa é proveniente de métodos matemáticos.

As (Eq. 3), (Eq. 3.1), (Eq. 5) e (Eq. 5.1), qualquer uma dessas equações ajudarão a chegar na nova equação desejada. Foi usada a (Eq. 3).

Considere um líquido A cuja sua tensão superficial é  $\gamma_A$  e um líquido B cuja sua tensão superficial é  $\gamma_B$ , como é um processo em que a aceleração da gravidade e o raio do tubo por onde passarão os líquidos são iguais para ambos, nas equações a seguir, o “r” e o “g” não terão modificações. A única grandeza física que é modificada é a massa dos líquidos A e B, pois cada líquido possui uma densidade e o momento em que cada gota cai será desigual devido à diferença de tensão superficial entre eles. Com base nas afirmações citadas, as duas equações ficariam da seguinte forma.

Para o líquido A:

$$\gamma_A = \frac{m_A \cdot g}{2\pi r}$$

Para o líquido B:

$$\gamma_B = \frac{m_B \cdot g}{2\pi r}$$

Tendo as duas equações de tensão superficial para os líquidos A e B, divide-se uma equação pela outra, independente de qual é o numerador ou denominador. Sendo assim, obtém-se que:

$$\frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{\frac{m_A \cdot g}{2\pi r}}{\frac{m_B \cdot g}{2\pi r}} \rightarrow \frac{\gamma_A}{\gamma_B} = \frac{m_A}{m_B} \quad (\text{Eq. 6})$$

Apesar de simples, a (Eq. 6) depende de um líquido que possua uma tensão superficial já definida, ou seja, precisa de um líquido de referência para obter a tensão superficial do líquido que se deseja descobrir. Sendo assim, fica definido que  $\gamma_A$  é a tensão superficial do líquido de referência que no caso utiliza-se a água destilada que tem uma tensão superficial estimada em 0,0728 N/m à uma temperatura em torno de 20°C [10]. Em relação ao  $\gamma_B$ , é a tensão superficial do líquido que deseja-se descobrir. As massas  $m_A$  e  $m_B$  são medidas em uma balança de precisão utilizando um mesmo número de gotas para ambas.

#### 4.2 Método do Anel (película)

Considera-se que este método de medição de tensão superficial, teoricamente pode ser mais preciso que o método da gota, devido à quantidade de fatores que influenciam na medição serem menores.

Conforme a dedução da fórmula de Tate, é possível entender que a tensão superficial é o quociente de uma força  $F$  resultante sobre um determinado comprimento  $L$ . Sendo assim, obtém-se a seguinte relação:

$$\gamma = \frac{F}{L} \quad (\text{Eq. 6})$$

Para a nomenclatura de tensão superficial pelo método do anel, pode ser utilizado o sigma ( $\sigma$ ) para distinguir os métodos.

Para entender melhor esse método, considera-se como exemplo um arame em forma de “U” com uma corrediça que desliza sobre esse arame conforme a figura 16, observa-se que ao molhar esse arame com a corrediça, se obtém a formação de uma película onde a força de tensão superficial se igualará a força peso  $P$ , deixando a corrediça em repouso. Como tem o peso da corrediça somado com o peso posto nela ( $P_2$ ), tem-se que  $P = P_1 + P_2$ .

Algo extremamente importante, que não está explícito na figura 16, o peso total  $P$  manterá a corrediça em repouso (Força de tensão superficial =  $P$ ) em qualquer posição entre  $\Delta h$  e 0 desde que a temperatura se mantenha constante, pois com o aumento da temperatura, diminui-se a tensão superficial do líquido. Muitas vezes tem-se a ideia de que a película formada tem um aspecto semelhante ao do desempenho elástico de uma lâmina de borracha, onde teria um aumento de força à medida que se estica, todavia obtém-se um aspecto bem diferente disso. Independente de aumentar a área da película do líquido entre  $\Delta h$  e zero, a força de tensão superficial se manterá constante. Isso ocorre pelo fato de que quando estica-se a película formada, ou seja aumentamos a sua área, as moléculas da camada interior da película movem-se para a superfície, criando mais área pelas moléculas que estão no interior, assim, a força se mantém constante. [12]

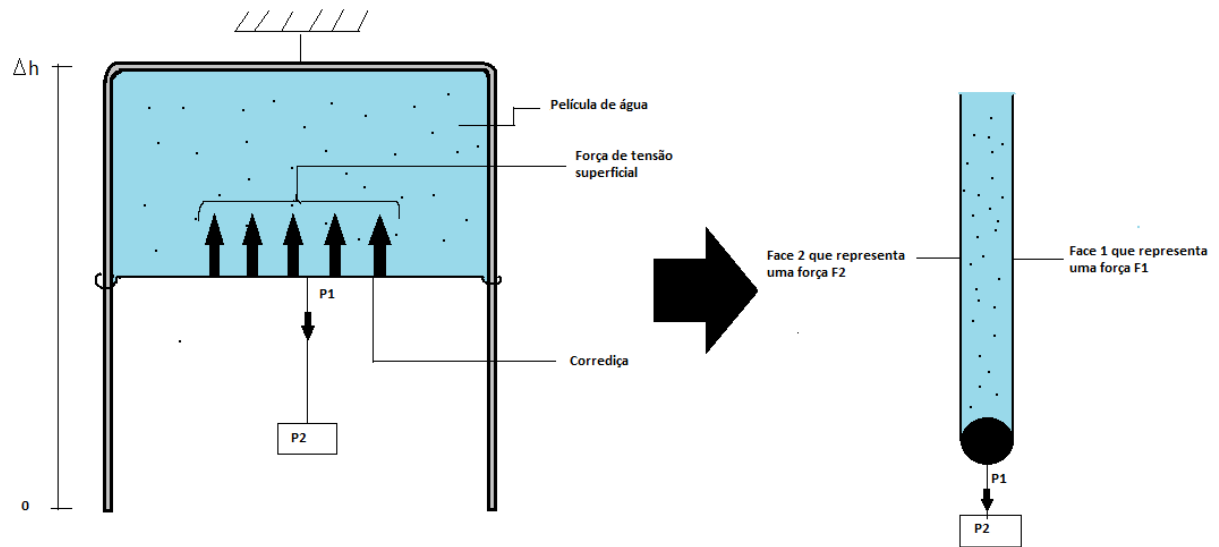


Figura 16: A película tem duas faces sendo que cada face atua uma força de tensão superficial.

Como ilustrado na figura 16, a corredeira tem comprimento  $L$ , mas o comprimento em que atua a força de tensão superficial não é  $L$ , e sim  $2L$  devido às duas faces da película, sendo assim a equação é modificada para:

$$\gamma = \frac{F}{2L} \quad (\text{Eq. 7})$$

Vale ressaltar que cada líquido possui uma tensão superficial e percebe-se que se ao aumentar a temperatura do líquido, tem-se um decréscimo em sua tensão superficial. Isso pode ser explicado pelo fato que quando se doa energia a um sistema, tende-se a deixar suas moléculas mais enérgicas, e estas passam a se movimentarem mais, consequentemente quebrando as ligações ou dando mais liberdade de movimento para as moléculas mais coesas na superfície do líquido. [12]

#### 4.3 Ângulo de contato

Um dos métodos mais utilizados para a observação ou avaliação de tratamento de superfície é o ângulo de contato, o ângulo formado entre o líquido e o sólido. O líquido normalmente usado para a medição do ângulo de contato é a água deionizada (Altamente limpa de impurezas e alta resistividade). Ao colocar a gota do líquido na superfície desejada teremos a informação sobre a energia de superfície, que está relacionada com a molhabilidade da superfície. [8]

A figura a seguir mostra os ângulos de contato  $\gamma_S$ ,  $\gamma_{LV}$  e  $\gamma_{SL}$  onde são as energias livres de superfície do sólido, líquido – vapor e interface sólido – líquido respectivamente.



Figura 17: Ângulo de contato da superfície da gota. Fonte: [14]

Tem-se, por definição, que quanto menor o ângulo de contato maior é a molhabilidade, ou seja, a capacidade do líquido molhar a superfície do sólido é grande. Tem-se algumas escalas importantes em relação à molhabilidade, são elas: [9]

- ➔ Baixa molhabilidade  $\rightarrow (\Theta > 90^\circ) \rightarrow$  Superfície Hidrofóbica
- ➔ Alta molhabilidade  $\rightarrow (\Theta < 90^\circ) \rightarrow$  Superfície Hidrofílica
- ➔ Espalhamento  $\rightarrow (\Theta = 0^\circ) \rightarrow$  Superfície Hidrofílica

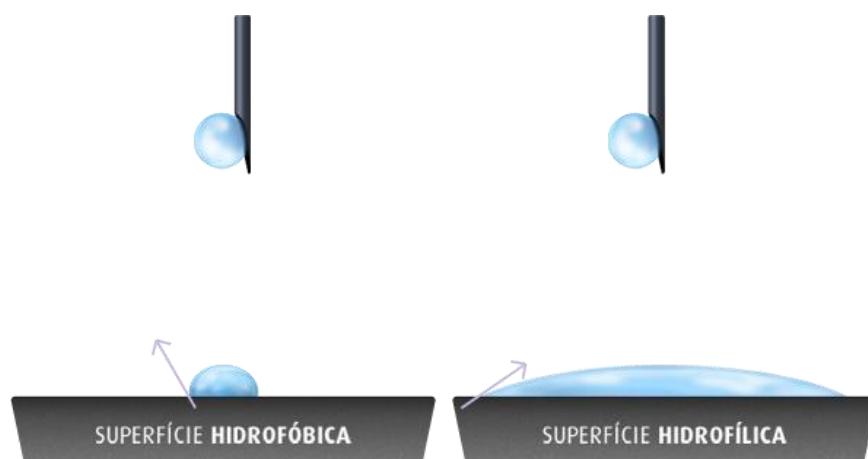


Figura 18: Superfície hidrofóbica versus superfície hidrofílica. Fonte: [8]

Existem equações que relacionam o ângulo de contato da gota de um líquido sobre uma superfície sólida e equações que envolvem o trabalho de adesão ( $W_a$ ). O trabalho de adesão se define como um trabalho necessário para separar uma interface, ou seja, criar duas superfícies. A seguir, são representadas as expressões dadas por Young e Dupré para representar o trabalho de adesão e o ângulo de contato em função das três energias livres de superfície: [14] [15]

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cdot \cos\theta \quad \text{Young (Eq. 8)}$$

$$W_a = \gamma_{lv} + \gamma_{sv} - \gamma_{sl} \quad \text{Dupré (Eq. 9)}$$

$$W_a = \gamma_{lv} \cdot (\cos\theta + 1) \quad \text{Young – Dupré (Eq. 10)}$$

Para a obtenção da energia livre de superfície de um sólido, Wu e Fowkes propuseram fórmulas para a sua medição, a de Wu representa um método harmônico e a de Fowkes representa um método geométrico, mas essas equações eram modificações das equações propostas por Young e Dupré. [14]

As equações propostas por Young e Dupré, são aplicáveis quando a gota está em equilíbrio. [14]



## **5. Metodologia**

Neste trabalho foram usados dois métodos para a medição de tensão superficial em diferentes líquidos. O primeiro método usado no trabalho é a Lei de Tate que como já citado possui variações nas medidas, ou seja, esse método não pode ser tão preciso nos resultados como se espera, mas possibilita alcançar resultados próximos do esperado de tensão superficial. Devido a essa variação nas medidas, foi feita uma série de medida para obtermos um resultado mais preciso. O segundo método de medição é denominado “Anel”. Esse segundo método por sua vez, aparentemente pode ser bem mais preciso que a Lei de Tate devido ao simples fato de que não há muitos fatores que alteram nos resultados das medidas.

### **5.1 Montagens para a Lei de Tate**

A montagem do procedimento experimental para a Lei de Tate foi relativamente fácil, porém na obtenção das medidas deve-se tomar alguns cuidados como, por exemplo, contaminações na pipeta, para que as medições não fiquem ruins. Foram utilizados alguns equipamentos que são descritos e mostrados a seguir:

- 1 Béquer
- 1 Pipeta
- 1 Bureta
- 1 Balança digital com precisão de quatro casas decimais
- Água destilada (Para entrar nas medições)
- Água Potável (Para a lavagem dos equipamentos)
- Glicose
- Glicerina
- Detergente (tensoativo)



Figura 19: Pipeta, pera de sucção, balança e béquer para as medições das massas das gotas.

Iniciando o procedimento de medidas, usa-se a água destilada como líquido de referência, como já citada, a mesma possui uma tensão superficial em torno de 0,0728 N/m, a uma temperatura em torno de 20°C.

A variação de gotas usado no experimento foi de 5 em 5 gotas, considerando um total de 60 gotas, foram feitas 12 medições de massa para o líquido de referência (água destilada) e para o líquido que deseja-se descobrir sua tensão superficial, como tem o valor de tensão superficial para a água destilada, pode-se achar a tensão superficial do líquido pela (Eq. 6). Tem-se como exemplo:

Foram coletadas a massa de 15 gotas de água destilada e a massa de 15 gotas de óleo. A massa das 15 gotas de água destilada foi de aproximadamente 0,800 g e a massa das 15 gotas de óleo foi aproximadamente 0,400 g. Calcule a tensão superficial do óleo.

Usando a (Eq. 6), e sabendo a tensão superficial da água destilada, tem-se que:

$$\frac{0,0728}{\gamma_B} = \frac{0,800}{0,400} \rightarrow \gamma_B = 0,036 \text{ N/m}$$

Vale lembrar que  $\gamma_A$  e  $m_A$  são dados do líquido referência.

Com relação ao experimento em si, aparentemente seria fácil obter os resultados, mas não foi tão simples obter resultados bem precisos devido a fatores que dificultam as medições.

A velocidade do decaimento de cada gota pode ser entendida melhor com a equação da vazão.

$$Q = V.A \quad (\text{Eq. 11})$$

$V$  = Velocidade de escoamento / decaimento da gota

$A$  = Área da seção transversal pela qual o líquido passa

Pode-se observar que se tiver uma velocidade de decaimento da gota constante para as 12 medidas, a probabilidade de haver variações prejudiciais para o experimento serão baixas, uma vez que a tendência de um gráfico Massa versus N° Gota deve ser linear. Toma-se como exemplo a seguinte situação:

Foram coletadas as massas de 5,10,15 e 20 gotas de água destilada, respectivamente 0,250g, 0,500g, 0,750g e 1,200g.

Nota-se que a diferença de 15 para 10 e 10 para 5 gotas, tem-se um caráter linear das massas, já de 20 para 15, fugiu dessa linearidade. Esse considerado “erro de medida” pode ter sido acarretado pelo fato do líquido que está sendo usado ter um difícil manuseio de escoamento na pipeta, vibrações que se faz na pipeta e principalmente pela variação da velocidade de decaimento da gota que se exerce que o ideal é ser constante e mais baixa possível, mas sendo suficiente para o líquido pingar, como foi citado acima. Erro de contagem das gotas também pode ser levado em consideração. Ao variar o aumento da velocidade do decaimento da gota da pipeta, irá variar a vazão, e por consequência modificará a massa da gota que cairá, isso analisando em termos de equações matemáticas.

## **5.2 Montagens para o método do anel (Película)**

Este método comparado ao que envolve a lei de Tate, aparentemente pode ser mais simples, mas tem-se que tomar cuidado com relação à calibração do dinamômetro e evitar contaminações no anel para que não tenha modificações nos resultados de tensão superficial. Tem-se a listagem dos equipamentos usados para a experiência:

- 1 Dinamômetro
- 1 Anel
- 1 Régua
- 1 Haste
- 1 Torno de bancada (Para prender a régua)
- 1 Recipiente para colocar o líquido

Segue a imagem a seguir com o arranjo experimental.



Figura 20: Arranjo experimental para o método do anel.

Para visualizar melhor a montagem do método da película, foi feito um esboço do experimento indicando cada material. É importante ter a noção do quanto a régua pode ser importante para o experimento.

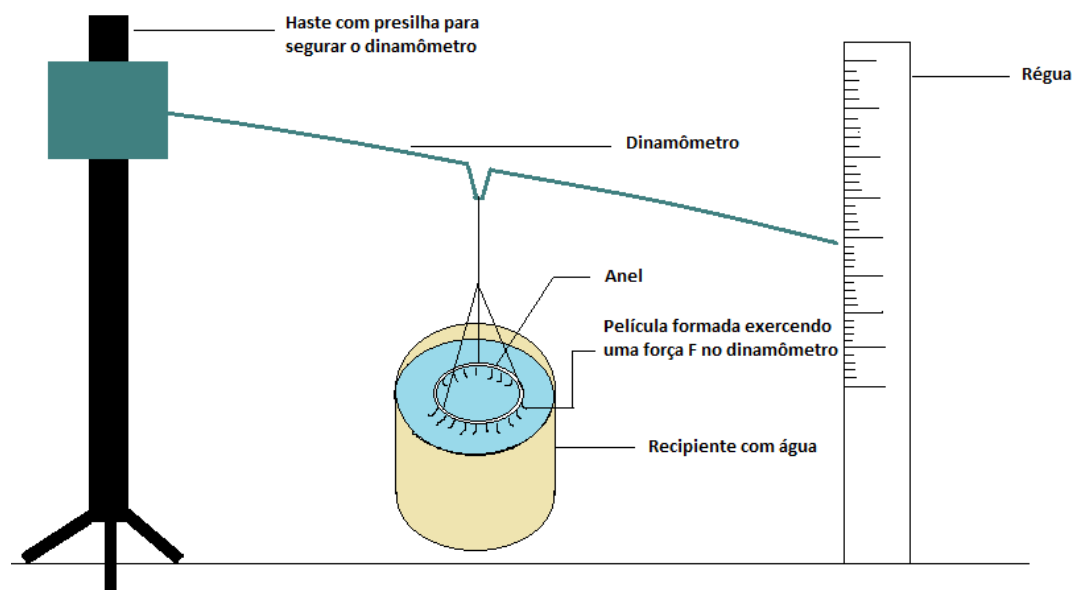


Figura 21: Desenho do esquema do método da película.

Como já dito, a régua tem um dos papéis mais importantes no experimento, junto ao dinamômetro. Com ela determina-se o deslocamento ao se aplicar uma determinada força sobre o dinamômetro. Para exemplificar, será mostrada a seguinte situação para o entendimento do esquema:

Foi feito a calibração do dinamômetro para o método do anel como mostra a Figura 21. Observou-se que ao colocar cliques com massa de 1g, o dinamômetro variou na régua aproximadamente 0,7cm.

Para esta situação, tem-se uma calibração definitiva para o dinamômetro que é representada por:

**1 grama força  $\rightarrow$  980 dinas ou 0,0098 N  $\rightarrow$  Que equivale a 0,7 cm de variação**

A força usada na equação 7 pode ser entendida como a força necessária para romper a película da superfície do líquido com um determinado comprimento L e essa força é medida através da relação acima por exemplo.

## 6. Resultados e Discussões

Foram apresentados resultados individuais para cada método com o objetivo de aumentar a possibilidade de entendimento do trabalho abordado. No final é feita a comparação final entre os dois métodos para saber a diferença de cada um, usando testes estatísticos. Todas as medições foram feitas em uma temperatura de aproximadamente  $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ .

Foi desenvolvida uma tabela para misturar os líquidos entre si e todas as soluções produzidas, possuíam um volume fixo de 20 ml de água destilada na experiência. Segue a tabela:

Tabela 1: Composição das soluções

	<b>Glicose = X1</b>	<b>Glicerina = X2</b>	<b>Detergente = X3</b>
<b>(-)</b>	<b>0 ml</b>	<b>0 ml</b>	<b>0 ml</b>
<b>(+)</b>	<b>20 ml</b>	<b>20 ml</b>	<b>20 ml</b>
	X1	X2	X3
<b>Solução 1</b>	(-)	(-)	(-)
<b>Solução 2</b>	(+)	(-)	(-)
<b>Solução 3</b>	(-)	(+)	(-)
<b>Solução 4</b>	(+)	(+)	(-)
<b>Solução 5</b>	(-)	(-)	(+)
<b>Solução 6</b>	(+)	(-)	(+)
<b>Solução 7</b>	(-)	(+)	(+)
<b>Solução 8</b>	(+)	(+)	(+)

Cada solução tem uma composição diferente sendo que o sinal de menos (-) representa a ausência do líquido que no caso está representado por 0 ml, e por sinal de mais (+) que representa a adição do determinado líquido a solução que está configurado para uma adição de 20 ml.

## 6.1 Resultados para a Lei de Tate

Primeiramente, foram feitas medições de tensão superficial para os líquidos individualmente, no caso, glicose, glicerina e o surfactante (detergente). As medições foram feitas num total de 60 gotas para cada líquido sendo que a cada cinco gotas, era medida a massa e depois calculada a tensão superficial dos líquidos com o auxílio de um fluido de referência, a água destilada, dando um total de 12 medições por líquido. Isso tudo aplicando a Lei de Tate. As especificações dos materiais usados são um detergente neutro da marca Minuano, glicose da marca Yoki e uma glicerina bi-destilada da marca LBS.

Os gráficos de Tensão Superficial versus número de gotas a seguir, mostra as variações das medidas para cada líquido.

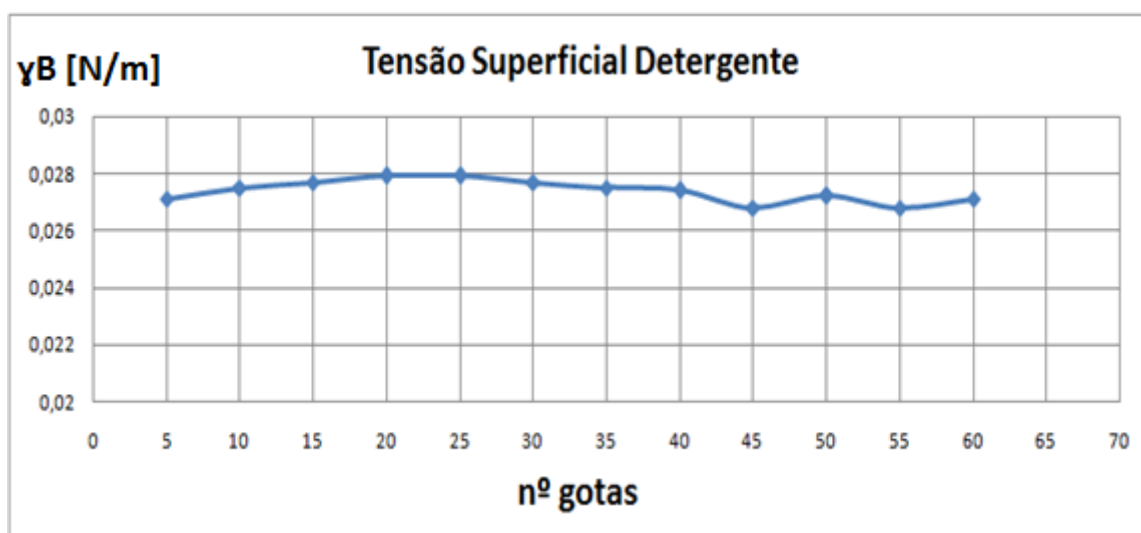


Figura 22: Tensão superficial do surfactante.





Figura 23: Tensão superficial da glicerina.

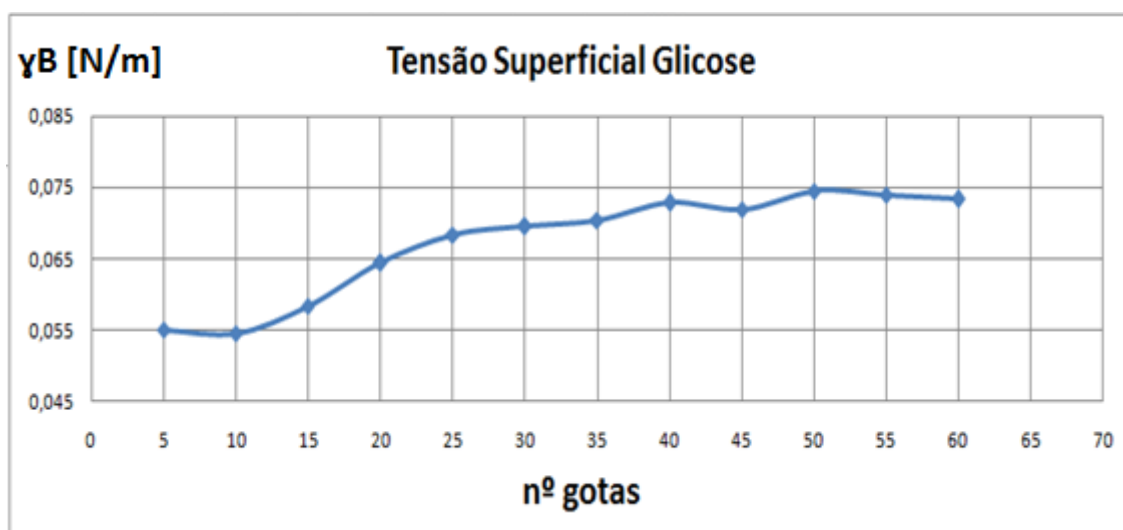


Figura 24: Tensão superficial glicose.

Com as apresentações das figuras 22, 23 e 24, é possível notar uma grande variação de tensão superficial em função do número de gotas do líquido e a estabilidade se apresenta em torno das 50 gotas em diante; em outras palavras, a confiabilidade da medida da tensão superficial é melhor a partir das 50 gotas. Levando isso em consideração, para se ter uma medição confiável, é tirada uma média aritmética das últimas três medições de todos os líquidos e soluções que aparecerão durante o trabalho; para detergente, glicerina e glicose, tem-se que:

Tabela 2: Média da tensão superficial dos diferentes líquidos.

$\gamma$ [N/m]	$\gamma'$ Detergente	$\gamma'$ Glicerina	$\gamma'$ Glicose
nº gotas			
50	0,0272	0,0537	0,0745
55	0,0268	0,0539	0,0739
60	0,0271	0,0542	0,0733
$\gamma'$ média	0,0270	0,0539	0,0739

Na literatura, segundo o artigo do Grupo de Ensino de Física da Universidade Federal de Santa Maria [13], a tensão superficial da glicerina, está em torno de 0, 059 N/m. Considerando esse dado teórico com o dado experimental obtido neste trabalho, tem-se um erro experimental:

$$E\% = \frac{|0,059 - 0,054|}{0,059} * 100 = 8,5\%$$

A observação importante com relação aos dados teóricos, a informação do valor de tensão superficial da glicerina na literatura, varia conforme se escolhe diferentes fontes literárias, ou seja, o valor de tensão superficial não é único em todos os livros de física, mas uns são próximos dos outros. Não foi possível achar valores teóricos na literatura sobre a tensão superficial do detergente e da glicose.

Pode-se analisar o grau de dificuldade para estabilizar as massas do quociente entre  $m_A$  e  $m_B$  que está representado na equação 6. Lembrando que  $m_A$  é a massa das gotas do líquido de referência onde utilizou-se a água destilada e sua tensão superficial equivale a 0,0728 N/m em torno de 20°C e  $m_B$  é a massa das gota do líquido cujo se quer achar sua tensão superficial. Os gráficos a seguir mostrarão o grau de dificuldade de estabilização do quociente.

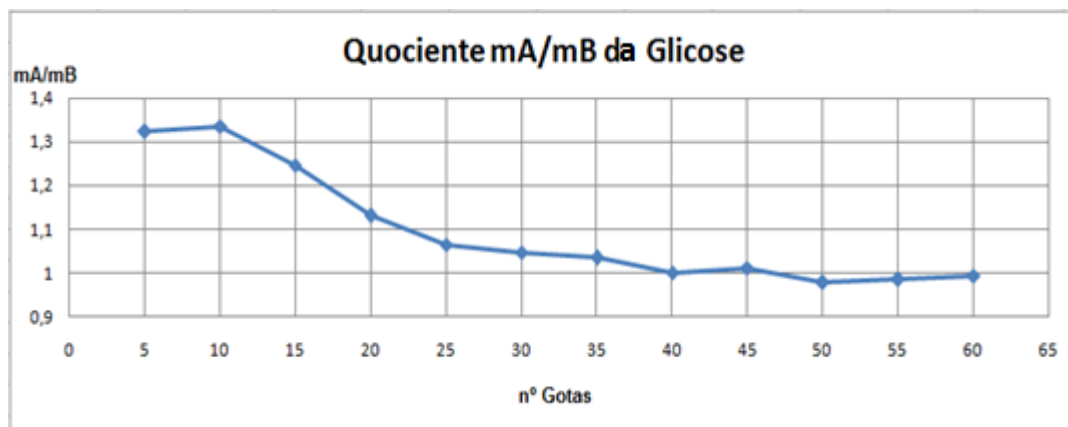


Figura 25: Quociente com a glicose.

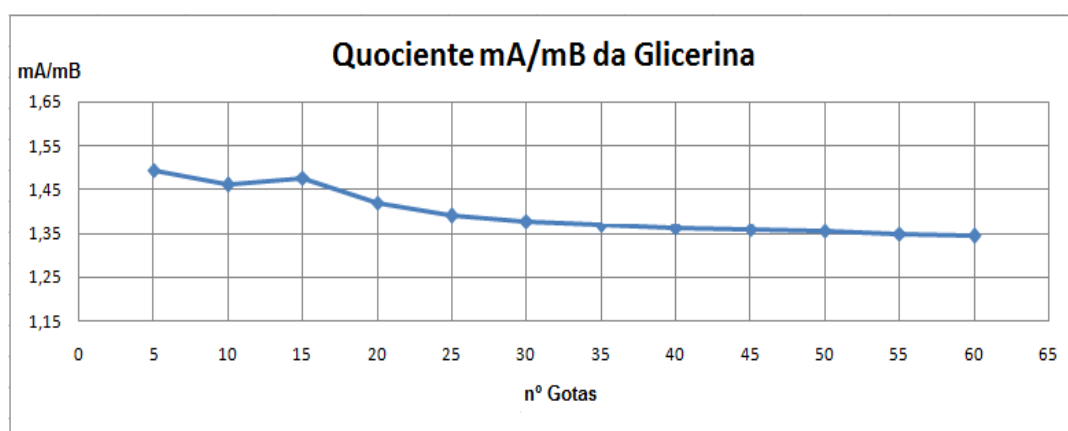


Figura 26: Quociente com a glicerina.

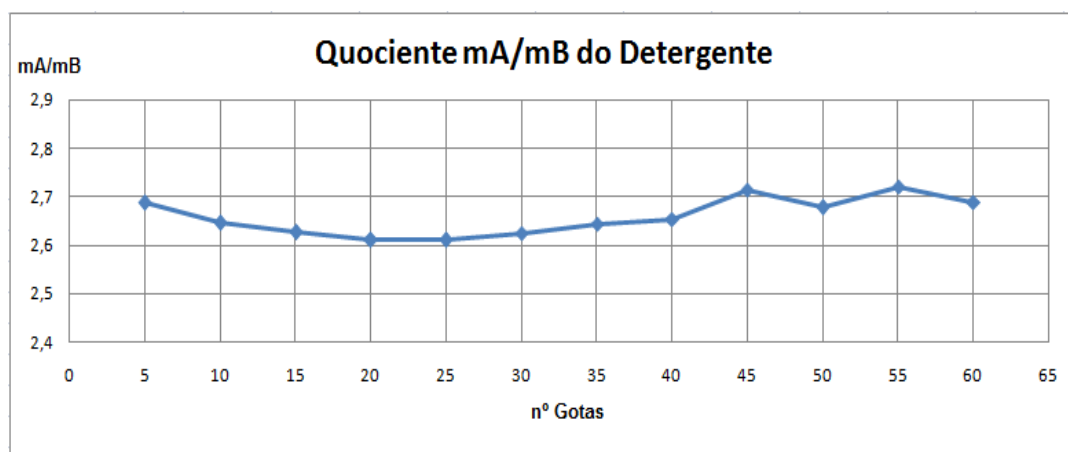


Figura 27: Quociente com o detergente.

Pode-se observar que para a glicerina e a glicose, apenas com um determinado número de gotas consegue-se um quociente estabilizado. Para a glicose precisou de um número maior de gotas para conseguir essa estabilização quando comparado a glicerina. Em outras palavras, pode-se dizer que o manuseio das gotas de glicerina, com relação às de glicose, é mais fácil.

Já no caso do detergente, não se teve nenhuma dificuldade para o manuseio de suas gotas apesar do seu gráfico não ter uma boa interpretação.

Como foram feitos os gráficos de tensão superficial versus número de gotas para os líquidos individualmente, para as soluções obtidas também foram feitos.

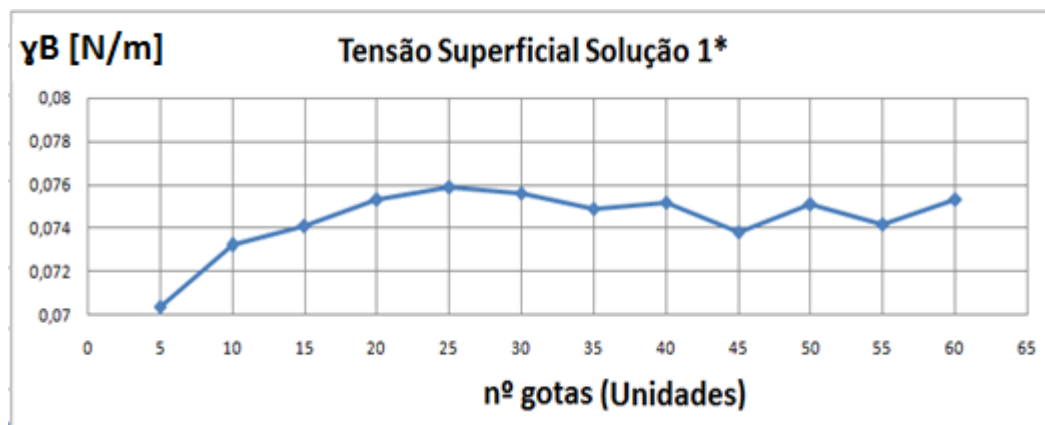


Figura 28: Tensão Superficial da Solução 1.



Figura 29: Tensão superficial da solução 2.

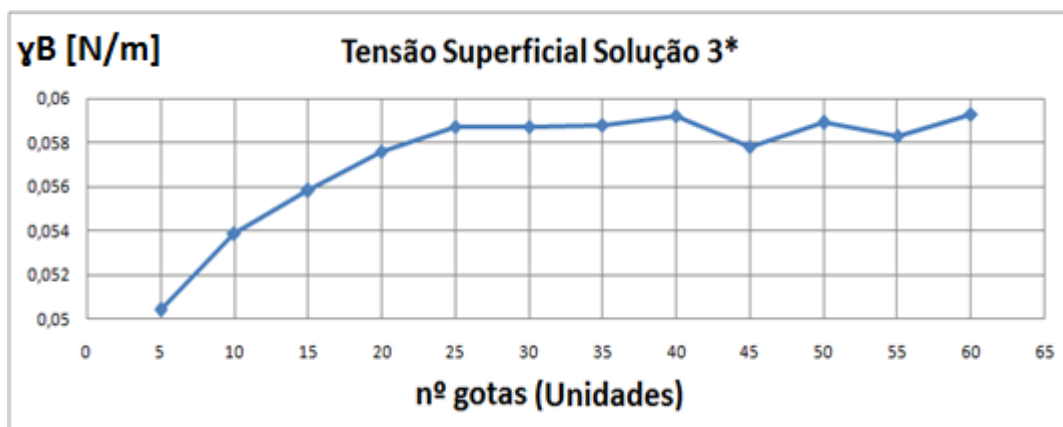


Figura 30: Tensão superficial da solução 3.

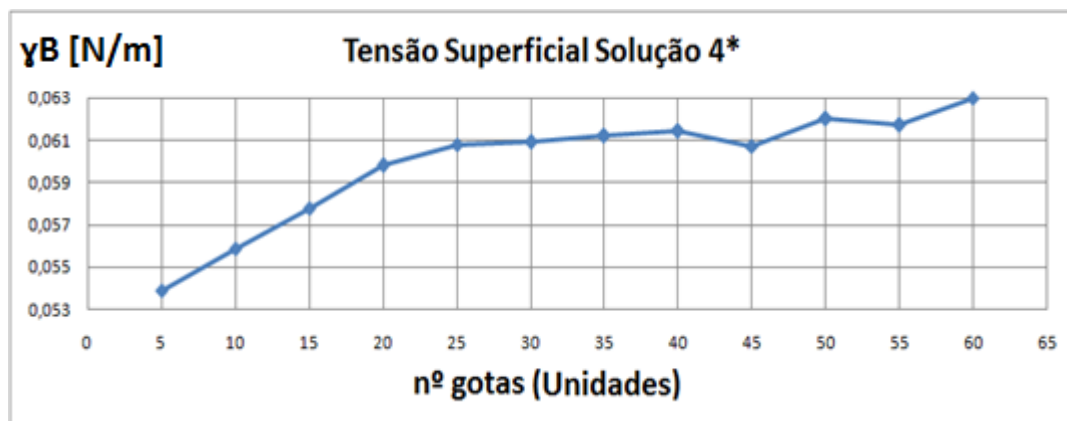


Figura 31: Tensão superficial da solução 4.

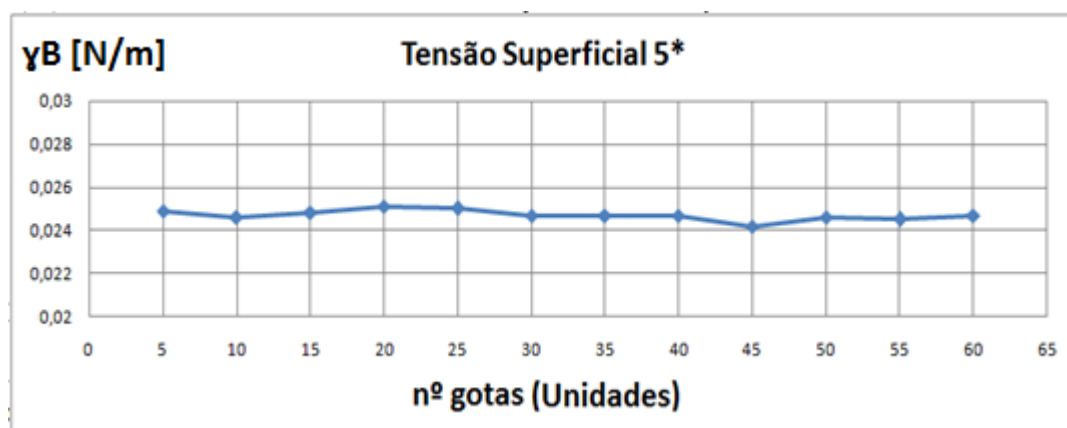


Figura 32: Tensão superficial da solução 5.

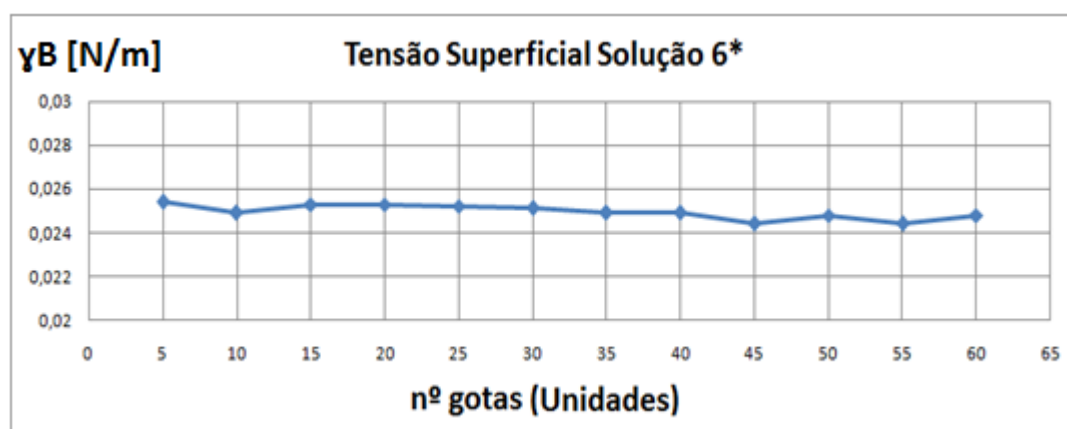


Figura 33: Tensão superficial da solução 6.

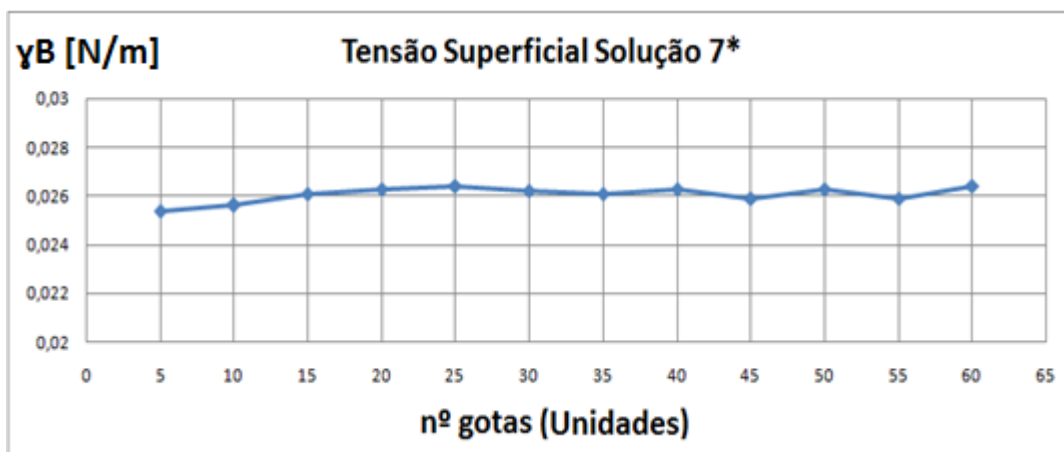


Figura 34: Tensão superficial da solução 7.

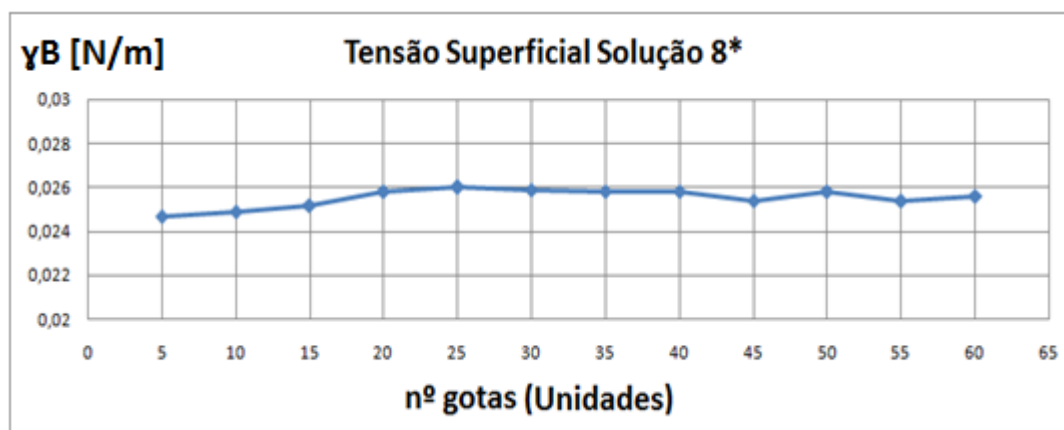


Figura 35: Tensão superficial da solução 8.

Assim como para os líquidos individualmente, para as soluções tem-se uma tabela utilizando as três últimas medições do número de gotas que são 50, 55 e 60, onde a confiabilidade da tensão superficial é amplamente maior.

Tabela 3: Média da tensão superficial das soluções

$\gamma'$ [N/m]	$\gamma'$ Solução 1	$\gamma'$ Solução 2	$\gamma'$ Solução 3	$\gamma'$ Solução 4	$\gamma'$ Solução 5	$\gamma'$ Solução 6	$\gamma'$ Solução 7	$\gamma'$ Solução 8
nº gotas								
50	0,0751	0,0789	0,0589	0,062	0,0246	0,0248	0,0263	0,0258
55	0,0742	0,0779	0,0583	0,0617	0,0245	0,0244	0,0259	0,0254
60	0,0753	0,0788	0,0593	0,063	0,0247	0,0248	0,0264	0,0256
$\gamma'$ Média	0,0749	0,0785	0,0588	0,0622	0,0246	0,0247	0,0262	0,0256
D.Padrão	0,00058595	0,000550757	0,00050332	0,00068069	1E-04	0,00023094	0,000264575	0,0002

Observando a tabela 3, entende-se que há uma variação considerável na tensão superficial à medida que se acrescenta diferentes líquidos em uma mistura, sendo que cada um tem sua influência para diminuir ou aumentar a tensão superficial de uma solução dependendo do volume (ml) que se usa. Observando a tabela 1, nota-se que as tensões superficiais dos líquidos cinco, seis, sete e oito, todos possuem surfactantes adicionado e que possuem um valor semelhante de tensão superficial. Esse fato ocorre devido à grande influência que um surfactante promove sobre a superfície de um líquido, quebrando drasticamente a membrana de moléculas coesas que a superfície possui. Desde modo, para ter uma pequena variação de tensão superficial de uma solução, deve-se acrescentar pequenos volumes de surfactantes, caso contrário, a solução irá saturar sua superfície onde ocorrerá uma grande queda de tensão superficial. Um detalhe importante está por conta de que um surfactante como já citado, possui uma parte apolar e polar, sendo que a parte apolar é formada por cadeias carbônicas e quanto maior for essa cadeia, maior é o efeito de redução de tensão superficial de um líquido.

Observando as soluções, é possível notar que, algumas apresentam uma estabilização de tensão superficial mais rápida que outras, como por exemplo, as soluções um e quatro. Comparando-as, a solução quatro apresentou uma estabilização mais rápida que a solução um, isso está relacionado com o tipo de material que está sendo usado, uns tem estabilização mais rápida que outros, mas foi pego as três últimas medições para manter um perfil padrão de confiabilidade, uma vez que quanto maior o número de amostra, maior é a confiabilidade.



## 6.2 Resultados para o método do anel

Assim como para a o método da gota (Lei de Tate), este segundo método tem a tabela 1 como base. A tabela a seguir mostra as seguintes medições, tendo como resultado as médias de tensão superficial de cada solução.

Tabela 4: Tensão superficial média das soluções.

$\gamma$ [dinas/cm]	$\gamma_1$	$\gamma_2$	$\gamma_3$	$\gamma_{\text{média}}$
<b>1</b>	65,9067	71,3988	74,1449	<b>70,4835</b>
<b>2</b>	60,4144	60,4144	54,9222	<b>58,5837</b>
<b>3</b>	46,6839	46,6839	35,6994	<b>43,0224</b>
<b>4</b>	49,4299	43,9378	52,1761	<b>48,5146</b>
<b>5</b>	27,4611	32,9366	27,4611	<b>29,2863</b>
<b>6</b>	32,9533	27,4611	30,2072	<b>30,2072</b>
<b>7</b>	27,4611	35,6994	27,4611	<b>30,2072</b>
<b>8</b>	24,715	27,4611	30,2072	<b>27,4611</b>

Foram feitos três vezes a medição da tensão superficial para cada solução e a média de cada uma para uma melhor confiabilidade dos resultados. Por esse método também é possível observar a variação de tensão superficial de cada solução à medida que se adicionam líquidos diferentes para compor uma nova solução. Na tabela, há resultados iguais como por exemplo, na solução três, isso ocorre devido a escala da régua estar milimetrada, sendo que quanto menor a escala, mais precisas são as medições, mas a escala estar milimetrada não afeta negativamente as medições.

O arranjo experimental para as medições da tabela 4 possui a calibração do dinamômetro e o raio do anel que foram usados. Ambos são:

**1,1gf → 1078 dinas → Que equivale 0,63cm de variação na régua.**

**Raio do anel = 24,7925 mm**

Especificações do anel como densidade, tipo de material usado e tamanho do anel, não são necessárias. Os parâmetros que interessam são apenas os diâmetros interno e externo do anel (desejável que a espessura entre esses dois diâmetros seja relativamente pequena), no caso da espessura entre os dois diâmetros for relativamente grande, deve-se considerar o diâmetro interno do anel.

Para mais informações, foram medidas as tensões superficiais médias dos líquidos separadamente por este método, obtendo-se:

Glicerina bi-destilada (LBS): 49, 4299 dinas/cm

Detergente neutro (Minuano): 29,6580 dinas/cm

Glicose (Yoki): 74,1449 dinas /cm

Como na literatura foi possível achar apenas a tensão superficial da glicerina, é usado novamente o valor teórico do Grupo de Ensino de Física da Universidade Federal de Santa Maria [13], podendo-se obter o erro experimental para a glicerina.

$$E\% = \frac{|0,059 - 0,049|}{0,059} * 100 = 17\%$$

### 6.3 Resultados unificados

Para um estudo comparativo entre as técnicas de medição de tensão superficial com as técnicas da gota (Lei de Tate) e do anel (película), é usado um método estatístico chamado teste T pareado para poder ter a confiabilidade se as duas técnicas exercem o mesmo resultado estatisticamente apesar das diferenças entre valores. A tabela a seguir fornece as informações necessárias para iniciar o teste.

Tabela 5: Diferença, desvio padrão e média da diferença entre os métodos

	<b>n (solução)</b>	<b>Gota</b>	<b>Anel</b>	<b>diferença (D)</b>	
<b><math>\gamma</math>[N/m]</b>	<b>1</b>	0,0749	0,0705	0,0044	
	<b>2</b>	0,0785	0,058	0,0205	
	<b>3</b>	0,0588	0,043	0,0158	
	<b>4</b>	0,0622	0,0485	0,0137	
	<b>5</b>	0,0246	0,0293	-0,0047	
	<b>6</b>	0,0247	0,0302	-0,0055	
	<b>7</b>	0,0262	0,0302	-0,004	
	<b>8</b>	0,0256	0,0275	-0,0019	
	<b>média da diferença (<math>\bar{D}</math>)</b>			<b>Desvio padrão (SD)</b>	
	<b>0,0047875</b>			<b>0,010457593</b>	

Para iniciar o teste, deve-se ter o nível de significância ( $\alpha$ ), o grau de liberdade que se dá por “n-1” e as hipóteses do teste, sendo que  $H_0$  representará a afirmação de que não há diferença entre os experimentos, e  $H_A$  irá contradizer  $H_0$ , onde haverá diferença entre os métodos experimentais. Entende-se que:

$$\alpha = 5\%$$

$$gl = 7$$

$$H_0(\text{Hipótese Nula}) = \mu_g - \mu_p = 0 \rightarrow \text{São Iguais}$$

$$H_A(\text{Hipótese alternativa}) = \mu_g - \mu_p \neq 0 \rightarrow \text{São diferentes}$$

O Microsoft Office Excel possui uma ferramenta estatística que dá à região crítica bilateral e unilateral do teste de hipóteses. É usado um teste bilateral neste trabalho devido ao fato de comparação ser se os experimentos são iguais ou diferentes estatisticamente. Existe uma tabela denominada “Distribuição t de Student”, para buscar manualmente o valor da região crítica ( $t_c$  e  $-t_c$ ). A figura a seguir mostrará um gráfico onde tem-se a região crítica e região de aceitação da hipótese nula.

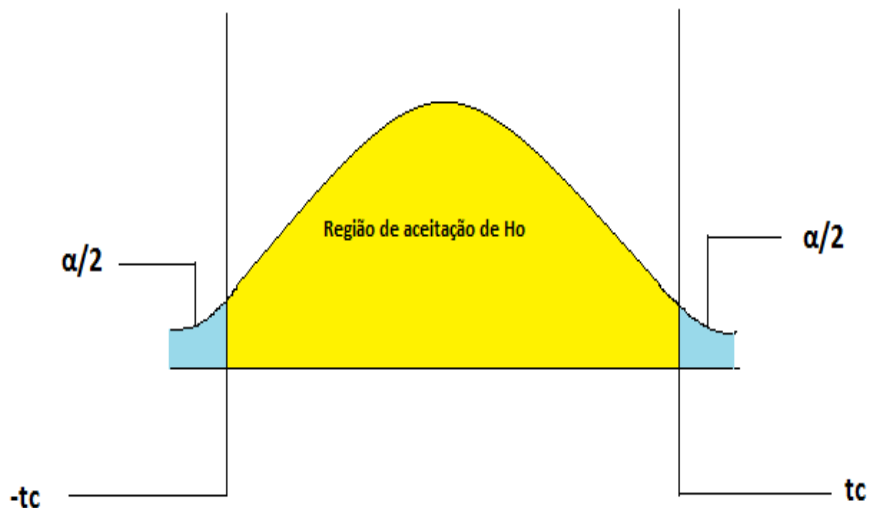


Figura 36: Região e crítica e região de aceitação.

Observa-se que como o teste adota um  $\alpha=5\%$  e o teste é bilateral, então tem-se que  $-t_c$  e  $t_c$ , cada um ficará com um  $\alpha=2,5\%$ . Como o grau de liberdade (GL) é sete, a região crítica para um teste bilateral equivale a 2,3646. Tendo esse valor, a imagem acima é modificada para:



Figura 37: Região crítica e região de aceitação com valores definidos.

Depois de determinado a região crítica, o próximo passo é fazer o cálculo do teste  $t$  para saber se foi aceita a hipótese nula ou alternativa. Para isso, usa-se a seguinte equação:

$$t = \frac{\bar{D}}{\frac{s_D}{\sqrt{n}}} \text{ (Eq. 9)}$$

Sabendo que:

$$s_D = 0,010457593$$

$$\bar{D} = 0,0047875$$

$$n = 8$$

Tem-se que:

$$t = 1,2949$$

Como o valor de  $t$  não está dentro das regiões críticas ( $t_c$  e  $-t_c$ ), aceita-se a hipótese nula, isso para um valor de significância ( $\alpha$ ) de 5%. Em outras palavras, pode-se dizer que os dois métodos experimentais usados para a medição de tensão superficial, estatisticamente possuem a mesma média, logo, os dois são confiáveis e as medições estão coerentes, apesar de existir fatores que prejudicam as medições.

## 7. Considerações Finais

Com base nos resultados obtidos e nos métodos apresentados, pode-se fazer diversas considerações. Com as soluções preparadas para estudo, observou-se que com diferentes composições a tensão superficial irá sofrer variações, independente do acréscimo de um surfactante ou não nessa solução.

As soluções que possuíam surfactante (detergente) sobre elas tiveram um grande decréscimo em sua tensão superficial e, conseqüentemente, seu manuseio se tornou mais fácil, aplicando-se o método da gota. Esse alto decréscimo na tensão superficial foi devido à característica que o surfactante tem de habitar a superfície de um líquido e ficar entre as moléculas coesas quebrando a película formada na superfície.

O estudo de superfícies, o qual envolve a energia livre de cada, tem importância no estudo em diversos processos. Pode-se citar alguns como os que envolvem microestruturas, atrito e desgaste, oxidação, corrosão, dispositivos eletrônicos, processos de flotação e etc.

No decorrer do trabalho, as conclusões sobre os dois métodos usados podem ser tiradas, e através dessas conclusões, pode-se afirmar que neste trabalho o método da gota (Lei de Tate) foi o mais confiável. Na literatura pode-se achar um valor tabelado da tensão superficial da glicerina, entretanto o erro experimental do método do anel foi duas vezes maior do que o método da gota. Os desvios padrão das duas medições com relação às soluções também comprovam essa afirmação.

Uma vez que o método da gota foi o mais confiável a ser usado nesse trabalho, essa confiança só aparece se for usado um número de gotas igual ou maior que 50, para poder ter certa estabilidade de tensão superficial.

O método do anel apresentou uma confiabilidade menor que a da gota, mas talvez contaminações no anel usado possam ter afetado as medições, desta maneira recomenda-se que o mesmo esteja sempre bem limpo para efetuar medições em diversas soluções ou líquidos. Apesar da diferença de resultados de tensão superficial para os dois métodos, o teste t pareado mostrou estatisticamente que as medições são iguais, a um nível de significância de 5%, então pode-se dizer que os dois métodos são confiáveis e podem auxiliar na técnica de ângulo de contato, que também permite achar a energia livre de superfície de um sólido.

Comparando os valores agregados dos dois métodos, o do anel tem um valor bem mais baixo com relação do da gota e pode ser montado facilmente em qualquer local, uma vez que

tenha os materiais necessários que no caso não são difíceis de obter. Já para o método da gota, essa facilidade é muito limitada, pois, necessita de equipamentos sofisticados como, por exemplo, uma balança de precisão.

## **8. Trabalhos futuros**

Algumas ideias sobre trabalhos futuros podem ser com relação ao método do ângulo de contato que exigiria um estudo aprofundado sobre o assunto. Comparar técnicas de medição de energia livre de superfície seria interessante para a continuação do estudo, apesar da necessidade de equipamentos sofisticados.

No que diz respeito à tensão superficial, fazer um delineamento de experimento com as soluções envolvidas nesse trabalho também seria uma ótima ideia de estudo.

Com relação às diversas técnicas que existem para a medição de tensão superficial de um líquido, pode-se estudá-las e compará-las entre si além das técnicas usadas nesse trabalho.

O método do anel se mostrou menos confiável nesse trabalho, mas desenvolver um projeto para que este método fique mais preciso nas medições, também seria uma ótima ideia de estudo.



## 9. Referências

- [1] UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ (Ceará). Seara da Ciência. **A Tensão Superficial**. 2011. Disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/tintim/fisica/tensaosuperficial/tintim2-1.htm>>. Acesso em: 10 fev. 2015.
- [2] FOGAÇA, Jennifer. **Tensão superficial da água**. 2012. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/quimica/tensao-superficial-agua.htm>>. Acesso em: 15 fev. 2015.
- [3] SANTOS, Luiz Ricardo dos. **Sistema Anfifílico**. 2009. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/quimica/sistema-anfifilico/>>. Acesso em: 17 fev. 2015.
- [4] TECNOLOGIA, Equipe de Redação Ciências e. **Tensoativos – Surfactantes | Alterando a tensão superficial**. 2011. Disponível em: <<https://cienciasetecnologia.com/tensoativos/>>. Acesso em: 25 fev. 2015.
- [5] ALHANATI, Lucien Silvano. **Tensoativos FQM0102**. 2013. Disponível em: <[http://alfaconnection.net/pag\\_avsf/fqm0102.htm](http://alfaconnection.net/pag_avsf/fqm0102.htm)>. Acesso em: 02 mar. 2015.
- [6] Fleming, R. R. et AL., **Tratamento a Plasma em Filmes de Poliacrilonitrila Obtidos pelo Processos de Extrusão**, 10°. CBPol, 2009.
- [7] WANKE, Cesar H. et al. **Recuperação hidrofóbica de polipropileno tratado por VUV ou plasma**. Polímeros, Porto Alegre, v. 22, n. 2, p.158-163, 2012. FapUNIFESP (SciELO). DOI: 10.1590/s0104-14282012005000027.
- [8] NEODENT. **Acqua: superfície inovadora com ativação físico-química**. 2011. Disponível em: <<http://www.neodent.com.br/acqua/>>. Acesso em: 15 fev. 2015.
- [9] SILVA, Heurison da. **Técnica De Ângulo De Contato**. 2012. Coordenada pela Universidade Federal do Piauí. Disponível em: <<http://www.ufpi.br/heurison/index/pagina/id/5443>>. Acesso em: 20 fev. 2015.
- [10] PILLING, Sergio. **Prática 5 - Tensão Superficial de Líquidos**. Univap. São José dos Campos, p. 1-8. 2011. Disponível em: <[http://www1.univap.br/spilling/FQE1\\_EXP5\\_TensaoSuperficialGota.pdf](http://www1.univap.br/spilling/FQE1_EXP5_TensaoSuperficialGota.pdf)>. Acesso em: 25 fev. 2015.

- [11] GUGLIOTTI, Marcos. **A química do corpo humano: Tensão superficial nos pulmões.** Química Nova na Escola. São Paulo, p. 3-5. nov. 2002. Disponível em: <[http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc16/v16\\_A02.pdf](http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc16/v16_A02.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2015.
- [12] SÃO PAULO. FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO. **. Exercícios experimentais de física: Tensão superficial.** São Paulo: Fatec-sp, 1983. 07 p.
- [13] GRUPO DE ENSINO DE FÍSICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (Rio Grande do Sul). **Tensão superficial.** 2010. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/gef/Fluidos/fluidos20.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2015.
- [14] UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO (Sorocaba). **Ângulo de contato e energia de superfície.** 2009. Disponível em: <<http://www2.sorocaba.unesp.br/gpm/angulo%20cont%20energia%20superf.htm>>. Acesso em: 20 mar. 2015.
- [15] OGEDA, Thais Lucy. **Ângulos de contato.** 2008. Disponível em: <[http://www2.iq.usp.br/posgraduacao/images/documentos\\_pae/1sem2010/fisico\\_quimica/thais.pdf](http://www2.iq.usp.br/posgraduacao/images/documentos_pae/1sem2010/fisico_quimica/thais.pdf)>. Acesso em: 05 abr. 2015.
- [16] MARIA, Ana. **Lagartos.** 2010. Disponível em: <<http://www.ninha.bio.br/biologia/lagartos.html>>. Acesso em: 04 mar. 2015.
- [17] MOREIRA, Hiram Zaleski. **A Física do Cotidiano - Como um inseto consegue andar sobre a água?** 2011. Disponível em: <<http://curtindoaciencia.blogspot.com.br/2011/09/fisica-do-cotidiano-como-um-inseto.html>>. Acesso em: 05 mar. 2015.
- [18] **Referência:** LOW COST SCIENCE (Estados Unidos da América). **Canpaper clips float?** 2010. Disponível em: <<http://lowcostscience.org/activities/physics/can-paper-clips-float/>>. Acesso em: 06 mar. 2015.
- [19] NEW WORLD ENCYCLOPEDIA (Coreia do Sul). **Surface tension.** 2008. Disponível em: <[http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Surface\\_tension](http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Surface_tension)>. Acesso em: 05 mar. 2015.
- [20] SANTOS, Vanessa dos. **Hematose.** 2014. Disponível em: <<http://www.biologianet.com/anatomia-fisiologia-animal/hematose.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2015.

[21] PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL (Rio Grande do Sul). **Distribuição T de Student**.2010. Disponível em: <[www.pucrs.br/famat/rossana/adm2/tabela\\_t.doc](http://www.pucrs.br/famat/rossana/adm2/tabela_t.doc)>. Acesso em: 10 maio 2015.

## 10. Anexos

gl	Teste Unilateral								
	15%	10%	5%	2,5%	2%	1%	0,5%	0,1%	0,05%
	Teste Bilateral								
	30%	20%	10%	5%	4%	2%	1%	0,2%	0,1%
1	1,9626	3,0777	6,3137	12,7062	15,8945	31,8210	63,6559	318,2888	636,5776
2	1,3862	1,8856	2,9200	4,3027	4,8487	6,9645	9,9250	22,3285	31,5998
3	1,2498	1,6377	2,3534	3,1824	3,4819	4,5407	5,8408	10,2143	12,9244
4	1,1896	1,5332	2,1318	2,7765	2,9985	3,7469	4,6041	7,1729	8,6101
5	1,1558	1,4759	2,0150	2,5706	2,7565	3,3649	4,0321	5,8935	6,8685
6	1,1342	1,4398	1,9432	2,4469	2,6122	3,1427	3,7074	5,2075	5,9587
7	1,1192	1,4149	1,8946	2,3646	2,5168	2,9979	3,4995	4,7853	5,4081
8	1,1081	1,3968	1,8595	2,3060	2,4490	2,8965	3,3554	4,5008	5,0414
9	1,0997	1,3830	1,8331	2,2622	2,3984	2,8214	3,2498	4,2969	4,7809
10	1,0931	1,3722	1,8125	2,2281	2,3593	2,7638	3,1693	4,1437	4,5868
11	1,0877	1,3634	1,7959	2,2010	2,3281	2,7181	3,1058	4,0248	4,4369
12	1,0832	1,3562	1,7823	2,1788	2,3027	2,6810	3,0545	3,9296	4,3178
13	1,0795	1,3502	1,7709	2,1604	2,2816	2,6503	3,0123	3,8520	4,2209
14	1,0763	1,3450	1,7613	2,1448	2,2638	2,6245	2,9768	3,7874	4,1403
15	1,0735	1,3406	1,7531	2,1315	2,2485	2,6025	2,9467	3,7329	4,0728

Distribuição T de Student. [21]