USP

Campus de São Carlos

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE HIDROFOBICIDADE EM MATERIAIS POLIMÉRICOS

Autor: Anderson Marques de Santana

Orientador: Prof. Titular Ruy Alberto Corrêa Altafim

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA PARA MEDIÇÃO DE HIDROFOBICIDADE EM MATERIAIS POLIMÉRICOS

Anderson Marques de Santana

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: **Prof. Tit. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim**

DEDALUS - Acervo - EESC
31100052135

São Carlos,
2004

Biblioteca

Class. TESE-EESC
Cutt. 5324 J
Tombo T089/05
Sysno 1443963

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento da
Informação do Serviço de biblioteca - EESC/USP

S232d

Santana, Anderson Marques de
Desenvolvimento de sistema para edição de hidrofobicidade em materiais poliméricos / Anderson Marques de Santana. -- São Carlos, 2004.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.
Área : Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Tit. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim.

1. Hidrofobicidade. 2. Isolação polimérica. 3. Medição. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANDERSON MARQUES DE SANTANA**

Dissertação defendida e julgada em 16-12-2004 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Titular **RUY ALBERTO CORRÊA ALTAFIM (Orientador)** Aprovado
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Prof. Associado **LUIZ GONÇALVES NETO** Aprovado
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

José Augusto Marcondes Agnelli
Prof. Dr. **JOSÉ AUGUSTO MARCONDES AGNELLI** Aprovado
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Prof. Associado **HOMERO SCHIABEL**
Vice-Coordenador em exercício do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Profa. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Agradecimentos

Aos meus pais Natal Joviniano de Santana e Jaguaraci Marques de Santana por terem iniciado este projeto mesmo antes que eu fosse capaz de vislumbrá-lo. Estas são as pessoas para as quais nenhum texto seria capaz de expressar a minha gratidão ao tamanho amor que me dedicaram.

Ao meu professor e orientador Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim pelo acolhimento, estímulo e orientação excepcionais sem os quais este trabalho não ocorreria. Enfim, o professor Ruy acrescentou a meu entendimento uma dimensão da palavra mestre.

Aos meus queridos irmãos Emerson Marques de Santana e Adria Verusca Marques de Santana pela fé que eles têm em minha capacidade e a conseqüente motivação que ela move em mim. Sei que brilha em seus olhos de entusiasmo agora um brilho tão intenso quanto nos meus.

Às minhas famílias patema e matema pela referência que são em minha vida, pelo exemplo diário e contínuo, por serem a minha história viva, por serem meu porto seguro.

Aos meus velhos amigos que compartilharam comigo os encantos e desencantos associados à prática do desafio aos limites ilusoriamente apresentados pela vida.

Aos meus novos amigos por terem sido a minha família durante este período de trabalho.

À minha companheira e amiga Roberta Fernandes de Oliveira pelos momentos nos quais era o ouvido mais atencioso e da qual ouvia as palavras mais serenas.

À minha nova família paulista pelo acolhimento e carinho.

À Dra. Cacilda Ribeiro Murakami pela presteza com a qual me auxiliou por todo esse período de trabalho.

Aos Engenheiros João Godoy e Hermano, meus novos velhos amigos.

Aos meus amigos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica pelo modelo profissional, humano e fratemo de relacionamento.

À CAPES pela viabilização financeira do trabalho.

Por fim, se houver de ser irrogada culpa por alguma ausência neste agradecimento que seja à minha mente ocupada e não ao meu coração profundamente grato a todos.

Resumo

SANTANA, A. M. (2004). *Desenvolvimento de sistema para medição de hidrofobicidade em materiais poliméricos.* Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Isoladores poliméricos têm crescentemente competido com os isoladores cerâmicos nas aplicações em sistemas elétricos de potência e é esperado que dominem as aplicações externas em alta tensão em um futuro próximo. Entretanto, há ainda algumas questões pendentes acerca do envelhecimento dos polímeros sobre estresse elétrico e climático. Dessa forma, a estabilidade da hidrofobicidade deve ser medida para estender o tempo de vida do isolador. Por esta razão, o desenvolvimento de um sistema de medição da degradação tem se tornado um fator relevante. Este trabalho apresenta e discute o desenvolvimento de um sistema para avaliação da hidrofobicidade em materiais poliméricos. São também discutidos os testes realizados em novas resinas derivadas do óleo de mamona.

Palavras-chave: hidrofobicidade; isolação polimérica; medição

Abstract

SANTANA, A. M. (2004). *Development polymeric material hydrophobicity estimation system.* M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

Polymeric isolators have been competing increasingly with ceramic isolators in electric power system applications and is expected do dominate in the near future high voltage outdoor applications. However, there are still some outstanding questions regarding aging of polymers under climatic and electrical stresses. In this way, hydrophobicity has to been measured for to extend the life time of these insulators. For these reasons, the development of a degradation measurement system has become a relevant factor. This work presents and discusses the development of a hydrophobicity estimation system to polymeric materials. Also discussed are the tests carried out on the new castor oil resin.

Keywords: hydrophobicity; polymeric insulation; measurement

SUMÁRIO

AGRADECIMENTO i
RESUMO ii
ABSTRACT iii
SUMÁRIO iv
1 INTRODUÇÃO 1
2 ESTADO DA ARTE 6
2.1 Introdução 6
2.2 Ângulo de Contato 8
2.3 Medição do Ângulo de Contato. 10
2.3.1 Rugosidade Superficial, Ângulos Estáticos e Ângulos Dinâmicos 12
2.3.2 Procedimentos Experimentais de Medição 13
2.4 Medições Manuais e Automáticas. 14
2.5 Medição do Ângulo Estático. 16
2.6 Medição dos Ângulos de Avanço e Retrocesso 18
2.6.1 A Técnica Da Gota Séssil 20
2.6.2 A Técnica da Plataforma Girante 21
2.7 Inspeção Visual. 21
2.7.1 Índices do Aspecto das Gotas 23
2.7.2 Padrões 24
2.7.3 Procedimentos e Equipamentos 27
3 SISTEMA PROPOSTO 30
3.1 O Sistema 31
3.2 Hardware e Software com Versatilidade 33
3.3 Processamento das Imagens 35
3.3.1 Detecção de Bordas 37
3.3.2 Classificação por Área 45
3.3.3 Determinação da Referência Horizontal 49

3.3.4 Parametrização da Gota e Medição do Ângulo de Contato 52
4 RESULTADOS 56
4.1 Metodologias de Calibração 57
4.2 Ensaios com Imagens Sintéticas 58
4.3 Ensaios com Imagens Reais de Corpos Conhecidos 60
4.4 Classificação das Resinas Poliuretanas 63
5 CONCLUSÕES 66
5.1 Quanto à Aplicabilidade das Técnicas de Processamento Digital de Imagens na Avaliação da Hidrofobicidade Superficial 67
5.2 Quanto ao Nível de Hidrofobicidade das Resinas Poliuretanas Derivadas do Óleo de Mamona 69
5.3 Quanto à Validação do Sistema 71
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 74

Capítulo I: Introdução

Indústrias e centros urbanos demandam suprimento contínuo de energia elétrica. Neste contexto, interrupções no abastecimento constituem evento depreciativo de sua qualidade. Dentre os fatores que impactam sobre a confiabilidade dos sistemas de distribuição destacam-se as falhas na isolação. Esse é o motivo pelo qual se tem verificado nas últimas décadas grande dedicação internacional às pesquisas referentes à utilização de novos materiais para isolação externa em alta tensão [1, 2, 3]. Os polímeros utilizados na confecção de isoladores são um bom exemplo.

A utilização de isolantes poliméricos em aplicações elétricas tem grande tradição. Na terceira década do século passado as primeiras resinas poliméricas foram utilizadas em aplicações de baixa tensão. Nos anos 60 e 70 materiais como o poliuretano, as resinas epóxi e o silicone foram introduzidos nas aplicações de média e alta tensão [4]. Em alta tensão, a utilização dos polímeros justifica-se pelo seu melhor comportamento elétrico em condições atmosféricas desfavoráveis. Por

conta das pequenas forças intermoleculares de London que predominam nas superfícies compostas essencialmente por grupos metílicos (*methyl groups*) [5], os polímeros apresentam baixa energia superficial. Com efeito, apresentam uma grande repulsividade à água sobre sua superfície.

Denominada **hidrofobicidade**, esta propriedade dos polímeros expressa-se pela oposição ao estabelecimento de filme de água sobre a superfície do isolador. Quando a superfície do dispositivo é molhada, a água tende a formar gotas discretas que não molham a superfície. Assim, apresentando alta resistência, a superfície hidrofóbica, por não constituir caminho para a corrente elétrica, garante ao isolador maiores tensões de ocorrência de descargas disruptivas [6,7].

A hidrofobicidade dos polímeros usados em isolação externa, portanto, em oposição a hidrofilicidade dos tradicionais vidro e porcelana, confere aos mesmos maiores níveis de suportabilidade, permitindo a confecção de isoladores mais compactos e, conseqüentemente, mais baratos. Em [8], por exemplo, verifica-se diferenças de 30% na tensão de *flashover* sob chuva e de 60% sob névoa limpa em isoladores idênticos exceto pela cobertura de material polimérico no que apresentou os melhores resultados.

Isto tem apresentado os polímeros como a solução mais viável para isolação externa em alta tensão. Na América do Norte, por exemplo, em 1999 os isoladores poliméricos já respondiam por cerca de 70% dos novos isoladores instalados [1]. Seu uso tem sido vasto também na Europa e na Austrália [2]. Até mesmo no Japão, onde importantes linhas de transmissão ficam próximas à costa, os polímeros tem sido utilizados [3]

Entretanto, como desvantagens os polímeros experimentam envelhecimento mais intenso que o vidro e a porcelana [9]. Ainda que os isoladores poliméricos apresentem a superfície originalmente hidrofóbica, em serviço eles verificam a perda total ou parcial desta propriedade [7, 10, 11]. Fenômenos como os arcos de banda seca, o contato com a água, o depósito de contaminantes [10] e o efeito corona [5] promovem a transição parcial ou até mesmo total da superfície para estados hidrofílicos [12]. Dado o comportamento particularmente dinâmico de propriedades superficiais do polímero, ainda que seu emprego na isolação em alta tensão cresça ano após ano, nem mesmo testes padrão foram definidos [1]. A influência da hidrofobicidade sobre a suportabilidade do isolador inviabiliza até mesmo o emprego dos ensaios tradicionalmente aplicados aos isoladores cerâmicos [1].

A diminuição dos níveis de hidrofobicidade superficial, conforme mencionado sucintamente acima, implica na diminuição dos níveis de suportabilidade do dispositivo. Por isso, em muitas situações, os isoladores poliméricos são projetados para o pior caso [9]. Isto demonstra que os benefícios do uso dos materiais poliméricos em substituição ao vidro e à porcelana ainda não são plenamente explorados. Isto qualifica como sendo de vital importância o conhecimento do estado superficial dos isoladores. Esta demanda reflete-se nas pesquisas recentes cuja essência são as novas técnicas para sensoriamento remoto de isoladores quanto a seu estado superficial [13, 14, 15, 16 e 17].

Assim sendo, a pesquisa acerca da isolação polimérica tem sido movida por uma demanda real e crescente. Ela justifica-se até mesmo sob o ponto de vista

econômico conforme se pode perceber pela atuação significativa de empresas privadas como a STRI [18].

No caso específico das plantas de alta tensão, o envelhecimento implica em problemas operacionais. Ao passo em que é desejável pelo aspecto econômico que se mantenha a planta em funcionamento pelo período de tempo mais longo possível, à medida que a idade da planta aumenta, a qualidade da isolação decai [13]. No caso das linhas de transmissão, por exemplo, em acréscimo às sobretensões de origens internas e externas, a severidade à qual a isolação é submetida em serviço é intensificada por fatores ambientais como chuva, névoa e depósito de contaminantes. Em algumas partes do mundo, a contaminação (e sua diluição pela chuva) tem sido o maior impedimento para o suprimento contínuo de energia elétrica [9]. A conjunção destes fatores com a diminuição da suportabilidade resultante da diminuição dos níveis de hidrofobicidade implica no aumento do risco de ocorrência de faltas decorrentes de ruptura da isolação. Disto decorre que **a manutenção de um suprimento confiável de energia e a utilização plena da planta requer o conhecimento do estado da isolação** [13]. Por isso, deve-se dispor de técnica capaz de promover essa avaliação [9]. Portanto, métodos convenientes de avaliação de hidrofobicidade devem ser desenvolvidos como base para futuras investigações.

O objetivo deste trabalho é desenvolver ferramenta para avaliação da hidrofobicidade em materiais poliméricos. Dada a variedade de montagens experimentais possíveis, o sistema deve contemplar os aspectos comuns das abordagens e ser versátil a ponto de tolerar suas especificidades. Com o desenvolvimento deste trabalho se terá implementado ferramenta para a avaliação

da hidrofobicidade e sua disponibilização em suporte a outras pesquisas desenvolvidas pelo grupo de pesquisa em alta tensão.

Com o objetivo de documentar a proposta da pesquisa de forma coerente o texto foi dividido em seis capítulos. Neste capítulo, o primeiro deles, foram apresentados conceitos preliminares da pesquisa. Diluíram-se ao longo do texto os objetivos e justificativas. Procurou-se aqui contextualizar a pesquisa apresentando a relevância dos polímeros na alta tensão.

No capítulo 2 será tratado o estado da arte. Serão apresentadas as técnicas disponíveis para a medição da hidrofobicidade e discutidas suas particularidades. No capítulo 3 será apresentado o sistema implementado e serão descritas suas especificidades. No capítulo 4, serão apresentadas os resultados obtidos. No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões da pesquisa. No capítulo 6, por fim, serão apresentadas as referências bibliográficas.

Capítulo II:

Estado da Arte.

2.1 Introdução.

Neste capítulo serão tratadas as técnicas de medição de hidrofobicidade por análise macroscópica. Serão descritas suas particularidades com foco na análise das incertezas associadas. À medida que a abordagem contemplar detalhes de implementação também serão analisados os custos material e computacional.

As técnicas e os registros de seus respectivos usos serão aqui tratados com o objetivo de fundamentar a determinação de parâmetros de implementação do sistema e contextualizar o trabalho no cenário mais amplo das pesquisas

congêneres. Com essa proposta, por similaridade de princípio e uso serão aqui descritas as técnicas de avaliação de hidrofobicidade que têm por base a medição de ângulos de contato e a inspeção visual do cenário estabelecido pela água sobre a superfície. Mais especificamente, serão descritas as **medições dos ângulos de contato por goniometria** e a **inspeção visual segundo normalização STRI**.

A menos das pesquisas sobre novas técnicas de avaliação da hidrofobicidade [14, 15, 16, 19 e 21] e parte das pesquisas na qual avalia-se a mobilidade de grupos moleculares superficiais [20], a avaliação macroscópica da hidrofobicidade em isolação polimérica é feita invariavelmente por estas duas técnicas [17]. Disto decorre que a limitação do foco a estas técnicas não implica em perda de generalidade.

Ao passo em que a compreensão dos procedimentos e fenômenos assim requerer, serão discutidos tópicos teóricos que não pertencem à base comum do curso de engenharia elétrica. Já ao próximo tópico será apresentado o ângulo de contato e, ao longo do texto, serão diluídas outras considerações teóricas. Sua relevância destaca-se sobremaneira como substrato teórico da análise dos princípios de medição e das incertezas associadas.

2.2 Ângulo de Contato

Conforme mencionado sucintamente no capítulo anterior, a hidrofobicidade de uma superfície influencia a acomodação da água sobre ela. A descrição fenomenológica desta propriedade dos polímeros se dá pela observação da relação entre os níveis de energia associados às interfaces entre a superfície e o líquido e entre o líquido e o ar. Este tópico será dedicado à apresentação do mecanismo pelo qual estes níveis de energia definem níveis de hidrofobicidade e o fator de formato utilizado na sua quantificação, o ângulo de contato.

Em superfícies mais hidrofóbicas, maior é a energia associada à interface líquido-sólido. Como resultado, o equilíbrio na acomodação de uma gota sobre a superfície se dá, ao ocorrer por minimização da energia total associada, por uma menor área de contato entre o líquido e a superfície e uma maior área de contato entre o líquido e o ar (figura 2.1 **a**). Analogamente, menores níveis de hidrofobicidade e, conseqüentemente, menores energias associadas à interface líquido-sólido implicam em uma configuração de equilíbrio para a gota com maiores áreas de contato com a superfície e menores áreas de contato com ar (figura 2.1 **b**).

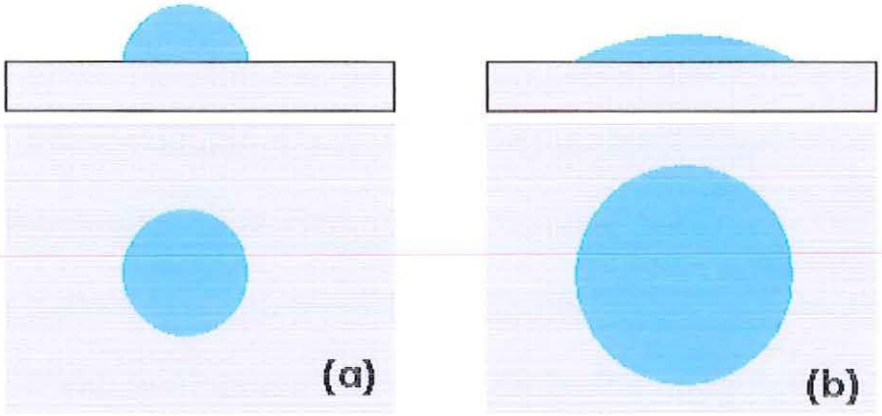


Figura 2.1 – Equilíbrio de uma gota de volume constante V sobre uma superfície mais hidrofóbica (a) e sobre uma menos hidrofóbica (b).

A intensidade com a qual o material opõe-se ao espalhamento da água sobre sua superfície relaciona-se com a forma com a qual o líquido acomoda-se sobre ela. Em outras palavras, o cenário estabelecido por gotas de água sobre uma superfície é influenciado pelo seu nível de hidrofobicidade. O parâmetro do formato mais utilizado na quantificação da acomodação da água sobre a superfície é o ângulo formado na interface entre o sólido, o líquido e o ar (figura 2.2). Este é chamado ângulo de contato.

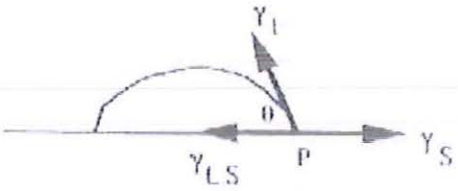


Figura 2.2 – Ângulo de contato e diagrama de forças interfaciais.

Conforme ilustrado na Figura 2.1, a maiores níveis de hidrofobicidade correspondem maiores ângulos de contato. Este é o princípio utilizado na avaliação de hidrofobicidade por medição do ângulo de contato. O próximo tópico tratará mais detalhadamente do princípio e das técnicas de medição.

2.3 Medição do Ângulo de Contato

Qualitativamente, a relação entre a hidrofobicidade e o ângulo de contato já havia sido enunciada por Young em 1805 [17, 18]. Entretanto, a relação entre os níveis de hidrofobicidade e propriedades dos materiais foi enunciada quantitativamente por Dupré em seu trabalho sobre adesão só em 1869. Ela define algebricamente a relação entre os níveis de tensão superficial (do sólido γ_S, da interfácie γ_{LS} e do líquido γ_L) e os ângulos de contato no que se costuma chamar de equação de Young-Dupré [17,18] ou, mais simplificadamente, equação de Young (abaixo).

$$\gamma_S = \gamma_{LS} + \gamma_L \cos(\theta) \tag{2.1}$$

A medição do ângulo de contato é a técnica mais utilizada no estudo da hidrofobicidade em isoladores poliméricos. Isto se deve à melhor conjunção apresentada entre os fatores versatilidade e precisão. Por conta da simplicidade dos equipamentos envolvidos e procedimentos associados, sua aplicabilidade ao

estudo da isolação polimérica é justificada mesmo quando consideradas suas limitações particulares [23].

Quanto ao princípio, a medição do ângulo de contato propriamente dita pode ocorrer de duas formas básicas. A medição pode ser goniométrica ou tensiométrica. A medição goniométrica caracteriza-se pela medição direta do ângulo de contato. A medição tensiométrica, por sua vez, é uma forma de medição indireta. Na medição tensiométrica o ângulo de contato é calculado a partir da medição de forças que atuam na amostra em condições específicas e cujas intensidades preservam relação biunívoca com o nível de hidrofobicidade do material. Dadas as limitações particulares das técnicas tensiométricas o texto será aqui restrito à apresentação das metodologias goniométricas.

Os tópicos que se seguem tratarão das metodologias experimentais de medição goniométrica. Com a proposta de apresentar com o destaque merecido a dependência que os ângulos reservam à rugosidade e a conseqüente influência na incerteza da medição, o próximo tópico será dedicado à apresentação de algumas considerações teóricas pertinentes. Os tópicos seguintes serão dedicados às medições goniométricas propriamente ditas e, no último tópico, se concluirá a respeito da aplicabilidade da técnica ao estudo dos isoladores poliméricos.

2.3.1 Rugosidade Superficial, Ângulos Estáticos e Ângulos Dinâmicos.

O depósito de uma gota sobre uma superfície perfeitamente lisa, homogênea e plana implica no estabelecimento de uma configuração à qual corresponde a menor energia associada. Dessa forma, o ângulo de contato formado relaciona-se com os níveis de tensão superficiais segundo enunciado pela equação 2.1. Já em situações práticas, as condições ideais pressupostas na utilização desta equação não ocorrem. Por isso, o ângulo estabelecido pode não satisfazer a equação de Young-Dupré.

Superfícies reais não são perfeitamente lisas ou homogêneas. Seja em decorrência dos processos de fabricação ou do desgaste natural, as superfícies apresentam rugosidade e heterogeneidade. Como resultado, o equilíbrio da gota sobre a superfície pode não ser atingido pelo seu simples depósito. A interação entre saliências microscópicas e moléculas do líquido resulta no surgimento de forcas resistivas que se opõem ao avanço ou retrocesso do líquido sobre a superfície [24, 25]. Essa resistência repercute no formato da gota pelo estabelecimento de uma configuração metastática. Situação na qual não se estabelece o equilíbrio estável e não vale a equação 2.1.

O ângulo estabelecido pelo simples depósito da gota sobre a superfície é chamado de ângulo de contato estático. Ainda que a ocorrência dos estados metastáticos mencionados no parágrafo anterior possa desqualificar o ângulo de contato estático como indicativo dos níveis de tensão superficial descritos pela

modelagem de Young. A grande simplicidade de implementação da técnica justifica sua utilização no estudo da isolação polimérica.

O procedimento adotado pelas abordagens goniométricas de medição de hidrofobicidade em solução ao problema dos estados metastáticos é a medição de ângulos de contato dinâmicos. Ângulos de contato dinâmicos são os ângulos estabelecidos na iminência do avanço (ângulo de avanço) e do retrocesso (ângulo de retrocesso) da interface da gota sobre a superfície. A custo do aumento da complexidade dos equipamentos utilizados obtém-se com estes procedimentos resultados cuja representatividade em relação aos níveis de rugosidade superficial e de hidrofobicidade é incrementada. Os próximos tópicos descreverão mais detalhadamente cada uma das abordagens experimentais.

2.3.2 Procedimentos Experimentais de Medição

A medição goniométrica do ângulo de contato é a mais utilizada no estudo da isolação polimérica. Dentre as motivações de seu uso destaca-se a simplicidade dos equipamentos envolvidos e procedimentos associados.

Apesar do grande uso que a técnica de medição dos ângulos de contato tem no estudo da isolação polimérica, ainda não existe sequer um padrão internacional que defina o ensaio. Isto se deve à grande complexidade que haveria de ter a norma para contemplar a grande variedade de fenômenos físicos e químicos envolvidos na interação entre o líquido e o polímero [7]. Por isso,

metodologias de medição são definidas em função de especificidades do estudo ao qual elas se prestam.

Genericamente, as medições dos ângulos de contato podem ser manuais ou automáticas. Podem ainda restringir-se à avaliação dos ângulos estáticos ou incorporar alguma complexidade na avaliação dos ângulos dinâmicos. Os próximos tópicos tratarão de cada uma delas separadamente.

2.4 Medições Manuais e Automáticas

Na medição manual, mediante amplificação óptica o ângulo é medido por um operador através de goniômetros. Na medição automática, o perfil da gota é adquirido por câmera e a medição do ângulo ocorre por processamento digital da imagem. As medições manuais e automáticas do ângulo de contato, portanto, diferem essencialmente na forma com a qual o perfil da gota é analisado. Na medição manual, o operador interpreta a imagem ampliada ao passo em que, na medição automática, a imagem é adquirida por câmera e posteriormente processada em microcomputadores. As figuras 2.3 e 2.4 apresentam equipamentos genéricos utilizados nas medições manuais e automáticas respectivamente.

O equipamento apresentado na Figura 2.3 pode ser descrito funcionalmente como sendo constituído por: uma base (b) na qual fixa-se a amostra; um sistema de amplificação óptica (c) com o qual o operador identifica o contorno do perfil da

gota contrastado pela fonte luminosa (a); o chassi (d) com o qual se ajusta as posições relativas dos elementos do sistema e, a escala (d) onde se efetua a leitura.

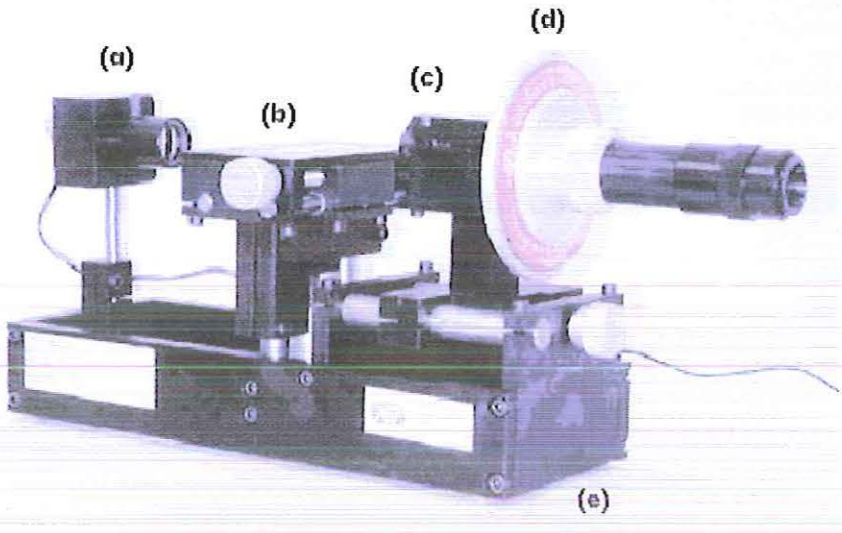


Figura 2.3 – Equipamento utilizado na medição manual do ângulo de contato

O equipamento genérico utilizado na medição automático e apresentado na Figura 2.4, por sua vez, é formado por: um anteparo iluminado (a) que oferece contraste para o perfil da gota depositada sobre a amostra que é sustentada pela base (b). A câmera (c) que, mediante ajuste das posições com controles no chassi (d), adquire a imagem da gota e a disponibiliza para processamento em microcomputador.

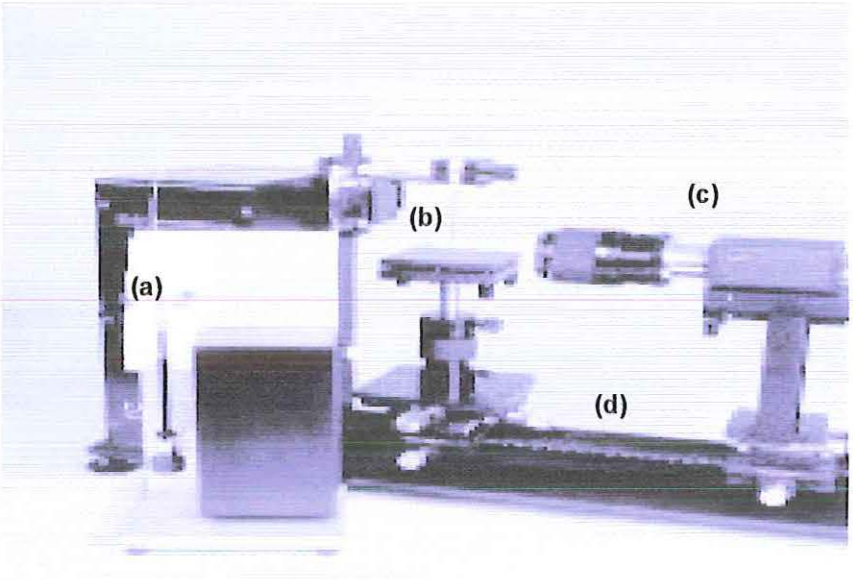


Figura 2.4 – Equipamento utilizado na medição automática do ângulo de contato

Seja a medição manual ou automática, ela pode restringir-se à análise dos ângulos estabelecidos pelo simples depósito da gota sobre a superfície ou ocorrer por arranjos experimentais que permitam a observação dos ângulos estabelecidos na iminência do avanço ou retrocesso da gota. Os tópicos subseqüentes tratarão de cada uma delas separadamente.

2.5 Medição do Ângulo Estático

Ângulo de contato estático é o estabelecido pelo simples depósito da gota sobre a superfície. Assume-se que o equilíbrio estável é atingido e efetua-se a

medição do ângulo tomando-o como indicativo dos níveis de hidrofobicidade conforme enuncia a equação 2.1.

A medição do ângulo estático é a maneira mais elementar de avaliar a hidrofobicidade por goniometria. Associada à simplicidade da técnica existem, entretanto, devido à influência exercida pela rugosidade superficial, incertezas que podem desqualificar os resultados obtidos como indicadores de níveis de hidrofobicidade.

Dada a possibilidade de ocorrência de um estado metastático, o ângulo de contato estabelecido pode não relacionar com os níveis de tensão superficial conforme modelado pela equação 2.1. A interpretação dos resultados passa a não ser elementar sendo necessário que se leve em consideração parâmetros não contemplados pela modelagem de Young. São utilizados artifícios com o objetivo de minimizar os efeitos da rugosidade. Destacam-se entre eles o controle do volume das gotas e a tomada das medições em pontos distintos da superfície.

Em [10], por exemplo, com o objetivo de minimizar a influência da rugosidade foram utilizadas gotas de volume constante (50μl) e foram tomadas medidas em três pontos distintos da superfície. A figura 2.5 abaixo ilustra a montagem.

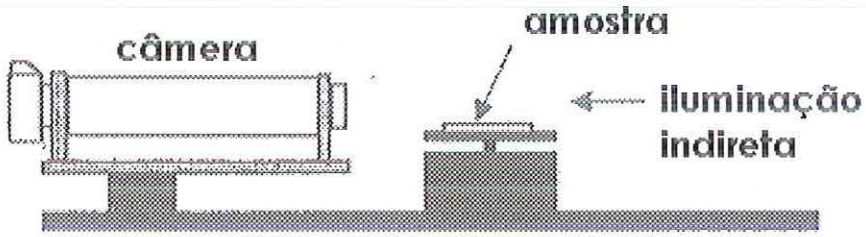


Figura 2.5 [10]– Montagem experimental para medição de ângulo de contato estático [19]

Em [7] descreve-se a utilização de gotas com tamanhos variados (5µl, 10µl e 20µl). Em [8], por sua vez, faz-se referência à forma cuidadosa de deposição da gota e ao controle de seu volume.

Quando levadas em consideração as limitações da técnica seu uso justifica-se somente pela sua simplicidade. O próximo tópico tratará das técnicas de medição dos ângulos dinâmicos.

2.6 Medição dos Ângulos de Avanço e Retrocesso

Em uma gota de líquido depositada sobre uma superfície horizontal, plana e homogênea, a adição de um pequeno volume do líquido implica no avanço da fronteira do líquido e o estabelecimento do mesmo ângulo de contato inicial. Inversamente, a retirada de um pequeno volume do líquido implica em um retrocesso da fronteira da gota e o restabelecimento do mesmo ângulo de contato. Em acordo ao que define a equação 2.1, o ângulo de contato estabelecido é sempre tal que, ao corresponder ao equilíbrio estável, o faz por preservar a relação enunciada por Young com os níveis de tensão superficial. Entretanto, em uma superfície rugosa ou heterogênea, a adição de um pequeno volume do líquido pode não implicar no avanço de sua periferia. Ao invés de ocorrer aumento da superfície de contato e a manutenção do ângulo, pode ocorrer a manutenção da superfície de contato e o aumento do ângulo. Somente após ter-se

acrescentado suficiente volume à gota ocorre a expansão abrupta de sua superfície de contato. O ângulo estabelecido na iminência do avanço do líquido sobre a superfície é chamado ângulo de avanço (θ_a). Quando se retira volume da gota, também como resultado da influência exercida pela rugosidade, ela se tornará menor sem retrocesso de seu entorno. Quando é retirado volume suficiente, a frente da gota será retraída repentinamente. O ângulo estabelecido na iminência desse retrocesso é chamado de ângulo de retrocesso (θ_r).

Diferentemente do que se experimenta na medição dos ângulos estáticos, a medição dos ângulos de avanço e retrocesso apresenta resultados que portam informações explícitas quanto ao nível de rugosidade da superfície. A diferença entre os ângulos de avanço e retrocesso, chamada de histerese no ângulo de contato indica a influência exercida pela rugosidade da superfície [24]. Desta forma, contorna-se o problema da ocorrência de estados metastáticos e incorpora-se aos resultados representatividade mais ampla do estado superficial.

Dentre os ângulos de avanço e de retrocesso, o ângulo de retrocesso é utilizado mais freqüentemente como indicador do nível de hidrofobicidade. Em [12], por exemplo, o comportamento dinâmico da hidrofobicidade de um revestimento polimérico é feito segundo observação exclusiva do ângulo de retrocesso. Em [4], a comparação entre as taxas de recuperação da hidrofobicidade de silicone e de resinas epóxi é feita também segundo análise exclusiva do ângulo de retrocesso. Em [26], sem explicar motivação, utilizou-se o ângulo de avanço na comparação entre a medição da hidrofobicidade por ângulo de contato e por eletro-espectroscopia para análise química.

Existem duas formas básicas de efetuar a medição goniométrica dos ângulos de avanço e retrocesso: pela técnica da gota séssil e pela técnica da plataforma girante. Segundo o que se tem registrado a respeito das suas aplicações no estudo da isolação polimérica cada uma delas mereceu aqui a atenção compatível.

2.6.1 A técnica Da Gota Séssil

A técnica da gota séssil consiste em induzir o avanço e o retrocesso da interface da gota sobre a superfície pela variação de seu volume. Utilizando uma seringa, o volume da gota é aumentado até que a interface da gota avance sobre a superfície na iminência do que se registra o ângulo de avanço. Inversamente, pela diminuição do volume da gota registra-se, na iminência de seu retrocesso, o ângulo de retrocesso. A figura 2.6 abaixo ilustra esquematicamente a montagem para medição automática.

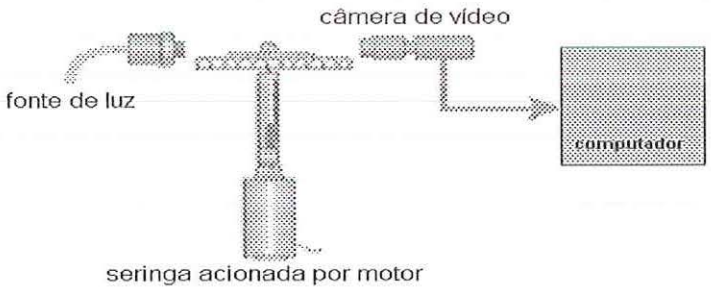


Figura 2.6 – Montagem experimental para medição pela técnica *da gota séssil*

2.6.2 A técnica da Plataforma Girante

A técnica da plataforma girante consiste em induzir o estabelecimento dos ângulos de avanço e de retrocesso da interface da gota pela inclinação da superfície de apoio. À medida que a inclinação estabelecida pela plataforma girante aumenta, a crescente componente tangencial (à superfície) da força peso aumenta e, com efeito, ao ser atingido um valor limite de inclinação, verifica-se a iminência de deslizamento. Estabelece-se por essa ocasião os ângulos de avanço e retrocesso como indicado na figura 2.7.

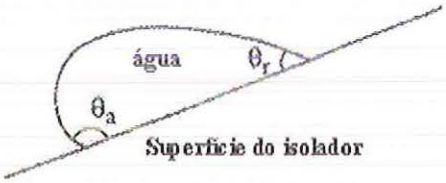


Figura 2.7 –Ângulos de avanço (θa) e retrocesso (θr) estabelecidos na iminência do deslocamento da gota sobre a superfície inclinada.

2.7 Inspeção Visual

A avaliação da hidrofobicidade através da inspeção visual se dá pela observação a olho nu (ou auxiliada por dispositivos de amplificação visual elementares como lupas) do aspecto das gotas depositadas por borrifamento

sobre a superfície em análise. Dado que, como já apresentado nos tópicos anteriores, o nível de hidrofobicidade da superfície influencia a acomodação da água sobre ela, o cenário estabelecido pela água é utilizado na avaliação de seu estado superficial. Este é o princípio utilizado na avaliação da hidrofobicidade por inspeção visual.

Esta técnica, diferentemente das apresentadas nos tópicos anteriores deste capítulo, fornece uma indicação grosseira do estado da superfície. Seu uso, entretanto, justifica-se sobremaneira na inspeção dos isoladores em campo por ser rápida e fácil de efetuar. A Figura 2.8 ilustra o procedimento.

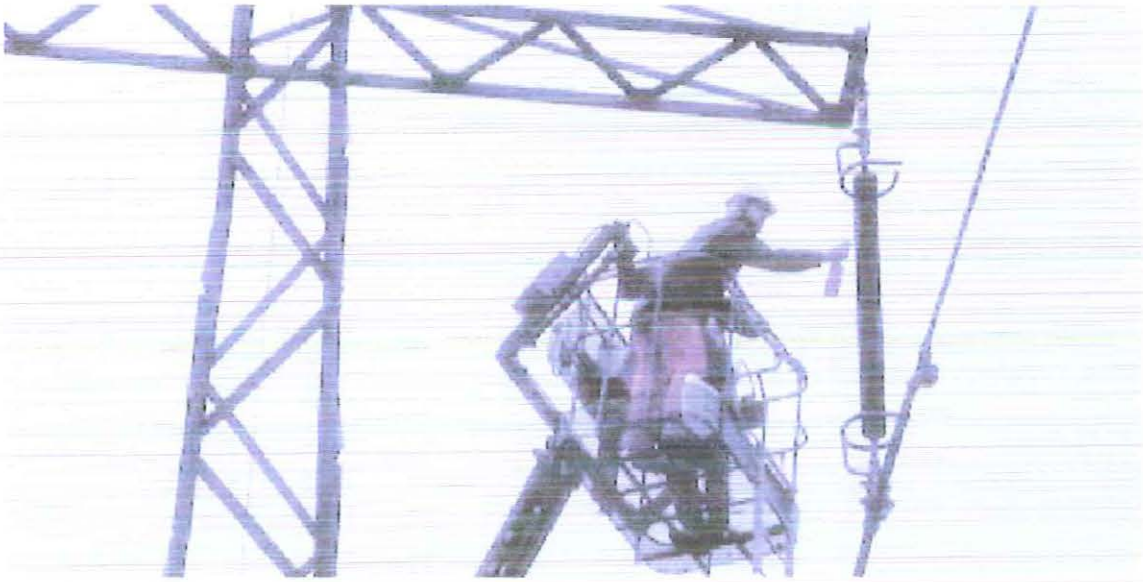


Figura 2.8 - Avaliação do isolador em linha viva através da inspeção visual

A avaliação da hidrofobicidade por inspeção visual ocorre por estratificação de parâmetros distinguíveis na imagem da água sobre a superfície. As imagens

são comparadas com padrões segundo índices específicos e se dá a classificação da hidrofobicidade em níveis discretos.

Neste tópico serão apresentados os índices utilizados, os padrões e a normalização do método. Se concluirá, então, quanto a sua aplicabilidade no estudo da isolação polimérica e suas vantagens e desvantagens em relação às técnicas goniométricas.

2.7.1 Índices do Aspecto das Gotas.

À medida que as superfícies são mais hidrofóbicas, a água depositada sobre elas, ao estabelecer a configuração de menor energia associada, o faz pela formação de gotas mais discretas, menores, mais freqüentes e uniformes (figura 2.9 a). Em tais situações, os ângulos de contato formados entre o líquido e a superfície assumem maiores valores. Analogamente, em estados superficiais menos hidrofóbicos, as gotas passam a apresentar menores valores de ângulos de contato, tornando-se mais planas e maiores (figura 2.9 b e c). Em acréscimo, passa a haver junção entre gotas adjacentes de forma que, em estágios de degradação da superfície mais avançados, formam-se filetes de água (figura 2.9 d) e algumas regiões eventualmente tornam-se completamente molhadas (Figura 2.9 e e f). Os índices utilizados na classificação das imagens por conta de sua maior sensibilidade à evolução do estado superficial quanto à hidrofobicidade são:

tamanho e quantidade das gotas e quantidade da superfície coberta por filme de água.

Na prática, de forma a diminuir a susceptibilidade da medição à subjetividade da avaliação humana, a interpretação ocorre por comparação do cenário com imagens padronizadas. Destaca-se neste aspecto a norma definida pela STRI [18]. Os tópicos seguintes apresentarão os padrões de cenário, e os procedimentos estabelecidos pela norma

2.7.2 Padrões

De forma a minimizar os efeitos da subjetividade da avaliação humana do cenário das gotas são utilizados padrões com níveis de hidrofobicidade bem característicos. A tarefa de avaliar a hidrofobicidade por inspeção visual, portanto, resume-se à comparação do cenário estabelecido com os padrões.

Neste sentido, os padrões apresentados pela empresa sueca STRI têm tido vasto uso. Por conta da boa caracterização dos níveis de hidrofobicidade e pela normalização proposta para o ensaio a classificação proposta pela STRI têm sido utilizada até mesmo pelas metodologias automáticas de avaliação do cenário de gotas por processamento de imagens. Segundo o que normaliza a STRI são definidos sete níveis de hidrofobicidade (**HC 1** a **HC 7**). Os níveis de hidrofobicidade (**HC´s**) são descritos na tabela 2.1 segundo os índices descritos

no parágrafo anterior. Segundo normalizou a **STRI**, o nível de hidrofobicidade mais elevado corresponde ao **HC 1** e os maiores níveis de degradação correspondem ao **HC 7**.

Tabela 2.1- Critérios de classificação STRI

Classe de Hidrofobicidade	Descrição
HC 1	Só há gotas pequenas e discretas
HC 2	Só há gotas discretas $50° < \Theta r < 80°$ para a maioria das gotas
HC 3	Só há gotas discretas $20° < \Theta r < 50°$ para a maioria das gotas
HC 4	Há gotas discretas e filmes de água sobre a superfície. Área completamente molhada não excede $2cm^2$. Cobrem menos de 90% da área observada.
HC 5	Há regiões completamente molhadas com área superior a $2cm^2$. Juntas não excedem 90% da área total.
HC 6	Mais de 90% da área observada fica completamente molhada. Ainda há pequenas regiões secas.
HC 7	Filme contínuo de água sobre toda a superfície observada.

As figuras 2.9 (a, b, c, d, e e f) apresentam os padrões de aspecto das gotas depositadas sobre superfícies a HC 1 a 6 respectivamente. Ao HC 7 corresponderia uma superfície completamente molhada.

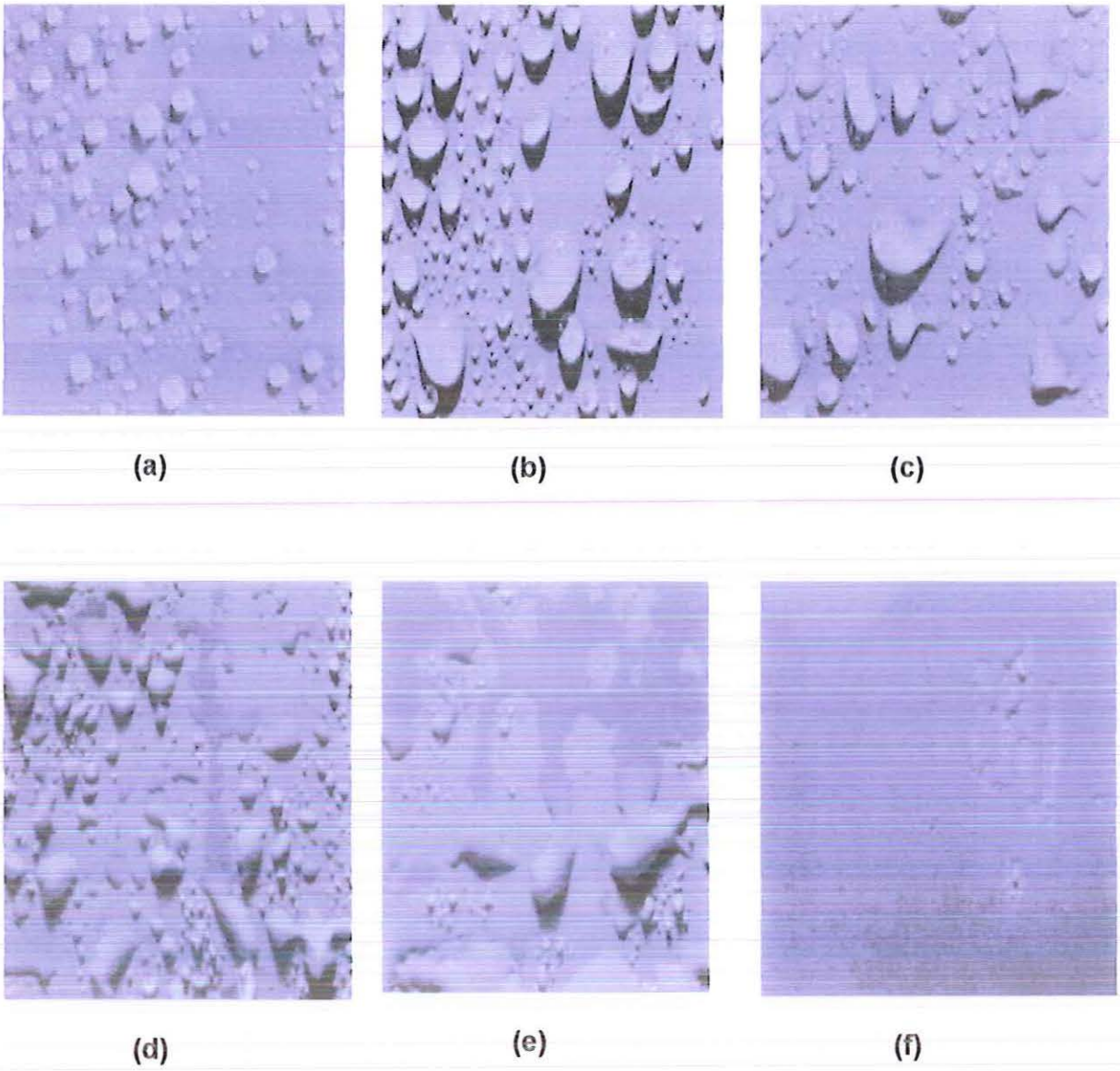


Figura 2.9 – Padrões de cenários sugeridos pela STRI para HC 1 (a), HC 2(b) HC 3 (c), HC 4 (d), HC 5 (e) e HC 6 (f)

2.7.3 Procedimentos e Equipamentos

Fenômenos como a reorientação de grupos moleculares no polímero e a dissolução de moléculas de baixo peso no líquido são responsáveis por variações rápidas no nível da hidrofobicidade [27]. A salinidade da água influencia a intensidade com a qual o seu comportamento eletrohidrodinâmico se expressa. Com efeito, parâmetros do ensaio como tempo de deposição da água sobre a superfície e condutividade da água utilizada repercutem na intensidade com a qual a hidrofobicidade se expressa na interação entre o líquido e a superfície. Por isso, são definidos na norma, além das características das classes de hidrofobicidade (HC´s), parâmetros como o tempo e forma de deposição da água e seu nível de salinidade. A figura 2.10, por exemplo, apresenta um modelo de garrafa borrifadora sugerida pela norma.

Figura 2.10 – Modelo de garrafa com borrifador sugerido pela norma STRI.

Outra característica contemplada pela metodologia é a variação dos níveis de hidrofobicidade verificada ao longo das diferentes regiões do isolador [28] Resultante do depósito não uniforme de camadas de poluentes, a variação experimentada ao longo da superfície implica na necessidade de que se efetue a análise em diversas regiões sobre a superfície para que se obtenha resultados com representativos quanto ao estado geral da superfície. Com esta proposta a norma define, como indicado na figura 2.11, regiões distintas a serem observadas.

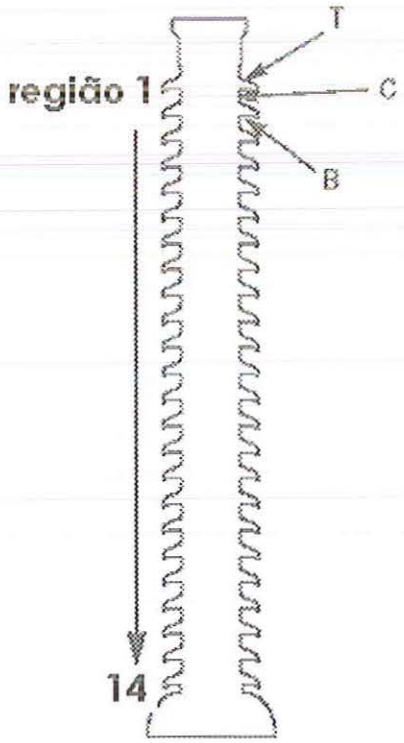


Figura 2.11 - Regiões a serem observadas segundo normalizado pela STRI. Parte superior da saia (T), parte inferior da saia (B) e corpo do isolador (C).

Dada a forma simples e completa com a qual os procedimentos e as classes de hidrofobicidade foram descritos pela STRI, a sua adoção tem sido vasta. Todos os trabalhos recentes publicados e que descrevem inspeção visual na avaliação da hidrofobicidade o fazem segundo normalizado pela STRI.

Como características principais da técnica destacam-se: a facilidade de aplicação, a simplicidade do equipamento utilizado, a orientação à observação em campo e a incerteza associada. A facilidade do experimento e a simplicidade do equipamento devem-se ao fato de que, além da observação do aspecto das gotas, o único procedimento demandado é o borrifamento (figura 2.10). Uma vez que os equipamentos necessários são portáteis e não demandam condições controladas de utilização, a aplicabilidade da técnica à inspeção em campo é assegurada. A incerteza associada à avaliação, por sua vez, deve-se ao fato da subjetividade da avaliação humana. A estimativa pode variar de pessoa para pessoa ou pode ocorrer variação ao decorrer do tempo.

Em solução aos problemas particulares da técnica têm sido propostas metodologias computacionais de implementação da norma STRI. Dado o caráter inédito destas técnicas e a fase de desenvolvimento em que se encontram, optou-se, como forma de atender a demanda imediata e real das pesquisas em curso no grupo, por implementar sistema dedicado às técnicas goniométricas. Ao próximo capítulo serão apresentadas suas particularidades.

Capítulo III:

O Sistema.

Dentre as metodologias manuais e automáticas de medição do ângulo de contato optou-se por implementar um sistema automático. A escolha foi motivada principalmente por não requerer intervenção humana, por sua praticidade, por sua reprodutibilidade e pela facilidade de documentação. Condições estas asseguradas pela forma digital com a qual se dá o registro das imagens. Ressalta-se que o sistema será fixo em critérios por não demandar intervenção humana quanto à identificação do contorno da gota. Conseqüentemente, superará o problema da subjetividade da avaliação decorrente da limitação imposta pela acuidade visual humana. Esta que, por

sua vez, é a principal limitação das técnicas tradicionais de avaliação de hidrofobicidade por inspeção visual.

Com a proposta de que o sistema apresente versatilidade que garanta sua aplicabilidade às técnicas de medição de ângulo estático, *gota séssil* [10] e ângulos dinâmicos, plataforma girante [12] definiu-se também conjunto de requisitos para a topologia do sistema. Como conseqüência, foram definidos parâmetros nas relações de compromisso entre complexidade do *hardware* e do *software*. Mais especificamente, a consecução de maior versatilidade para o sistema implicou na simplificação do hardware e no aumento da complexidade do software. Os próximos tópicos serão dedicados a apresentar a topologia proposta para o sistema, as relações de compromisso entre hardware, software e versatilidade, as técnicas utilizadas e as ferramentas computacionais desenvolvidas.

3.1 O Sistema

O sistema de medição implementado pode ser esquematicamente descrito como sendo constituído por: uma câmera CCD, um anteparo luminoso, um microcomputador e o software para processamento de imagens. O arranjo pode ser esquematizado como indicado na figura 3.1.

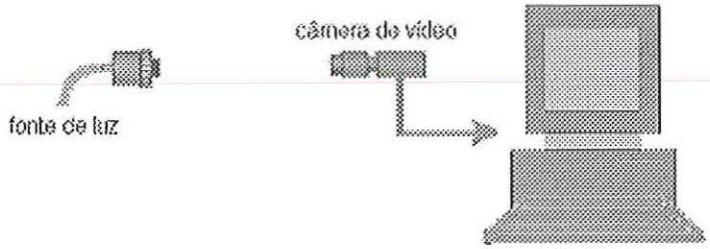


Figura 3.1 – Representação esquemática do sistema montado

Diferentemente do sistema tradicional para medição automática indicado na figura 2.4, o sistema proposto não dispõe de chassi de acoplamento entre câmera, fonte de iluminação e base de apoio. Como resultado, além de diminuir a complexidade do hardware e conseqüentemente o seu custo, a ausência de acoplamento entre as partes físicas provê ao sistema a capacidade de ser adaptado a necessidades específicas de algumas montagens. Juntamente com a total independência da intervenção humana na identificação dos contomos da gota, estas características constituem o caráter inédito do sistema proposto.

Ainda que algumas montagens experimentais para medição do ângulo de contato estático [11] e para a técnica *da gota séssil* [10] não exijam mobilidade entre a amostra e a câmera, o estudo da hidrofobicidade em superfícies inclinadas [12] o faz. Por isso, o chassi de acoplamento da base à câmera, ainda que responsável por garantir alinhamento entre câmera e amostra e uma conseqüente redução na complexidade do software em montagens mais

simples, é inviabilizado em montagens mais complexas. A observação da molhabilidade de superfícies inclinadas e a análise de superfícies curvas de isoladores são bons exemplos. Portanto, com a proposta de garantir versatilidade optou-se por desenvolver o sistema com câmera e base independentes. Detalhes da relação entre complexidade do hardware e do software serão descritas no próximo tópico.

3.2 Hardware e Software com maior Versatilidade

Segundo a topologia proposta para o sistema, a diminuição do nível de complexidade do hardware relacionou-se intimamente com o esforço computacional demandado. Sobretudo por conta da proposta do sistema não demandar qualquer intervenção humana para identificar o perfil da gota, a falta de um chassi de acoplamento entre base e câmera, ao habilitar o sistema efetuar configurações que contemplem ensaios como a plataforma girante, implica na perda da garantia de alinhamento entre amostra e câmera. Perde-se, desta maneira, conhecimentos *a priori* da natureza da imagem que simplificariam intensamente o seu processamento. Como resultado, em tais situações a tarefa de efetuar a medição do ângulo de contato precisa incorporar lógicas que contemplem a influência da inclinação aparente da superfície sobre os ângulos estabelecidos.

A figura 3.2 ilustra o efeito da inclinação entre amostra e câmera. Consta na imagem o perfil de uma gota depositada sobre uma superfície horizontal que, por conta do desalinhamento entre câmera e amostra, apresenta-se na imagem com pequena inclinação (aqui chamada de inclinação aparente).

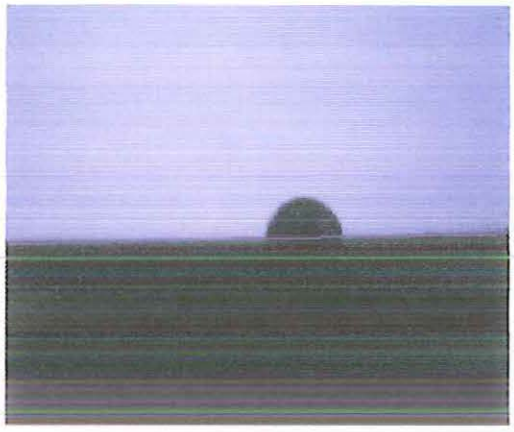


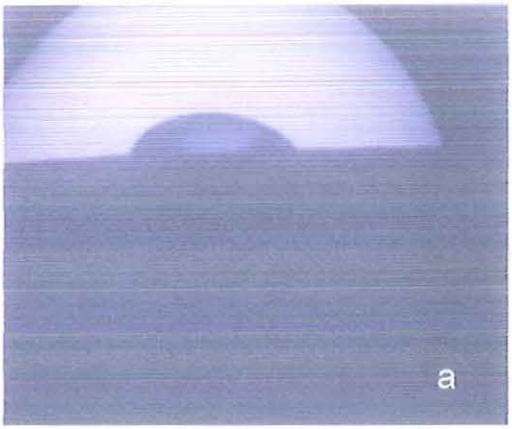
Figura 3.2 – Gota depositada sobre superfície plana e horizontal adquirida por câmera desalinhada com o plano da amostra

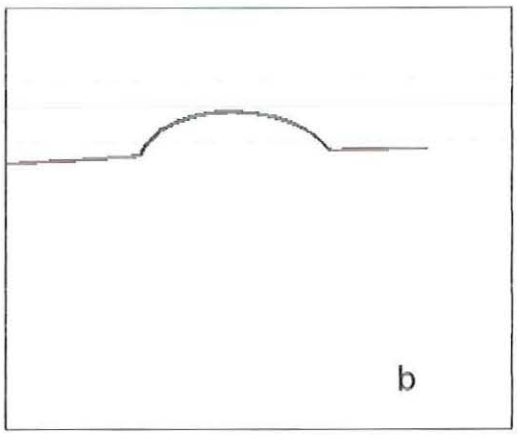
Uma vez que a medição do ângulo de contato ocorre com referência à superfície da amostra, possíveis inclinações devem ser contempladas pelo processamento. Disto decorre que a representação paramétrica da superfície que poderia ocorrer pela simples determinação de uma constante referente a seu afastamento à margem superior ou inferior da imagem (*offset*) se fosse possível se pressupor alinhamento com a câmera, precisa ser feita por uma representação analítica através da determinação de coeficientes lineares (inclinação) e angulares (*offset*). Na prática, a solução para esta questão consistiu, em si só, uma etapa de processamento. As soluções desenvolvidas e

as ferramentas implementadas serão descritas no próximo tópico. Serão apresentados também resultados preliminares e as motivações para a escolha da estratégia de processamento.

3.3 Processamento das Imagens

Entre a forma inicialmente apresentada pela câmera e a medição efetiva do ângulo, a imagem original perfaz etapas de processamento análogas ao processamento feito cognitivamente por um avaliador humano. Destacam-se dentre estas etapas núcleos de tarefas que podem ser agrupadas segundo os seguintes rótulos: **detecção de bordas, classificação por área, determinação da referência horizontal** e, por fim, **parametrização da gota e medição do ângulo de contato**. Os resultados parciais apresentados nas figuras 3.3 **a**, **b**, **c** e **d** ilustram as etapas do processamento das imagens.





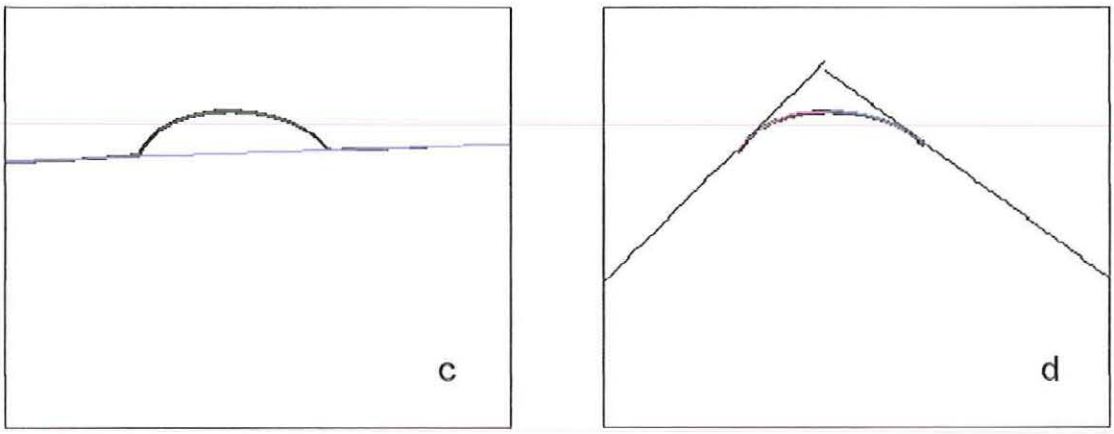


Figura 3.3 – Imagem original (a), contornos destacados (b), referência horizontal determinada e parametrizada (c) e perfil da gota determinado e parametrizado (d)

Na figura 3.3 **a** consta a imagem adquirida em seu formato original; à figura 3.3 **b** apresenta-se a imagem original com os elementos de contorno destacados; a figura 3.3 **c** apresenta a obtenção da reta em representação à amostra e a figura 3.3 **d** ilustra a identificação das curvas que aproximam o hemisfério esquerdo (vermelho) e direito (azul) e as retas tangentes no ponto de contato com a superfície (preto). Os próximos tópicos apresentarão com maior detalhamento as etapas de processamento implementadas separadamente. Já ao próximo tópico será apresentada a detecção de bordas e, aos tópicos subseqüentes as etapas posteriores do processamento segundo a sua ocorrência no fluxo de execução do programa desenvolvido.

3.3.1 Detecção de Bordas

Em essência, a medição automática do ângulo de contato se dá mediante identificação do ângulo formado entre a gota e a superfície em análise. Mais especificamente, se dá pela identificação do ângulo formado entre a reta tangente ao contorno da gota e a superfície de apoio no ponto de contato com a superfície (conforme indica a figura 3.3-d). Neste contexto, sendo os contornos da gota e da amostra pontos de borda, julgou-se conveniente iniciar o processamento pela identificação dos pontos de borda. Consegue-se, desta maneira identificar dentre as informações constantes na imagem original como brilho e textura aquelas que têm significância quanto à medição do ângulo de contato. A implicação mais imediata desta escolha, portanto, se dá sobre redução do tamanho da memória necessário ao processamento e sobre o aumento da sua velocidade. Neste caso particular, dado o conhecimento prévio do aspecto geral da imagem, também se estudou a incorporação aos algoritmos de detecção das bordas especificidades que ressaltam sua aplicabilidade à natureza comum das imagens.

A metodologia de detecção das bordas escolhida foi a análise do gradiente [16]. A figura 3.4 ilustra o quanto os pontos de interesse são muito bem caracterizados por maiores intensidades do gradiente.

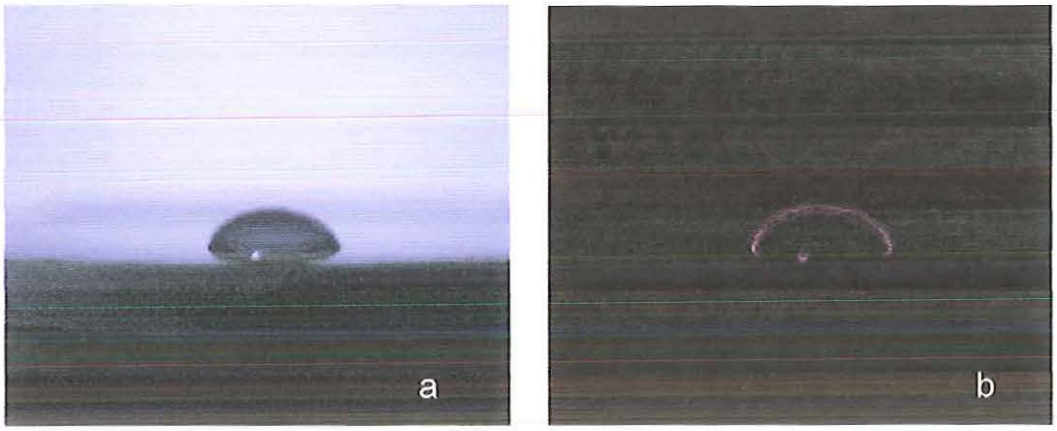


Figura 3.4 – Imagem original (a) e imagem gradiente (b).

O método utilizado para a determinação do gradiente foi o método de Sobel [16]. Neste método, a aproximação do gradiente **G** de um pixel da imagem é obtida conforme indica a equação 3.1 abaixo.

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial h}\Gamma\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial v}\Gamma\right)^2} \qquad 3.1$$

em que $\left(\frac{\partial}{\partial h}\Gamma\right)^2$ e $\left(\frac{\partial}{\partial v}\Gamma\right)^2$ representam, respectivamente, as derivadas do tom do pixel em relação às direções horizontal e vertical.

As componentes do gradiente são obtidas por convolução dos operadores de Sobel e podem ser escritos conforme indicam as equações 3.2 e 3.3 abaixo.

$$\frac{\partial}{\partial h}\Gamma(x,y)=\begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & h_{1,3} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & h_{2,3} \\ h_{3,1} & h_{3,2} & h_{3,3} \end{bmatrix} * \Gamma(x,y) \qquad 3.2$$

$$\frac{\partial}{\partial v}\Gamma(x,y)=\begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & v_{1,3} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} \\ v_{3,1} & v_{3,2} & v_{3,3} \end{bmatrix} * \Gamma(x,y) \qquad 3.3$$

em que a operação de convolução (*) é definida como sendo

$$\begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & v_{1,3} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & v_{2,3} \\ v_{3,1} & v_{3,2} & v_{3,3} \end{bmatrix} * \Gamma(x,y)=\sum_{i=-1}^{1}\sum_{j=-1}^{1} v_{i,j}\Gamma(x+i,y+j) \qquad 3.4$$

No software desenvolvido, com a proposta de incorporar conhecimentos específicos da natureza da imagem, optou-se por permitir ao usuário a definição dos coeficientes das máscaras de convolução ($h_{i,j}$, $v_{i,j}$). Foram utilizados valores que minimizassem a contribuição das componentes horizontais e verticais uma

sobre as outras. A figura 3.5 abaixo apresenta as janelas e os valores utilizados.

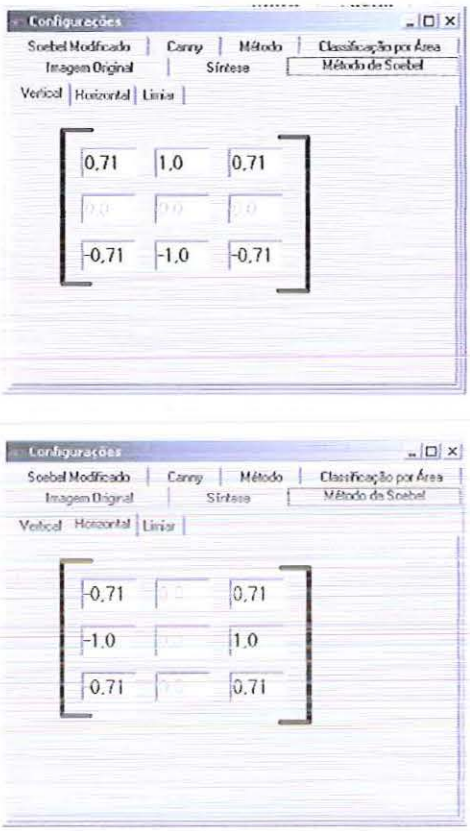


Figura 3.5 – Máscaras de convolução vertical e horizontal

Uma vez determinadas as intensidades dos gradientes para cada um dos pixels da imagem original, a geração da imagem com as bordas destacadas se dá pela simples comparação das intensidades com um limiar determinado empiricamente. Pixels aos quais correspondem intensidades de gradiente superiores ao limiar são assinalados na imagem de bordas ao passo em que os

que apresentam intensidades menores são descartados. As figuras 3.6 **a**, **b**, **c** e **d** abaixo apresentam a imagem original e as bordas obtidas para limiares iguais a 190, 160 e 130 respectivamente.

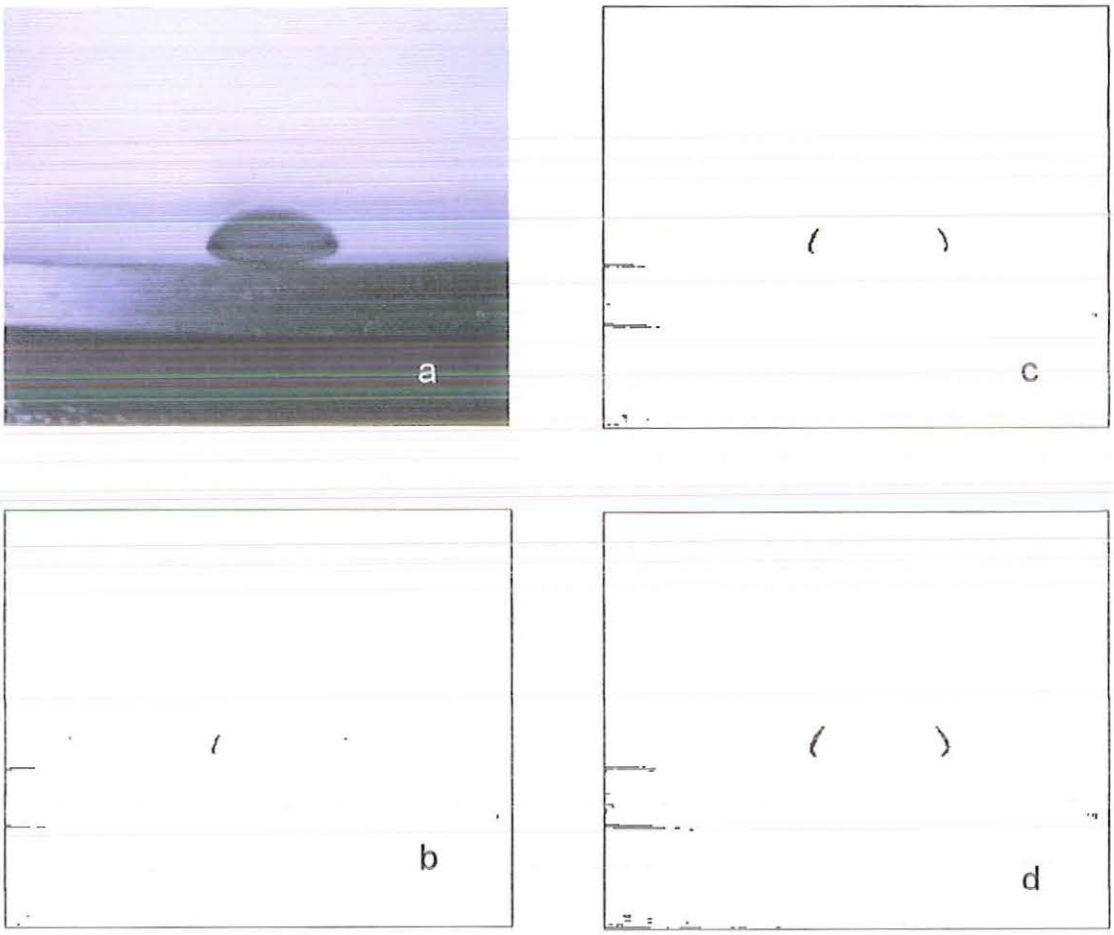


Figura 3.6 – Imagem original (a) contorno obtido por limiar igual a 190 (b), 160 (c) e 130 (d)

Conforme ilustram as figuras anteriores, constavam nos primeiros resultados da detecção de bordas contornos segmentados. Procurou-se, então, incorporar à determinação informações disponíveis acerca da natureza das imagens na melhora da identificação dos contornos. Com essa proposta, estudou-se a ponderação entre componentes horizontal e vertical do gradiente. Dado que os contornos ausentes nas imagens são pontos de ocorrência de maiores intensidades de componente vertical do gradiente, procurou-se avaliar o efeito de atribuição de maior peso à componente vertical. A figura 3.7 apresenta uma imagem na qual se pode perceber maiores intensidades de componentes verticais em pontos de *gap* nos contornos apresentados nas figuras 3.6 b, c e d

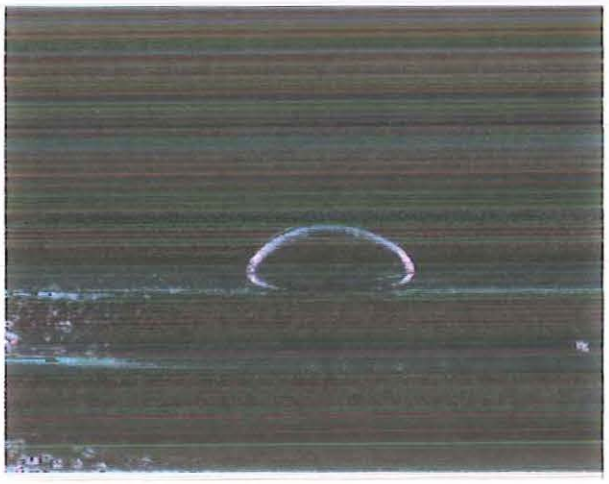


Figura 3.7 – Imagem gradiente; componentes horizontais em vermelho e verticais em verde.

Com esta proposta, utilizou-se operador análogo ao gradiente cuja equação de definição está apresentado abaixo na equação 3.5.

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial h}\Gamma\right)^2 + k^2\left(\frac{\partial}{\partial v}\Gamma\right)^2} \qquad 3.5$$

em que a constante k>1 atribui peso à componente vertical do gradiente para que, a menores limiares, aumente-se a sensibilidade do método às regiões ausentes nas figuras 3.6 a, b, c e d. A figura 3.8 apresenta o resultado obtido.

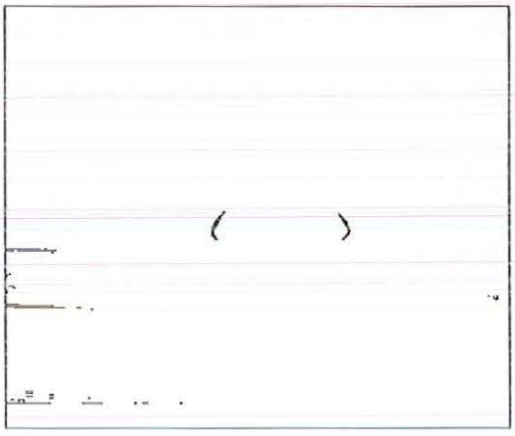


Figura 3.8 – Borda destacada por k=1,37 e limiar =130

Segundo o que se pode concluir da comparação entre as imagens 3.6 **b**, **c** e **d** e 3.8, o ajuste empírico da constante k e do limiar não implicam em melhorias significativas da qualidade da imagem. Resolveu-se, portanto, manter-se a proposta inicial de avaliar apenas o vetor gradiente e encontrar soluções alternativas para os problemas de continuidade dos contornos.

A solução encontrada foi dedicar maior cuidado à aquisição das imagens. Sobretudo por não implicar em maiores esforços computacionais, a melhoria nas condições de iluminação e posicionamento na aquisição da imagem mostrou-se a solução mais adequada. Ao ser dedicada maior atenção ao ajuste da posição do anteparo iluminado e, conseqüentemente, obtenção de melhores níveis de contraste, o problema das inconsistências no contorno da gota foram superados, conforme apresentado na figura 3.9. O problema com o contorno da superfície, por sua vez, tem solução em outra etapa do processamento.

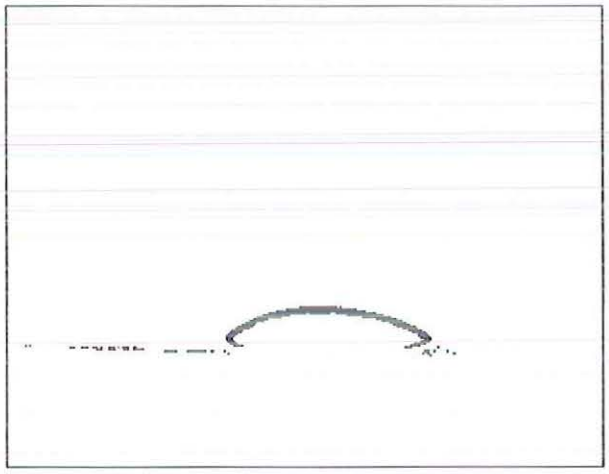


Figura 3.9 – Contorno obtido com cuidados com a iluminação

Os resultados obtidos, exceto por algum nível de sensibilidade a elementos indesejados, foram intensamente melhorados pelos cuidados com a

iluminação. Apresentam-se nas imagens de bordas obtidas com o devido destaque o contorno da gota e o contorno superior da superfície.

Uma vez obtida a imagem das bordas, segue a etapa, melhor descrita no item subseqüente, que consiste em destacar entres os elementos constantes na imagem os que, de fato, correspondem aos contornos da gota e da amostra.

3.3.2 Classificação por Área

Obtém-se como resultado da etapa de detecção de bordas uma imagem binária com pontos de contorno. Constam nesta imagem, entretanto, além dos elementos de interesse, outros elementos aos quais também correspondem grandes intensidades de gradiente na imagem original. Com efeito, as etapas posteriores do processamento, teriam a complexidade de implementação grandemente aumentada por demandarem tratar deste tipo de ruído. Optou-se, portanto, por desenvolver ferramenta capaz de destacar, dentre os elementos constantes da imagem de borda, os que são de interesse.

Esta dificuldade é imposta pela natureza dos elementos imagiados. Deve-se principalmente à ocorrência de intensidades de gradiente apreciáveis na lateral da amostra e no seu entorno. A figura 3.10 abaixo ilustra o fenômeno.

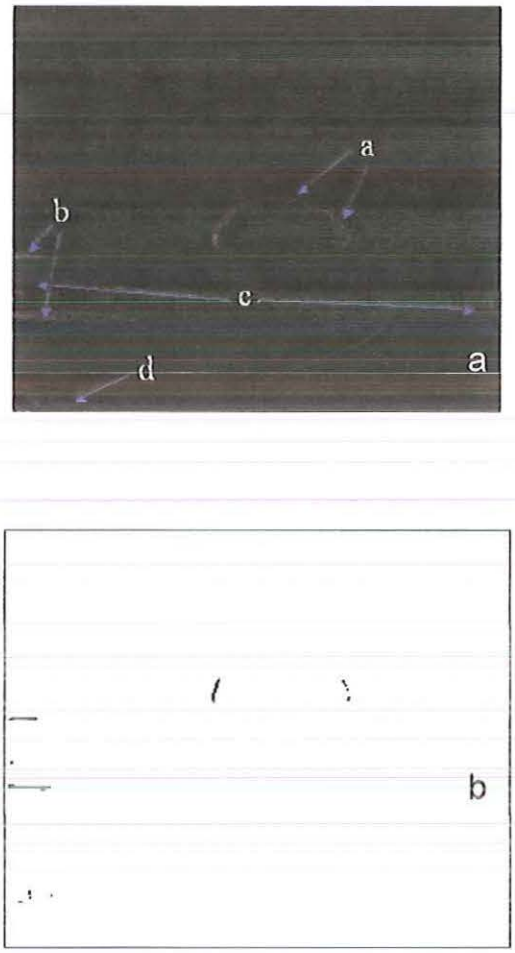


Figura 3.10 – Imagem gradiente (a) – com contornos da gota (a), da amostra(b) e de irregularidades (c e d) e imagem do contorno gerado (b)

Devido às irregularidades decorrentes do corte da amostra e ao seu contorno de fato, esses pontos representam grande intensidade no gradiente. Como resultado, a borda identificada por limiar, além de portar informações sobre a referência horizontal da superfície e do contorno da gota apenas, leva em consideração esses efeitos.

A solução mais elementar para este problema seria a intervenção humana quanto a identificação dos elementos, dentre os constantes na imagem de bordas. Fiel à proposta inicial, entretanto, de não demandar intervenção humana, foi desenvolvida solução alternativa por classificação.

O princípio do método desenvolvido é identificar na imagem os seus elementos constituintes e, mediante sua classificação pelo número de pixels utilizados em sua representação, identificar automaticamente dentre eles os que são de interesse. Tendo sem vista, o contorno da gota e o da superfície apresentarem-se sensivelmente maiores que os contornos das irregularidades da superfície, a classificação por área surge como solução para o problema.

O algoritmo desenvolvido para implementar a seleção dos objetos consistiu na busca de pontos que apresentam conexões entre si. Referenciados como o maior conjunto destes pontos (adjacentes), os objetos são facilmente classificados quanto à sua área por contagem do número de elementos destes conjuntos.

A classificação por área na imagem, por sua vez, ocorre por comparação das áreas dos elementos a um limiar estabelecido empiricamente. O conhecimento da natureza das imagens é suficiente para assegurar a robustez do método do limiar. Isto se deve ao fato de que os objetos indesejados são sensivelmente menores que os de interesse. As figuras 3.11 **a**, **b** e **c** ilustram a classificação.

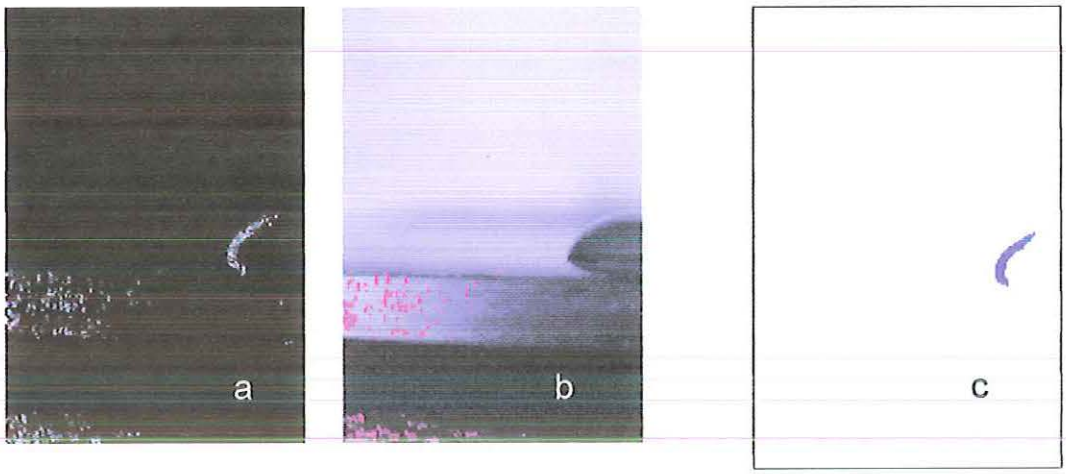


Figura 3.11 – Figura original (a), elementos descartados (b) e elemento destacado (3).

A figura 3.12 apresenta em destaque a capacidade do método de excluir pixels próximos a elementos de interesse sem que, como efeito indesejado, haja deterioração de seu contorno.

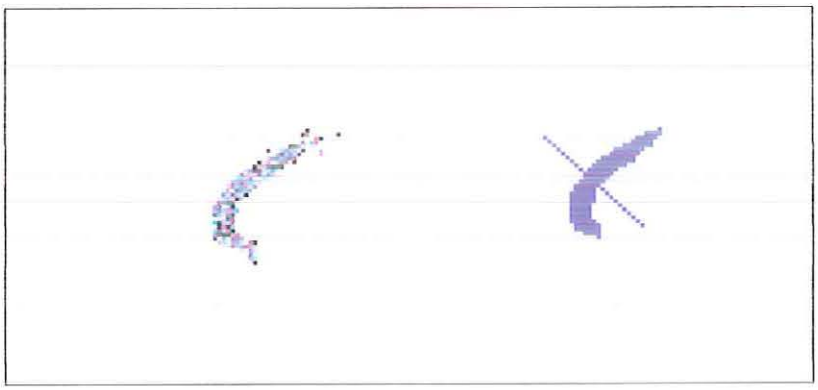


Figura 3.12 – Elemento original (a) e destacado (b)

Destaca-se a seletividade do método como maior qualidade quando comparada às possíveis soluções de filtragem.

3.3.3 Detecção da Referência Horizontal

A etapa de processamento da imagem aqui denominada detecção da referência horizontal consiste na identificação da reta que melhor representa o contorno superior da amostra. Partindo da imagem binária resultante das etapas anteriores de processamento identifica-se, dentre os contornos da gota e da amostra, o contorno da amostra. A figura 3.2 que ilustra a inclinação aparente da amostra apresenta também (em azul) o resultado da detecção.

A identificação da referência horizontal justifica-se pela falta de garantia de alinhamento entre a câmera e a amostra resultante da falta de acoplamento mecânico confiável entre ambos. Responsável por uma sensível diminuição na complexidade do hardware, esta característica do sistema implicou na necessidade de se obter uma representação paramétrica da superfície que contemple sua inclinação. Esta foi a motivação para a escolha da transformada de Hough [16] como solução.

A transformada Hough é uma técnica que pode ser usada para isolar aspectos de um formato particular em uma imagem. Dado que, neste caso particular, o que se deseja é que o aspecto destacado seja representado em uma forma paramétrica (inclinação e offset), a transformada Hough clássica [17] apresenta-se como a solução mais indicada.

A transformada Hough clássica é usada mais comumente para a detecção de curvas regulares como retas, círculos e elipses. A transformada Hough generalizada [18] pode ser empregada quando não é possível se obter a descrição analítica simples de um dado aspecto. Devido à complexidade computacional do algoritmo e da solução ao problema desta pesquisa obtida diretamente com a transformada clássica, será tratado aqui, sem perda de generalidade, exclusivamente desta última. Acerca das restrições da transformada Hough clássica (aqui chamada apenas de Transformada Hough), o fato das imagens que serão tratadas com essa ferramenta conterem apenas elementos cuja representatividade é boa por aspectos geométricos elementares, nenhuma restrição será imposta pelo seu uso. A vantagem principal da técnica da transformada Hough é sua tolerância a inconsistências nos aspectos e sua relativa imunidade ao ruído.

A determinação da referência horizontal propriamente dita foi feita por identificação no espaço de parâmetros de Hough (EPH) da reta contemplada pelo maior número de pixels na imagem. Associando a cada pixel de borda uma

curva no espaço de parâmetros de Hough correspondente ao feixe de retas que se cruzam neste pixel (da imagem de borda), obtém-se como resultado (no EPH) um conjunto de curvas que se cruzam no ponto ao qual corresponde a reta que melhor representa estes pontos. A figura 3.13 ilustra a ocorrência.

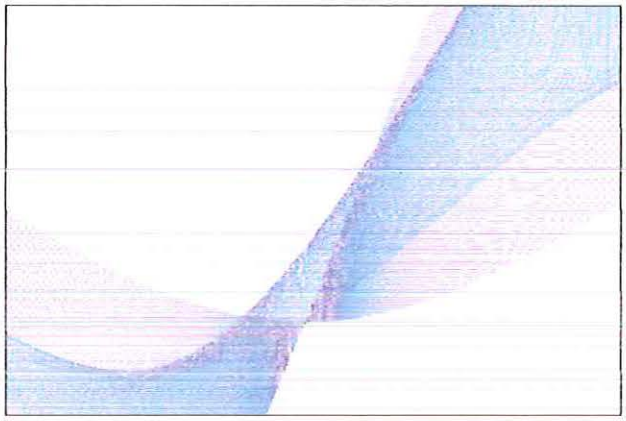


Figura 3.13 – EPH com ponto de intersecção mais freqüente

Segundo o que foi apresentado no parágrafo anterior e ilustra a figura 3.13 acima, a utilização de um algoritmo de votação, então, passa a ser responsável pela indicação deste ponto de concorrência das curvas no EPH. Este foi o princípio utilizado na identificação da reta que melhor representa o contorno superior da superfície. As figuras 3.14 **a** e **b** apresentam um exemplo. Entretanto, uma melhor discussão desta etapa do processamento será objeto do próximo capítulo.

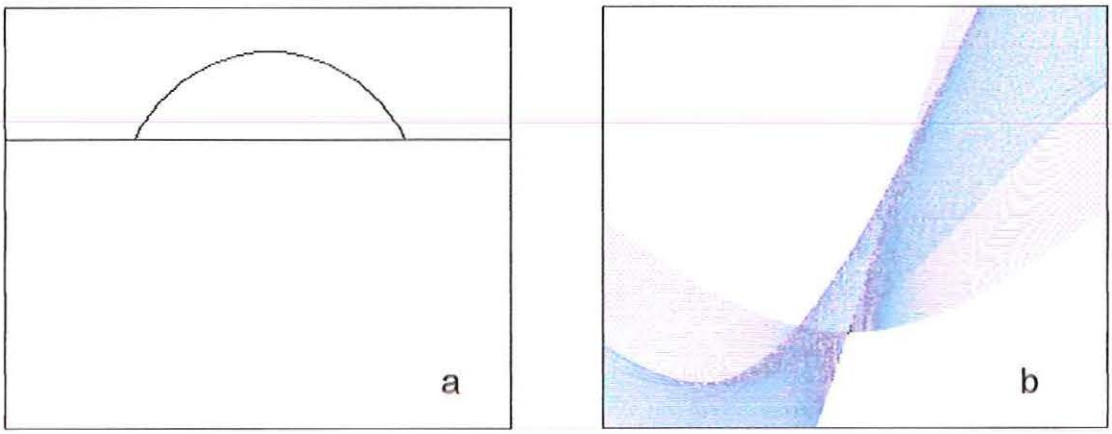


Figura 3.14 – Imagem sintética (a) e espaço de parâmetros de Hough correspondente (b)

3.3.4 Detecção e Parametrização do Perfil Gota

A detecção e parametrização do perfil da gota é a ultima etapa do processamento da imagem e compõem da detecção dos pixels que referem-se ao contorno do perfil da gota e sua descrição analítica. Mais especificamente, a parametrização consiste em determinar os coeficientes de dois polinômios de segundo grau que melhor representam os perfis dos semi-hemisférios da gota.

Optou-se por aproximar os semi-hemisférios por polinômios de segundo grau. Assim, consegue-se incorporar ao modelo analítico o achatamento da gota e a suavidade do perfil. O conhecimento do formato elipsoidal da gota poderia justificar a utilização de técnicas de detecção e parametrização de

elipses. A solução utilizada, entretanto, ao incorporar à análise o conhecimento básico das posições relativas ocupadas pela gota é a superfície (já parametrizada), a um custo desprezível na perda da fidelidade da representação, demanda esforço e recurso computacional substancialmente menor.

Dado que a imagem nesta etapa é formada apenas pelo contorno da amostra e o perfil da gota (por haver sido classificada por área) e que já se dispõe dos parâmetros da reta que aproxima a superfície, a solução implementada foi a exclusão dos pixels próximos o suficiente da reta que aproxima a amostra. As figuras 3.15 **a**, **b**, **c** e **d** ilustram a identificação do perfil da gota.

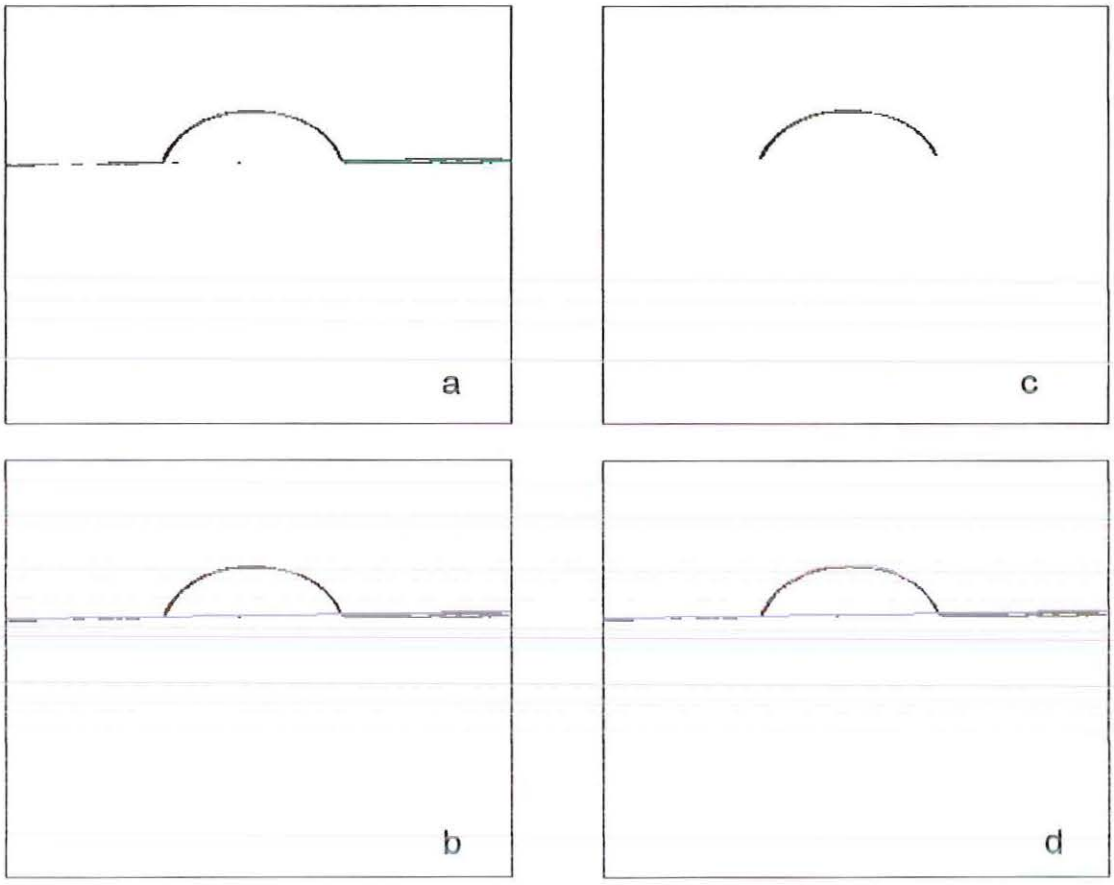


Figura 3.15 – Imagem de contorno (a), amostra identificada (azul) (b), Perfil de gota destacado (c) e gota parametrizada (d)

Constam na figura anterior a imagem obtida da classificação por área (**a**), a imagem com a amostra identificada (**b**), a imagem com a gota destacada (**c**) e a imagem com os dois lóbulos da gota parametrizados (**d**). O algoritmo desenvolvido para a parametrização trata o perfil da gota como se formado por dois lóbulos (esquerdo e direito) que, uma vez identificados, são aproximados por mínimos quadrados por um polinômio de segundo grau.

Capítulo 4:

Resultados.

Tendo sido concluída a etapa de implementação do sistema de aquisição de dados, a pesquisa prosseguiu com sua validação e com a caracterização das novas resinas poliuretanas. Neste capítulo, serão detalhadas as metodologias de calibração utilizadas segundo suas particularidades quanto à sensibilidade aos diferentes grupos de fontes de incerteza e, os resultados obtidos em cada uma das etapas. A análise dos resultados e as conclusões serão apresentadas no próximo capítulo.

As metodologias utilizadas nos ensaios permitiram a avaliação dos erros resultantes das não-idealidades da aquisição das imagens e os erros originados no processamento das imagens. No que se refere à caracterização das novas

resinas poliuretanas, serão apresentados os resultados de sua classificação quanto ao nível de hidrofobicidade superficial. Contudo, sua aplicabilidade à isolação externa em alta tensão será objeto do próximo capítulo.

4.1 Metodologias de Calibração

Genericamente, os erros na avaliação do ângulo de contato segundo a metodologia de medição ora proposta são devidos basicamente ao processo de aquisição das imagens e aos erros no processamento. Com o objetivo de avaliar esses erros de medição segundo suas contribuições individuais a calibração do sistema foi estabelecida em duas fases: calibração da aquisição e calibração do processamento.

Na fase de calibração da aquisição da imagem e da geração da imagem de borda foram empregados corpos de prova padrão com dimensões conhecidas, na avaliação dos erros referentes à etapa de processamento foram utilizadas imagens sintéticas com parâmetros de tamanho e posição dos elementos conhecidos. Resumidamente, as contribuições para a definição dos erros na medição foram determinadas pela intervenção no fluxo tradicional da informação pictórica no processamento. Suas particularidades e os resultados obtidos serão apresentados nos tópicos subseqüentes.

4.1.1 Ensaios com Imagens Sintéticas

A solução desenvolvida para avaliar os erros referentes à etapa de processamento das imagens, conforme mencionado sucintamente no tópico anterior, utiliza imagens de bordas sintéticas. As imagens sintéticas produzidas foram da mesma natureza das imagens de borda geradas do pré-processamento das imagens adquiridas mas, diferentemente destas últimas, são formadas por elementos de contorno bem definidos e com geometria bem parametrizada. Assim, ao se alimentar o sistema com as imagens geradas, pode-se comparar os resultados apresentados com os calculados analiticamente em função dos parâmetros de formato da imagem que são conhecidos. A Figura 4.1 apresenta como exemplo uma imagem de bordas sintética.

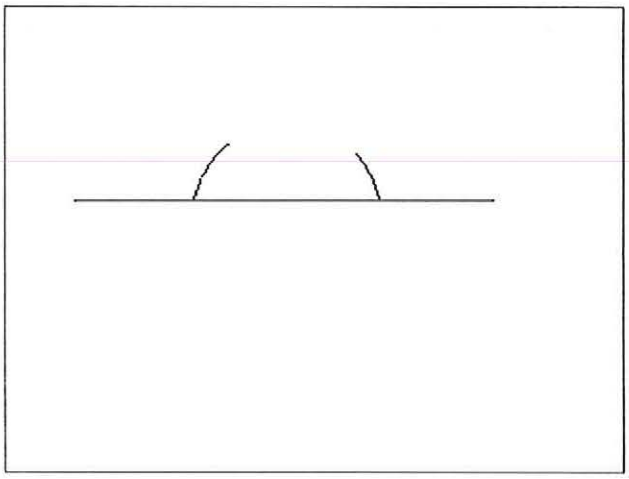


Figura 4.1 – Imagem sintética com circunferência de raio igual a 50 pxl e ângulo de contato igual a 78,46°

Para que as imagens sintéticas reproduzissem a natureza dos contornos obtidos diretamente do pré-processamento das imagens adquiridas foram utilizadas imagens com circunferências de raios conhecidos e retas secantes que estabeleciam segundo sua posição relativa à circunferência ângulos conhecidos. Foram utilizados traços finos e definidos de sorte que se pudesse supor ser de origem exclusiva do processamento os erros experimentados.

A tabela 4.1 apresenta os cenários gerados para as imagens sintéticas e sua descrição.

Tabela 4.1 – Parâmetros de formato das imagens sintéticas

Cenário	Ângulo Calculado (graus)	Ângulo Medido (graus)	Desvio Absoluto (graus)	Desvio Relativo (%)
1	126,87	127,02	0,15	0,12
2	113,58	113,71	0,13	0,11
3	104,48	104,26	-0,22	-0,21
4	90	89,92	-0,08	-0,09
5	78,46	78,54	0,08	0,10
6	66,42	66,46	0,04	0,06
7	53,13	53,01	-0,12	-0,23
8	36,87	36,91	0,04	0,11

4.1.2 Ensaios com Imagens Reais de Corpos Conhecidos

Nesta segunda etapa da calibração foram utilizados corpos de prova com dimensões conhecidas. Este ensaio teve como objetivo incorporar à determinação dos erros as contribuições da etapa de aquisição da imagem e geração das bordas.

Os corpos utilizados como modelos foram formados por esferas de aço de raios conhecidos e superfícies planas de alumínio com furos. As montagens ocorreram por alojamento das esferas nos furos. Os furos apresentavam

profundidade inferior ao diâmetro da gota e, conseqüentemente, a montagem assemelha-se em perfil a uma gota depositada sobre a superfície. A figura 4.2 abaixo apresenta esquematicamente os corpos de prova.

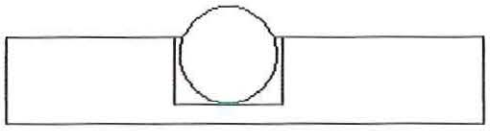


Figura 4.2 – Corte longitudinal do modelo.

Os modelos foram confeccionados com esferas de aço e superfície de alumínio para apresentar situação crítica quanto ao nível de reflexos. A figura 4.3 abaixo apresenta um modelo montado.

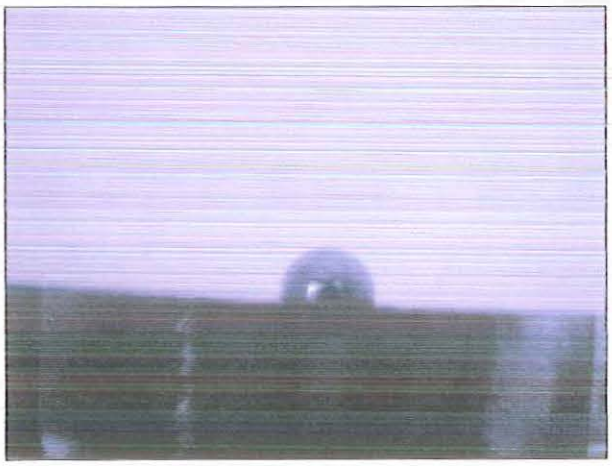


Figura 4.3 – Imagem adquirida de corpo de prova

A tabela 4.2 apresenta os parâmetros de formato e os respectivos ângulos de contato dos modelos montados.

Tabela 4.2 – Parâmetros de formato dos modelos

Modelo	Diâmetro da esfera (mm)	Profundidade do furo (mm)	Ângulo de contato (graus)
1	5,55	2,00	106,22
2	5,55	2,02	105,87
3	5,55	2,36	98,60
4	5,55	2,78	90,10
5	5,55	3,18	81,61
6	5,55	3,86	66,98
7	5,55	4,15	60,30
8	5,55	4,52	51,04

A tabela 4.3 apresenta os resultados obtidos

Tabela 4.3 – Erros obtidos para a etapa de aquisição

Modelo	Ângulo Calculado (graus)	Ângulo Medido (graus)	Desvio Absoluto (graus)	Desvio Relativo (%)
1	106,22	107,04	0,82	0,77
2	105,87	105,80	-0,07	-0,07
3	98,60	97,75	-0,85	-0,86
4	90,10	90,40	0,30	0,33
5	81,61	82,34	0,73	0,89
6	66,98	65,13	-1,85	-2,76
7	60,30	60,42	0,12	0,20
8	51,04	51,53	0,49	0,96

4.4 – Classificação das Resinas Poliuretanas

Terminada a fase de calibração, o sistema foi utilizado na classificação quanto à hidrofobicidade de novas resinas poliuretanas derivadas de óleo de mamona[11]. Conforme determina a norma STRI para a classificação do nível de hidrofobicidade superficial, a classificação ocorreu por medição do ângulo de contato estático [9]. Os moldes foram confeccionados com as duas resinas RI 1 e RI 2 combinadas com as cargas C 1 e C 2 [31]. Em reforço à validação do sistema ocorrida na etapa de calibração foi confeccionada uma amostra de silicone. Os valores obtidos para o silicone foram então comparados aos valores obtidos em pesquisas análogas [1].

Para se minimizar o efeito da rugosidade superficial foram utilizadas gotas de volume constante e igual 0,1ml depositadas sobre a superfície em 3 áreas distintas. As imagens dos perfis foram adquiridas após decorridos dois minutos de modo que se pôde supor ser desprezível a influência da reorientação dos grupos polares superficiais. A Figura 4,4 apresenta os valores médios obtidos em cada área.

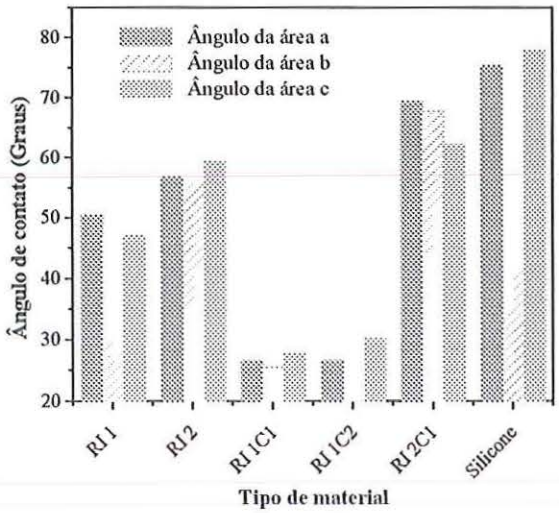


Figura 4,4: Ângulos de contato das gotas de água depositadas sobre os materiais poliméricos.

A Tabela 3, abaixo, apresenta a média dos valores obtidos nas três áreas distintas (a, b e c) e a conseqüente classificação segundo normalização STRI.

Tabela 3 – Nível de Hidrofobicidade STRI

Material Polimérico	**Ângulo Médio (graus)**	**Desvio Padrão**	**Nível de Hidrofobicidade STRI**
RI 1	48,20	1,99	HC 3
RI 2	57,34	1,91	HC 2
RI 1 C 1	26,68	1,13	HC 3
RI 1 C 2	27,76	2,27	HC 3
RI 2 C 1	66,49	3,85	HC 2
Silicone	76,37	1,48	HC 2

Ressalta-se que os valores obtidos para amostra de silicone são compatíveis com os valores apresentados em literatura [01]. Sobretudo quando observado o nível de envelhecimento da amostra utilizada por conta de sua utilização como molde para a confecção de isoladores, o valor obtido (76,37º) apresenta coerência com o intervalo limitado pelos valores mínimo e máximo de 70º e 110º respectivamente

Capítulo 5:

Conclusões

Como forma de apresentar com o destaque e a objetividade convenientes as conclusões do trabalho, este capítulo será dedicado à apresentação da análise dos resultados segundo seus vários enfoques específicos. Neste formato serão apresentadas aqui as conclusões acerca da aplicabilidade das técnicas de processamento digital de imagens ao diagnóstico da hidrofobicidade superficial, acerca da confiabilidade do sistema implementado e, por fim, acerca da aplicabilidade das novas resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona à isolação externa em alta tensão. Os tópicos subseqüentes serão mais detalhados ao apresentar cada um dos aspectos separadamente.

5.1 – Quanto à Aplicabilidade das Técnicas de Processamento Digital de Imagens na Avaliação da Hidrofobicidade Superficial

À avaliação da hidrofobicidade por medição do ângulo de contato associam-se incertezas que se devem essencialmente à heterogeneidade das superfícies e a seu comportamento dinâmico. Conforme descrito no primeiro capítulo, fenômenos como a reorientação de grupos moleculares superficiais e as dispersões dos níveis de hidrofobicidade ao longo da superfície são responsáveis pelo estabelecimento de ângulos de contato que eventualmente não se relacionam com os níveis efetivos de hidrofobicidade da superfície. Com efeito, a avaliação pontual do ângulo de contato tem sua representatividade comprometida quanto ao estado geral da superfície.

As técnicas de processamento de imagem mais elaboradas, entretanto, são capazes de prover um acesso mais preciso à hidrofobicidade efetiva da superfície. Ao contemplarem informações referentes a vários pontos da superfície por imagiamento de regiões mais amplas da área em análise, rotinas de processamento podem ser utilizadas na avaliação do estado mais geral da superfície. A avaliação da entropia das imagens [11], por exemplo, tem sua aplicabilidade comprovada na identificação de níveis de hidrofobicidade superficiais médios de toda uma área imagiada.

A avaliação do ângulo de contato por processamento digital da imagem minimiza a dificuldade da identificação do contorno. Dado que o sistema passa a ser livre da intervenção humana ele torna-se fixo em critérios e assegura-se repetitividade e confiabilidade aos resultados. Neste sentido, o processamento de imagem reduz os erros na avaliação da hidrofobicidade por medição do ângulo de contato aos intrínsecos ao princípio de medição. Os princípios e técnicas utilizadas no processamento poderiam até mesmo ser utilizados na implementação de solução que avaliasse a expressão mais geral da hidrofobicidade.

A alternativa que vem sendo estudada para a avaliação da hidrofobicidade em serviço em substituição ao uso do processamento de imagem é a avaliação da corrente de fuga. Sua insensibilidade a maiores níveis de hidrofobicidade, entretanto, tem sinalizado sua aplicabilidade exclusiva à predição das descargas disruptivas. Esta limitação reforça a apresentação das técnicas que têm como fundamento o processamento de imagens como as mais convenientes à avaliação global do nível de hidrofobicidade superficial.

Em síntese, pôde-se concluir que o processamento de imagens apresenta-se hoje como a solução mais promissora para a avaliação dos níveis de hidrofobicidade efetiva. Sobretudo por contemplar a influência do comportamento eletrohidrodinâmico das gotas de água e assegurar sua aplicabilidade à avaliação em serviço, o processamento de imagens constitui

hoje a solução mais completa quando levadas em consideração as não idealidades das condições de avaliação.

5.2 – Quanto ao Nível de Hidrofobicidade das Resinas Poliuretanas Derivadas do Óleo de Mamona

A utilização de materiais poliméricos na isolação em alta tensão justifica-se pela manutenção de níveis de suportabilidade em condições atmosféricas desfavoráveis. Resultado direto do seu maior nível de hidrofobicidade superficial quando comparado aos tradicionais materiais empregados na isolação em alta tensão como o vidro e a porcelana, esta propriedade dos polímeros justifica seu uso mesmo quando levado em consideração seu maior custo. Neste contexto, a hidrofobicidade superficial dos materiais poliméricos apresenta-se como sua principal característica.

A aplicabilidade de materiais poliméricos como as novas resinas poliuretanas na isolação externa em alta tensão, portanto, tem como uma das condições a apresentação de bons níveis de hidrofobicidade superficial. Dentre outras propriedades como a estabilidade térmica e a resistência à erosão, a hidrofobicidade destaca-se como fator viabilizador da utilização destes materiais.

A avaliação das novas resinas quanto ao nível de hidrofobicidade sinalizou níveis intermediários de hidrofobicidade. Conforme se pode atestar pela tabela 4.4, as resinas puras RI 1 e RI 2 apresentaram ângulos de contato estático médios iguais a 48,2° e 57,34° respectivamente. Correspondentes a níveis STRI iguais a HC 3 e HC 2, estes níveis de hidrofobicidade são também apresentados por materiais popularmente empregados na isolação externa em alta tensão. A amostra de borracha de silicone, por exemplo, conforme se pode observar na tabela 4.4 apresentou ângulos de contato médio de 76,37° e classe de hidrofobicidade HC 2.

A adição de cargas às resinas, responsável pela melhoria em propriedades como a mecânica, teve repercussão diferenciada nos níveis de hidrofobicidade das resinas RI 1 e RI 2. Conforme consta na tabela 4.4 os ângulos de contato na resina RI 1 sofreram diminuição de 21,52° e 20,41° pela adição das cargas C 1 e C 2 respectivamente. Diferentemente, a resina RI 2 experimentou um aumento no ângulo de contato de 9,15°.

Estes resultados preliminares indicam que as resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona apresentam altos ângulos de contato e, conseqüentemente, consideráveis níveis de hidrofobicidade superficial. Enquanto vidro e porcelana apresentam valores típicos de 44° e 47°, respectivamente, os valores obtidos para as novas resinas variam entre 50° e 60° caracterizando estes materiais como de hidrofobicidade intermediária entre o silicone e os cerâmicos utilizados na confecção de isoladores. Estudos têm

sido conduzidos no sentido de caracterizar quanto à hidrofobicidade produtos que utilizam estas resinas.

5.3 – Quanto à Validação do Sistema

A avaliação da hidrofobicidade por medição do ângulo de contato imbute na classificação erros cujas naturezas devem-se às mais variadas propriedades dos polímeros. Seja por conta do comportamento dinâmico de sua superfície ou pela dispersão natural que a hidrofobicidade experimenta ao longo da superfície, têm sido considerados desprezíveis erros na medição do ângulo de contato inferiores a 1 grau.

Neste contexto, ao se considerar os resultados apresentados nas tabelas 4.1 e 4.3, o sistema implementado tem sua validação comprovada. As contribuições das etapas de processamento (tabela 4.1) e da aquisição (tabela 4.3) definiram erros médios de 0,65º para a faixa de ângulos avaliada.

Os erros associados à etapa do processamento deveram-se quase que exclusivamente à discretização da representação por pixels no formato digital segundo sua repercussão na parametrização da gota e na identificação por Hough da referência horizontal. A minimização destes erros ocorre por aumento na resolução da imagem adquirida e do espaço em memória dedicado à representação do espaço de parâmetros de Hough. A pequena contribuição

para a composição dos desvios, entretanto, não justificou a implementação de solução desta natureza quando levados em consideração o conseqüente aumento do esforço computacional demandado e do custo do equipamento de aquisição das imagens.

Os erros associados à etapa de aquisição deveram-se às suas não idealidades segundo sua influencia na definição do contorno do perfil da gota. A influência da iluminação externa, a não uniformidade da luminosidade do anteparo e o baixo contraste apresentado entre a gota e o anteparo implicaram na obtenção de contornos mais espessos. Na solução deste problema podem ser utilizadas câmaras escuras e iluminação do anteparo mais uniforme. Por conta da simplicidade da montagem e do baixo custo do sistema conforme implementado, ao se considerar os desvios obtidos no sistema, optou-se pela sua manutenção.

Em resumo, conclui-se que o sistema implementado constitui ferramenta confiável para a medição do ângulo de contato. Maiores graus de confiabilidade poderiam ser atingidos mediante modificações simples como a utilização de câmera com maior resolução, maior espaço em memória dedicado à representação do espaço de parâmetros de Hough e a utilização de câmara escura para aquisição das imagens. Entretanto, estas modificações não se justificam quando observada a incerteza implícita que o ângulo de contato reserva em representação à hidrofobicidade.

Em continuação ao trabalho nesta linha de pesquisa tem sido proposto em nível de doutoramento o estudo das técnicas de processamento de imagem na avaliação efetiva da hidrofobicidade superficial. Pretende-se desenvolver ferramenta para avaliação das superfícies poliméricas que incorpore o efeito do comportamento eletrohidrodinâmico das gotas de água e a dispersão em seus níveis ao longo da superfície. Assim, se terá implementado ferramenta inédita capaz de apresentar resultados que sejam mais representativos no que se refere à repercussão das variações dos níveis de hidrofobicidade sobre o nível de suportabilidade.

Capítulo 6:

Referências Bibliográficas

[1] R. Hackam, "Outdoor High Voltage Composite Polymeric Insulators", Transactions on Dieletric and Eletrical Insulation, Vol. 6, N. 5, pg. 557-585, 1999, IEEE.

[2] T. Kikuchi, S. Nishimura, M. Nagao, K. Izumi, Y. Kubota e M. Sakata "Survey on the Use of Non-Ceramic Composite Insulators", Transactions on Dieletrics and Eletrical Insulation, Vol. 6, N. 5, Outubro, 1999, pg. 548-556, IEEE.

[3] E. M. Sherif, "Perfomance and Aging of HVAC and HVDC Overhead Line Insulators", Ahalmes Institute of Technology, Suécia, 1987.

[4] R. S. Gorur, J. W. Chang e O. G. Amburley, "Surface Hydrophobicity of Polymers Used For Insulation" IEEE Transactions on Power Deliveru, Vol 5, N. 4, Novembro, 1990.

[5] K. Ermeler e W. Pfeifer "About the Correlation Between the Hydrophobicity and the Impulse Withstand Voltage Characteristics of Insulation Material Surfaces

Under Humidity Conditions", Annual Report Conference on Eletrical Insulation and Dieletric Phenomena, 2001, IEEE.

[6] Z. Jiz e Z. Guan "The Discharge Along Hyudrophobic and Hydrophilic Surfaces" Internation Symposium on Eletrical Insulation, Conference Report, 2002, IEEE.

[7] J. G. Wankowicz, S. M. Gubanski e W. D. Lampe "Loss and Recovery of Hydrophobicity on RTV Coanting Surfaces". IEEE Transactions on Dieletrics and Eletrical Insulation, Vol. I, N. 4, Agosto, 1994, Pg. 604 a 614.

[8] Guia para Classificação de Hidrofobicidade, STRI, Suécia, 1992.

[9] D. Allan, M. Blundell, K. Boyd e D. Hinde "New Techiques for Monitoring the Insulation Qualityu of In-Service High Voltage Apparatus", Vol. 27, N. 3, Junho 1992, Pg 578 a 585.

[10] M. Berg, R. Thottappillil e V. Scuka, "A Digital Image Processing Method for Estimating the Level of Hydrophobicity of High Voltage Polymeric Insulating Materials", Conference on Electrical Insulation and Dieletric Phenomena, IEEE, 1999.

[11] T. Tokoro, M. Nagao e M. Kosaki, "Image Analysis of Hydrophobicity of Polymer Insulators by Observing at Microscopic Área", Conference on Electrical Insulation and Dieletric Phenomena,Pg. 226 – 229, IEEE, 2000.

[12] M. Berg, R. Thottappillil e V. Scuka, "Hydrophobicity Estimation of HV Polymeric Insulating Materials", Transactions on Dieletrics and Eletrical Insulation, Vol. 8, N. 6, IEEE, Dezembro, 2001

[13] D. Sankowski, K. Strzecha e S. Jezewski, "Computerized Device with CCD Câmera for Measurement of Surface Tension and Wetting Angle in Solid-Liquid Systems", IEEE, 1999.

[14] T. Young, "Miscellaneous Work", Vol 1, G. Pecock, Ed. Murray, Londres, 1855, pg. 418

[15] G. G. Karady, F. Amarh e R. Sundarajan, "Dynamic Modeling of AC Flashover Characteristics" ,High Voltage Engineering Symposium, agosto, 1999, Conference Publication N. 467, IEE

[16] J. P. Rey, I. R. Jandrell e S. M. Reynders "Review of Aging Recovery of Silicone Rubber Insolation for Outdoor Use" IEEE Transactions on Dieletrtics And Eletrical Insulation. Vol. 6, N. 5, Outubro, 1999

[17] **Adamson, Arthur S.**- *Physyical Chemistry of Surfaces* – Fifth Edition – Wiley Interscinence – 1990

[18] **R. Aveyard e D. ª Haydon** – *Introduction to principles of surface chemistry* – Cambridge University Press – 1973

[19] K. T. Sirait, Salama e Swanno – "Surface Hydrophocitity of Silicoine Rubber Under Natural Tropical Condition" High Voltage Enginnering Symposium, agosto, 1999, Conference Publication N. 467, IEE.

[20] V. Kalterborn, P. Meler e Y. Dirix – "Loss and Recovery of Hydrophobicity of Novel Hydrophobic Resins" Annual Report Conference on Eletrical Insulation and Dieletrics Phenomena" 2002, IEEE.

[21] T. Tokoro, M. Nagao e M. Kosaki "Image Analysis of Hydrophociity off Silicone Rubber Insulator" Conference on eletrical Insulation and Dieletric Fenomena, IEEE, 1999.

[22] M. Kahle, H. Adolf, "The Influence of The Structure of Elastomeric Insulators Coatings on the Degradation and Recovery Process" 9º ISH, Graz, 1995, pg. 3031(1-4)

[23] Y. Jun e S. Qinghe "Investigation on Hyudrophobicity and Polution Status of Composite Insulators in Contaminated Áreas" Annual Report Conference on Eletrical Insuylation and Dieletric Phenomena – IEEE, Outubro, 2001.

[24] H. Jansen, U. Steizel, "Contact Angle Measuring on Clean and Poluted High Voltage Olymer Insulator", ISH, Montreal, pg. 149-152

[25] H. Buchner, F. Schmuck, A. Zanetti, B. Barsch, H. Jahn e J. Labrecht, "A Comprehensive Program For Evalution of Essential Material Properties of Silicone Rubber for Outdoor High Voltage Applications", Cigré Regional Meeting for the African Continent, Cairo, 1997.

[26] A. Bognar, G. Y. Besztercey, G. Y. Banhegyi, R. Kimata, P. Szaplouczay "Study of Surface Properties of Silicone Rubber Compounds for Composite Insulators", SEE – Societe des Eletriciens et Electronicies Conference, Paris , Junho, 1994, pg. 113-118

[27] S. M. Reynders, J. P. Reynders, I. R. Jandrell," Recoivery of Corona Aged Silicone Rubber Insulation", Cigré Regional Meeting for the African Continent, Cairo, 1997, V. 102

[28] W. L. Vosloo, J. P. Holtzhausen e A. H. A. Roediger, "Leakage Current Performance of Naturally Aged Non-Ceramic Insulators under Severe Marine Environment", Africon 96, Stellengosch, setembro, 1997, pg. 489-495, IEEE.