

1

Introdução

Muitos processos naturais e industriais abrangem fenômenos dominados pela mecânica interfacial, isto é, que ocorrem dentro das regiões de interseção entre as fases líquidas, sólidas e gasosas. As aplicações abrangem desde processos de revestimento, filmes finos até espumas. Vários produtos que são produzidos pela deposição de uma camada fina de líquido aplicada sobre uma superfície sólida, são de valor significativo para a indústria, devido ao seu emprego em diferentes aplicações. O processo de revestimento de superfícies sólidas por uma camada de líquido também acontece de forma natural, como nos casos de revestimentos dos alvéolos pulmonares por uma camada fina de mucosa e da lubrificação da córnea.

Uma das importantes aplicações de dispositivos revestidos é o sistema de impressão digital onde o processo eletrofotográfico é usado para impressão. Este processo utiliza um cilindro revestido de um material fotocondutor e fotossensível que tem como características principais aceitar e reter carga eletrostática, ser sensível pela presença de luz, e assim permitir a formação e transmissão da imagem-fonte na etapa de impressão.

A qualidade da reprodução das imagens obtidas neste sistema de impressão tem função direta com a qualidade e desempenho do cilindro fotorreceptor, também conhecido como fotocondutor. Frequentemente, a etapa de revestimento no processo de manufatura deste cilindro é significativa em relação ao custo, tempo envolvido e o nível de tecnologia requerida para a produção de um cilindro fotorreceptor de qualidade. Assim, o processo de revestimento de cilindros fotorreceptores é um desafio para a indústria. Para serem competitivos no mercado, todos os processos de manufatura devem ser eficientes e devem manter um aceitável nível de controle de qualidade.

Um dos fatores mais importantes a serem tomados em consideração no processo de revestimento é, em geral, a precisão e a uniformidade da espessura da camada de líquido revestida, sendo que o grau de uniformidade depende da aplicação final do produto. A aplicação dos cilindros fotorreceptores nos sistemas de impressão digital demandam tolerâncias mínimas no diâmetro e na excentricidade, para assim assegurar uma impressão de alta qualidade.

Atualmente existem processos descritos em patentes que são aplicados na indústria de manufatura que satisfazem as exigências de fabricação destes tipos de cilindros, mantendo um aceitável nível de precisão e uniformidade. Porém, a otimização do processo e a eliminação de certas imperfeições só pode ser alcançada com um melhor entendimento fundamental do processo.

1.1

Processo de revestimento do cilindro fotorreceptor

A aplicação do revestimento na superfície de cilindros sólidos tem como finalidade reforçá-los, protegê-los e/ou torná-los aptos para desempenhar diferentes funções. Uma importante aplicação na indústria e que envolve esta pesquisa é no processo de fabricação dos componentes dos sistemas de impressão digital e mais especificamente em sistemas eletrofotográficos.

Nas próximas subseções será feita uma breve descrição funcional dos sistemas de eletrofotografia, dos componentes dos cilindros fotorreceptores e finalmente uma descrição em detalhe do processo de revestimento do cilindro e os defeitos que se apresentam neste processo.

1.1.1

Descrição dos sistemas de eletrofotografia ou xerografia

O primeiro nome deste processo chamava-se eletrofotografia, mas por motivos comerciais foi trocado para xerografia que vem do grego *xeros* (seca) e *graphos* (escrita). Os equipamentos que utilizam este tipo de processo são as máquinas xerográficas, patenteadas pelo inventor americano Chester F. Carlson em 1938 ([1]), que tem como principal característica a utilização de cargas elétricas para a obtenção de cópias em papel. Comercialmente, estas máquinas ficaram conhecidas como *Xerox* porque foram fabricadas pela primeira vez pela empresa *Haloid Xerox Inc.*, que atualmente é conhecida como *Xerox Corporation*. Um importante componente deste tipo de máquina é o cilindro fotorreceptor previamente revestido de um material fotossensível, pois é ele que tem a propriedade de tornar-se condutor na presença de luz e semi-condutor na ausência da luz. Sua estrutura possui uma base de alumínio, ou material condutor, e uma camada externa do material fotocondutor. Considera-se o cilindro fotorreceptor o elemento essencial do equipamento, pois sem ele o processo eletrográfico das máquinas xerográficas não ocorreria.

O processo de impressão se inicia com o carregamento eletrostático uniforme na superfície do cilindro fotorreceptor, por meio do efeito corona através de um fio condutor, como mostrado na fase “1” da Fig. 1.1. Logo depois o cilindro gira até onde se realiza a exposição, seja pela varredura de uma fonte

laser ou por um feixe de diodos emissores de luz (Leds). A imagem-fonte a ser copiada é reproduzida por esta exposição que forma uma imagem latente de cargas eletrostáticas na superfície do cilindro fotorreceptor, representada pela fase “2”. Em seguida o cilindro passa pelo depósito de toner (tinta em pó ou líquida) que possui partículas com carga elétrica que irá permitir que o toner se fixe na superfície do cilindro somente onde tem carga eletrostática. As áreas da imagem que conseguiram manter sua carga após a exposição (aquelas que não receberam a luz) atraem o toner e a imagem eletrostática latente se converte numa imagem de toner, ver a fase “3”. O cilindro e a imagem giram até a zona de transferência, onde se encontra o papel, e outro fio condutor situado na parte posterior do papel induz uma carga eletrostática suficiente para transferir as partículas do toner sobre ele, como ilustrado na fase “4”. Depois o toner é fixado sobre o papel mediante combinação de calor e pressão, ver a fase “5”.

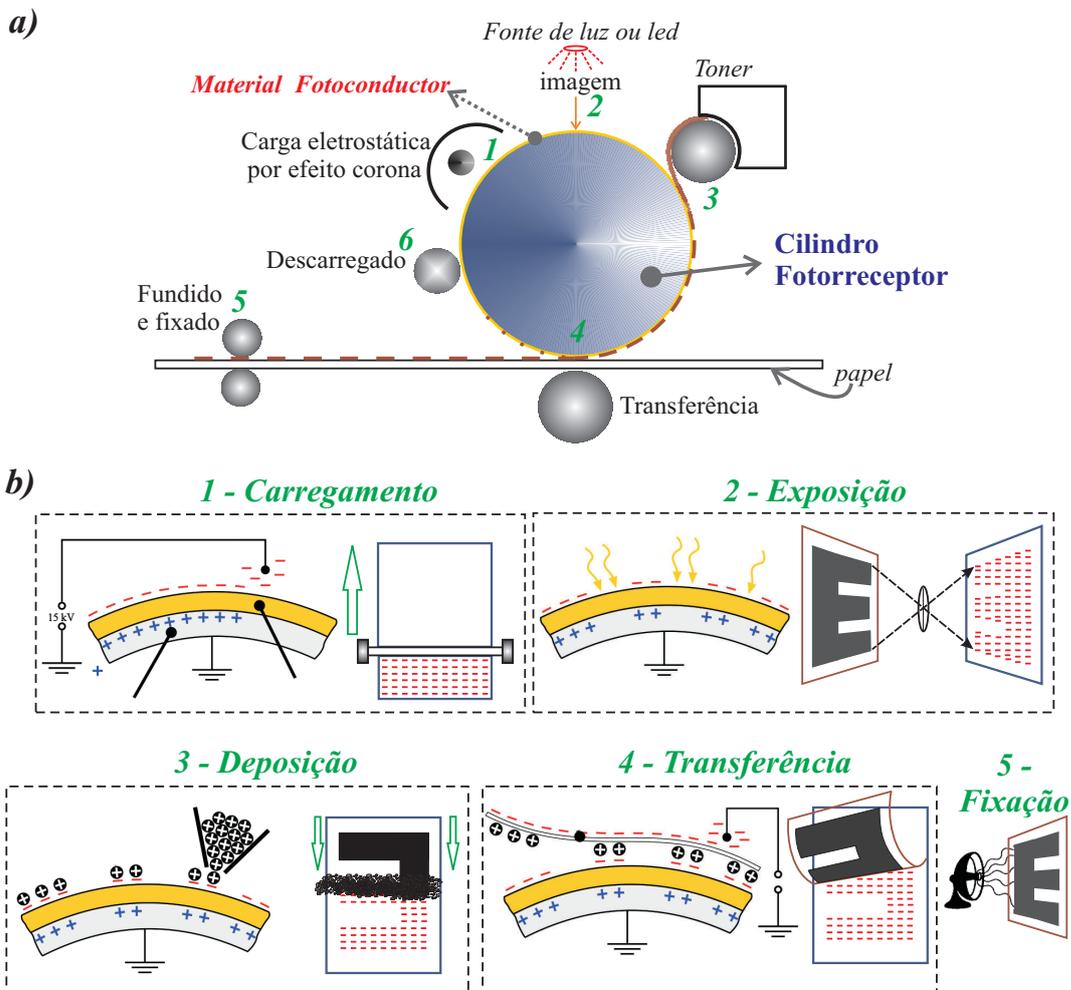


Figura 1.1: Desenho de um típico sistema de impressão eletrográfica, vista lateral (a) e uma seqüência aproximada dos passos utilizados por Carlson no processo eletrográfico, vista mista lateral e do topo (b)

Finalmente, o cilindro é descarregado eletrostaticamente e quaisquer partículas do toner remanescentes no cilindro são eliminadas por meio de uma escova rotativa ou por uma lâmina de limpeza, correspondente à fase “6”.

1.1.2

Cilindro fotorreceptor

Existem vários materiais fotocondutivos, porém o mais utilizado hoje nas máquinas fotocopiadoras é o cilindro fotorreceptor OPC, que é a abreviatura de Fotocondutor Orgânico. O termo **orgânico** indica que o revestimento do fotocondutor é fabricado com compostos químicos baseados em carbono, mais especificamente polímeros fotocondutores sintetizados de matérias-primas obtidas através do refino de petróleo. Os cilindros OPC são geralmente considerados os fotorreceptores menos nocivos ao meio-ambiente disponíveis atualmente, principalmente porque os seus projetistas e fabricantes usam deliberadamente as matérias-primas que não causam danos ambientais. Todos os materiais são submetidos a rigorosos testes de segurança antes de serem utilizados na fabricação de cilindros OPC. Isto assegura que os cilindros OPC sejam alternativas não prejudiciais ao meio-ambiente quando comparados a fotorreceptores mais nocivos, como os cilindros de trisseleneto de arsênico (As_2Se_3) e os de telúrio de selênio ($SeTe$). Uma descrição mais detalhada dos materiais utilizados no processo de revestimento destes cilindros pode ser encontrada no trabalho de Pai & Springett [1].

1.1.3

Características físicas do cilindro fotorreceptor OPC

A maioria dos cilindros OPC são fabricados para receber uma carga negativa. Da camada mais interna até a mais externa eles normalmente são compostos de uma camada de substrato de alumínio, uma sub-camada de revestimento de base ou bloqueamento (UCL), uma camada de geração de carga (CGL) e a camada de transporte de carga (CTL), como mostra a Fig.1.2.

O substrato de alumínio facilita a fotocondutividade em termos físicos e elétricos, mas não desempenha um papel ativo no processo eletrofotográfico. A sua principal função é oferecer suporte estrutural e mecânico, e uma boa conexão de aterramento. A sub-camada de revestimento de base (UCL) funciona como uma interface entre o substrato e as camadas fotocondutoras, para fornecer adesão e evitar vazamentos indesejáveis de carga que podem deteriorar a qualidade da cópia. Esta sub-camada não desempenha um papel ativo no processo eletrofotográfico, como o substrato, mas também oferece uma

boa conexão de aterramento. Os materiais mais utilizados para a sub-camada incluem óxido de alumínio, alumínio anodizado e vários polímeros resistentes.

A camada de geração de carga (CGL) é extremamente fina, com uma espessura típica que varia de apenas 0,1 mícron até 1,0 mícron. A sua cor, que normalmente determina a cor do cilindro OPC, depende dos materiais específicos que contém. A sensibilidade à luz do CGL é um fator essencial no desempenho do cilindro OPC, e pode ser um fator limitante de velocidade de cópias na qual o cilindro OPC pode funcionar eficientemente.

A camada de transporte de carga (CTL) é a camada externa de um cilindro OPC cuja espessura é de 20 a 30 μm . Ela é essencialmente transparente, permitindo que a luz passe diretamente até atingir a camada de geração de carga. A camada de geração de carga determina basicamente a sensibilidade à luz de um cilindro OPC, já a camada de transporte de carga determina sua capacidade de aceitação de carga e velocidade de transporte de carga. Como esta é a camada mais externa, ela entra em contato com o toner, o revelador, o papel, a lâmina de limpeza do cilindro e outros agentes potencialmente abrasivos ou contaminantes. Conseqüentemente, as características de desgaste desta camada, sua durabilidade e resistência à abrasão são fatores essenciais no potencial da vida útil de um cilindro OPC.

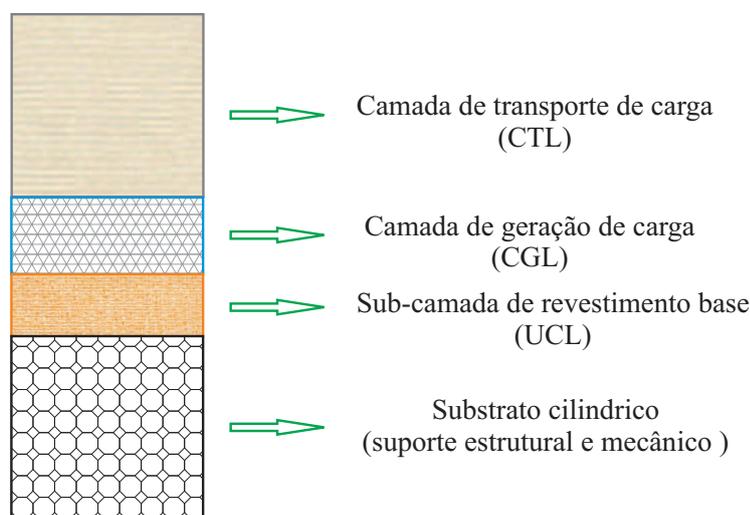


Figura 1.2: Estrutura genérica de um típico fotocondutor orgânico (OPC) e a descrição das diferentes camadas. Este tipo de desenho permite flexibilidade na escolha de materiais de maneira a otimizar a performance do dispositivo

Embora a descrição acima seja válida para a maioria dos cilindros OPC usados atualmente, existem alguns de carga positiva que são compostos por uma camada de geração de carga e uma camada de transporte de carga combinadas. Eles são chamados de cilindros OPC “de camada única”. Como

esta camada única determina todas as características elétricas e físicas do revestimento (inclusive aceitação de carga, fotossensibilidade e resistência ao desgaste) ela deve ser formulada e fabricada com extrema precisão. Os cilindros OPC de carga positiva normalmente têm vida útil mais curta do que os cilindros OPC “padrão”, pois a sua camada única, cuja composição inclui materiais “mais macios”, normalmente restritos à camada de geração de carga, é menos resistente à abrasão.

1.1.4

Vantagens da tecnologia de fotocondutores orgânicos

Há muitas razões significativas para a indústria de equipamentos de escritório estar adotando com relativa rapidez a tecnologia dos cilindros OPC. Em primeiro lugar os avanços nos materiais de revestimento e tecnologia de fabricação tornaram possível a fabricação de cilindros OPC mais sensíveis à luz e mais duráveis, adequando-os a uma ampla variedade de aplicações, tais como fotocopiadoras de alta velocidade (75 cópias por minuto ou mais). Os cilindros OPC utilizados na maioria das máquinas mais modernas fornecem altos níveis de qualidade de cópias e uma maior duração na vida útil anteriormente alcançadas apenas com os cilindros de trisseleneto de arsênio (As_2Se_3). As crescentes preocupações com o meio-ambiente também constituem um fator importante na adoção da tecnologia do cilindro. Esta conscientização global levou a uma expansão e intensificação das restrições legais sobre o procedimento de descarte de fotorreceptores de sulfeto de cádmio (CdS) ou os de selênio (As_2Se_3 e $SeTe$). Os cilindros OPC, classificados como dejetos não perigosos, são a alternativa mais conveniente disponível.

Outro motivo para os fabricantes preferirem a tecnologia OPC é que o seu processo de fabricação é muito mais econômico e rápido do que o processo de fabricação dos fotorreceptores de selênio. O método mais comum de fabricação dos cilindros OPC é o mergulho do cilindro na substância de revestimento. Este é um processo “contínuo” e de difícil controle da uniformidade das camadas de revestimento, enquanto que o processo de deposição de vapor usado para fabricar cilindros de selênio ou de silicone amorfo ($a - Si$) é um processo “discreto ou de lote”, isto é, requer-se a colocação seqüencial de lotes de cilindros em câmaras a vácuo para formar as diversas camadas de revestimento [1].

1.1.5

Processo de revestimento do cilindro fotorreceptor

Atualmente, uma nova tecnologia tem sido aplicada no revestimento de cilindros fotorreceptores OPC, que permite controlar as espessuras das camadas e que contribui para a diminuição dos custos de produção. Este método é mencionado na patente *U.S.Pat.Nº.6, 521, 330* [2], que será descrita a seguir.

O esquema da metodologia empregada no revestimento de cilindros fotorreceptores é mostrado na Fig. 1.3. O líquido a ser revestido é bombeado desde um reservatório até o bocal do alimentador (em forma de agulha) de onde o líquido escoar sobre a superfície externa do cilindro em forma de uma tira. O cilindro gira em torno de seu próprio eixo enquanto o bocal se desloca na direção paralela ao eixo longitudinal do cilindro, levando a uma deposição da tira de líquido sobre o cilindro em padrão espiral. A aplicação do revestimento é semelhante ao caminho de uma ferramenta de corte desbastando a superfície externa de uma peça cilíndrica num torno mecânico (ver Fig. 1.4).

Logo depois de depositado na superfície do cilindro, a camada líquida passa por um canal convergente formado entre a superfície do cilindro e o aplicador deformável que ajuda a distribuir o líquido lateralmente obtendo uma determinada espessura, fixada por meio de uma lâmina flexível. Na indústria, a espessura do filme fotossensível pode variar de 5 a 250 μm com uma faixa de tolerância $\pm 2,5\mu\text{m}$. O bocal do alimentador e o aplicador deformável são colocados preferencialmente numa mesma posição axial ao longo do eixo longitudinal do cilindro. A lâmina flexível tem uma superfície que é paralela e ligeiramente espaçada da periferia do cilindro, que ajuda a distribuir uniformemente o líquido.

Nesta última etapa, a fixação da espessura do líquido é controlada pela interação entre as forças elásticas do aplicador deformável e as forças hidrodinâmicas. Assim, temos um sistema elastohidrodinâmico no qual uma das fronteiras é deformada até atingir uma determinada forma ou posição de equilíbrio devido ao balanço entre as forças de restauração elástica do elemento deformável, a carga externa e as forças hidrodinâmicas geradas pelo escoamento do fluido.

Geralmente, após os passos descritos anteriormente, a espessura da camada líquida sobre o cilindro não é uniforme, formando uma superfície ondulada (ver Fig. 1.5 a) devido à uma interferência entre duas tiras de líquido espalhadas pelo aplicador deformável por dois passos consecutivos, como esquematizado no desenho da Fig. 1.5 b). A interferência cria uma pequena costura ao longo da superfície do cilindro revestido, influenciando no

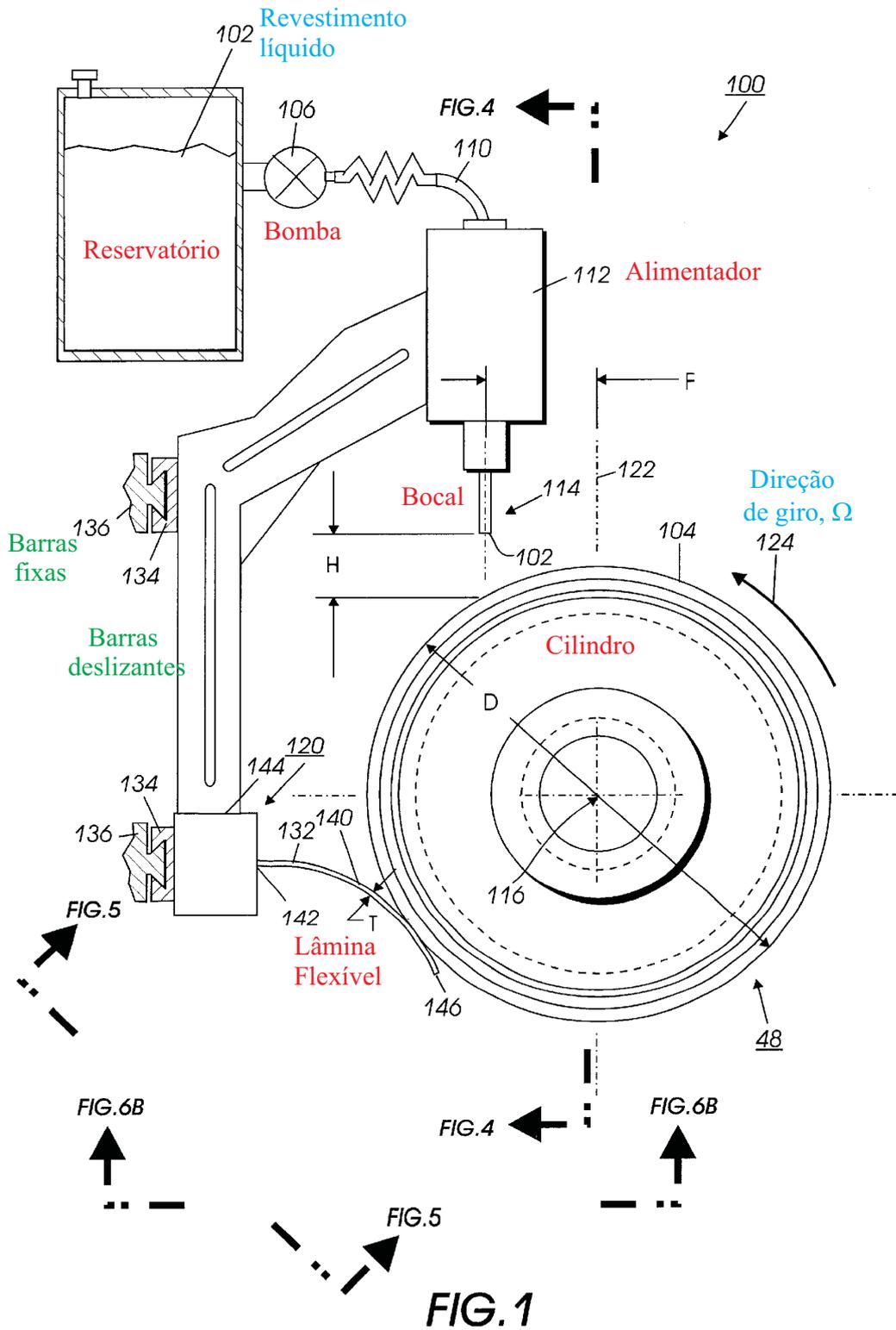


Figura 1.3: Vista simplificada dos componentes de um sistema que reveste cilindros fotorreceptores; (retirada da U.S. Pat. No. 6,521,330)[2]

acabamento final do revestimento e na qualidade da imagem no processo de impressão.

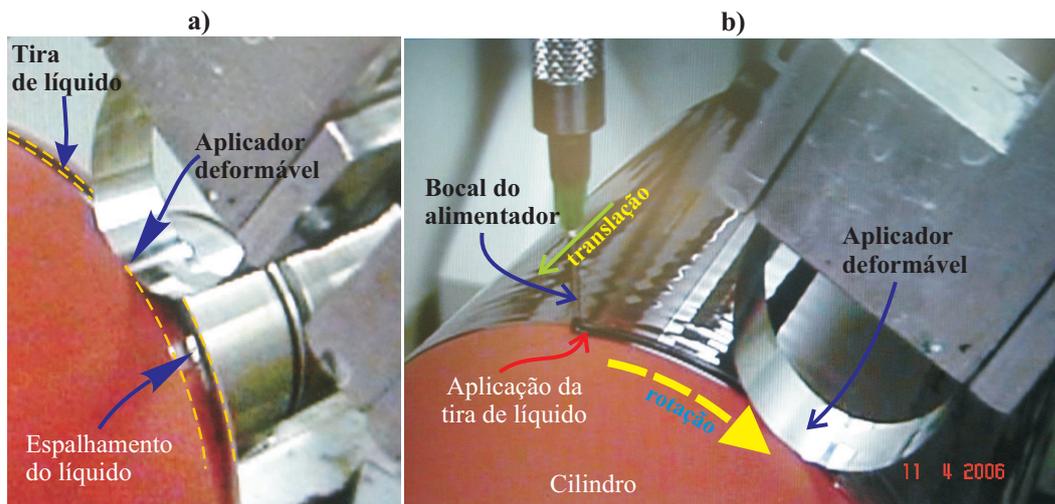


Figura 1.4: Fotografias do processo de revestimento de cilindros fotorreceptores (fornecidas pela Xerox Corporation) e a descrição de alguns elementos deste processo; (a) no tempo inicial do processo; (b) num tempo intermediário.

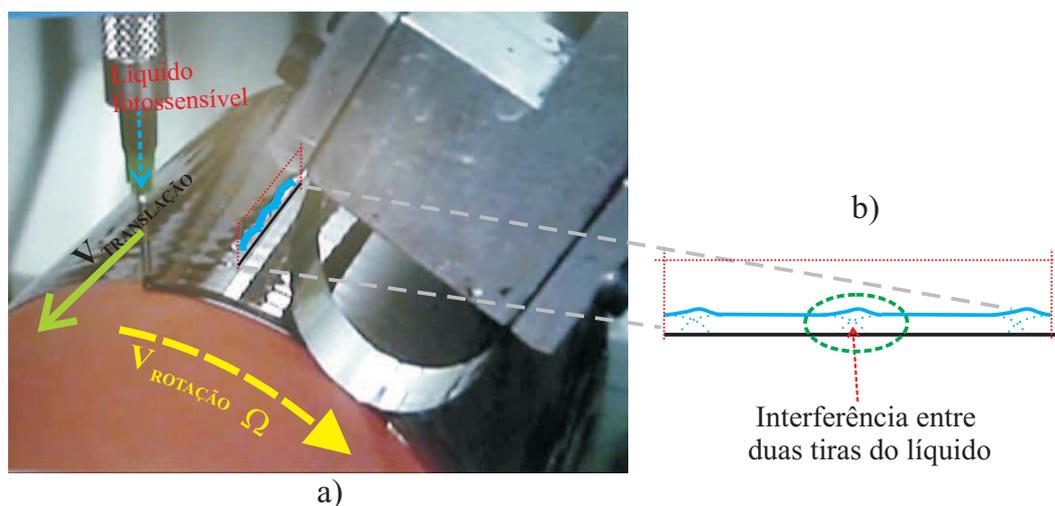


Figura 1.5: Superfície ondulada da camada revestida.

1.2 Escopo e Roteiro da Tese

Baseada na descrição do problema, a presente pesquisa tem como objetivo entender de forma fundamental os mecanismos físicos envolvidos no processo de revestimento de um cilindro fotorreceptor e desenvolver um modelo matemático e uma subsequente simulação numérica e computacional para descrevê-lo.

As propriedades do fluido mudam os campos de velocidade e pressão e também de maneira significativa as formas das interfaces, mudando a configuração final do filme revestido. Os efeitos de interferência entre as tiras de líquido podem ser reduzidos pelo controle das condições de operação do

processo e das propriedades hidrodinâmicas, conseguindo dessa maneira a otimização do processo.

Neste trabalho, o processo de revestimento de cilindros fotorreceptores foi estudado por uma abordagem numérica resolvendo as equações que descrevem o modelo teórico do processo. O desenvolvimento deste complexo modelo teórico foi feito por etapas.

Primeiro, foi estudado o escoamento $3D$ de um filme fino alimentado por duas portas de injeção num plano inclinado, com o objetivo de entender como duas tiras de líquido interagem e escoam no plano. Nesta etapa, foi também desenvolvida uma abordagem experimental, visualizando a região de interação e quantificando a cinemática do processo para as diferentes propriedades do líquido. Comparações quantitativas foram efetuadas para validar o modelo numérico. Os dados experimentais foram obtidos numa bancada de testes do laboratório de revestimentos do Departamento de Engenharia Química da Universidade de Minnesota, USA.

A segunda etapa consistiu de uma análise $3D$ da camada de filme fino sobre superfícies cilíndricas em rotação, onde o objetivo foi estudar como as forças de arraste viscoso do cilindro em rotação, as forças de tensão superficial e gravitacional afetam o perfil da espessura do filme uniforme ao longo da direção azimutal e axial.

A terceira etapa consistiu da combinação das etapas anteriores e correspondeu à completa análise $3D$ de um filme fino sobre uma superfície cilíndrica em rotação com uma porta de injeção de líquido em movimento. O objetivo aqui consiste em ajustar os diferentes parâmetros que governam o processo de revestimento a fim de reduzir os efeitos de interferência por nivelamento.

Na quarta e última etapa, o efeito de solidificação do líquido do revestimento foi analisado utilizando um modelo para a viscosidade em função do tempo. Esta etapa teve como objetivo analisar a competição dos efeitos de nivelamento e solidificação, controlando o tempo suficiente para o nivelamento acontecer e evitar o escoamento do líquido na direção da base do cilindro por efeito gravitacional.

O trabalho desenvolvido cobre áreas de pesquisa bastante amplas: processo de revestimento de cilindros com e sem injeção de líquido e processo de solidificação. Por tal motivo não é possível apresentar nesta seção um resumo de toda a literatura encontrada. Optamos por citar e comentar ao longo da tese, quando conveniente, os diversos trabalhos encontrados.

No capítulo 2 serão apresentadas as equações matemáticas que descrevem o escoamento de uma camada de filme fino sobre um plano inclinado de portas de injeção. O método numérico utilizado para resolver as equações diferenciais,

o procedimento numérico para lidar com superfícies livres, e a linha de contato dinâmica serão também apresentados neste capítulo.

É importante que o código computacional seja validado comparando com dados experimentais para assim proceder a sua aplicação no problema de interesse. Esta validação é apresentada no capítulo 3, para o problema descrito no capítulo 2. A abordagem experimental é apresentada também neste capítulo, onde são descritos a bancada experimental utilizada, o procedimento seguido e os resultados obtidos.

No capítulo 4, será tratado o problema do escoamento de filmes finos, gerados por injeção contínua de líquido de uma porta de injeção, sobre superfícies cilíndricas. O método numérico utilizado para resolver as equações diferenciais e a validação com casos padrões encontrados na literatura são também apresentados.

No capítulo 5 será descrita em detalhe a formulação matemática do processo de pseudo-solidificação do problema descrito no capítulo 4, o método numérico utilizado e os resultados numéricos obtidos.

E finalmente, os comentários finais e sugestões para trabalhos futuros serão apresentadas e discutidas no capítulo 6.