

**Pontifícia Universidade Católica  
do Rio de Janeiro**



**Bruno Pereira de Macedo**

**Estudo Experimental da Transferência de uma  
Gota de Líquido entre uma Superfície  
Plana e um Cilindro em Rotação**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Márcio da Silveira Carvalho  
Co-orientador: Dr. Danmer Paulino Maza Quinones

Rio de Janeiro  
novembro de 2017

**Pontifícia Universidade Católica  
do Rio de Janeiro**



**Bruno Pereira de Macedo**

**Estudo Experimental da Transferência de uma  
Gota de Líquido entre uma Superfície  
Plana e um Cilindro em Rotação**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dr. Danmer Paulino Maza Quinones**

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Mônica Feijó Naccache**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dr. Eduardo de Britto Perez**

3M do Brasil

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de novembro de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Bruno Pereira de Macedo**

Graduou-se em Engenharia Química na UFSCar (Universidade Federal de São Carlos) em 2009. Teve seu desenvolvimento pessoal na iniciativa privada sendo engenheiro de processos na área de revestimento na 3M do Brasil.

#### Ficha Catalográfica

Macedo, Bruno Pereira de

Estudo experimental da transferência de uma gota de líquido entre uma superfície plana e um cilindro em rotação / Bruno Pereira de Macedo ; orientador: Márcio da Silveira Carvalho ; co-orientador: Danmer Paulino Maza Quinones. – 2017. 92 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Microimpressão. 3. Capilaridade. 4. Linha de contato. I. Carvalho, Márcio da Silveira. II. Maza Quinones, Danmer Paulino. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Para minha esposa, Carla pelo apoio,  
compreensão e incentivo.

## Agradecimentos

À Deus por toda criação.

Ao meu orientador Professor Márcio da Silveira Carvalho pela oportunidade de especialização na minha área de atuação.

À 3M do Brasil pelo incentivo a ampliação do conhecimento técnico e investimento nos colaboradores.

Ao Danmer, Felicle e Leonardo pelo suporte prestado durante a preparação de cada experimento no Laboratório de Microhidrodinâmica e Escoamento em Meios Porosos.

Aos meus pais, pelo esforço feito por eles e incentivo para que eu tivesse uma boa educação.

Aos professores que participaram da Comissão Examinadora.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica que contribuíram para a minha formação.

Aos amigos e familiares pelo apoio, estímulo e força nos momentos difíceis.

## Resumo

Macedo, Bruno Pereira de; Carvalho, Márcio da Silveira; Quinones, Danmer Maza. **Estudo experimental da transferência de uma gota de líquido entre uma superfície plana e um cilindro em rotação.** Rio de Janeiro, 2017 92p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O processo de impressão por rotogravura é largamente usado na manufatura de revistas pela sua alta velocidade de aplicação. As aplicações deste processo vêm sendo ampliadas para o processo de impressão de circuitos eletrônicos em substratos flexíveis, onde o grau de precisão e controle são bem maiores, já que falhas na impressão levam ao mal funcionamento dos dispositivos fabricados. O processo consiste na transferência de fluido de uma superfície a outra formando uma ponte de fluido. No entanto, essa operação aparentemente simples apresenta mecanismos ainda não bem compreendidos que têm efeito direto na precisão do padrão impresso. O entendimento dos mecanismos de transferência de fluidos entre duas superfícies formando pontes de fluido vai além dos processos de impressão, como tribologia, biologia, recuperação de óleo e microfluídica. Muitos estudos têm sido direcionados para o entendimento da transferência de fluidos entre superfícies e cavidades através do uso de simulação computacional; entretanto os ensaios experimentais são escassos dada a complexidade na execução dos mesmos, principalmente pela pequena dimensão e alta velocidade do escoamento. O objetivo principal deste trabalho é analisar experimentalmente a dinâmica da transferência de uma gota para um cilindro de borracha em movimento rotacional. O ensaio experimental foi realizado utilizando uma mesa de cobrimento com cilindro motorizado e uma câmera de alta velocidade para visualizar o processo. Os resultados mostram como as propriedades dos fluidos, o número de capilaridade, a posição relativa do cilindro com relação à superfície da gota e a interação fluido-estrutura (molhabilidade) influenciam o processo de formação da ponte de fluido, o volume de fluido transferido entre as superfícies e o padrão impresso.

## Palavras-chave

Microimpressão; capilaridade; linha de contato.

## Abstract

Macedo, Bruno Pereira de; Carvalho, Márcio da Silveira (advisor); Quinones, Danmer Maza (co-advisor). **Experimental study of liquid transfer from a plate and a rotating roll**. Rio de Janeiro, 2017 92p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Gravure printing process is widely used for the production of magazines because of its high speed. Gravure printing application is being expanded to flexible electronic circuits, at which the degree of precision is much higher, since small printing defects can lead to circuit malfunctioning. Gravure printing process consists in liquid transfer from one surface to another, forming a liquid bridge. However, this seemingly simple operation has flow phenomena not well understood that have a direct impact on the printing pattern. Liquid transfer forming liquid bridges goes beyond printing processes and includes applications such as tribology, biology, oil recovery and microfluidics. There are many studies driven towards the fundamental understanding of liquid transfer between surfaces and cavities by computational simulation. However, experimental analyses are rare because of the complexity of the problem, mainly associated with the small scale and high speed of the flow. The goal of this research is to analyze experimentally the liquid transfer dynamics of a liquid drop to a rotating cylinder. The experiments were done using a draw-down coating apparatus with a rotating roll and a high-speed camera for flow visualization. The results show how different liquid properties, surface wettability and operating conditions affect the formation of the liquid bridge, the volume of liquid transfer and the printing pattern.

## Keywords

Micro printing; capillarity; contact line.

## Sumário

1. Introdução	14
1.1. A História da Impressão e seus tipos	15
1.2. Descrição do Comportamento da Interface Líquido-Substrato	21
1.3. Caracterização da Ponte de Líquido em Superfícies Planas	23
1.3.1. Aspectos do Movimento Extensional	23
Estudos Baseados em Ensaio Experimentais	23
Análises Oriundas de Simulação Computacional	26
1.3.2. Aspectos do Movimento de Cisalhamento e/ou Rotacional	29
Análises Oriundas de Simulação Computacional	29
1.4. Caracterização da Ponte de Líquido em Cavidades Singulares e/ou Múltiplas	29
1.4.1. Aspectos do Movimento Extensional	30
Estudos Baseados em Ensaio Experimentais	30
Análises Oriundas de Simulação Computacional	34
1.4.2. Aspectos do Movimento de Cisalhamento e/ou Rotacional	37
Estudos Baseados em Ensaio Experimentais	37
Análises Oriundas de Simulação Computacional	42
2. Abordagem Experimental	48
2.1 Aparato Experimental	48
2.1.1. Mesa de Cobrimento	48
2.1.2. Câmera de Alta Velocidade	50
2.1.3. Tensiômetro	52
2.1.4. Reômetro	53
2.1.5. Caracterização de Líquidos	54
2.2 Procedimento Experimental	55



3. Resultados	59
3.1. Relação de Volume Transferido e Número de Capilaridade	61
3.2. Diferentes Alturas de Cilindro	73
3.3. Cilindro com Tratamento Superficial	80
4. Conclusão e Sugestões	89
5. Referências Bibliográficas	91

## Lista de Figuras

Figura 1 - Evolução da deposição e transferência de líquidos entre duas superfícies	21
Figura 2 - Tipos de Movimentos entre superfícies	22
Figura 3 - Fração de líquido removido da célula (“pick out”) em função do número de capilaridade obtido por Sankaran & Rothstein (2012)	32
Figura 4 - Ilustração de uma cavidade trapezoidal utilizada por Dodds et al. (2009)	36
Figura 5 - Fração de líquido transferido em função do número de capilaridade obtido por Campana & Carvalho (2014)	45
Figura 6 - Aparato Experimental	49
Figura 7 - Vista frontal do suporte da lâmina, da mesa de cobrimento com o cilindro de borracha, câmera de alta velocidade e conjunto óptico	50
Figura 8 - Câmera FastCam UX100 Modelo 800K	51
Figura 9 - Vista lateral do aparato experimental	51
Figura 10 - Vista do conjunto óptico posicionado em frente ao espelho	52
Figura 11 - Foto à esquerda mostra a câmera, lâmina de vidro e a fonte de luz. A foto à direita apresenta o hardware que controla o aparato	53
Figura 12 - Equipamento TA Instruments modelo Discovery HR-3	53
Figura 13 - Viscosidade em função da taxa de cisalhamento	54
Figura 14 - Detalhe da mesa de cobrimento e do orifício na placa de iluminação	56
Figura 15 - A figura à esquerda apresenta os gabaritos que suportam a lâmina de vidro e à figura da direita mostra a gota depositada sobre a lâmina de vidro	57

Figura 16 - Altura H do cilindro com relação à lâmina de vidro; altura $h_g$ da gota em relação a lâmina de vidro e a altura $h_v$ da própria lâmina de vidro	57
Figura 17 - Definição da altura H do cilindro em relação à superfície vítrea	60
Figura 18 - Fração de líquido transferido ( $V_t/V_i$ ) em relação ao número de capilaridade (Ca)	62
Figura 19 - Tempo de Rompimento ( $T_r$ ) medido desde o contato inicial do cilindro de borracha com a gota até o rompimento da ponte de líquido em relação ao número de capilaridade (Ca)	66
Figura 20 - Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da água para altura H igual a 177,8 micrômetros	68
Figura 21 - Sequência de imagens captadas desde o período de constância e parte do período de contração da ponte de água para altura H igual a 177,8 micrômetros	69
Figura 22 - Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual de água para altura H igual a 177,8 micrômetros	70
Figura 23 - Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da solução de glicerina 90% para altura H igual a 177,8 micrômetros	70
Figura 24 - Sequência de imagens captadas desde o período de expansão e parte do período de contração da ponte da solução de glicerina 90% para altura H igual a 177,8 micrômetros	71
Figura 25 - Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual da solução de glicerina 90% para altura H igual a 177,8 micrômetros	72
Figura 26 - Comparativo da fração de líquido	

transferido ( $V_t/V_i$ ) em relação ao número de capilaridade (Ca) em diferentes alturas H	74
Figura 27 - Comparativo do Tempo de Rompimento (Tr) medido desde o contato inicial do cilindro de borracha com a gota até o rompimento da ponte de líquido em relação ao número de capilaridade (Ca) em diferentes alturas H	75
Figura 28 - Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da água para altura H igual a 355,6 micrômetros	76
Figura 29 - Sequência de imagens captadas desde o período de constância e parte do período de contração da ponte de água para altura H igual a 355,6 micrômetros	77
Figura 30 - Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual de água para altura H igual a 355,6 micrômetros	77
Figura 31 - Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da solução de glicerina 90% para altura H igual a 355,6 micrômetros	78
Figura 32 - Sequência de imagens captadas desde o período de expansão e parte do período de contração da ponte da solução de glicerina 90% para altura H igual a 355,6 micrômetros	79
Figura 33 - Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual da solução de glicerina 90% para altura H igual a 355,6 micrômetros	80
Figura 34 - Filme de polipropileno tratado e fixado no cilindro de borracha	81
Figura 35 - Comparativo da fração de líquido transferido ( $V_t/V_i$ ) em relação ao número de capilaridade (Ca) em diferentes tratamentos do cilindro	82
Figura 36 - Comparativo do Tempo de Rompimento (Tr)	

medido desde o contato inicial do cilindro de borracha com a gota até o rompimento da ponte de líquido em relação ao número de capilaridade ( $Ca$ ) em diferentes tratamentos do cilindro	83
Figura 37 - Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da água com filme tratado aplicado sobre o cilindro	84
Figura 38 - Sequência de imagens captadas desde o período de constância e parte do período de contração da ponte de água com filme tratado aplicado sobre o cilindro	85
Figura 39 - Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual de água com filme tratado aplicado sobre o cilindro	86
Figura 40 - Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da solução de glicerina 90% com filme tratado aplicado sobre o cilindro	86
Figura 41 - Sequência de imagens captadas desde o período de constância e parte do período de contração da ponte da solução de glicerina 90% com filme tratado aplicado sobre o cilindro	87
Figura 42 - Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual de solução de glicerina 90% com filme tratado aplicado sobre o cilindro	88

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 - Caracterização de líquidos	55
Tabela 2 - Líquidos e números adimensionais	59
Tabela 3 - Configuração utilizada na seção 3.1	61
Tabela 4 - Configuração utilizada na seção 3.2	73
Tabela 5 - Configuração utilizada na seção 3.3	81