

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ - CÂMPUS MEDIANEIRA  
GERÊNCIA DE ENSINO E PESQUISA  
CURSO DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

ALEXSSANDER ARIEL KUHN LIESENFELD  
EVANDRO ROGÉRIO CANAVESSE

**PROJETO E EXECUÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE  
ÂNGULO DE CONTATO DE LÍQUIDOS EM SUPERFÍCIES SÓLIDAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2014

ALEXSSANDER ARIEL KUHN LIESENFELD  
EVANDRO ROGÉRIO CANAVESSE

**PROJETO E EXECUÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE  
ÂNGULO DE CONTATO DE LÍQUIDOS EM SUPERFÍCIES SÓLIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Diplomação, do Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo.

Orientador: Prof. Me. Ivair Marchetti

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Rodrigo S. Bittencourt.

MEDIANEIRA

2014



## TERMO DE APROVAÇÃO

### PROJETO E EXECUÇÃO DE EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE ÂNGULO DE CONTATO DE LÍQUIDOS EM SUPERFÍCIES SÓLIDAS

Por:

Alexssander Ariel Kuhn Liesenfeld  
Evandro Rogério Canavesse

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 19h00min do dia 2 de Dezembro de 2014 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel no Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira. Os acadêmicos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **aprovado**.

---

Prof. Me. Ivair Marchetti  
UTFPR – Câmpus Medianeira  
(Orientador)

---

Prof. Me. Yuri Feruzzi  
UTFPR – Câmpus Medianeira  
(Convidado)

---

Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt  
UTFPR – Câmpus Medianeira  
(Coorientador)

---

Prof. Me. Neron Alípio Cortes Berghauser  
UTFPR – Câmpus Medianeira  
(Convidado)

A folha de Aprovação assinada encontra-se na coordenação do Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial.

## **AGRADECIMENTOS**

Certamente que será impossível descrever todas as pessoas às quais somos gratos pela contribuição na execução desse trabalho e conseqüente formação, porém, gostaríamos de agradecer primeiramente à Deus por nos dar a oportunidade de estarmos concluindo esse curso, às nossas famílias que nos incentivaram e foram os propulsores dessa conquista, à UTFPR pela exímia estrutura oferecida para nossa formação e à todos os professores que de alguma forma contribuíram com a conclusão desse desafio, em especial ao Professor Orientador Ivair Marchetti, ao Professor Paulo Rodrigo Stival Bittencourt e ao Professor Neron Alípio Cortes Berghauser por sua dedicação e paciência em sua colaboração, a eles nosso profundo respeito e gratidão.

*“A persistência é o caminho do êxito”.*  
(Charles Chaplin)

*“O heroísmo não consiste em não ter medo, mas sim em superá-lo”*  
(Roberto Gómez Bolaños)

## RESUMO

LIESENFELD, Alexssander Ariel Kuhn, CANEVESSE, Evandro Rogério. **Projeto e Execução de Equipamento para Medição de Ângulo de Contato de Líquidos em Superfícies Sólidas**. 2014. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2014.

Este trabalho visa o estudo, projeto e montagem de um protótipo a ser utilizado para obter o exato ângulo que determinado líquido gera quando entra em contato com a superfície a ser ensaiada. Sua utilidade abrange diversas áreas como, por exemplo, a análise de molhabilidade de materiais, estudos na área da química de substâncias e análise de molhabilidade de solos. Trata-se de uma caixa feita em aço aberta em sua parte inferior, onde será feito o ensaio. Um microscópio fixado em sua parte superior e com a imagem ampliada na quantidade necessária é o responsável pela captação da imagem da gota que fora depositada na superfície. Esta imagem é visualizada diretamente no computador e, através de um software, é possível calcular exatamente qual o ângulo de contato que se forma entre o líquido e a superfície. Uma microsseringa é utilizada para depositar o líquido a ser ensaiado, logo que a gota toca a superfície a microsseringa é retirada, finalizando o processo de depósito da gota. Com o processo concluído, o registro dos ensaios é realizado. Esse equipamento será muito utilizado didaticamente, já que seus resultados foram bastante satisfatórios, com a obtenção de imagens de grande qualidade que permite a obtenção exata do ângulo de contato formado no ensaio e esse tipo de medição tem grande relevância no estudo de materiais e sua molhabilidade e na área de química analítica.

**Palavras-chave:** Molhabilidade. Ângulo de contato. Projeto.

## ABSTRACT

LIESENFELD, Alexssander Ariel Kuhn, CANEVESSE, Evandro Rogerio. **Design and Implementation of Equipment for Measuring Contact Angle of Liquids on Solid Surfaces**. 2014. 39f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2014.

This work aims to study, design and installation of a prototype to be used to get the exact angle that generates when certain liquid comes in contact with the surface to be tested. Their utility includes several areas, for example, analysis of wettability of materials, studies in the chemical analysis of substances and wettability of soils. It is a box made of open steel in its lower part, where the test will be done. A microscope set at its top and with the enlarged image in the required quantity is responsible for capturing the image of the drop that had deposited on the surface. This image is displayed directly on the computer, using software, it is possible to calculate exactly where the contact angle formed between the liquid and the surface. A microsyringe is used to deposit the liquid to be tested as soon as the drop touches the surface microsyringe is removed, completing the deposit process drop. With the process complete, the record of the trial is held. This equipment is widely used for teaching purposes, since their results were quite satisfactory, with obtaining high quality images that allow the accurate realization of the contact angle formed in this type of test and measurement has great relevance in the study of materials and their wettability and in the field of analytical chemistry.

**Keywords:** Wettability. Contact angle. Project.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Variação do ângulo de contato e relação com a molhabilidade de uma superfície.....	16
Figura 2 – Comportamento de um líquido exposto a superfície hidrofóbica e hidrofílica.....	17
Figura 3 – Ilustração do ângulo de contato para distintos graus de molhabilidade, ..	17
Figura 4 – Definição de ângulo de contato estático para uma gota de líquido sobre uma superfície plana horizontal.....	19
Figura 5 – Representação do funcionamento do medidor de ângulo de contato projetado. ....	21
Figura 6 – Imagem ilustrativa da caixa do medidor de ângulo de contato.....	23
Figura 7 – Imagem ilustrativa do microscópio utilizado nos ensaios. ....	24
Figura 8 – Imagem ilustrativa da microsseringa.....	25
Figura 9 – Ilustração do espelho refletor da imagem da gota para o microscópio. ...	26
Figura 10 – Ilustração do equipamento completo.....	28
Figura 11 – Registro da sequência para depósito da microgota na superfície testada. ....	30
Figura 12 – Registro da leitura dos ângulos de contato da gota na superfície.....	30



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores aproximados dos principais itens de compra para a montagem do leitor de ângulo de contato. ....	29
Tabela 2: Resultados obtidos com as leituras dos ângulos de contato e cálculo das médias.....	31

## LISTA DE SIGLAS, ACRÔNIMOS E SÍMBOLOS

$\mu\text{L}$	Microlitro
$\sigma$	Sigma
$\Theta$	Teta
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celcius
3D	Três Dimensões
2D	Duas Dimensões
CAD	Computer Aided Design
$\text{Cm}^2$	Centímetro quadrado
LED	Light Emissor Diode
MAG	Metal Active Gás
MIG	Metal Inert Gás
Mm	Milímetro
PET	Polietileno Tereftalado
TIG	Tungsten Inert Gás
USB	Universal Serial Bus

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>16</b>
2.1 ÂNGULO DE CONTATO.....	16
2.2 MOLHABILIDADE .....	18
2.3 CONCEITOS DE MOLHABILIDADE NA MANUTENÇÃO.....	19
<b>3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MONTAGEM</b> .....	<b>21</b>
3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO .....	21
3.2 CAIXA PRINCIPAL.....	22
3.3 MICROSCÓPIO .....	24
3.5 ESPELHOS DE PROJEÇÃO .....	26
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>27</b>
4.1 DETALHAMENTO DA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO .....	27
4.2 DESCRIÇÃO DO MATERIAL USADO NO EQUIPAMENTO .....	28
4.3 DESCRIÇÃO DOS TESTES REALIZADOS COM O EQUIPAMENTO .....	29
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>33</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>35</b>
<b>APÊNDICE</b> .....	<b>38</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente as organizações procuram oferecer soluções alternativas para as suas atividades diárias tornando seus processos mais rápidos e baratos. Nesta procura contínua pela eficácia, qualquer atividade que puder ser realizada com maior confiabilidade e menor custo será muito bem vinda para as empresas.

Neste cenário de exigências constantes, o profissional responsável pela área de Manutenção Industrial também precisa cumprir seu papel de inovador, projetando e construindo equipamentos e soluções para as mais diversas áreas de conhecimento. Com o aumento da complexidade dos equipamentos industriais, a cada dia que passa, exige-se mais conhecimento especializado por parte deste profissional que necessita agora trafegar por áreas anteriormente consideradas exclusivas de outras ciências. No caso deste trabalho, a proposta do dispositivo envolve conceitos oriundos da Química, Física, e suas subáreas tais como Óptica e Mecânica.

O principal foco deste trabalho consiste em apresentar o projeto de um dispositivo para medição do ângulo de contato de líquidos em superfícies sólidas como solução para necessidades variadas em laboratórios ou empresas. Trata-se de um equipamento que pode ser muito útil para ensaios ligados à resistência de materiais, aderência de líquidos em superfícies variadas ou mesmo do comportamento de determinados líquidos diante de situações específicas. Na prática os resultados poderão ser usados como suporte para as atividades de manutenção mecânica e de hidráulica em equipamentos variados.

Os estudos realizados na área de resistência dos materiais normalmente utilizam como um dos parâmetros de avaliação a capacidade que o material possui de absorver um determinado líquido que porventura entre em contato com o mesmo. Este tipo de teste pode ser realizado através do estudo do que acontece quando um líquido entra em contato com esse material, mais especificamente estudando-se o ângulo formado entre eles, de modo que quanto maior for esse ângulo, maior é a capacidade deste material absorver o líquido e, portanto, maior sua molhabilidade. Nas indústrias, este tipo de avaliação se mostra de grande relevância por evitar gastos com manutenção, por exemplo, no caso de uma peça ser projetada com

material inadequado para situações em que não pode ter contato com umidade, ou até mesmo para evitar acidentes, já que a resistência dos materiais é um assunto tratado com muita seriedade quando se vai projetar uma determinada máquina ou equipamento.

Por, em alguns casos, se tratar de um ensaio a ser realizado em campo, ou seja, no próprio ambiente de trabalho do material a ser ensaiado, o equipamento para realização do ensaio precisa ser de pequeno porte, para que seja de fácil manuseio e para que possa ser levado até o local necessário, porém sem que se perca a precisão e a confiabilidade dos resultados obtidos nos ensaios. O protótipo desenvolvido para a realização deste trabalho foi construído pensando exatamente nessas particularidades, para que pudesse ser levado a qualquer lugar por ser de pequeno porte e necessitando apenas de um computador contendo o *software* para o registro dos valores. Com essas facilidades pretendeu-se aumentar a utilização desse tipo de ensaio, já que é tão importante para avaliação de materiais na indústria e muitas vezes não é realizado exatamente por não ser possível fazê-lo no próprio ambiente de trabalho. Assim, com um equipamento pequeno e mais barato do que equipamentos similares, as empresas poderão adquiri-lo com mais facilidade e, então, realizar seus próprios ensaios, com praticidade e rapidez, sem deixar de lado a precisão, eficácia e confiabilidade.

Para ter certeza de que o equipamento realmente é confiável, vários testes foram realizados, utilizando para isto vários tipos de superfície na presença de microgotas de água. Os resultados desses testes demonstraram que o equipamento realmente é confiável, pois foram comparados com dados de outros equipamentos já existentes com funções similares e pôde-se observar que todos foram bastante parecidos. A precisão que fora registrada nos resultados dos ensaios realizados é de grande relevância não somente para a área de mecânica, mas especificamente na análise de molhabilidade dos materiais.

O dispositivo construído tem aplicação para a área da química aplicada, já que testes como estes têm grande utilidade como, por exemplo, para se analisar como reagem fisicamente as substâncias de determinada composição química e qual seu comportamento quando colocadas em contato com determinada superfície.

Este trabalho apresenta sua justificativa pelos resultados apresentados na prática de testes de comportamento de líquidos aplicados em determinadas superfícies. Equipamentos com características similares são normalmente de alto

valor e de difícil obtenção principalmente no mercado nacional. Com a proposta apresentada neste trabalho espera-se atender a uma demanda considerável de profissionais de diversas áreas de conhecimento, atendendo-os com praticidade e baixo custo em suas pesquisas. Pelo fato de esse trabalho apresentar tamanha abrangência espera-se realizar atividades das mais variadas finalidades, porém, neste projeto, realizaram-se principalmente ensaios voltados à resistência dos materiais, partindo do estudo da molhabilidade dos mesmos.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi projetar e desenvolver um equipamento capaz de realizar medições do ângulo de contato formado por microgotas de líquidos em superfícies sólidas, realizando todas as etapas necessárias, desde a aplicação da gota na superfície, a captação das imagens e o registro dos valores obtidos nos ensaios, sendo este, um equipamento compacto e preciso.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Encontram-se listados a seguir os objetivos específicos que foram realizados na execução deste trabalho:

- a) Desenvolver o projeto do equipamento de acordo com as medidas e características definidas para sua funcionalidade;
- b) Executar a montagem do protótipo utilizando os componentes adquiridos e os processos necessários ao seu correto funcionamento;
- c) Realizar ensaios com o equipamento a fim de verificar o registro das imagens e, conseqüentemente, permitindo ao *software ImageJ*® mensurar os valores considerados corretos da angulação obtida;

- d) Verificar no *software* os valores registrados e compará-los com registros feitos por outros equipamentos similares, com o intuito de verificar a eficácia da leitura do protótipo montado;
- e) Executar as calibrações e alterações necessárias tanto no protótipo como no *software* responsável pelos registros das angulações obtidas nos ensaios.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a revisão literária necessária ao embasamento deste trabalho foram pesquisados temas como elaboração de projetos, molhabilidade, medidas de ângulo de contato, e aspectos ligados à molhabilidade na manutenção. Para tanto, foram obtidos dados e conceitos principalmente em artigos científicos e em manuais operacionais ligados a resistência de materiais e manutenção.

### 2.1 ÂNGULO DE CONTATO

Segundo Luz *et al* (2008), o ângulo de contato é definido pelo ângulo formado entre um plano tangente à interface líquido-vapor traçado a partir da linha de contato triplo (líquido-gás-sólido) e o plano líquido-sólido medido na fase líquida. Através do ângulo de contato é possível medir o grau de molhabilidade de uma superfície por um determinado líquido.

Myers, *apud* Brisolari (2008) comenta que uma das principais características relacionadas a avaliação de um sistema imiscível consiste na determinação do ângulo de contato de um líquido com outras fases condensadas (Figura 1).

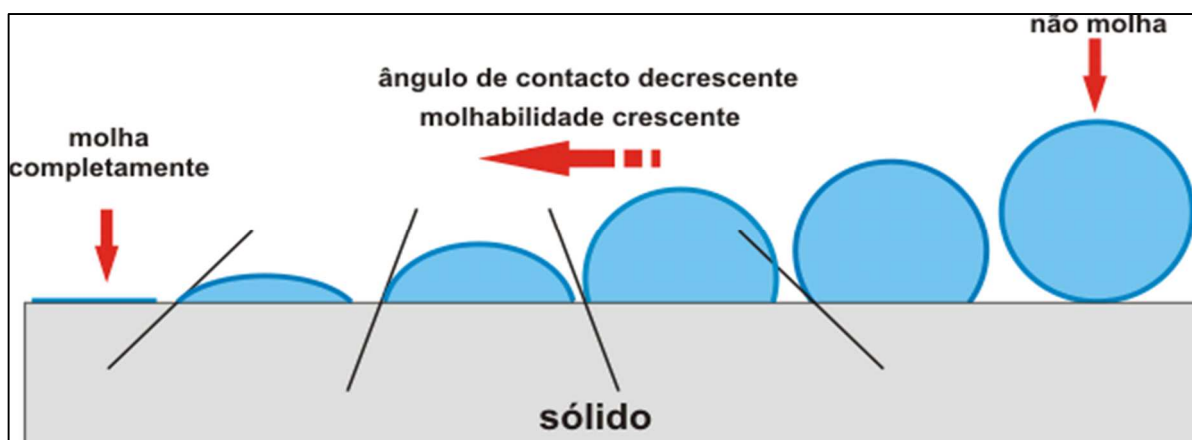


Figura 1 – Variação do ângulo de contato e relação com a molhabilidade de uma superfície. Fonte: Alfaconnection (2014).

O valor de ângulo de contato encontrado indica a capacidade de molhamento da superfície, ou seja, se a superfície é hidrofóbica ou hidrofílica. De



acordo com Motta (2012), quando o ângulo encontrado for menor que  $90^\circ$ , pode-se considerar que a superfície é hidrofílica, porém, se forem maiores que  $90^\circ$ , caracterizam-se superfícies hidrofóbicas (Figura 2)



Figura 2 – Comportamento de um líquido exposto a superfície hidrofóbica e hidrofílica.  
Fonte: Alfaconnection (2014).

A medição do ângulo de contato de líquidos é de grande relevância nas mais diversas áreas como, por exemplo, para avaliar o efeito de determinadas substâncias químicas quando em contato com soluções aquosas (IOST e RAETANO, 2010), para o estudo de físico-química de líquidos e coloides (OGEDA, 2010), além da análise da molhabilidade de solos (VOGELMANN, 2010). A Figura 3 mostra diferentes exemplos de valores de ângulos de contato, cada qual com valores distintos de angulação propostos por Luz *et al.*

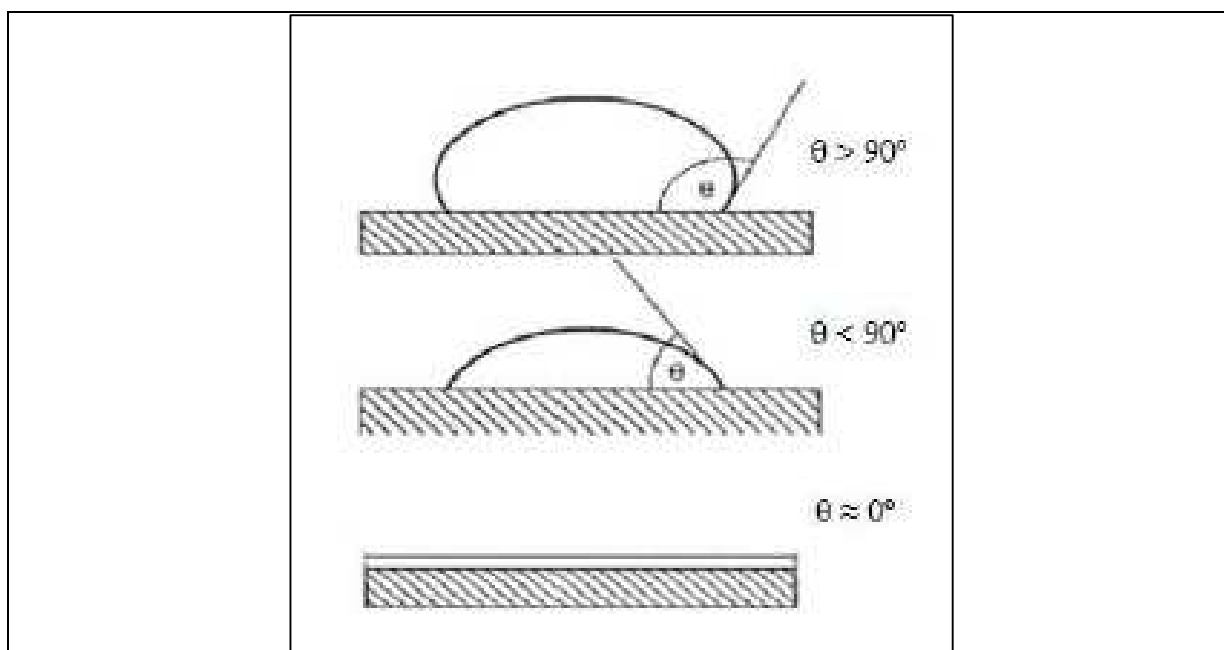


Figura 3 – Ilustração do ângulo de contato para distintos graus de molhabilidade,  
Fonte: LUZ, *et al.* (2008).

Quanto à leitura do ângulo de contato, Ramos *et al apud* Motta (2012) comentam que é diretamente afetada pelo volume da gota além de seu diâmetro e também pela densidade do líquido testado.

## 2.2 MOLHABILIDADE

Molhabilidade é a tendência de um determinado fluido espalhar ou aderir sobre uma superfície sólida (BRISOLARI, 2008). A análise de molhabilidade é outro fator que abrange sua utilidade para variadas áreas do conhecimento. Segundo Motta (2012), os principais fatores que alteram a molhabilidade são:

- a) Temperaturas envolvidas no sistema;
- b) Características da atmosfera do ambiente do ensaio;
- c) Heterogeneidade e Rugosidade da superfície ensaiada;
- d) Reações físicas ou químicas entre o líquido e o sólido;
- e) Tempo de contato entre o líquido e a superfície ensaiada;

De acordo com Andreucci (2003) e Motta (2012) existem vários métodos científicos para determinar o grau de molhabilidade de uma determinada superfície. O autor comenta que o método mais usado é o da chamada gota séssil. Os ensaios são realizados colocando o material no estado líquido sobre uma superfície sólida e, a partir da formação de uma gota, efetua-se a medição do ângulo criado entre a superfície e uma reta tangente à interface da gota traçada. Neste caso está-se medindo o comportamento de absorção de uma substância líquida em contato com uma superfície sólida à presença de um determinado gás, ou seja um ponto de contato triplo (sólido-líquido-gás).

Motta (2012) afirma que a molhabilidade de uma superfície está relacionada ao balanço da energia interfacial sólido-líquido-vapor. Este balanço é determinado pela equação de forças de Young. De acordo com a referida autora, a equação de Young relaciona as tensões superficiais do sólido  $\sigma_{SG}$ , do líquido  $\sigma_{LG}$ , a tensão

interfacial sólido-líquido  $\sigma_{SL}$  e o ângulo de contato do líquido na linha tripla sólido-líquido-ar. A equação de Young (1) é definida como:

$$\sigma_{SG} = \sigma_{SL} + \sigma_{LG} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Em que  $\sigma_{SG}$  é a energia da superfície do sólido e  $\sigma_{LG}$  é a tensão superficial do líquido em equilíbrio com o vapor e  $\sigma_{SL}$  é a energia da interface sólido-líquido, como demonstra a Figura 4 proposta por Motta (2012).

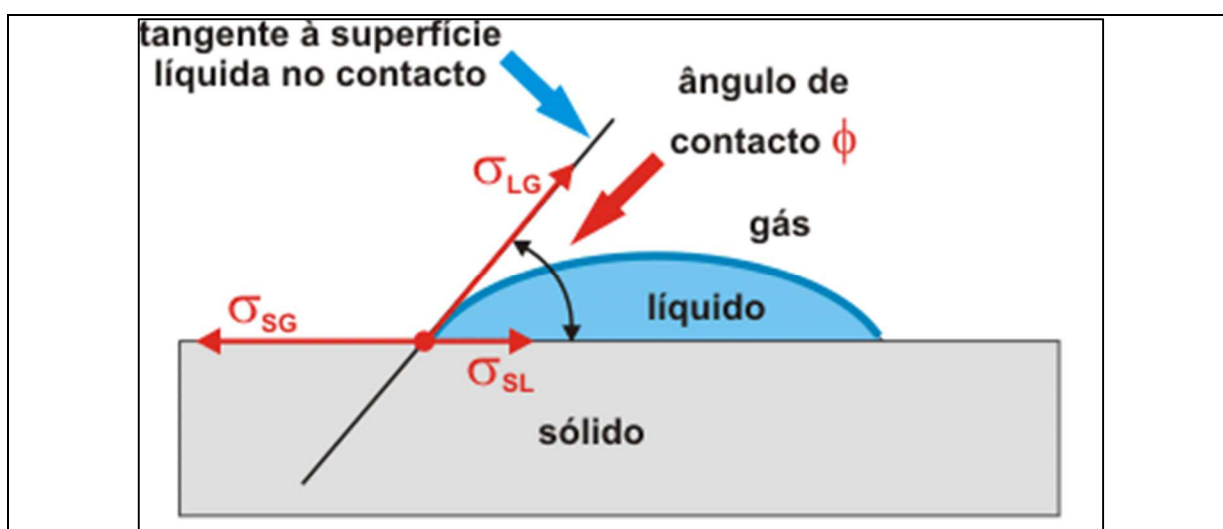


Figura 4 – Definição de ângulo de contato estático para uma gota de líquido sobre uma superfície plana horizontal.

Fonte: Alfaconnection (2014).

### 2.3 CONCEITOS DE MOLHABILIDADE NA MANUTENÇÃO

A preocupação com a molhabilidade de líquidos em contato com determinados materiais remete aos cuidados com possíveis impregnações em superfícies com diversas características. Fontanella (2007) salienta sobre a importância de conhecer as propriedades hidrofílicas e hidrofóbicas dos produtos como forma de poder planejar o produto correto para revestimento de determinados equipamentos. Busca-se desta forma, adquirir conhecimentos sobre o que utilizar para proteger uma área da ação da água ou outro líquido que pode comprometer o desempenho de equipamentos. No caso do autor citado, o estudo refere-se a

capacidade de isoladores elétricos em não absorver água, propriedade completamente ligada à qualidade e segurança de equipamentos elétricos de uma maneira geral.

Soares (2012) demonstra que conhecer o comportamento de absorção de uma substância em contato com uma superfície contribui para a definição dos componentes ideais para construção de equipamentos. E que nas áreas Mecânica, Elétrica e Petrolífera este conhecimento é fundamental para elaboração de projetos de equipamentos e maquinários industriais, pois pode representar a diferença entre o sucesso e o fracasso de uma empresa.

A hidrofobicidade (capacidade de uma superfície absorver água pela interação molecular) é descrita por Vogelmann *et al* (2010) como uma propriedade de importância vital para equipamentos modernos visto a necessidade de se manter em funcionamento pelo maior tempo possível sem que haja a necessidade de intervenções de manutenção ou substituições. Neste caso Soares (2012) também descreve esta importância na manutenção de dispositivos funcionando em melhores condições de desempenho.

### 3 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA MONTAGEM

Para a confecção do protótipo, foi necessário analisar quais seriam os equipamentos e os materiais a serem utilizados em sua montagem, cada qual pensado para atender às necessidades para o bom funcionamento do equipamento. A seguir a listagem detalhada dos materiais e equipamentos utilizados.

#### 3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO

Para o funcionamento do equipamento utilizou-se o princípio de projeção da imagem da microgota de água sobre uma superfície do corpo de prova refletida para um microscópio por meio de um espelho conforme pode ser visto na Figura 5. No caso dos ensaios realizados utilizou-se como padrão o volume de 5 $\mu$ L.

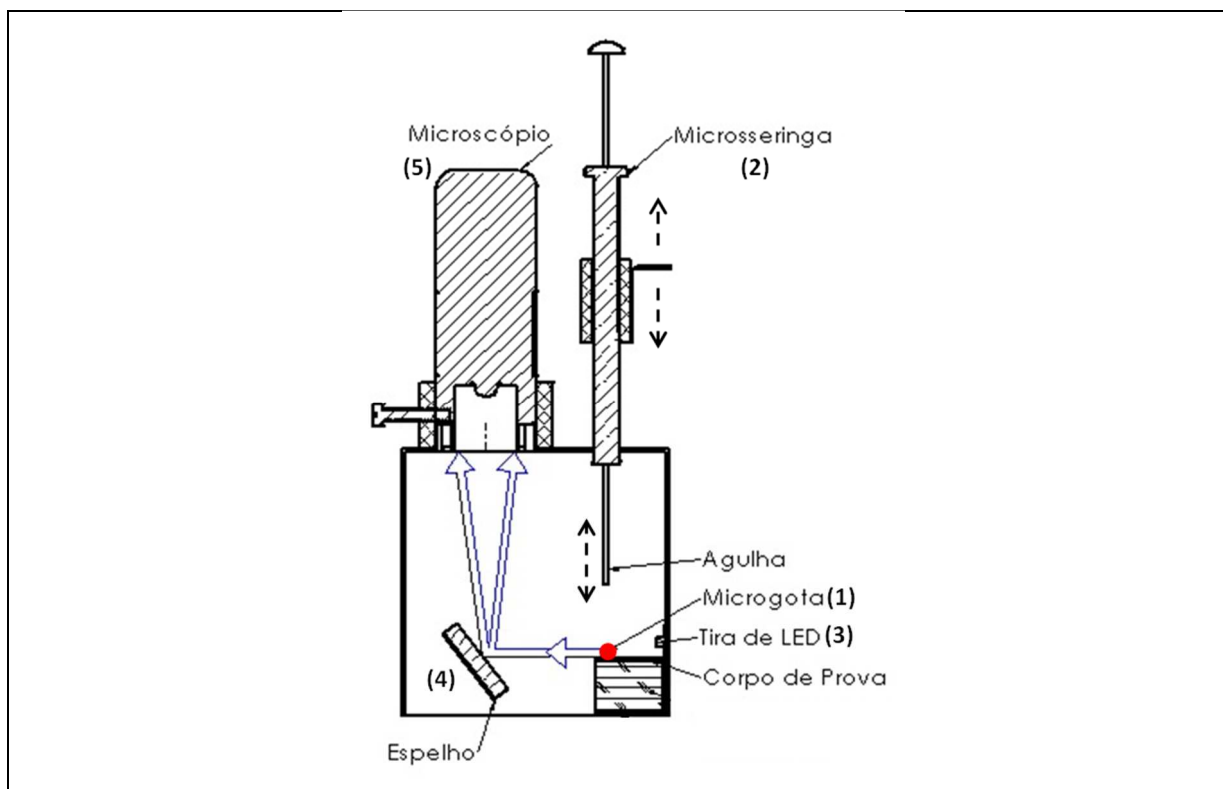


Figura 5 – Representação do funcionamento do medidor de ângulo de contato projetado.

Para que o ensaio seja realizado, uma microgota do líquido (1) é depositada da seringa (2) sobre o corpo de prova que fica posicionado sobre a plataforma de apoio. Os LED's (Emissores de Luz) (3) projetam a luz pela microgota até o espelho (4) e, em seguida, até as lentes do microscópio (5) que envia ao computador a imagem registrada. A partir da recepção da imagem pelo microscópio, são usados três programas computacionais para filmagem do processo, captura da imagem e cálculo do ângulo de contato.

### 3.2 CAIXA PRINCIPAL

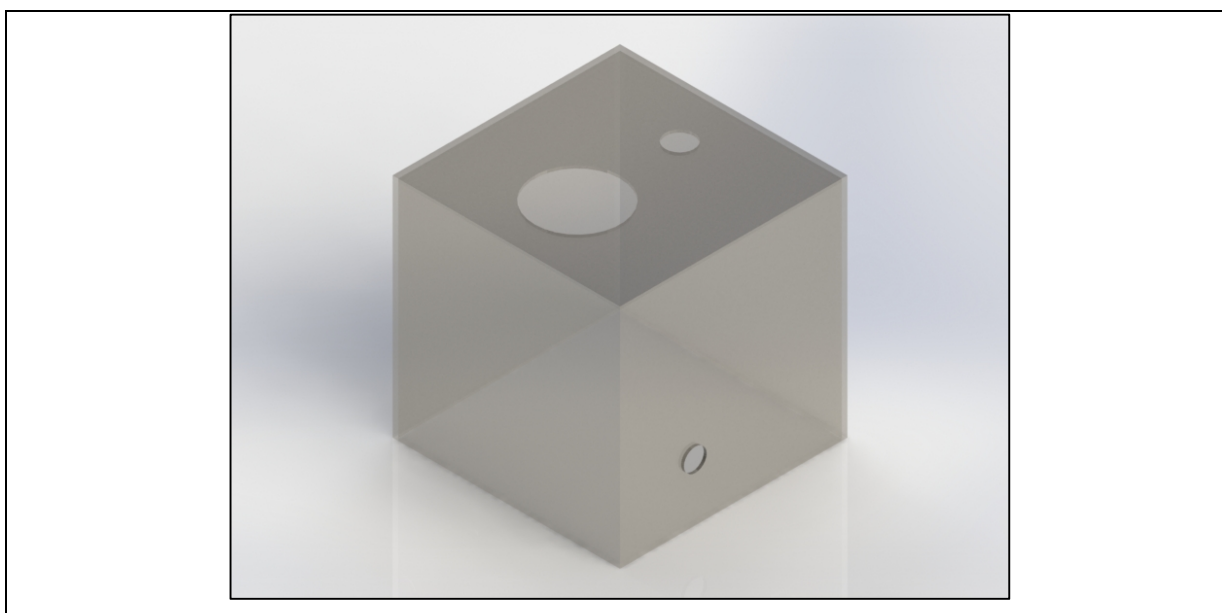
A primeira peça do protótipo a ser projetada e montada foi a caixa em que são posicionados os outros componentes. A proposta para o projeto desta peça foi de que teria dimensões reduzidas, visto a necessidade de movimentação do dispositivo para ser usado em testes externos. O primeiro protótipo da caixa já foi construído com as dimensões consideradas ideais para o seu uso em condições reais. Tentou-se para isto, fazer com que todos os espaços internos da caixa fossem utilizados da melhor forma possível. Para o projeto da caixa procurou-se fazer com que os componentes fossem fixados de acordo com o necessário para o funcionamento do equipamento, mas sem abrir mão do tamanho reduzido do protótipo.

Depois de realizada a medição dos componentes que seriam fixados, foram feitos os projetos da montagem do protótipo utilizando um software da família CAD 3D, projetos estes que serão demonstrados posteriormente. Estudado e realizado o projeto, concluiu-se que a medida mais adequada para a confecção da caixa cúbica seria de 80 mm de lado.

A parte inferior da caixa é aberta, pois é ali onde serão realizados os ensaios. Na parte superior, dois furos, um medindo 30mm de diâmetro e outro medindo 8mm, servem para fixar o microscópio e a microsseringa respectivamente. Também na parte superior da caixa foi fixada a alavanca com mola, responsável por fazer com que a microsseringa desça até a posição necessária para depositar a gota e depois de feito isso retornar à posição inicial. Em uma das laterais da caixa, alinhado com o centro do microscópio, foi fixado o espelho quadrado com 15mm de lado sendo o responsável por refletir a imagem captada pelo microscópio para a posição em que a

gota será colocada em contato com a superfície na realização do ensaio. Acoplado ao espelho há um rolamento e uma manivela utilizada para girar o espelho, ajustando o mesmo no ângulo mais adequado para a detecção das imagens do ensaio.

A caixa foi confeccionada utilizando chapas de aço SAE 1020 com espessura de 1,2mm, por ser um material resistente, não muito pesado, mas que ofereça robustez suficiente para que o ensaio fosse realizado com firmeza, pois utilizando um material muito leve, o protótipo acabaria por não ter um posicionamento preciso no momento do ensaio (a Figura 6 ilustra a caixa do dispositivo devidamente concluída).



**Figura 6 – Imagem ilustrativa da caixa do medidor de ângulo de contato.**

As chapas foram cortadas de modo que ficassem duas partes distintas, uma medindo 240mm x 80mm e outra medindo 160mm x 80mm. Essas chapas foram dobradas utilizando dobradeira industrial, de modo que todas ficassem com suas arestas medindo 80mm cada. Depois de dobradas as chapas foram soldadas formando a caixa em sua forma final. Essa solda foi realizada com o processo de soldagem TIG (*Tungsten Inert Gás*) pois, segundo Weiss (2010, p. 113), “[...] produz soldas de alta qualidade e solda a maioria dos metais e ligas” e possui uma solda mais contínua que outras opções de soldagem como o processo MIG/MAG (*Metal Inert Gás/ Metal Active Gás*) ou o processo de solda à arco elétrico com eletrodo revestido, portanto, a soldagem TIG deu um acabamento melhor à peça.

No lado oposto ao que depois seria instalado o espelho de projeção da imagem da gota, foi fixada uma tira de LED (Emissor de Luz) alimentada através de uma porta USB do computador utilizado na realização do ensaio. A mesma foi instalada para ajudar na captura da imagem da gota, no modo que, com a luz batendo atrás da gota e de frente para o espelho de captura da imagem, o formato da gota fica mais destacado, contribuindo para que o *software* a identifique e realize a medição com a maior precisão possível.

### 3.3 MICROSCÓPIO

A aquisição das imagens utilizadas para a realização dos ensaios foi feita através de um microscópio. O mesmo possui capacidade de ampliação de imagem de 10x até 230x da imagem real. A quantidade de ampliação da imagem, é ajustada a cada ensaio realizado, deixando-a de modo que a captura de imagem seja a mais precisa possível, normalmente ficando entre 20x e 30x de ampliação. No protótipo montado, o equipamento utilizado foi o Microscópio digital Satellite® A-SC01 (Figura 7), por possuir o ajuste de ampliação de imagem necessária para a realização dos ensaios e ser de baixo custo quando comparado a outros equipamentos similares, o que ajudou a manter o baixo custo do protótipo.

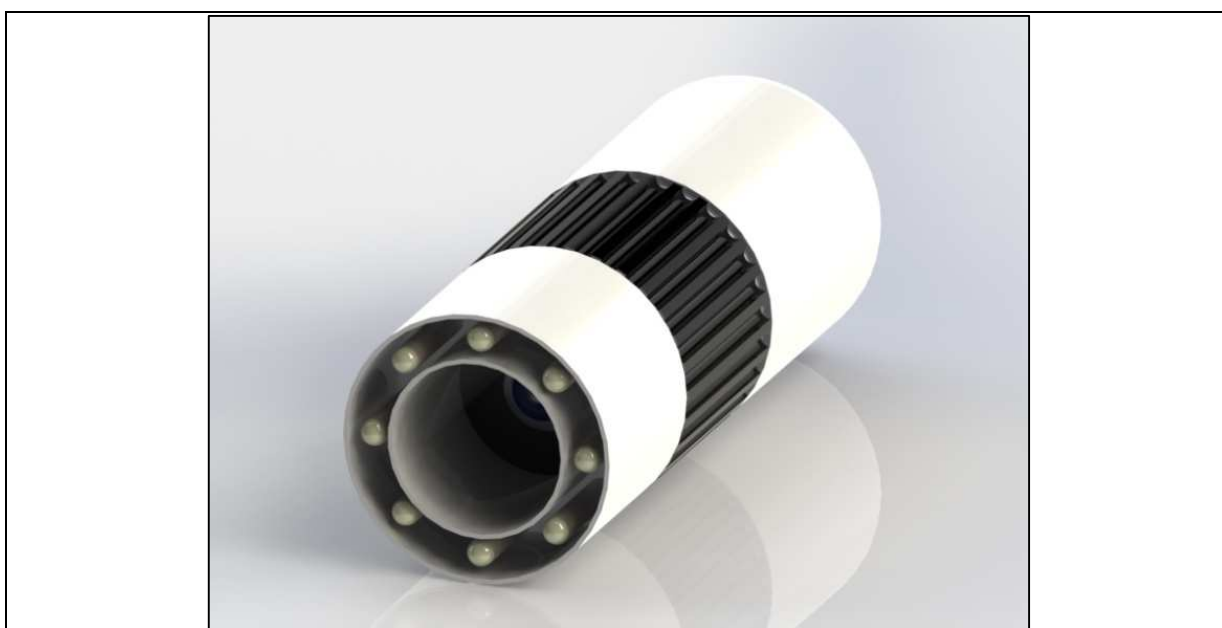


Figura 7 – Imagem ilustrativa do microscópio utilizado nos ensaios.



### 3.4 MICROSSERINGA OU PIPETA

A microsseringa é o equipamento que foi utilizado para depositar a gota do líquido na superfície para a realização do ensaio. Trata-se de uma microsseringa da marca Hamilton ® (Figura 8), graduada de 10 $\mu$ L à 100 $\mu$ L, porém, devido ao fato de que a quantidade de líquido a ser depositada no ensaio ser bastante pequena, apenas o necessário para formar a gota, outras micro seringas similares mas de menor graduação poderiam ter sido utilizadas, pois não prejudicariam o resultado do ensaio.

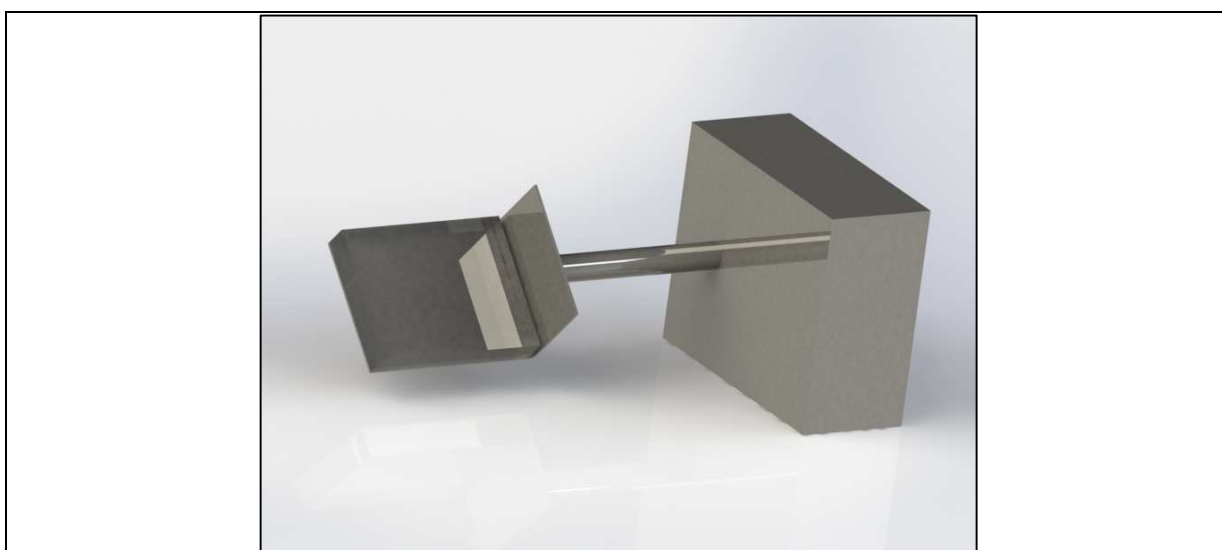
O que deve ser observado é a precisão exigida para depositar a microgota, pois grande parte do sucesso do ensaio depende do cuidado em manter a uniformidade no volume medido. Caso ocorrer esta uniformidade provavelmente o ensaio terá um resultado confiável. Ao mesmo tempo em que existe este cuidado, é necessário executar-se a leitura o mais rápido possível para evitar que o líquido interaja com a superfície.



**Figura 8 – Imagem ilustrativa da microsseringa.**

### 3.5 ESPELHOS DE PROJEÇÃO

Para a projeção da imagem da gota no microscópio, utilizou-se um espelho quadrado de lados medindo 30mm fixado na estrutura da caixa com um ângulo ajustável da superfície da gota para o microscópico. O propósito é que este espelho esteja alinhado a  $45^\circ$  com a base do corpo de prova, possibilitando uma melhor visualização da imagem do contato da gota com a superfície em que será depositada pela microsseringa, na Figura 9 pode-se ver o detalhe deste espelho.



**Figura 9 – Ilustração do espelho refletor da imagem da gota para o microscópio.**

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O projeto do medidor do ângulo de contato tratado neste trabalho foi concebido para que o equipamento pudesse ser usado de forma didática e de fácil operação e baixo custo. Em seguida serão descritos os procedimentos realizados para os testes do equipamento na leitura do grau de contato entre a água e corpos de prova de diversos materiais.

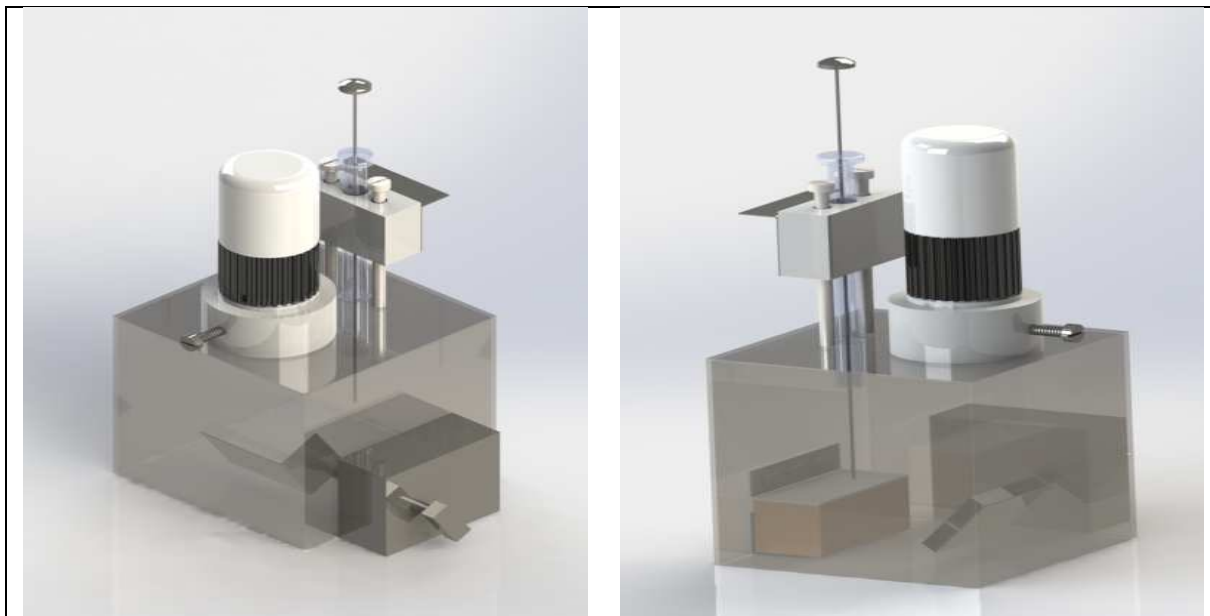
### 4.1 DETALHAMENTO DA MONTAGEM DO EQUIPAMENTO

O propósito deste trabalho consistiu em projetar e construir um equipamento de medição do ângulo de contato da gota de um líquido depositada sobre uma superfície de prova. Para tanto a microgota é depositada manualmente por meio de uma microsseringa e a sua imagem, captada pela câmera de um microscópio eletrônico, analisada por meio de um software. Para melhor destacar a imagem da gota, foram inseridos componentes emissores de luz (LED's) cuja intensidade pode ser regulada pelo usuário, bem como o ângulo de inclinação do espelho refletor da imagem para o microscópio. O equipamento comunica-se com o PC/Notebook através de interface USB, na Figura 10 pode-se ver uma ilustração do equipamento devidamente montado.

A primeira etapa para a criação do equipamento foi a sua concepção por meio de um aplicativo computacional para projetos mecânicos. Usou-se para isto o software Solidworks® da Dassault Systemes®, uma ferramenta que permite criar, simular, publicar e gerenciar projetos (SolidWorks Corp., 2014), usando plataformas em duas e três dimensões (2D e 3D).

Por meio do Solidworks® é possível definir exatamente as medidas e os materiais que foram especificados para serem utilizados na montagem e, na medida

em que os desenhos são elaborados, pode-se conferir como ficará o trabalho antes de realizar a montagem.



**Figura 10 – Ilustração do equipamento completo.**

Para que a montagem fosse facilitada, desenvolveu-se separadamente o projeto da caixa principal do protótipo, a qual seria utilizada para apoiar os demais componentes em suas respectivas posições. Com as furações e posições determinadas de cada componente, foi-se adaptando cada qual da melhor maneira possível, de modo que todos ficassem firmes e colaborassem na precisão da medição do ângulo de contato.

#### 4.2 DESCRIÇÃO DO MATERIAL USADO NO EQUIPAMENTO

Para a montagem do medidor de ângulo de contato foram adquiridos componentes no mercado nacional e listados na Tabela 1. Tendo em vista de parte dos componentes necessários para a montagem do equipamento já era de propriedade dos pesquisadores, os valores foram levantados por meio de consultas em sítios especializados no assunto.

**Tabela 1 – Valores aproximados dos principais itens de compra para a montagem do leitor de ângulo de contato.**

<b>Componente</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor (R\$)</b>
Microscópio Satellite A-SC01	01	100,00
Microseringa Hamilton 710SNR, 100uL	01	100,00
Espelho	01	2,00
Chapa de aço	0,2 m <sup>2</sup>	3,00
Dobradiça de 50mm	01	2,00
Barra de Nylon (50mm de Ø)	15 cm	5,00
Outros pequenos componentes (parafusos, porcas, bloco de ferro, etc...)		10,00
<b>TOTAL</b>		<b>222,00</b>

O valor calculado para a montagem do equipamento foi obtido considerando-se uma unidade, entretanto, para alguns itens, houve dificuldade em se calcular o valor para itens em pequenas quantidades como foi o caso da chapa de aço, o espelho e as placas de suporte para o corpo de prova, e outros itens.

Mesmo com as limitações listada percebe-se que os custos incidentes na construção deste medidor de ângulo de contato seriam muito reduzidos considerando-se a compra de um equipamento similar no mercado que, dependendo das condições de compra poderiam superar a faixa de R\$ 10.000,00 (dados de 2014).

#### 4.3 DESCRIÇÃO DOS TESTES REALIZADOS COM O EQUIPAMENTO

Para a realização dos ensaios na medição do ângulo de contato usando o equipamento construído, optou-se por efetuar um conjunto de leituras variando os corpos de prova e mantendo o líquido sem variação.

Neste caso foi adquirido um conjunto de amostras de garrafas PET (Polietileno Tereftalado) pré-consumo, que receberam tratamento com radiação ultravioleta resultantes de uma pesquisa realizada na própria universidade na área da química de alimentos. Estas placas foram expostas à incidência da referida radiação por tempos variados (de 0 a 96 horas de exposição) e, por consequência

passaram a apresentar propriedades diferentes entre si. Foram separados quatro grupos de placas relacionadas com o tempo de exposição da radiação. Os tempos foram respectivamente de 0; 24; 48, e 96 horas de exposição à radiação.

O processo de descida da microseringa até próximo à superfície testada é gravado pelo software AMCap® (Noeld®, 2014) gerando um arquivo em vídeo. A partir desta animação, são geradas as imagens separadas por meio do aplicativo FreeVideo JPG Converter® (DVDVideoSoft®, 2014). A Figura 11 apresenta uma sequência de imagens usada durante os testes. Nesta ilustração é possível visualizar o momento do depósito da microgota sobre a superfície testada.

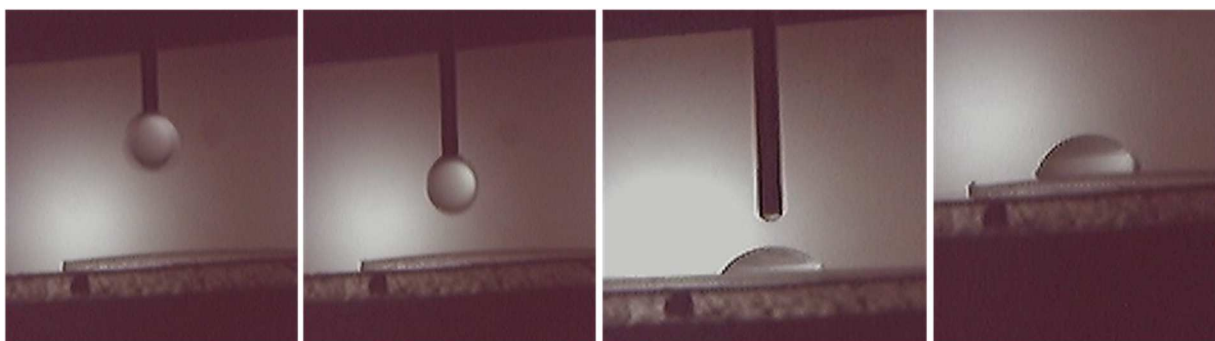


Figura 11 – Registro da sequência para depósito da microgota na superfície testada.

Após este registro, utilizou-se outro software para a leitura dos ângulos de contato naquele ponto (da direita e da esquerda) indicados próximo à projeção da foto da gota (Figura 12). Trata-se do aplicativo ImageJ® (Fiji®, 2014) disponível livremente na Internet. O uso deste aplicativo possibilitou a leitura dos ângulos à direita e à esquerda do ponto do triplo contato. Em seguida faz-se o cálculo da média dos valores encontrados para se ter uma leitura mais aproximada da realidade.

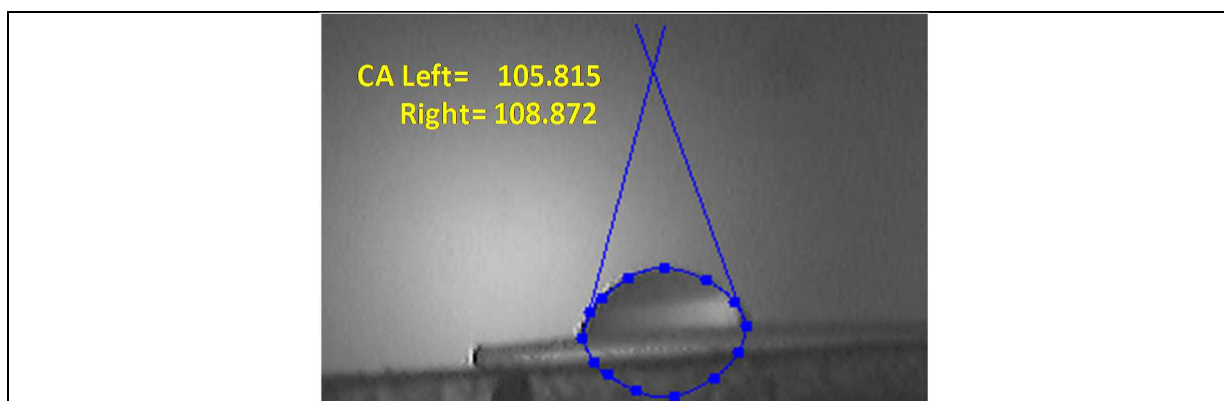


Figura 12 – Registro da leitura dos ângulos de contato da gota na superfície.

Procurou-se durante os ensaios, padronizar alguns elementos envolvidos, sendo estipulado que cada microgota de água destilada teria um volume de 5 $\mu$ L (microlitro) e a temperatura ambiente manter-se-ia próxima de 22°C. Desta forma podem-se eliminar alguns fatores potencialmente causadores de mascaramento nas respostas obtidas, lembrando Motta (2012) ao afirmar que a leitura do ângulo de contato é diretamente afetada pelo volume da gota além de seu diâmetro e também pela densidade do líquido testado.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados das leituras efetuadas nos dois lados de cada microgota (1) Direita e (2) Esquerda. A partir destes valores foram calculadas a sua média aritmética (3) e posteriormente a média das três médias encontradas (4) e o desvio padrão (5) para cada teste da placa de PET nos quatro tempos de exposição de radiação. No APÊNDICE são apresentadas as imagens dos ensaios realizados com todos os tempos de exposição da radiação sobre a superfície testada.

**Tabela 2 – Resultados obtidos com as leituras dos ângulos de contato e cálculo das médias.**

Amostra	Ensaio	Ângulos		Média dos ângulos '(3)	Média dos testes '(4)	$\sigma$ Desvio Padrão '(5)
		Direita '(1)	Esquerda '(2)			
PET 0 hora	1	105.815°	108.872°	107.343°	<b>109,702°</b>	<b>2,045</b>
	2	111.490°	110.434°	110.962°		
	3	111.044°	110.558°	110.801°		
PET 24 horas	1	100.393°	101.202°	100.797°	<b>103,355°</b>	<b>4,685</b>
	2	100.319°	100.681°	100.505°		
	3	108.783°	108.741°	108.762°		
PET 48 horas	1	111.226°	111.901°	111.563°	<b>112,183°</b>	<b>4,199</b>
	2	117.013°	116.301°	116.657°		
	3	105.985°	110.671°	108.328°		
PET 96 horas	1	107.921°	108.429°	108.177°	<b>109,025°</b>	<b>0,876</b>
	2	109.884°	108.062°	108.973°		
	3	109.946°	109.906°	109.926°		

Os dados obtidos com os testes apontaram para uma constância nos resultados lidos dos ângulos de contato nas quatro condições de exposição da radiação nos corpos de prova testados. Desta forma entende-se que o comportamento do dispositivo construído responde às expectativas iniciais com

poucas variações detectadas entre cada leitura. Da mesma forma, as médias obtidas (calculadas) entre cada uma das medidas aponta para uma adequada precisão do equipamento, corroborada pelo desvio padrão encontrado entre cada série de leituras.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O principal objetivo desse trabalho foi apresentar a proposta de um equipamento de pequeno porte e de baixo custo, porém com a precisão necessária para a realização dos referidos ensaios. A execução do protótipo foi benéfica para complementar e exigir que fosse utilizada a experiência vivenciada durante as aulas no decorrer do curso. Um exemplo disso foi a confecção da caixa principal que, por ser feita em aço exigiu que fosse utilizada uma dobradeira industrial, fresadora, furadeira, além do processo de soldagem; todos equipamentos trabalhados em diversas disciplinas durante o curso. Outro exemplo que pode ser citado é exatamente na etapa dos testes, pois pôde-se observar a importância de se analisar o tipo de material que será utilizado na montagem de uma máquina ou equipamento, outro aspecto que também fora abordado em sala de aula quando estudado sobre resistência e tecnologia de materiais.

Quanto aos projetos do equipamento, foi adquirida experiência com software de desenho auxiliado por computador, matéria também vista no decorrer do curso, além da utilização de softwares gratuitos para obtenção de imagens e cálculo dos valores dos ângulos de contato.

Entende-se que tanto o objetivo geral quanto os específicos foram atendidos neste trabalho, principalmente pelas medidas obtidas e com a qualidade das imagens demonstradas durante os ensaios. Os aplicativos escolhidos para a captura e tratamentos das imagens apresentaram bom desempenho e permitiram leituras claras e nítidas as microgotas usadas nos testes.

Os valores encontrados de ângulos de contatos demonstraram que o equipamento possui uma boa precisão e pode ser usado normalmente em ensaios educacionais com bons resultados.

Com a realização dos testes, obteve-se resultados bastante satisfatórios, tanto com relação a qualidade das imagens que ajudaram a fazer com que as medições fossem realizadas com perfeição, como nos próprios resultados dos valores dos ângulos de contato. Esse desempenho faz com que o equipamento tenha confiabilidade e viabilize sua utilização, visto que equipamentos que fazem atividade similar têm custo bastante elevado, porém, de nada adiantaria o equipamento ser de baixo custo e não demonstrar resultados satisfatórios. Outro

ponto a ser citado, é que o protótipo será utilizado didaticamente, principalmente em aulas de química, área essa que a análise do ângulo de contato é de muita relevância.

Apesar de o protótipo obter êxito e atender às expectativas, já se pensa em formas alternativas de se montar o equipamento, melhorando sua funcionalidade e praticidade. Vale ressaltar que esse trabalho é um protótipo, o primeiro desenvolvido e que melhorias estão sendo pensadas e estudadas para que, principalmente didaticamente o equipamento seja de grande utilidade.

Com a conclusão do trabalho, foi verificado o quão interessante é estudar áreas alternativas, criar e desenvolver projetos das mais diversas áreas, o que enriquece o conhecimento e a experiência do profissional de Tecnologia em Manutenção Industrial. Certamente que trabalhos futuros serão realizados, tendo em vista que esta primeira experiência foi bastante satisfatória, com resultados dentro do esperado e conhecimentos adquiridos de grande relevância.

## REFERÊNCIAS

ALFACONNECTION. **Fisicoquímica FQM**. Disponível em < [http://alfaconnection.net/pag\\_avsf/fqm\\_0101.htm](http://alfaconnection.net/pag_avsf/fqm_0101.htm)>, acesso em 10/ago/2014.

ANDREUCCI, Ricardo. Ensaio por Líquidos Penetrantes. Associação Brasileira de Ensaio Não Destrutivos. ABENDE. São Paulo. SP. 2003.

BRISOLARI, André. **Estudo da Molhabilidade em madeiras tropicais ou de reflorestamento por medidas de ângulo de contato e de permeabilidade**. Dissertação de Mestrado. 2008. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. SP. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-17062009-145256/pt-br.php>>. Acesso em 12/set/2014.

BURKARTER, Ezequiel. **Construção de Imagens por Padrões Hidrofóbico Hidrofílico**. Dissertação de Mestrado. 2006. Universidade Federal do Paraná. UFPR. Curitiba, PR. Disponível em < <http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/handle/1884/4334> >. Acesso em 22/set/2014.

CARDOSO, Marcos Roberto. **Microestruturação de superfícies poliméricas a laser: fabricação: fabricação de superfícies superhidrofóbicas**. Dissertação de Mestrado. 2010. Instituto de Química de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. SP. Disponível em < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-06012011-155402/pt-br.php> >. Acesso em 14/ago/2014.

DVD VIDEO SOFT. **FreeVideoJPG Converter**. Disponível em < <http://www.dvdvideosoftware.com/br/freevideotojpg>>. Acesso em 20/ago/2014.

FIJI. Software **ImageJ**. Disponível em < <http://imagej.net/Fiji> >, acesso em 21/ago/2014.

FONTANELLA, César Augusto. **RECOBRIMENTOS HIDROFÓBICOS PARA USO EM ISOLADORES PORCELÂNICOS DE ALTA TENSÃO**. Dissertação de Mestrado. 2007. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis, SC. Disponível em < <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/90773/239603.pdf?sequence=1>>. Acesso em 30/out/2014.

IOST, Cristina A. R., RAETANO, Carlos G. **TENSÃO SUPERFICIAL DINÂMICA E ÂNGULO DE CONTATO DE SOLUÇÕES AQUOSAS COM SURFATANTES EM SUPERFÍCIES ARTIFICIAIS E NATURAIS**. 2010. Disponível em < <http://biblioteca>.

universia.net/html\_bura/ficha/params/title/tens%C3%A3o-superficial-din%C3%A2mica-%C3%A2ngulo-contato-solu%C3%A7%C3%B5es-aquosas-com-surfatantes-em/id/53264912.html>. Acesso em 12/out/2014.

KEHRWALD, André Michel. **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ENERGIA LIVRE SUPERFICIAL NA MOLHABILIDADE E ADESÃO DE REVESTIMENTOS À BASE DE FLUORSILANOS**. Dissertação de Mestrado. 2009. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Florianópolis, SC. Disponível em < <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/106636/276398.pdf?sequence=1>>. Acesso em 21/out/2014.

LUZ, A. P., RIBEIRO, S., PANDOLFELLI, V. C. **Artigo revisão: Uso da molhabilidade na investigação do comportamento de corrosão de materiais refratários**. Disponível em <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132008000200007&script=sci\\_abstract&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132008000200007&script=sci_abstract&tlng=pt)>. Acesso em 2/set/2014.

MOTTA, Franciane. **Caracterização da condutividade térmica, viscosidade dinâmica e ângulo de nanofluidos baseados em partículas de alumina-gama em água**. Dissertação de Mestrado. 2012. Universidade de São Paulo. São Paulo. SP. Disponível em < <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18147/tde-20062012-161828/pt-br.php> >. Acesso em 2/out/2014.

NOELD. Software **AMCap**. Aplicativo de captura de imagens. Disponível em < <http://www.noeld.com/programs.asp?cat=video#AMCap>>, acesso em 21/1go/2014.

OGEDA, Thais Lucy. **Físico-Química Experimental – Notas de aula**. Instituto de Química. Universidade de São Paulo. 2010. São Paulo, SP. Disponível em < [http://www2.iq.usp.br/pos-graduacao/images/documentos\\_pae/1sem2010/fisico\\_quimica/thais.pdf](http://www2.iq.usp.br/pos-graduacao/images/documentos_pae/1sem2010/fisico_quimica/thais.pdf)>. Acesso em 4/out/2014.

SANTOS, Tiago Manoel de Oliveira. **Avaliação das características anti-impressões digitais em aços inoxidáveis coloridos revestidos com nanofilmes de óxidos**. Dissertação de Mestrado. 2013. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto. MG. Disponível em < <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3258>>. Acesso em 20/set/2014.

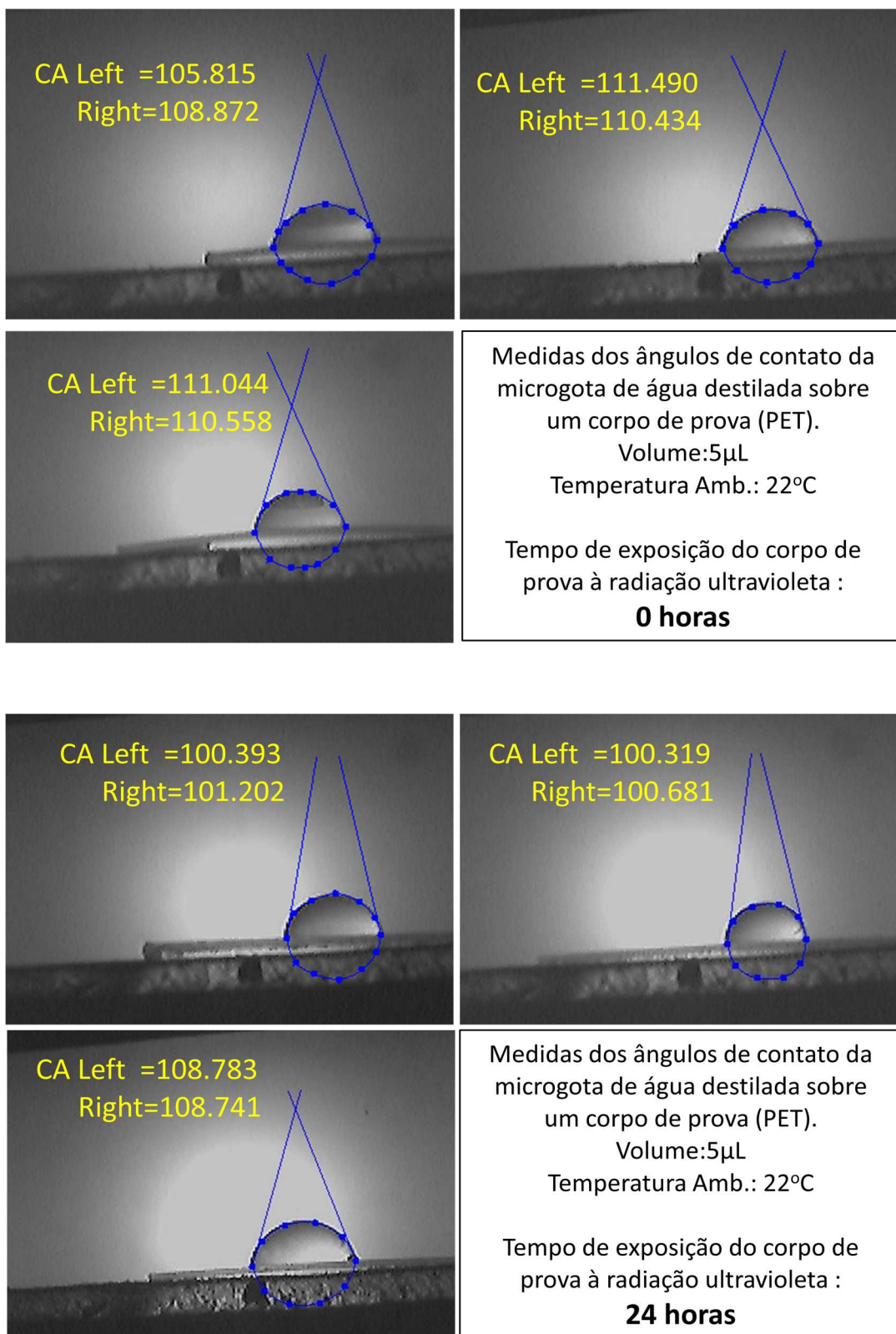
SOARES, Ana Paula Justino. **Aplicação de Microemulsão na Recuperação de Petróleo de Reservatórios Carbonáticos**. Dissertação de Mestrado. 2012. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Engenharia Química. Natal. RN. Disponível em < [http://btdt.ufrn.br/tde\\_arquivos/12/TDE-2012-10-01T231400Z-4527/Publico/AnaPJS DISSERT\\_PARCIAL.pdf](http://btdt.ufrn.br/tde_arquivos/12/TDE-2012-10-01T231400Z-4527/Publico/AnaPJS DISSERT_PARCIAL.pdf) >. Acesso em 22/set/2014.

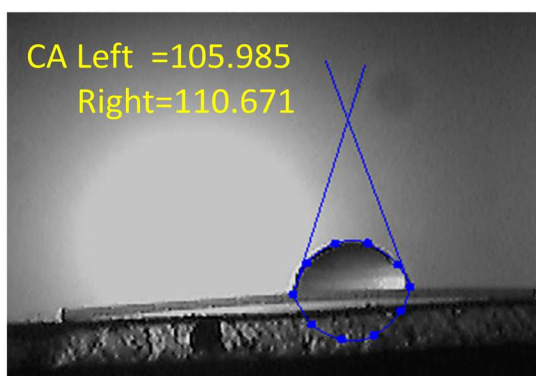
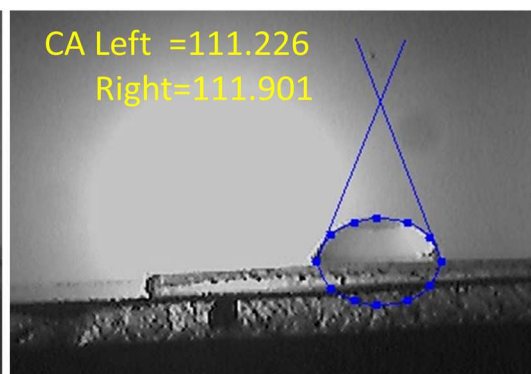
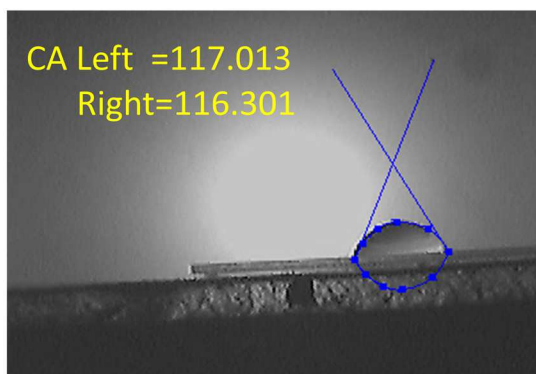
VOGELMANN, Eduardo S., REICHERT, José M., PREVEDELLO, Juliana, BARROS, Cláudia A. P. de. QUADROS, Fernando L. F. de, AGUIAR, Bruno R. P. de. **OCORRÊNCIA DE HIDROFOBICIDADE EM UM PLANOSSOLO SUBMETIDO A QUEIMADAS**. 2010. Disponível em <[http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao\\_Resumos/XXXIII\\_8.pdf](http://www.fisicadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Resumos/XXXIII_8.pdf)>. Acesso em 28/set/2014.

WEISS, Almiro. **SOLDAGEM**. Curitiba, PR. Editora do Livro Técnico, 2010.

## APÊNDICE

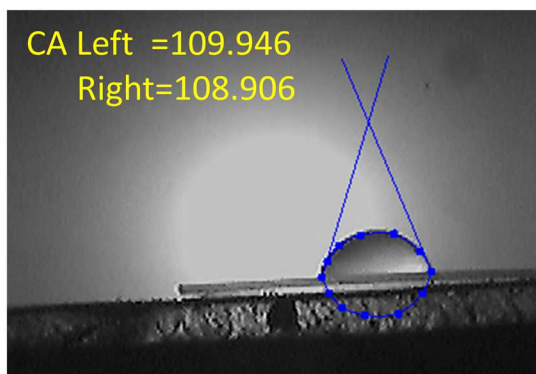
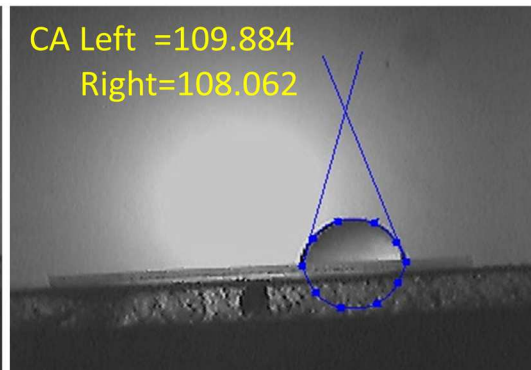
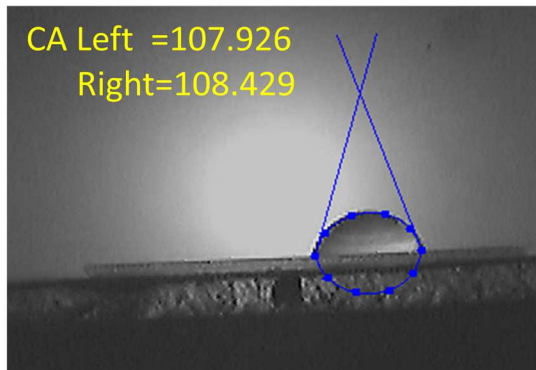
## REGISTROS DOS TESTES REALIZADOS COM O EQUIPAMENTO PROJETADO





Medidas dos ângulos de contato da  
microgota de água destilada sobre  
um corpo de prova (PET).  
Volume:5 $\mu$ L  
Temperatura Amb.: 22°C

Tempo de exposição do corpo de  
prova à radiação ultravioleta :  
**48 horas**



Medidas dos ângulos de contato da  
microgota de água destilada sobre  
um corpo de prova (PET).  
Volume:5 $\mu$ L  
Temperatura Amb.: 22°C

Tempo de exposição do corpo de  
prova à radiação ultravioleta :  
**96 horas**