

1 Introdução

O processo de impressão tem sido utilizado extensivamente há várias décadas. Recentemente, o processo de impressão tem sido utilizado na produção de circuitos eletrônicos flexíveis. O grau de precisão nesta aplicação é bem maior do que nas aplicações clássicas de impressos, já que pequenas falhas nos padrões de impressão podem causar mal funcionamento dos dispositivos. Estudos recentes têm como objetivo principal o entendimento fundamental do processo de transferência de líquido de uma superfície para outra que se move em relação a primeira. As superfícies utilizadas nestes estudos incluem superfícies planas, células singulares, células múltiplas, cavidades entre outras.

Na última década, os estudos foram mais focados em simulações computacionais. Diversos estudos foram direcionados para endereçar o comportamento de líquidos em inúmeras situações de transferência de líquido. Entretanto, poucos foram os autores de estudos experimentais dada a complexidade de execução dos ensaios.

O presente trabalho analisa experimentalmente a dinâmica da transferência parcial de líquido de uma gota depositada sobre uma superfície vítrea utilizando uma mesa de revestimento com cilindro de borracha motorizado de forma a proporcionar um movimento rotacional do mesmo. Para analisar o fenômeno de transferência e caracterizá-lo, foi utilizada uma câmera de alta velocidade capaz de capturar 800.000 quadros por minuto, um conjunto óptico e um software de edição de imagens. Foram utilizadas soluções de glicerina em água de diferentes concentrações como líquidos de trabalho. As configurações utilizadas no preparo do equipamento foram definidas de forma a obter uma ampla faixa de variáveis do problema e foi baseada em estudos anteriores e nas condições de operação do processo de revestimento usadas nos processos de impressão.

1.1 A História da Impressão e seus tipos

Impressão é, basicamente, definida pela reprodução de textos ou imagens. O processo de impressão é datado da época dos Mesopotâmicos e desde então tem evoluído gradativamente sendo objeto de estudo nos últimos anos. Há relatos de que um pequeno livro tenha sido impresso com o evangelho de João cuja origem seja no Século VII. No Século XV, o processo de impressão era feito através de uma peça de madeira em alto relevo formando o desenho que se desejava reproduzir. Este processo era muito rudimentar e basicamente auxiliava na reprodução de imagens. Em 1436, Gutenberg inicia um trabalho para aprimorar este processo de impressão adicionando peças metálicas móveis de forma que se pode iniciar a reprodução de textos. Dessa forma, deu-se o início da reprodução da Bíblia. Em 1465, foi criada a técnica de gravura conhecida como Cooper por Housebook Master, um artista alemão. Esta técnica consiste em cortar a superfície de um material plano formando pequenos canais, nestes canais são depositados líquidos que formarão a imagem que se deseja reproduzir. Este processo de reprodução foi largamente utilizado em diversas cidades na época. No Século XVIII, mais precisamente em 1710, o pintor Jakob Cristof Le Blon ampliou o uso de placas gravadas através da inclusão de 3 cores (azul, amarelo e vermelho) de forma que passou a ser possível reproduzir impressões coloridas. A partir desta época foi possível reproduzir revistas e jornais, que circulavam com imagens e textos mais atraentes aos leitores. No Século XIX, a madeira usada como base para as gravações foi substituída pelo ferro. O primeiro cilindro de impressão foi construído e o processo de cromolitogravura foi patentado, este processo se baseia na reprodução de litogravuras. Neste mesmo século, Richard March Hoe construiu o primeiro equipamento de impressão rotativo de litogravura o que aumentava consideravelmente a produtividade da reprodução. Até então, usava-se placas planas gravadas. Em 1890, Bibby, Baron e Sons construíram a primeira máquina para impressão flexográfica. Neste processo é usado uma superfície de borracha onde está gravado o modelo de impressão a ser reproduzido. Em 1900, o americano Ira Washington Rubel criou a primeira máquina de impressão Off Set para papel, três anos mais tarde a Enciclopédia Larousse foi impressa pela primeira vez. Em 1907, o processo de Silk Screen é desenvolvido e patentado por Samuel Simon e largamente usado inclusive nos dias atuais.

Assim, com o passar dos anos, o processo de impressão tem se desenvolvido rapidamente. No último século, este desenvolvimento foi exponencial, gerando tecnologias e equipamentos aprimorados capazes de produzir impressões com uma grande qualidade. Há diversos métodos de impressão tais como: ink-jet, tela - mais conhecido por silk screen, cilindro gravado, flexografia e litogravura. Cada método apresenta vantagens e desvantagens no processo de impressão, também influência na qualidade e produtividade na reprodução. Assim, a escolha por cada método para a realização de impressão varia de acordo com uma série de fatores.

A impressão do tipo Ink-Jet

Um dos métodos mais conhecidos e usados no dia-a-dia é o método ink-jet, onde a deposição da tinta é feita através de gotas sobre o substrato. Este método foi muito utilizado em impressões domésticas dado seu baixo custo de manutenção.

A impressão do tipo Litogravura

No método de impressão litogravura, a gravação é feita em uma chapa ou cilindro de metal, geralmente de alumínio, onde é gravado a imagem que se deseja reproduzir. Esta superfície é tratada quimicamente para que o líquido permaneça em determinadas áreas. Quando a tinta preenche a gravação feita no alumínio, é formada a imagem que por sua vez é transferida para a superfície onde deseja-se reproduzir a imagem. Usa-se esse método para impressão de livros, materiais promocionais, folders, entre outros. Este processo possui uma resolução maior se comparado com o método flexográfico, porém é um processo mais complexo que o método de rotogravura e flexografia, pois há a presença de dois líquidos cuja reologia são complexas.

A impressão Flexográfica

A flexografia utiliza uma camisa cilíndrica de borracha, mais conhecida como clichê. A camisa é formada por alto relevo da borracha, onde esta moldado na superfície a imagem a ser impressa. Assim, a tinta é depositada no clichê de forma que apenas a parte mais elevada é molhada e assim a imagem pode ser transferida para o substrato, formando a impressão. Este método é largamente utilizado por causa do baixo custo e a facilidade do método em se adaptar a superfícies não regulares, uma vez que a borracha do clichê se deforma. Entretanto, este método não possui uma grande resolução de imagem se comparado com rotogravura ou litogravura. Ainda assim, é muito utilizado na indústria de embalagem, uma vez que o método permite a impressão em diversos tipos de substratos tais como: papel, plástico, metal, celofane, entre muitos outros.

A impressão do tipo Silk-Screen

Outro método de impressão muito conhecido chama-se silk-screen, nada mais é do que a impressão sobre tecido. Neste método é empregado uma tela ou stencil onde a tinta passará pelos orifícios sendo depositada no substrato. Este método apresenta baixa resolução e grande espessura de revestimento, que é uma vantagem para impressão de logos em camisetas, por exemplo.

A impressão do tipo Rotogravura

O método alvo do nosso estudo é o método conhecido como rotogravura ou simplesmente gravura. Se compararmos com a flexografia, podemos dizer que este método é justamente o oposto daquele, pois a superfície cilíndrica é formada por um baixo relevo ao invés de alto relevo. Nesse método, a superfície de um cilindro é gravada com um padrão de gravação. Este padrão será reproduzido ao longo do cilindro. O líquido depositado sobre este padrão é transferido para o substrato formando uma camada que pode ser contínua ou descontínua.

A gravação pode ser feita em uma chapa ou mesmo em um cilindro. O uso de cilindros gravados tem se intensificado devido há alta produtividade obtida com o formato rolo-rolo de revestimento. Uma das desvantagens é o alto custo do equipamento uma vez que se faz necessário a gravação do padrão de acordo com a necessidade e esta gravação possui alto custo. A grande vantagem recai sobre a alta resolução obtida através do uso deste método, principalmente em comparação com o método flexográfico. Devido a estes fatos, a indústria tem usado este método de maneira consolidado para impressões em grandes volumes. Porém, uma aplicação pouco familiar tem ganho força recentemente: aplicação em impressão de circuitos, transistores e antenas em substratos flexíveis. Assim, as impressões poderiam ser feitas em superfícies planas flexíveis a ponto de se tornarem rolos, o que seria um grande avanço do ponto de vista de volume e peso de material. Entretanto, diferentemente de uma impressão comum cujos defeitos ocasionados durante a impressão podem ser tolerados, a impressão de circuitos e dispositivos eletrônicos, quando apresenta defeito, ocasiona o não funcionamento adequado dos mesmos. Diante disso, há um grande desafio no processo de impressão para evitar a ocorrência de falhas de impressão.

Os métodos de rotogravura, flexografia são métodos de impressão diretos, ou seja, o líquido é transferido da superfície depositada para o substrato. Já o método de litogravura é um método off set, pois a impressão não é realizada diretamente, há um passo intermediário antes da transferência do líquido. Este é transferido para uma segunda ou mais superfícies antes de ser transferido para o substrato.

Especificação do Tipo Rotogravura de Impressão

Como dito anteriormente, a rotogravura é um dos métodos mais conhecidos e usados para impressão de substratos. A técnica deste processo consiste em transferir líquidos com ampla escala de viscosidade (até 1.500 mPa.s) para um substrato com altas velocidades (até 900 m/min), cujas espessuras de cobrimento podem variar de 1 micrometro até 50 micrometros, tamanha a versatilidade deste processo.

Neste método, a superfície do rolo é gravada com determinados padrões. Estes são chamados de padrões de gravação. Cada padrão de gravação é formado por diferentes geometrias e tamanhos que afetam as propriedades do revestimento. Existem diversas configurações de uso dos cilindros gravados, sendo as mais conhecidas rolo gravado direto, rolo gravado reverso e off set. Na primeira e segunda configuração, o líquido transfere-se diretamente da cavidade gravada na superfície do cilindro para o substrato a ser revestido. Na terceira configuração, o líquido é transferido para um cilindro deformável, geralmente constituído de borracha, e este transfere o líquido para o substrato. Apesar destas configurações serem semelhantes, apresentam diferenças bem distintas.

Além das diferentes configurações, também existe uma diferenciação na aplicação do cilindro gravado. Quando há um revestimento uniforme de todo o substrato, diz-se que a gravação é típica para cobrimento, entretanto, quando há um revestimento parcial, ou seja, partes específicas do substrato são revestidas diz-se que a gravação é para impressão. Há um mercado emergente, tal qual a indústria de produtos eletrônicos, tem demanda crescente para a técnica de impressão através de cilindro gravado.

A impressão e suas Aplicações

O processo de rotogravura é extensamente utilizado na indústria, principalmente na área de impressão, e está consolidado no mercado industrial em diversas aplicações. Recentemente, a tecnologia de impressão na área de eletrônicos tem aberto novos horizontes na indústria de comunicação gráfica. Os processos tradicionais de impressão podem ter sua área de atuação ampliada se adicionarmos novos materiais que possuam capacidade condutiva. Estes materiais condutivos podem conferir aos líquidos de revestimento a possibilidade de transmitir corrente. Esta modificação no líquido é infinitamente mais econômica que a alteração da matriz de revestimento. Neste caso, a adaptação do processo tradicional de rotogravura para um método que utilize tais materiais não seria complexo e tão pouco oneroso.

O mercado de aplicação de impressões em dispositivos eletrônicos é bastante vasto e está em pleno crescimento. Há exatos 10 anos, a Apple lançava a primeira geração de celulares inteligentes nomeada Iphone. Desde então, as vendas de aparelhos em todo mundo saltaram de 1,36 milhões de unidades no primeiro ano para 231,22 milhões de unidades em 2015¹ tratando-se apenas da Apple que detém parte do mercado, pois há outros concorrentes tais como Samsung, Motorola, Sony, entre outras. Também é necessário mencionar a invenção de *tablets* e diversos outros dispositivos eletrônicos como leitores de livros digitais que podem se beneficiar do desenvolvimento dessa tecnologia. A aplicação de impressão em dispositivos eletrônicos pode ser feita em displays flexíveis, dispositivos fotovoltaicos, displays de diodo emissão de luz orgânica (mais conhecido por OLED), cartões de memória e lógica.

Um dos requisitos fundamentais para a aplicação de impressão de circuitos e dispositivos eletrônicos é a resolução da impressão. Esta característica corresponde a qualidade de impressão. Nos métodos tradicionais, a qualidade de impressão é avaliada pelo olho humano, porém falhas em magnitude inferior a capacidade humana não é perceptível a olho nu. Para que possa haver a condutividade elétrica, se faz necessária a continuidade dos líquidos condutores, havendo falhas de impressão, a continuidade é afetada e como consequência, não há condução. Um dos grandes avanços dessa tecnologia, seria o uso em baterias e semicondutores, sendo estes últimos utilizados na produção de diodo de emissão de luz (mais conhecido como LED) largamente utilizado na indústria, principalmente de televisores. Como resultado dessa aplicação, poderiam existir baterias de baixo peso e até mesmo flexíveis. Desse modo, o controle de todos os parâmetros que direcionam esta nova tecnologia é fundamental para produção de impressões em eletrônicos com qualidade.

¹ Informação obtida através do site < <https://macmagazine.com.br/2015/11/17/grafico-do-dia-as-vendas-mundiais-de-iphones-de-2007-a-2015/>> acessado em 31/10/2017 cujos dados foram fornecidos pela Apple compilados por Thomas Unterstenhoefer

1.2

Descrição do Comportamento da Interface Líquido-Substrato

O **revestimento** de superfície pode ser definido pela deposição de um líquido sobre uma superfície sólida (superfície de impressão). Considerando que um líquido está sobre uma determinada superfície chamada de superfície de impressão, o substrato (segunda superfície) é colocado em contato com a superfície de impressão tocando o líquido. Ocorrendo o distanciamento das superfícies, o líquido passa a formar uma ponte entre elas chamada de ponte de líquido que após fragmentada deixa parte do líquido na superfície de impressão e parte do líquido no substrato. A determinação da quantidade de líquido em cada uma das superfícies é uma questão fundamental no processo de revestimento. A figura 1 ilustra a deposição e transferência do líquido de uma superfície sólida para a superfície de impressão.



Figura 1: Evolução da deposição e transferência de líquido entre duas superfícies.

A importância do estudo da dinâmica de formação e quebra de uma ponte de líquido se deve ao que o volume de líquido transferido e o padrão impresso dependem fortemente deste processo.

Durante a formação da ponte de líquido, há duas linhas de contato, uma em cada superfície. As linhas de contato podem ou não se movimentar ao longo da superfície de acordo com as características químicas do líquido e do tratamento superficial.

No processo de **impressão**, há inúmeros fenômenos que influenciam o escoamento, como por exemplo o comportamento da interface ar-líquido; o movimento das linhas de contato formadas entre o líquido e a superfície; a reologia do líquido, neste caso, uma tinta formada por uma mistura de polímeros, surfactantes e partículas; o próprio substrato, superfície onde será depositado o líquido. Dessa forma, a análise de um processo de impressão se torna muito complexo. Mais complexo, inclusive, que o processo de cobrimento pois neste caso o revestimento

ocorre em 2D e em regime permanente, enquanto que, no processo de impressão o estado não é estacionário e ocorre em 3D.

Uma alternativa para análise deste processo é estudar isoladamente cada componente deste complexo sistema, o que do ponto de vista técnico auxilia na compreensão de cada fenômeno, porém, do ponto de vista prático, existe o risco de que cada sistema isoladamente não produza (represente) as condições reais do processo de **impressão**.

Outro ponto importante a ser destacado é a caracterização do movimento da superfície móvel em relação à superfície que inicialmente contém a gota: extensional, cisalhamento e rotacional. Cada tipo de movimento promove uma interação diferente das linhas de contato em relação às superfícies. O movimento extensional é caracterizado pelo movimento de uma superfície perpendicularmente a outra. O movimento caracterizado por cisalhamento é feito através do movimento paralelo de uma superfície com relação a outra. O movimento de rotação é feito considerando a movimentação sobre um eixo central de maneira a formar de ângulo / raio de curvatura. A figura 1 apresenta os tipos de movimento ilustrativamente.

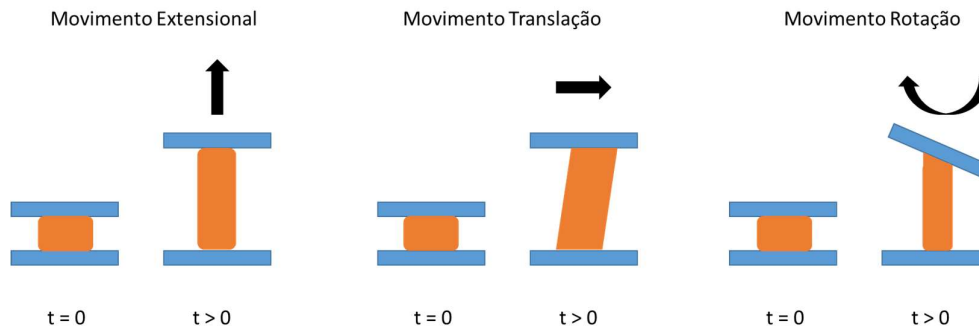


Figura 2: Tipos de Movimentos entre superfícies.

Como descrito anteriormente, cada tipo de movimento promove uma interação distinta do líquido com o substrato, estas interações podem favorecer ou não a transferência de líquido. Estes movimentos foram analisados separadamente em diferentes trabalhos, porém podem ocorrer de maneira combinada, como por exemplo, ex-

tensional e cisalhamento; cisalhamento e rotação. As características de molhabilidade da superfície também interferem nesta interação. A seguir, veremos uma breve revisão a respeito de cada um deles.

1.3 Caracterização da Ponte de Líquido em Superfícies Planas

1.3.1 Aspectos do Movimento Extensional

Estudos Baseados em Ensaios Experimentais

Um dos processos mais simples a ser analisado é o processo cuja ponte de líquido é formada pela transferência de líquido entre duas superfícies planas e o tipo de movimento é o extensional. Há um grande número de autores que analisaram esta configuração sendo que os pioneiros foram Chadov & Yakhnin (1979, 1983). Estes estudos foram realizados experimentalmente com água e glicerina depositados sobre diferentes superfícies poliméricas com aproximação de um prato de zinco e posterior afastamento com velocidade constante. Foram usadas superfícies poliméricas distintas para que durante a formação das linhas de contato, os ângulos pudessem ser diferentes. Chadov & Yakhnin (1979, 1983) observaram a diferença na formação e rompimento da ponte de líquido entre o Fluoroplástico² e o prato de Zinco (I) e PVC e prato de Zinco (II).

Da análise das interações entre o líquido e as superfícies, Chadov (1979) mostrou que a molhabilidade é maior quando a superfície é metálica ao invés de polimérica. Pode-se notar também que o coeficiente de transferência é função dos ângulos de contato do líquido com a superfície. Observou-se uma maior transferência de líquido para a placa de zinco que apresenta menores ângulos de contato com o líquido que com a superfície polimérica que apresenta maiores ângulos de contato.

² (*) terminologia usada na década de 1970 para designar polímeros com flúor, geralmente formados de polímeros fluorados derivados de etileno e seus co-polímeros tais como oleofinas, fluor-oleofinas ou vinil-eter-alcalino-perfluorado. Sendo que o mais importante é Politetrafluoretileno (PTFE).

Assim, estabeleceu-se que a quantidade de líquido transferido era maior para aquela superfície com maior molhabilidade e quando foram usadas as duas superfícies igualmente tratadas com zinco, observou-se a mesma quantidade de líquido entre as duas placas. Explorou-se as velocidades relativas de separação das superfícies, cujo resultado foi a mesma quantidade de líquido em ambas as superfícies para altas velocidades de separação, mesmo que estas tenham tratamentos superficiais diferentes. Foi observado também que a viscosidade e a tensão superficial têm papel fundamental neste processo. Em velocidades intermediárias, o aumento da viscosidade reduziu a quantidade de líquido transferida para a superfície de zinco bem como a redução da tensão superficial no sistema ar-líquido também reduziu a quantidade de líquido transferida.

Utilizam-se números adimensionais para que possa ser efetuado uma comparação adequada com os trabalhos dos autores que estudaram este tema. Os números de Reynolds, de Capilaridade e de Stokes são os adimensionais mais utilizados na literatura. O número de Reynolds fornece uma relação entre as forças inercial e viscosa; o número de Capilaridade mostra a relação entre as forças viscosa e tensão superficial. O número de Stokes, por sua vez, fornece a relação das forças gravitacional e viscosa.

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad \text{eq. (1)}$$

$$Ca = \frac{\mu U}{\sigma} \quad \text{eq. (2)}$$

$$St = \frac{\rho g L^2}{\mu U} \quad \text{eq. (3)}$$

Onde ρ é a densidade do líquido, U é a velocidade da superfície móvel, μ é a viscosidade do líquido, σ é a tensão superficial ar-líquido, g é a aceleração da gravidade e L é o comprimento característico inicial da ponte de líquido. A velocidade da superfície móvel está relacionada com o tipo de movimento: extensional, translação ou rotacional. Este trabalho considera a velocidade de translação como a velocidade característica do movimento, a rotação do cilindro é proporcionada pelo atrito do cilindro com a lâmina de vidro. As relações entre estes parâmetros podem auxiliar de modo qualitativo na caracterização do processo. Mas além destes parâmetros, há

outros parâmetros que podem auxiliar na caracterização tais como linha de contato, posição de formação e rompimento da ponte de líquido.

Os processos industriais utilizam a velocidade da linha, ou seja, a velocidade que a máquina transporta o substrato como velocidade de trabalho. Este substrato é levado até uma estação de revestimento onde ocorre a deposição do material. Em sistemas de revestimento que possuem a configuração de cilindro gravado como método de revestimento, esta velocidade de linha é utilizada como uma das componentes da velocidade. Esta velocidade e o diâmetro do cilindro compõem a velocidade angular de aplicação do líquido sobre o substrato. Conforme dito anteriormente, as velocidades características estão relacionadas ao tipo de movimento. Dessa forma, as velocidades extensionais se referem a velocidade de separação de uma superfície móvel utilizando o movimento extensional (figura 2) em relação à uma superfície fixa. As velocidades de linha são altas (0,5 a 50 m/s), enquanto que as velocidades extensionais são relativamente menores (1 a 10 cm/s) (Dodds, 2011; Dodds et al., 2009, 2011b, 2012). A viscosidade do líquido associado a impressão tem uma grande variação (1 a 1.000 cP), porém a densidade, em geral, está em torno de 1.000 kg/m³, enquanto a tensão superficial também varia entre 20 a 70 mN/m, e o comprimento característico varia entre 1 a 500 microns. Estes parâmetros formam impressões na ordem de grandeza de 10 a 100 microns de espessura, cujos números adimensionais são, aproximadamente: $Ca \sim 0,0001$ a 1, $Re \sim 0,0001$ a 100 e $St \sim 0,00001$ a 10. Com estes números adimensionais é possível estimar relações tais como: altas velocidades de impressão promovem o aumento da importância das forças viscosas com relação a tensão interfacial (alto número de capilaridade) e a força gravitacional (baixo número de Stokes) mas também aumenta a importância das forças inerciais (alto número de Reynolds). Por outro lado, baixas velocidades de impressão aumentam a importância das forças viscosas com relação as forças inerciais (baixo número de Reynolds) e a força gravitacional (baixo número de Stokes). Assim, o processo de impressão pode ser regido pela relação de todas estas forças: tensão interfacial, viscosa, inercial e gravitacional ao mesmo tempo. Porém, podemos analisar os casos extremos de forma isolada para obter relações importantes.

Análises Oriundas de Simulação Computacional

Dodds et al. (2009) fizeram um estudo sobre a transferência de líquido de uma superfície plana estacionária e de uma superfície em movimento usando o estiramento da ponte de líquido como modelo de sistema. O método de elementos finitos foi usado na simulação numérica para modelar diferentes tipos de superfícies de contato (molhantes e não molhantes), aplicou-se condições de contorno tal que a linha de contato se deslize livremente ao longo da superfície mantendo um ângulo de contato fixo. Dodds et al. (2009) examinou o efeito do deslizamento das linhas de contato na ponte de líquido formada entre duas superfícies planas através da variação do ângulo de contato entre cada superfície e o número de capilaridade. O objetivo, neste caso, foi compreender como a molhabilidade da superfície e a tensão superficial afetam a quantidade de líquido transferida.

A equação de Navier-Stokes que descreve os campos de pressão e velocidade do escoamento foi simplificada de acordo com os valores dos números adimensionais (Reynolds, Stokes), tanto o efeito inercial quanto o gravitacional foram ignorados. As condições usadas foram: pressão ambiente do líquido ao redor da ponte de líquido é zero; tensão superficial entre 20 a 70 mN/m; número de capilaridade entre 0,0001 a 0,5; não houve deslizamento e nem penetração durante a movimentação entre as duas superfícies; o ângulo de contato da ponte com a superfície foi mantido constante, o que é válido apenas para baixas velocidades (entre 5 e 50 mm/s); a ponte de líquido inicialmente formada pelas duas superfícies apresentam a forma cilíndrica com comprimento igual ao diâmetro.

Se as linhas de contato fossem fixas, não haveria diferenciação de uma e outra superfície, deste modo o rompimento da ponte de líquido ocorreria de tal forma que a quantidade de líquido em ambas as superfícies seria a mesma. Porém, se o deslizamento de uma das linhas de contato fosse permitido, enquanto a outra permanecesse fixa, seria possível avaliar como o movimento da linha de contato pode afetar o rompimento da ponte de líquido.

Dodds et al. (2009) consideraram diferentes números de capilaridade (0,01; 0,1; 1,0), relacionando-os com distintos ângulos de contato da superfície fixa, após o

rompimento da ponte de líquido, obtendo a fração de líquido transferida da superfície fixa para a superfície móvel. A variação do ângulo de contato está relacionada com a molhabilidade do líquido sobre a superfície em que está depositado.

A característica de molhabilidade de uma superfície é resultado do balanço de forças de aderência do líquido a superfície e a força coesiva do líquido. A molhabilidade de uma superfície pode ser caracterizada pelo ângulo formado pelo líquido com a superfície. A relação do ângulo de contato com a molhabilidade é inversamente proporcional, ou seja, quanto menor é o ângulo de contato, maior é a molhabilidade, isso significa que as forças de aderência do líquido com a superfície são muito grandes em relação às forças coesivas. Como consequência, o ângulo de contato é menor que 90° .

A fração de líquido transferida da superfície fixa para a superfície móvel foi determinada para diferentes ângulos de contato formado com a superfície imóvel e diferentes números de capilaridade. Nas simulações feitas por Dodds et al. (2009), notou-se que independentemente do número de capilaridade, o incremento do ângulo de contato sobre a superfície fixa favorece a transferência do líquido para a superfície em movimento. Este comportamento está de acordo com a molhabilidade do líquido na superfície fixa, assim com o aumento do ângulo de contato do líquido sobre esta superfície faz com que o líquido tenha menos tendência de permanecer aderido à superfície fixa.

Foi observado que para $Ca = 1$, independente do ângulo de contato da ponte de líquido, a fração de líquido transferida para a superfície móvel é simétrica, ou seja, metade do volume total permanece em cada superfície após rompimento da ponte de líquido. Por outro lado, para números de capilaridade menores que a unidade, a fração de líquido transferida não tem comportamento simétrico. Existe uma grande variação na quantidade de líquido transferida para a superfície móvel quando a comparamos em termos de ângulo de contato e número de capilaridade. Foi visto por Dodds et al. (2009) que em baixos ângulos de contato na superfície fixa, o incremento do número de capilaridade favorece a transferência de líquido; entretanto, este comportamento não é percebido quando os ângulos de contato são maiores que 80° . Nestes casos, o incremento do número de capilaridade reduz a fração de líquido

transferida. Uma explicação para tal comportamento é o fato de que em baixos ângulos de contato, o líquido fornece uma molhabilidade maior para a superfície, ou seja, uma aderência maior nesta superfície. Com o incremento do número de capilaridade, a força viscosa se torna maior que a força de aderência e se opõe a esta força até mesmo fixando a linha de contato (rompimento da ponte de líquido na simetria). Por outro lado, o aumento do ângulo de contato faz com que não ocorra uma interação tão grande entre líquido e superfície, favorecendo assim a transferência de líquido para a superfície móvel em baixos números de capilaridade, cujo deslizamento das linhas de contato ocorrem com mais facilidade.

Dodds et al. (2009) também fizeram simulações nas quais as linhas de contato deslizaram em ambas as superfícies e o resultado foi qualitativamente semelhante ao caso obtido com apenas uma linha de contato em movimento. Se as superfícies apresentam a mesma molhabilidade, ou seja, o mesmo ângulo de contato, o rompimento da ponte de líquido ocorre simetricamente para baixos valores de capilaridade. Entretanto, quando os ângulos de contato diferem entre si, a superfície de maior molhabilidade permanece com a maior parte do líquido e quanto maior for a diferença, maior será a quantidade de líquido transferida. Foi observado também que a diferença de molhabilidade de ambas superfícies podem alterar a forma da ponte de líquido e como consequência disso podem haver diferentes comportamentos na transferência do líquido entre superfícies.

Assim, de acordo com Dodds et al. (2009), a quantidade de líquido residual é maior sobre a superfície cujo ângulo de contato é menor (se comparado com a outra superfície) após o rompimento da ponte de líquido. E que essa quantidade de líquido é proporcional a diferença entre os ângulos de contato de cada superfície. Esta diferença se torna mais influente se o número de capilaridade for reduzido, isto é, como a tensão superficial se torna mais influente, a diferença de molhabilidade entre as superfícies tem um efeito maior na transferência de líquido.

1.3.2

Aspectos do Movimento de Cisalhamento e/ou Rotacional

Análises Oriundas de Simulação Computacional

Diferentemente do movimento extensional, há poucos trabalhos realizados relativo aos movimentos rotacional e de cisalhamento e como estes movimentos influenciam na deformação das linhas de contato em movimento. Dodds (2012) utilizou o método dos elementos finitos para simular o movimento de cisalhamento na ausência de efeitos inercial e gravitacional. Com as linhas de contato fixas, foi observado que a ponte de líquido é rompida simetricamente, o que significa que o cisalhamento não influencia na quantidade de líquido transferida para valores baixos de número de capilaridade.

Dodds (2012) também executou uma combinação de movimento extensional e rotacional, enquanto uma superfície permanecia fixa, a outra se movimentava verticalmente e rotacionava com velocidade angular constante, além das linhas de contato estarem fixas. Foi analisado que a rotação não auxiliou na transferência de líquido da superfície fixa, na verdade impulsionou o líquido para a superfície em repouso. Este bombeamento é oposto ao gradiente de pressão feito pela capilaridade, pois este direciona o escoamento para fora da superfície. Houve uma menor quantidade de líquido transferida para a superfície móvel.

1.4

Caracterização da Ponte de Líquido em Cavidades Singulares e/ou Múltiplas

Uma outra forma usada para a transferência de líquidos entre superfícies é o uso de cavidades singulares e/ou múltiplas. A transferência de líquido deste modo está intimamente associada a remoção de líquido de dentro da cavidade.

As pontes de líquido podem ser caracterizadas através dos números de Reynolds, capilaridade e de Stokes, como visto anteriormente. Com a inclusão de cavidade, outro fator importante passa a fazer parte desta caracterização: a geometria da cavidade. As paredes e cantos da cavidade podem influenciar o movimento das linhas de contato ou fixá-las e este fato pode alterar a dinâmica da ponte de líquido que, por sua vez, irá alterar o processo de transferência de líquido entre as superfícies. A quantidade de cavidades, a distância entre cada cavidade, a geometria, entre outros parâmetros podem influenciar na remoção do líquido da cavidade.

1.4.1 Aspectos do Movimento Extensional

Estudos Baseados em Ensaio Experimentais

As cavidades utilizadas na impressão apresentam dimensões muito pequenas, da ordem de 50 a 100 microns e a velocidade de remoção do líquido são, geralmente, elevadas (1 a 10 m/s). O que torna muito difícil a visualização do processo de esvaziamento das cavidades. Assim, Sankaran & Rothstein (2012) construíram um aparato com dimensões maiores do que as utilizadas normalmente para processos de impressão com o objetivo de estudar/analisar a influência do movimento extensional durante o fenômeno de transferência de líquido nas cavidades. O objetivo daquele trabalho foi analisar o efeito viscoelástico através da visualização da dinâmica do estiramento da ponte de líquido em uma cavidade singular.

A cavidade estudada por Sankaran & Rothstein (2012) foi feita de aço inoxidável e revestida com dimetil polissiloxano (PDMS), possui geometria de seção trapezoidal simétrica com raio de abertura de 2,5 mm e ângulo da parede de 15° com duas profundidades: 0,5 mm e 1 mm. Foram estudadas 3 configurações distintas: cavidade fixa na base e movimento da superfície plana afastando-se da cavidade; superfície plana fixa na base e cavidade afastando-se no topo e cavidade fixa no topo e superfície plana se afastando em direção a base. Cada configuração foi analisada

para avaliar os efeitos da inércia, gravidade e da capilaridade. As velocidades utilizadas no estudo variaram de 2 mm/s a 190 mm/s.

Neste ensaio, foram utilizadas soluções de óxido de polietileno diluída em água com cinco concentrações diferentes, sendo três concentrações caracterizadas como líquido Newtoniano e duas concentrações caracterizadas como líquido viscoelástico, cujas tensões superficiais estão variando de 52 mN/m a 62 mN/m. As viscosidades dos líquidos Newtonianos usadas foram 0,0567 Pa.s; 0,0263 Pa.s e 0,0106 Pa.s. Enquanto as viscosidades dos líquidos considerados visco elásticos foram 0,170 Pa.s e 0,227 Pa.s. A faixa de taxa de cisalhamento utilizada foi entre 1 e 100 1/s.

Com a cavidade totalmente preenchida, a superfície plana foi aproximada da cavidade que estava fixa na base de forma a criar a ponte de líquido e após o contato foi afastada com velocidade constante. Para os líquidos Newtonianos, a fração do volume transferido da cavidade aumenta com o incremento da velocidade extensional da superfície plana até atingir um platô entre 0,20 e 0,25. Comparando o número de capilaridade com a fração de líquido transferido, para os líquidos Newtonianos, é possível estabelecer uma curva característica que descreve o comportamento da transferência de líquido, exceto quando o número de capilaridade está próximo ou acima de 0,10. Neste caso, apenas o líquido Newtoniano com maior viscosidade foi capaz manter a fração de volume transferido em um platô mesmo que a velocidade ainda fosse incrementada. Os outros líquidos não mostraram esta capacidade. A figura 3 apresenta graficamente a relação entre a fração de líquido transferida e o número de capilaridade para os fluidos Newtonianos.

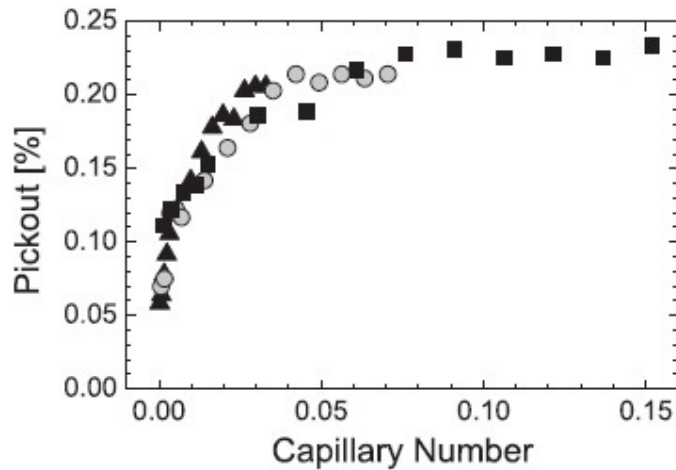


Figura 3: Fração de líquido removido da célula (“pick out”) em função do número de capilaridade para configuração onde a célula estava fixa e a superfície móvel estava posicionada no topo. Os dados incluem as seguintes soluções: (■) 20% 20K PEO, (●) 15% 20K PEO, (▲) 10% 20K PEO obtidas do trabalho realizado por Sankaran & Rothstein (2012).

Uma segunda configuração utilizada neste estudo foi quando a cavidade estava posicionada no topo e estava se afastando da superfície plana que estava fixa na base. Esta configuração foi utilizada para analisar os efeitos da gravidade e da inércia na transferência do líquido da cavidade para a superfície plana. Neste caso, a ação da gravidade está contrária à ação a inércia.

Para os líquidos Newtonianos, o comportamento nesta configuração foi muito semelhante ao comportamento da primeira configuração, cuja fração de líquido transferido foi aumentado com o incremento da velocidade até o atingimento do platô, com exceção do valor da fração que nesta configuração foi chegou a ser 0,30 enquanto na primeira configuração foi, no máximo, 0,25 para os mesmos números de capilaridade.

Para os líquidos visco-elásticos, foi observado um comportamento muito distinto da primeira configuração. O líquido com maior viscosidade apresentou um aumento na fração de volume transferido com o incremento da velocidade até o atingimento do platô no seu ápice a mais de 0,45 (fração do líquido transferido da cavidade para a superfície). Este comportamento difere e muito do comportamento deste mesmo líquido quando a cavidade estava fixa na base e a superfície móvel estava no topo, ápice da fração de transferência ocorreu com velocidade de 25 mm/s e decréscimo

para 0,05 de fração de volume transferido após esta velocidade. Vale ressaltar também que o líquido menos viscoso também teve uma melhora significativa na transferência do líquido da cavidade chegando a 0,35 (melhora de 75% na transferência do líquido).

Sankaran & Rothstein (2012) puderam inferir que as diferenças observadas nos comportamentos dos líquidos visco-elásticos se devem a diferença de peso molecular dos líquidos promovendo uma distinta elasticidade entre os mesmos. Até então, não estava nítida se a diferença obtida na fração de líquido transferido foi ocasionada por causa da inércia ou da gravidade, pois nesta configuração ambas possuíam direções opostas de atuação. Deste modo, Sankaran & Rothstein (2012) propuseram uma terceira configuração cujo objetivo era isolar a inércia. Assim, a cavidade foi mantida no topo, porém fixa, enquanto que a superfície plana na base possuía direção de movimento no mesmo sentido da força de gravidade.

Para os líquidos Newtonianos, não houveram muitas alterações de comportamento exceto pelo fato da fração de líquido transferida ter sido reduzida e que praticamente não houve um aumento da fração de líquido transferida com o incremento da velocidade.

Para os líquidos visco-elásticos, não houve alteração no comportamento do líquido menos viscoso se compararmos com a segunda configuração. Entretanto, o líquido com maior viscosidade atingiu o máximo da fração de líquido transferido da cavidade (próximo a 0,60) a partir de 100 mm/s quando Sankaran & Rothstein (2012) observaram um platô. Em baixas velocidades, as linhas de contato da ponte de líquido permaneceram fixas nos cantos da cavidade, entretanto com incremento da velocidade houve o aumento das forças inerciais que prevaleceram sobre as viscosas, liberando as linhas de contato dos cantos da cavidade gerando, assim, uma melhor transferência do líquido da cavidade. Sankaran & Rothstein (2012) utilizaram do número de Reynolds para comparar a força viscosa com a força inercial de forma que enquanto as velocidades utilizadas eram baixas, $Re \ll 1$, as forças inerciais podem ser negligenciadas. Entretanto, quando as velocidades tornaram-se altas, $2 < Re < 45$, as forças inerciais não podem ser negligenciadas.

Assim, Sankaran & Rothstein (2012) concluíram que para líquidos Newtonianos a fração de líquido transferido da cavidade aumenta com o incremento de velocidade até atingir um máximo em um platô. A fração deste platô também foi aumentada quando o líquido era mais viscoso. Independente de qual configuração foi utilizada, não houve uma mudança significativa na fração de líquido transferida da cavidade para este tipo de líquido. O comportamento dos líquidos visco-elásticos mostrou-se muito mais complexo e dependente da configuração do ensaio. Para baixas velocidades, o comportamento dos líquidos visco-elásticos é muito semelhante ao dos líquidos Newtonianos. Entretanto, em altas velocidades, o efeito da viscoelasticidade dos líquidos alterou significativamente a fração de líquido transferida da cavidade. Na configuração em que a cavidade está fixa na base e a superfície movimenta-se na direção oposta à gravidade, a fração de líquido transferido teve seu ápice em baixas velocidades, porém em altas velocidades teve uma redução muito acentuada. Em outra configuração, a cavidade foi fixada no topo enquanto que a superfície estava fixa na base e movimentou-se na mesma direção da gravidade. Nesta configuração, o comportamento foi extremamente diferente. A fração de líquido transferido aumentou significativamente, inclusive em altas velocidades até o atingimento da máxima fração de líquido transferido próximo a 60% em um novo platô. Deste modo, Sankaran & Rothstein (2012) concluíram que a viscoelasticidade do líquido e configuração da cavidade/superfície podem alterar drasticamente a fração de líquido transferido e, por fim, a impressão.

Análises Oriundas de Simulação Computacional

A influência do movimento extensional na remoção do líquido de cavidades planares e axissimétricas tem sido examinada por diversos autores Dodds et al. (2009, 2011), Huang et al. (2008), Powell et al. (2002, 2005), Campana et al. (2014, 2016).

Dodds et al. (2009) desenvolveram um modelo simulado através de elementos finitos para avaliar o comportamento das linhas de contato e correlacionar com a formação da ponte de líquido. Uma das superfícies plana foi substituída por uma célula de seção trapezoidal simétrica.

Dodds et al. (2009) estipularam que tanto a cavidade quanto à superfície em movimento teria o mesmo ângulo de contato o que sugere que célula e superfície plana são do mesmo material. Por este motivo era de se esperar que (como visto no item 3.1.2) houvesse uma fração simétrica em cada superfície. Porém, este comportamento não ocorreu, o que foi observado é que a linha de contato da célula movimentou-se muito mais devagar em relação ao movimento da linha de contato com a superfície plana criando uma diferença no tamanho da gota resultante em cada superfície após o rompimento da ponte de líquido e conseqüentemente uma baixa fração de líquido transferida da célula para a superfície plana (transferência de 20%) se compararmos com duas superfícies planas (transferência de 50%).

Uma das razões para que a transferência de líquido seja menor na configuração célula/plano em comparação com a configuração plano/plano é a fixação da linha de contato na superfície. Este comportamento se deve ao gradiente de pressão diferenciado entre superfície plana e célula. Pelo fato da célula ser angulada, a superfície livre não deforma tanto quanto se deforma na superfície plana. Como resultado, o gradiente de pressão próximo à linha de contato na célula é muito menor que na superfície plana não sendo capaz de fazer com que a linha de contato da célula deslize, permanecendo em uma posição fixa. O gradiente de pressão elevado na superfície plana direciona o fluxo daquela região promovendo o deslizamento da linha de contato e posterior rompimento da ponte de líquido resultando em um volume baixo de líquido transferido para esta superfície.

Além destas análises, Dodds et al. (2009) exploraram diversos parâmetros que poderiam influenciar na transferência de líquido de dentro da célula: a relação de largura da célula pela profundidade, diferentes ângulos de contato entre a superfície da célula e superfície plana e número de capilaridade. Para efeito de comparação, foi utilizado $Ca = 0,1$ e $Ca = 0,01$.

Quando utilizado o primeiro número de capilaridade, pode-se evidenciar que células com a relação largura/profundidade alta, ou seja, mais largas promovem uma transferência maior de líquido, pois dado o amplo raio da célula a quebra da ponte de líquido é adiada de forma haver tempo suficiente para que a linha de contato possa deslizar pela extensão da célula e contribuir para uma maior transferência.

Houve maior transferência de líquido quando o ângulo de contato da célula era maior que o ângulo formado pela superfície plana. A figura 4 mostra o modelo de cavidade usado por Dodds et al. (2009).

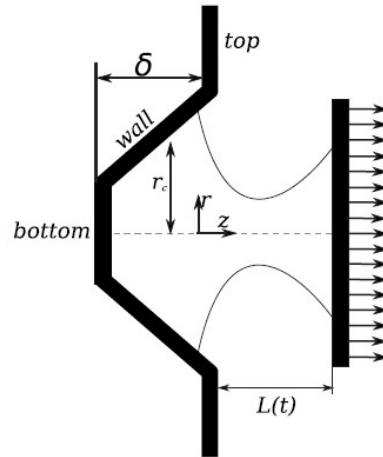


Figura 4: Ilustração de uma cavidade trapezoidal onde δ é a profundidade da cavidade e $L(t)$ a função que descreve a distância da superfície plana móvel usada por Dodds et al. (2009).

Quando o número de capilaridade foi reduzido ($Ca = 0,01$), houve uma sensível redução no volume transferido para a superfície plana independente da relação de largura e profundidade da célula. A única configuração onde houve um incremento da transferência de líquido com o decréscimo do número de capilaridade foi quando a relação largura e profundidade da célula é 2 e o ângulo de contato da superfície plana é menor que o ângulo da célula. O que mostra que esta configuração e relação da célula podem alterar significativamente a fração de volume transferida para a superfície. A sensível redução no volume transferido quando o número de capilaridade foi reduzido se deve ao fato da fixação da linha de contato cuja força foi aumentada através da queda no número de capilaridade.

1.4.2

Aspectos do Movimento de Cisalhamento e/ou Rotacional

Estudos Baseados em Ensaios Experimentais

O completo entendimento do processo de impressão com rolos gravados envolve macro aspectos tais como espessura do filme de revestimento, fração de líquido transferido, qualidade de revestimento, o tratamento da superfície do rolo. Existem também micro aspectos oriundos do comportamento do líquido dentro da cavidade, seu preenchimento e esvaziamento além da obtenção de um revestimento estável e uniforme. Porém, devido à grande dificuldade de observar o comportamento do líquido dentro da cavidade dadas as dimensões, Yin & Kumar (2006) construíram um aparato escalonado para facilitar a visualização da transferência de líquido entre uma cavidade e uma superfície. Foi utilizado um bloco de alumínio cuja gravação trapezoidal possui 1,5 mm de abertura superior, 0,9 mm na superfície da base e 1,0 mm de altura. O mesmo líquido água/glicerina usado por Chadov & Yakhnin (1979) também foi usado por Yin & Kumar (2006).

Primeiramente, Yin & Kumar (2006) utilizaram o movimento de cisalhamento através da aproximação da superfície curva de vidro até que o menisco do líquido fosse atingido. Assim, a ponte de líquido foi formada e parte do líquido pode ser removido para fora da cavidade. Após a quebra da ponte de líquido, parte restante do volume de líquido ficou permanecida dentro da cavidade. Uma das principais realizações deste trabalho foi a visualização através de vídeos que Yin & Kumar (2006) obtiveram, podendo assim, explicar o que estava ocorrendo na interface cavidade/superfície durante o processo de transferência de líquido da cavidade para a superfície. Em outro ensaio feito por Yin & Kumar (2006), foi utilizado um rolo cilíndrico cujo objetivo era analisar a influência do movimento de rotação no esvaziamento da cavidade.

Yin & Kumar (2006) utilizaram uma superfície curva feita de vidro cuja velocidade inicial de teste foi de 3 mm/s. Eles utilizaram duas configurações de preenchimento da cavidade: totalmente preenchida e preenchida em excesso. Na primeira configu-

ração, o volume de líquido inserido na cavidade foi aproximadamente igual ao volume da própria cavidade; enquanto que na segunda configuração, o volume de líquido inserido na cavidade foi maior que o volume da própria cavidade. Em um primeiro teste, a distância entre a superfície curva de vidro e a cavidade era zero. Foi mostrado que quando a superfície curva de vidro toca o canto superior da cavidade, o líquido começa a escoar em direção a superfície formando um menisco entre cavidade e superfície. A cavidade é esvaziada antes mesmo da superfície curva chegar ao centro da cavidade. Utilizando o mesmo estado de distância nula, porém preenchendo a cavidade com mais líquido, foram estudados dois casos: excesso de líquido formou um filme e excesso de líquido feito pela adição de apenas uma gota além do volume da cavidade. O ensaio com a segunda configuração foi realizado nos mesmos moldes da primeira configuração, excesso pela quantidade de líquido dentro da cavidade. Foi realizado um ensaio com excesso de líquido formando um filme sobre a cavidade. Houve a aproximação da superfície curva da cavidade até o canto superior, quando o líquido toca a superfície, este começa a escoar em direção a superfície. A diferença nos resultados começa a aparecer no momento que a superfície de vidro está no centro da cavidade, neste momento é possível visualizar uma recirculação de líquido dentro da cavidade. Após a passagem pelo centro da cavidade, há entrada de ar na cavidade que auxilia no escoamento do líquido para fora da cavidade. Em um segundo ensaio com excesso de líquido dentro da cavidade, foi utilizada apenas uma gota de líquido a mais além do volume da cavidade. O resultado da visualização obtido por Yin & Kumar (2006) com esta configuração foi o mesmo que na configuração anterior. Utilizando esta mesma configuração, cuja gota de líquido causa o excesso de volume na cavidade e alterando o estado de distância nula para distância positiva, onde a distância entre a cavidade e a superfície curva de vidro é maior que zero, foi feito um novo ensaio. Os resultados obtidos através da visualização nesta configuração foram distintos dos anteriores. Yin & Kumar (2006) puderam perceber que parte do líquido permanece na cavidade, portanto esta foi parcialmente esvaziada. Estes resultados foram semelhantes às simulações feitas por Powell et al. (2000) em cavidades retangulares.

Yin & Kumar (2006) utilizaram basicamente três diferentes líquidos para avaliar a relação entre o volume residual e o número de capilaridade: água, solução 1 de glicerina e solução 2 de glicerina sendo a primeira solução tem 2,5 vezes o volume

de glicerina em relação ao volume de água e a segunda solução 3,5 vezes o volume de glicerina com relação ao volume de água. Cada um destes líquidos apresenta viscosidades distintas que somadas as diferentes velocidades avaliadas nos ensaios chegaram uma relação entre número de capilaridade e volume residual na cavidade.

A superfície curva de vidro e o cilindro foi revestida com polietileno tereftalato (PET), a cavidade foi totalmente preenchida e foi utilizado a distância nula. Nestas condições, observou-se que o volume residual para os três líquidos aumentou com o incremento do número de capilaridade. Isso significa que a fração de líquido transferido da cavidade foi menor quanto maior o incremento da capilaridade. Estes resultados também estão em conformidade com as simulações feitas por Powell et al. (2000) cujas predições indicam, para uma relação de largura por profundidade maior que 1, a fração de líquido transferida decresce com o incremento da capilaridade.

Para uma melhor análise, Yin & Kumar (2006) usaram um fator multiplicador para criação de uma curva característica independente do líquido. Foi observado que o volume residual na cavidade (V_r) obedece uma relação formada pela equação 4:

$$V_r = A \cdot Ca^p \quad \text{eq. (4)}$$

Onde A e p são parâmetros obtidos após os ensaios. Diferentes configurações foram utilizadas para compor os ensaios: superfície curva de vidro revestida ou não com borracha; rolo revestido ou não com borracha; distância positiva, distância nula ou distância negativa; volume inicial. Destes ensaios, foi possível verificar que parâmetros A e p não tem seus valores alterados no caso da interação superfície de vidro e a cavidade. Quando a superfície curva de vidro foi substituída pelo rolo cilíndrico com movimento rotacional, os parâmetros A e p não tiveram o mesmo comportamento, porém o volume de líquido residual foi bem menor se comparado com a superfície curva que estava desenvolvendo apenas o movimento de cisalhamento. Yin & Kumar (2006) puderam inferir que a aproximação e afastamento do rolo cilíndrico com relação a cavidade tem uma importância maior ao movimento de cisalhamento provocado pela superfície curva de vidro.

Com estes resultados, Yin & Kumar (2006) puderam inferir que o processo de esvaziamento da cavidade é similar através do movimento de cisalhamento (superfície curva de vidro) e movimento de rotação proporcionado pelo rolo cilíndrico. Entretanto, o volume de líquido residual gerado pelo movimento de cisalhamento é maior que o gerado pelo movimento de rotação. Mostrando que o movimento de rotação possui uma capacidade maior de transferência de líquido do que a superfície curva de vidro.

Assim, como Yin & Kumar (2006), Chuang et al. (2008) também fizeram um estudo experimental utilizando células singulares e múltiplas com o objetivo de analisar os efeitos de viscosidade; tensão superficial; distância positiva, negativa e nula; número de células e dimensões destas células na transferência de líquidos das células. As dimensões das células quadradas piramidais são de 1,000 mm e 2,116 mm. Foram utilizadas soluções poliméricas com diferentes viscosidade e tensões superficiais para avaliação do número de capilaridade, estas soluções são Newtonianas. O único movimento estudado foi o rotacional. Assim, um cilindro de borracha revestido com polietileno tereftalado (PET) passa sobre a célula já preenchida com volume de líquido similar ao volume da célula, velocidade constante em movimento rotacional e distâncias entre as superfícies pré-determinada.

Primeiramente, Chuang et al. (2008) avaliaram o efeito da viscosidade na fração de líquido transferida da célula quando a distância entre o cilindro e a célula era positiva e cujo valor neste caso foi de 0,1 mm. O aumento da viscosidade facilita o rompimento da ponte de líquido reduzindo a transferência de líquido da cavidade para superfície. Nesta mesma configuração, foi considerado o aumento da velocidade de cobertura, o comportamento da transferência foi o mesmo. Houve uma redução na quantidade de líquido transferido com o incremento de velocidade.

Em uma outra configuração com a distância entre as superfícies positiva de 0,05 mm e líquidos com diferentes tensões superficiais, foi observado por Chuang et al. (2008) que a redução na tensão superficial também facilita o rompimento da ponte de líquido, portanto também ocorre uma redução na transferência de líquido da célula.

Chuang et al. (2008) também avaliaram o efeito de diferentes distâncias entre o cilindro de borracha e a célula. A distância pode ser positiva, quando as superfícies do cilindro de borracha e da célula não se tocam, pode ser zero quando as duas superfícies se tocam e também pode ser negativa, neste caso, o cilindro de borracha deforma ao encontrar em contato com a célula pois a distância entre o cilindro e a célula é menor que zero. Os resultados obtidos com esta análise mostram que conforme a distância se torna menor, a fração de líquido transferida aumenta chegando a seu ápice quando a distância é igual a zero. Uma vez que a distância se torna negativa, a fração de líquido transferido diminui e quanto mais negativa, a fração de líquido transferida se reduz ainda mais.

Outros dois ensaios foram feitos no estudo de Chuang et al. (2008), no primeiro deles foram usados arranjos diferentes de células: singular, duas células alinhadas no sentido do revestimento, três células alinhadas na direção do revestimento e quatro células emparelhadas duas a duas. A profundidade das células era de 0,6 mm e a abertura de 2,116 mm. Quanto maior o número de células, menor foi a transferência de líquido. Sendo a melhor fração transferida quando o arranjo era singular e o pior quando o arranjo era formado por três células. Os arranjos com 2 células alinhadas na direção do revestimento e quatro células emparelhadas duas a duas tiveram comportamentos semelhantes cuja a quantidade de líquido transferido foi semelhante entre si. No segundo ensaio, foram utilizadas as mesmas configurações, porém as dimensões das células utilizadas eram menores: profundidade de 0,284 mm e abertura de 1,0 mm. O comportamento das células cujas dimensões são menores foi exatamente o mesmo das células com dimensões maiores, entretanto aquelas apresentaram uma fração de líquido transferido menor que estas. Assim, Chuang et al. (2008) puderam concluir que a dimensão reduzida da célula rompe a ponte de líquido mais rapidamente, diminuindo a quantidade de líquido transferida. Ou seja, mesmo utilizando a mesma razão de comprimento por profundidade (3,52); quanto menor a dimensão da célula, menor foi a fração de líquido transferido em comparação com uma dimensão maior nas mesmas condições. Em todas as configurações utilizadas por Chuang et al. (2008), o aumento da velocidade de revestimento reduziu a fração de líquido transferida da célula para a superfície independentemente de qualquer outro aspecto.

Análises Oriundas de Simulação Computacional

Powell et al. (2000) desenvolveram um modelo computacional que simula o movimento horizontal sobre uma célula retangular para analisar a influência da razão de profundidade e abertura da célula e número de capilaridade na fração de líquido transferido da célula para a superfície. Inicialmente, o líquido está inserido na célula retangular em contato com uma superfície em estado estacionário. Em um segundo momento, a superfície é movimentada com velocidade constante gerando um gradiente de pressão ao longo do deslocamento. Este gradiente promove a movimentação da superfície livre de líquido dentro da célula removendo parte do líquido inserido nela. O modelo criado por Powell et al. (2000) considera que a superfície livre se movimenta até próximo ao canto superior da célula e se encerra quando o menisco encosta neste. Uma série de restrições e imposições foram consideradas na simulação.

Em uma primeira avaliação, Powell et al. (2000) analisaram o campo de velocidade dentro da célula em momentos distintos e pode perceber que existe uma recirculação. Através da observação do campo de velocidades, Powell et al. (2000) puderam constatar que a medida que o menisco se aproxima do canto superior há um incremento de velocidade significativo.

Powell et al. (2000) também avaliaram o efeito da capilaridade e também da alteração da razão de aspecto que seria a razão entre a largura e a profundidade da célula e correlacionou estes efeitos com a fração de líquido transferido da célula. Quando a razão entre a abertura da célula e a profundidade é de 0,5; pode notar que os menores valores de capilaridade apresentaram uma maior fração de líquido transferido. Isso significa que uma quantidade maior de líquido foi transferida da célula quando as forças viscosas se sobrepunham a tensão superficial do líquido. Ainda assim, as frações de líquido removidas nesta configuração de célula foram as menores. Quando a razão entre abertura da célula e a profundidade é unitária, houve uma maior fração de líquido removida em comparação com a configuração anterior. Entretanto, ainda assim, o incremento de capilaridade reduz a fração de líquido transferida. As diferentes configurações mostram que células com razão de aspecto maior tendem a facilitar a transferência de líquido, mas que as forças viscosas e o

efeito da tensão superficial não têm grande interferência na fração de líquido transferido. Quando a razão de abertura da célula e profundidade foi maior que 1, ainda assim houve uma maior fração de líquido transferida em comparação com a configuração quando a razão era unitária e o comportamento da capilaridade foi o mesmo obtidos nas demais configurações. Destas simulações, Powell et al. (2000) puderam inferir que números de capilaridade baixos e razões de aspecto altas promovem uma maior transferência de líquido da célula.

Hoda & Kumar (2008) desenvolveram um modelo de simulação para uma cavidade planar rotogravada de 0,25 e 1 micrometro com ângulo de contato de 120° da linha dentro da cavidade. Os efeitos inercial e gravitacional foram desprezados, a cavidade permaneceu estática enquanto a superfície plana se moveu com velocidade constante. Havia um menisco da interface ar-líquido em apenas um dos lados da cavidade bem como excesso de líquido no outro lado da cavidade, portanto, neste caso não havia interface ar-líquido. Na interface ar-líquido, a linha de contato da superfície plana permaneceu fixa, enquanto que a linha que estava próximo a cavidade foi deixada livre, podendo deslizar na extensão da cavidade.

Ficou evidente durante a simulação que a cavidade com maior profundidade apresentou maior quantidade de líquido na cavidade, pois a linha de contato foi incapaz de deslizar para o fundo da cavidade a ponto de transferir maior quantidade de líquido para fora desta antes que a simulação terminasse. O término da simulação foi definido de modo que a interface do líquido toque o canto da cavidade. Outro fato observado foi o aumento do líquido remanescente dentro da cavidade quando o número de capilaridade teve um incremento e a deformação da interface foi maior por conta da força viscosa.

Foi observado também que o gradiente de pressão próximo a interface se enfraquece com o aumento do número de capilaridade, este gradiente é o que direciona o deslizamento da linha de contato. Outro fator muito interessante é que a relação de volume residual (V_r) e número de capilaridade (Ca) foi obtida com exponenciais de 0,35 a 0,45 dependendo do ângulo de contato e da profundidade da cavidade, esta relação também foi observada por Yin & Kumar (2006) muito embora neste caso a geometria, cinemática do movimento e ângulo de contato são distintos.

Com os resultados obtidos no experimento de Yin & Kumar (2006) e os simulados por Hoda & Kumar (2008) é possível dizer que o fluxo do líquido é dirigido pelo cisalhamento em baixos números de capilaridade e que a força de tensão interfacial é a principal responsável pelo esvaziamento da cavidade.

É interessante notar que a quantidade do líquido removido da cavidade aumenta conforme há incremento de número de capilaridade para movimentos extensionais, porém é reduzido quando ocorre movimento de cisalhamento.

Campana et al. (2014; 2016) apresentaram, através de simulação computacional, a cinemática correta de transferência de líquidos entre duas superfícies. Campana & Carvalho (2014) apresentaram um modelo 2D que descreve a cinemática de um sistema de cilindros considerando os três tipos de movimento (extensional, cisalhamento e rotação) para células singulares e cavidades. No sistema de cilindros, Campana & Carvalho (2014) utilizaram uma cavidade trapezoidal muito semelhante a utilizada por Dodds et al. (2009) conforme mostrado figura 4.

Campana & Carvalho (2014) utilizaram o movimento extensional para validar o modelo computacional e demonstrar que números de capilaridade próximos da unidade promovem uma extensão da ponte de líquido. Enquanto que números de capilaridade iguais a 0,05 e 0,35 não tem esta capacidade, rompendo em uma altura inferior em relação ao Ca igual a 1. Este comportamento pode reduzir a quantidade de líquido transferido por não permitir que haja tempo suficiente para a ponte de líquido transferir um volume maior para a outra superfície.

Quando Campana & Carvalho (2014) utilizaram um cilindro em rotação, puderam avaliar que o incremento da velocidade do cilindro aumentou a fração de líquido transferido da cavidade para qualquer tamanho da cavidade. Foi demonstrado que a ponte de líquido é controlada por dois aspectos: espessura da ponte e movimento das linhas de contato. Neste último caso, estão envolvidas as propriedades dos líquidos, coeficiente de deslizamento e ângulo de contato.

Primeiramente, Campana & Carvalho (2014) mostrou que a fração de líquido transferida através do movimento puramente extensional foi similar a fração obtida por Dodds et al. (2009). A fração de líquido transferida é aumentada quase que proporcionalmente ao incremento do número de capilaridade.

Entretanto, quando o movimento rotacional é utilizado, Campana & Carvalho (2014) mostraram que a fração de líquido transferida não é linear e também não é proporcional ao número de capilaridade. Isso porque, em baixos valores de número de capilaridade (0,01), a fração de líquido transferida foi próxima de 0,50. Enquanto que, para número de capilaridade igual a 0,10 a fração de líquido transferida foi em torno de 0,20. Para números de capilaridade acima de 0,10 houve novamente um incremento na fração de líquido transferido atingindo 0,30. Estes resultados estão apresentados na figura 5 em conjunto com os dados obtidos por Yin & Kumar (2006) e por Chuang et al. (2008).

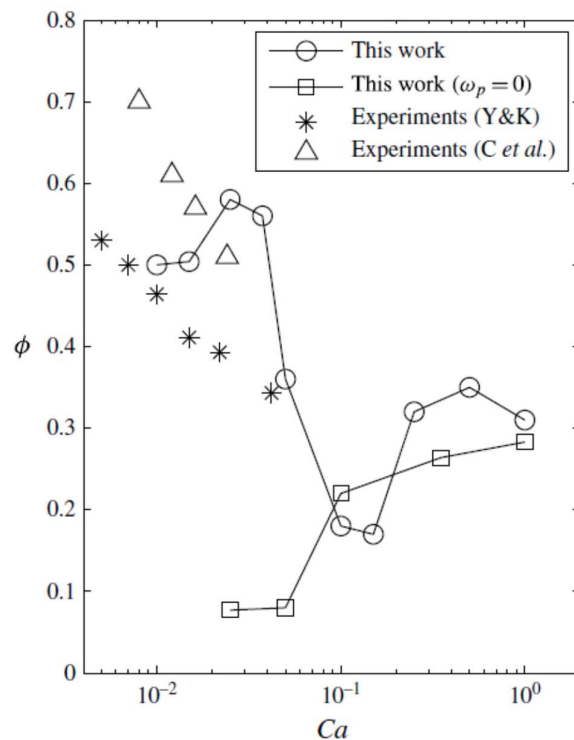


Figura 5: Fração de líquido transferido em função do número de capilaridade obtido por Campana & Carvalho (2014).

Campana & Carvalho (2014) avaliaram a evolução da superfície livre da ponte de líquido para justificar os resultados obtidos conforme demonstrado na figura 5. A ponte de líquido formada entre duas superfícies cria raios de curvatura entre estas superfícies. Estes raios têm sua curvatura alterada mediante o movimento de rotação do cilindro. A diferença entre os raios de curvatura promove um gradiente de pressão que direciona o líquido do maior raio de curvatura para o menor raio de curvatura de acordo com Campana & Carvalho (2014). Dessa forma, o líquido é escoado para fora da cavidade transferindo próximo da metade do volume contido inicialmente dentro da cavidade para número de capilaridade igual a 0,01. Este tipo de comportamento também foi observado por Yin & Kumar (2006), embora estes tenham utilizado diferentes configurações experimentais.

Com um pequeno aumento no número de capilaridade, a fração de líquido transferida também tem um pequeno incremento alcançando um valor próximo a 0,60. Campana & Carvalho (2014) mostraram que as forças capilares dentro da cavidade são fracas de forma que o gradiente de pressão que direciona o líquido para fora da cavidade é menor e que ocorre uma diminuição da velocidade das linhas de contato. Como resultado, a linha com maior raio de curvatura permanece por mais tempo dentro da cavidade direcionando uma quantidade de líquido maior para fora desta, assim a fração de líquido é aumentada. Conforme ocorre o aumento do número de capilaridade, e este se torna próximo a 0,10, a fração de líquido transferida é reduzida. Mais uma vez, Campana & Carvalho (2014) demonstra que as forças capilares estão se tornando ainda mais fracas a tal ponto que o raio de curvatura da ponte de líquido não tem força suficiente para sair da cavidade. Assim, o gradiente de pressão que direciona o líquido para fora da cavidade se torna mais fraco, sendo incapaz de direcionar o fluxo para fora da cavidade. Nestes casos, a fração de líquido transferida da cavidade para o cilindro foi entre 0,20 e 0,40. Para números de capilaridade maiores que 0,10 a molhabilidade é maior em comparação com as configurações anteriores de forma que o líquido, molha melhor a superfície, tornando as linhas de contato praticamente fixas durante todo o processo. Este comportamento auxilia no escoamento do líquido e promove um pequeno aumento na fração de líquido transferida da cavidade.

Campana & Carvalho (2014) propuseram um modelo de fluxo planar em 2D que considera a cinemática completa do sistema de revestimento com dois cilindros, entretanto, este modelo pode ser utilizado apenas para cavidades. Assim, o modelo computacional proposto por Campana et al. (2016) visam obter um modelo para descrever o processo de transferência de líquido inclusive em pequenas células individuais.

Campana et al. (2016) estenderam o trabalho anteriormente apresentado utilizando um novo modelo 3D de superfície livre com linhas de contato móveis. O objetivo de Campana era entender como fluxo característico 3D modifica o campo de pressão capilar que direciona o rompimento da ponte de líquido e o movimento das linhas de contato. Além disso, Campana et al. (2016) quiseram entender como o número de capilaridade poderia afetar o padrão de impressão. O comportamento da vazão de líquido desse trabalho foi muito similar ao observado por Campana & Carvalho (2014). A dinâmica da ponte de líquido foi baseada no movimento das linhas de contato e do rompimento da ponte de líquido conforme trabalho anterior. O comportamento da relação de fração de líquido transferido e número de capilaridade foi muito similar utilizando o modelo planar 2D utilizado por Campana & Carvalho (2014) quanto utilizando o modelo 3D proposto por Campana et al. (2016), embora, os valores de fração não tenham sido exatamente iguais.