

### 3 Resultados

Para que fosse possível obter uma amplitude de resultados capaz de reproduzir os requisitos utilizados na indústria, foram usadas diversas configurações de ensaio. Estas configurações foram caracterizadas pelas variações de velocidade do cilindro de borracha, de altura do cilindro de borracha em relação à superfície vítrea, das propriedades de líquidos e do tratamento da superfície cilíndrica. A Tabela 2 apresenta a composição de cada líquido, a velocidade do cilindro de borracha e os números adimensionais de Reynolds (Re) e de capilaridade (Ca) provenientes da caracterização das soluções.

Tabela 2: Líquidos e números adimensionais

Líquido	Velocidade (mm/s)	Re	Ca
Água	4,327	15,1445	5,99E-05
Glicerina 30%	4,327	7,4239	1,35E-04
Glicerina 30%	8,654	14,8478	2,70E-04
Glicerina 30%	17,308	29,6957	5,40E-04
Glicerina 70%	4,327	0,9421	1,26E-03
Glicerina 70%	8,654	1,8842	2,52E-03
Glicerina 70%	17,308	3,7683	5,05E-03
Glicerina 90%	4,327	0,1073	1,18E-02
Glicerina 90%	8,654	0,2147	2,35E-02
Glicerina 90%	17,308	0,4293	4,71E-02
Glicerina 100%	4,327	0,0193	6,78E-02
Glicerina 100%	8,654	0,0386	1,36E-01
Glicerina 100%	17,308	0,0772	2,71E-01

A ampla faixa de Reynolds utilizada está baseada em autores como Sankaran & Rothstein (2012) e Yin & Kumar (2006) cujos trabalhos envolvem número de Reynolds menores que 45 além das simulações computacionais de Dodds et al. (2009) e Powell et al. (2000) que utilizaram número de Reynolds próximo ou inferior a 1. Os trabalhos anteriores mostram que o efeito do número de Reynolds neste processo

é desprezível. Assim, o número de capilaridade se torna mais influente neste tipo de processo dadas as dimensões utilizadas. O comprimento característico utilizado neste trabalho foi a altura da gota ( $762 \mu\text{m}$ ) medida com o auxílio do Tensiômetro. Os autores como Sankaran & Rothstein (2012), Yin & Kumar (2006), Dodds et al. (2009) e Chuang et al. (2008) utilizam comprimentos característicos na ordem de milímetros. De maneira geral, os diversos autores utilizam números de capilaridade na ordem decimal e centesimal. Apenas Yin & Kumar (2006), apresentaram números de capilaridades inferiores a ordem centesimal. Com este trabalho, obtivemos baixos números de capilaridade chegando a ordem de  $10^{-5}$ , ampliando a faixa estudada por estes autores.

Um outro parâmetro de suma importância a ser definido é a altura  $H$  que o cilindro de borracha estava em relação à superfície vítrea. Considerando a altura como nula, não haveria líquido residual na superfície de vidro, pois todo o líquido seria escoado até o final da superfície quando não houvesse mais contato entre o cilindro e a superfície. Para a definição da altura  $H$  foi considerado a altura da superfície de vidro ( $1092,2 \text{ micrômetros} - 0,043 \text{ polegadas}$ ) acrescida de uma medida na qual o cilindro tocasse a gota em torno de 23% da altura da gota depositada sobre a superfície. Assim, foi definido que a altura do cilindro de borracha em relação a lâmina de vidro seria de  $177,8 \text{ micrômetros} (0,007 \text{ polegadas})$ . A figura 17 apresenta um esquema ilustrativo para melhor entendimento do ajuste de altura utilizado.

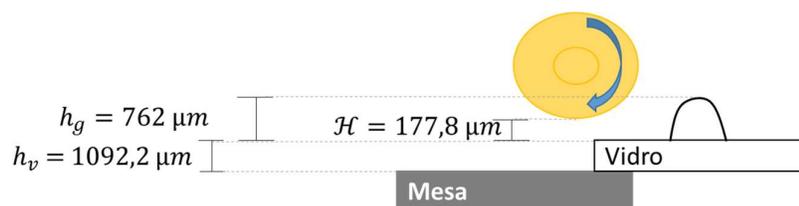


Figura 17: Definição da altura  $H$  do cilindro em relação à superfície vítrea.

### 3.1 Relação de Volume Transferido e Número de Capilaridade

Definida a altura H do cilindro de borracha em relação à superfície de vidro, somada a caracterização dos líquidos apresentada na Tabela 1 e as configurações dos ensaios apresentadas na Tabela 2, através do uso do procedimento experimental descrito no item 2.2, foram obtidos os volumes iniciais e residuais da gota sobre lâmina de vidro. Dessa forma, foi possível calcular o volume de líquido transferido da superfície vítrea para a superfície do cilindro de borracha conforme seguinte equação.

$$V_t = V_i - V_r \quad \text{eq. (5)}$$

Onde o volume transferido é representado por  $V_t$ , o volume inicial é representado por  $V_i$  e o volume residual por  $V_r$ . A determinação da fração de líquido transferida da superfície de vidro para o cilindro foi obtida através da relação do volume de líquido transferido pelo volume inicialmente depositado sobre o vidro e esta relação foi denominada  $V_t/V_i$ .

As diversas configurações empregadas nos ensaios são formadas por números de capilaridade distintos. Estes são obtidos através da utilização de diferentes tipos de líquidos cujas alterações refletem nas características de viscosidade e tensão superficial e pelas velocidades empregadas em cada ensaio. Além do número de capilaridade, apresentado na Tabela 2, há outros dois parâmetros que foram utilizados para definir as diferentes configurações dos ensaios: altura H do cilindro em relação a lâmina de vidro e o tratamento superficial sobre o cilindro (ângulo de contato do líquido com a superfície do cilindro).

Tabela 3: Configuração utilizada na seção 3.1

Velocidade (mm/s)	Altura H ( $\mu\text{m}$ )	Tratamento do Cilindro
4,327	177,8	Não
8,654	177,8	Não
17,308	177,8	Não

Os ensaios foram executados mediante as configurações apresentadas na Tabela 3 utilizando todos os líquidos (água, soluções de glicerina de 30%, 70%, 90% e

100%) e obteve-se uma relação entre a fração de volume transferido da superfície vítrea para o cilindro de borracha e o número de capilaridade. Estes dados foram compilados e dispostos na figura 18.

Como apresentado na equação 2, o número de capilaridade representa a relação da força viscosa pela força da tensão superficial. A partir desta interpretação, podemos dizer que o aumento do número de capilaridade significa que a força viscosa aumenta em relação a força da tensão superficial, de tal forma que aquela se sobrepõe a essa na direção do fenômeno. Por outro lado, quando o número de capilaridade é pequeno, mostra que a força da tensão superficial é maior que a força viscosa. Assim, o direcionamento do fenômeno passa a ser da tensão superficial e não mais das forças viscosas.

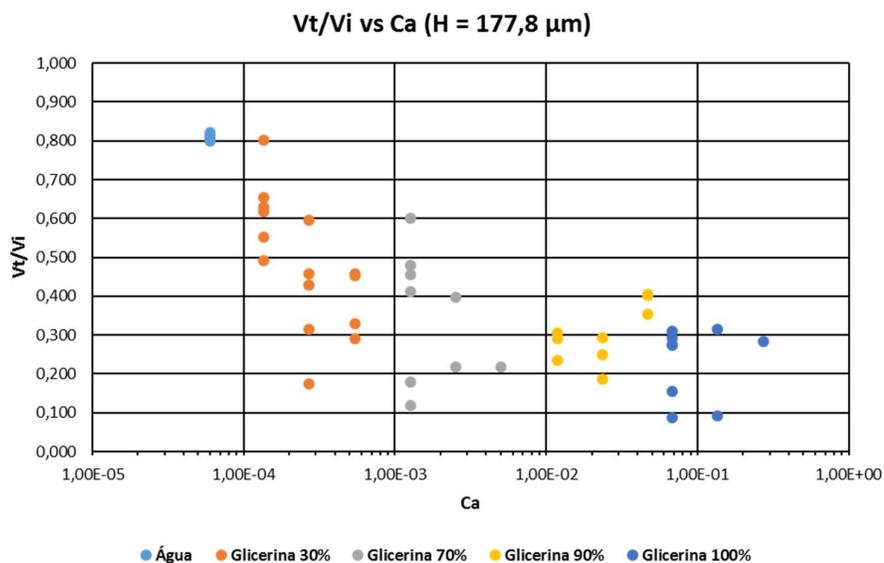


Figura 18: Fração de líquido transferido ( $V_t/V_i$ ) em relação ao número de capilaridade (Ca).

Este mesmo modelo de gráfico será utilizado nas próximas seções, de modo que outros pontos de vista serão analisados. Ainda assim, existem faixas de número de capilaridade que podem ser utilizadas para identificar os líquidos que estão sendo utilizados. Os números de capilaridade inferiores a  $10^{-4}$  referem-se à água; os números de capilaridade compreendidos entre  $10^{-4}$  e  $10^{-3}$  se referem a solução de glicerina 30%; a faixa entre  $10^{-3}$  e  $10^{-2}$  compreende a solução de glicerina 70%; a solução de glicerina 90% está compreendida na faixa de número de capilaridade

entre 0,07 a  $10^{-2}$ ; enquanto que a solução de glicerina 100% apresenta números de capilaridade superiores a 0,07.

Em uma primeira análise, é possível verificar que a fração de volume de líquido transferido torna-se menor com o incremento do número de capilaridade, este comportamento não é linear mostrando quão complexo pode ser a descrição do fenômeno estudado. O aumento no número de capilaridade demonstra que as forças viscosas tornam-se mais fortes em relação a tensão superficial, e a consequência desse balanço de forças é que a quantidade de líquido transferida da superfície de vidro para o cilindro passa a ser menor, ou seja, quando as forças viscosas passam a direcionar o fenômeno, ocorre uma queda no volume de líquido transferido da superfície vítrea. Este mesmo comportamento foi observado por Yin & Kumar (2006). Estes autores criaram uma relação de volume residual e número de capilaridade cujos parâmetros da relação foram obtidos experimentalmente. Nas diversas configurações utilizadas, o mesmo comportamento foi obtido, principalmente quando a distância entre a superfície do cilindro e a cavidade eram positivas, assim como neste estudo onde a altura  $H$  é igual a 177,8 micrômetros.

Podemos observar que ocorre um espalhamento na fração de líquido para um mesmo número de capilaridade independente do líquido utilizado. Uma das possíveis causas para que ocorra o espalhamento é o transporte da lâmina de vidro desde a mesa de cobrimento até o Tensiômetro. Este transporte pode perturbar o formato da gota residual e interferir no formato da gota e, conseqüentemente, na medição do volume residual. Os volumes inicialmente depositados sobre a superfície de vidro são muito pequenos, na ordem de grandeza de  $3 \mu\text{L}$ , de forma que a precisão na medição de volume nesta ordem de grandeza possa ser afetada, gerando resultados com uma grande amplitude.

Chuang et al. (2008) fizeram um trabalho experimental com células dispostas em múltiplas configurações, líquidos com características semelhantes aos líquidos utilizados neste trabalho utilizando o movimento rotacional para obtenção da fração de líquido transferido. Eles constataram que a fração de líquido transferida é inversamente proporcional ao número de capilaridade e que para o caso estudado por eles, a relação é linear, de forma que eles propuseram uma equação que relaciona a

fração transferida com o número de capilaridade. Apesar da figura 18, apresentar uma relação não linear entre a fração de líquido transferida e o número de capilaridade, qualitativamente, estes trabalhos foram semelhantes. Sankaran & Rothstein (2012) realizaram ensaios experimentais para determinar a fração de líquido transferida de cavidade para uma superfície plana e os resultados obtidos não estão em conformidade com os resultados apresentados na figura 18, isso ocorre porque no caso desses autores, foi considerado apenas o movimento extensional.

É possível notar que a fração de líquido transferida é reduzida para baixos números de capilaridade ( $5,9 \times 10^{-5}$ ) até que o valor seja próximo a  $1 \times 10^{-2}$ . Para números de capilaridade superiores a 0,01, a fração de líquido transferida se mantém mais ou menos constante, embora exista uma variação da fração entre 10% e 30%.

A água e as soluções de glicerina (30%, 70%, 90% e 100%) foram utilizadas para fornecer uma ampla extensão de números de capilaridade em conjunto com as velocidades pré-definidas de cada ensaio e a tensão superficial. Este último parâmetro não apresenta valores muito distintos se compararmos todos os líquidos utilizados.

Além da viscosidade, outro parâmetro importante no estudo da transferência de líquidos formados a partir de uma ponte de líquido entre duas superfícies é a molhabilidade. Esta pode ser caracterizada através do ângulo de contato que o líquido forma com a superfície onde está depositado. Assim, foram analisados os ângulos de contato que cada líquido possui com o cilindro de borracha e a superfície vítrea.

Os líquidos que possuem ângulos de contato com superfícies inferiores a  $90^\circ$  são considerados molhantes, acima deste valor, são considerados não-molhantes. O ângulo de contato formado pela água na superfície vítrea foi  $38^\circ$ . Isso significa que a água molha a superfície vítrea, tem uma interação forte com esta superfície. O ângulo de contato formado pela água sobre o cilindro de borracha foi  $79^\circ$ . A superfície de borracha também é uma superfície molhante para a água, visto que o ângulo formado entre o líquido e a superfície foi inferior a  $90^\circ$ . Porém, devido ao ângulo formado ser próximo a  $90^\circ$  a força entre a interface líquido-sólido é menor para este caso.

Os ângulos de contato formados sobre a superfície vítrea foram próximos de  $50^\circ$  independentemente da solução de glicerina utilizada. Entretanto, quando foram analisados os ângulos de contato formados entre as soluções de glicerina e o cilindro de borracha, observamos que os valores de ângulos de contato encontrados foram crescentes. As soluções de glicerina 30%, 70% e 100% possuem ângulos de contato formados com o cilindro de borracha de  $82^\circ$ ,  $94^\circ$  e  $98^\circ$ , respectivamente. Dessa forma, a superfície cilíndrica se transforma de uma superfície molhante para uma superfície não-molhante à medida que a solução de glicerina é mais concentrada.

Os ângulos de contato e o número de capilaridade formados pelas soluções de glicerina sobre o cilindro de borracha, podem explicar a redução na fração de líquido transferido da superfície vítrea. Conforme ocorre o aumento da concentração da solução de glicerina, o ângulo de contato formado com o cilindro de borracha também é aumentado de forma a exceder  $90^\circ$ , limite no qual a superfície se torna não-molhante. Assim, as soluções de glicerina 70%, 90% e 100% não molham a superfície do cilindro, de forma que haja uma quantidade menor de líquido em contato com este e a fração de líquido transferido também se reduz conforme apresentado na figura 18.

Conforme relatado no item 2.2, foram gravados vídeos contendo a sequência de eventos: a aproximação do cilindro de borracha, momento em que o cilindro entra em contato com a gota que está depositada sobre a superfície de vidro, o espalhamento do líquido sobre a superfície, afastamento do cilindro gerando a ponte de líquido, estiramento da ponte de líquido até o rompimento da ponte e formação da gota residual.

Em uma análise inicial, foi medido o tempo desde o contato do cilindro de borracha com a superfície da gota até o completo rompimento da ponte de líquido formada entre a lâmina de vidro e o cilindro. O tempo foi medido para cada líquido e relacionado com o número de capilaridade conforme figura 19. Para baixos números de capilaridade, o tempo de rompimento possui um dos valores mais altos. Entretanto, este tempo passa a ser reduzido até que atinge seu mínimo quando o número de capilaridade alcança o valor  $1 \times 10^{-3}$ . A partir deste ponto, conforme ocorre o nú-

mero de capilaridade, também ocorre um incremento no tempo de rompimento atingindo seu máximo quando a solução de glicerina 100% é utilizada. Se compararmos os dados obtidos nas figuras 18 e 19, poderemos perceber que para baixos números de capilaridade as curvas de fração de líquido transferida e tempo de rompimento tem comportamentos semelhantes, isso quer dizer que nestas condições, conforme ocorre o aumento do número de capilaridade, ocorre a redução na fração de líquido transferido e no tempo de rompimento da ponte.

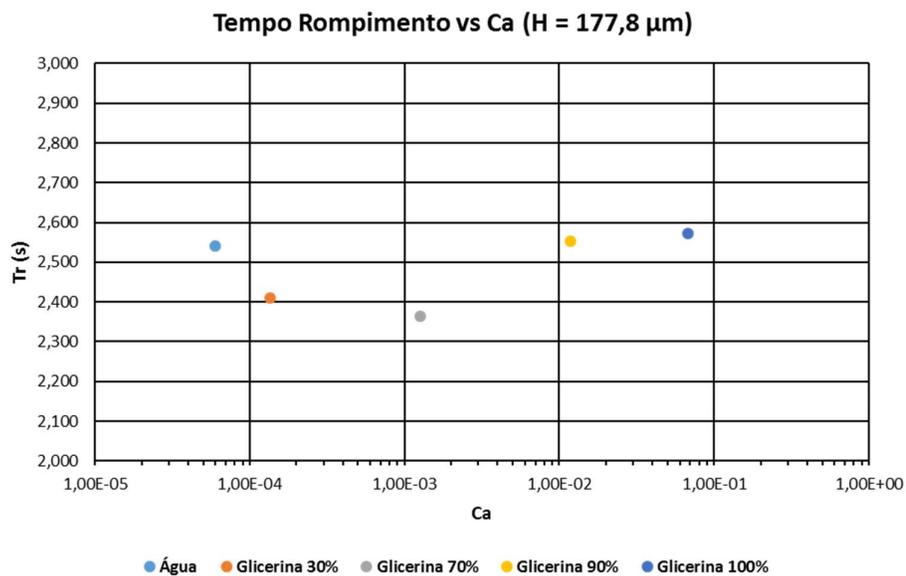


Figura 19: Tempo de Rompimento (Tr) medido desde o contato inicial do cilindro de borracha com a gota até o rompimento da ponte de líquido em relação ao número de capilaridade (Ca).

Para números de capilaridade superiores a  $1 \times 10^{-3}$ , o comportamento não é o mesmo relatado no parágrafo anterior. Ao compararmos as figuras 18 e 19, poderemos perceber que conforme ocorre o aumento do número de capilaridade, a fração de líquido transferida se mantém mais ou menos constante, enquanto que o tempo de rompimento é aumentado. Podemos inferir que para baixos números de capilaridade, o tempo de rompimento pode indicar o comportamento da fração de líquido transferida, porém para altos números de capilaridade este comportamento não é o mesmo.

As gravações foram feitas em uma velocidade de 1.000 quadros por segundo, gerando assim uma sequência de imagens que puderam ser capazes de serem observadas, analisadas e que explicam o fenômeno. Utilizando-se das imagens obtidas durante o ensaio, foi possível realizar uma análise considerando o movimento do cilindro frente a gota. Para facilitar a análise, foi necessário segmentar a sequência de imagens em três períodos distintos. O primeiro período consiste desde o momento em que ocorre o contato do cilindro com a gota, expandindo este contato até o momento em que haja uma constância na imagem, este período foi chamado de Expansão. O segundo período foi caracterizado pela estagnação da imagem, foi chamado de Constância e o contato entre o cilindro e a gota é máximo. O período onde inicia-se a contração do diâmetro da imagem formada entre o cilindro e a gota até o rompimento da ponte de líquido é chamado de período de Contração. A ponte de líquido é formada no período de expansão, quando o cilindro entra em contato com a gota e se estende pelo período de constância. No período de contração, ocorre o estiramento da ponte de líquido ocasionada pelo afastamento do cilindro de borracha em relação a posição de contato com a gota.

No primeiro quadro da figura 20, é apresentada a imagem da gota inicial vista por baixo formada sobre a superfície de vidro através do item 4 do procedimento experimental. Neste trabalho, foi empregada uma visualização do fenômeno de transferência sob uma óptica diferente. As imagens foram obtidas no plano x-z conforme figura 16, diferentemente dos trabalhos anteriores nos quais as imagens são obtidas no plano x-y (referência está na figura 16). Estes trabalhos caracterizaram a ponte de líquido neste plano devido às dimensões de cavidades e volumes depositados utilizados serem bem maiores que a realidade. Para efeito de comparação, autores como Sankaran & Rothstein (2012) utilizaram cavidades de 0,5 mm e 1,0 mm; Yin & Kumar (2006) utilizaram cavidades de 0,9 mm a 1,5 mm. Neste trabalho, o volume inicialmente depositado é próximo a 3  $\mu\text{L}$  e a altura característica é 762  $\mu\text{m}$ , estes valores são mais próximos a processo de impressão real. A escolha pela captação de imagens nesta perspectiva possibilitou a análise da posição da ponte de líquido formada entre a superfície vítrea e o cilindro de borracha. Os trabalhos anteriores não puderam identificar onde a ponte de líquido era formada em relação a base da gota, este posicionamento pode influenciar o rompimento da ponte de líquido.

A imagem imediatamente a direita (quadro 390) mostra o momento exato do contato do cilindro com a gota, neste instante ocorre a interação do líquido com o cilindro em movimento rotacional e o período de expansão tem seu início. Cada imagem tem um quadro relacionado e o tempo transcorrido desde o início do contato do cilindro com a gota. O período de expansão tem a duração em média de 0,750 segundos para a água. Pode-se observar um pequeno deslocamento do centro de massa da gota, causado pela força capilar. Quando este período se encerra tem-se o início do período de constância cujo tempo de duração é, em média, 0,123 segundos.

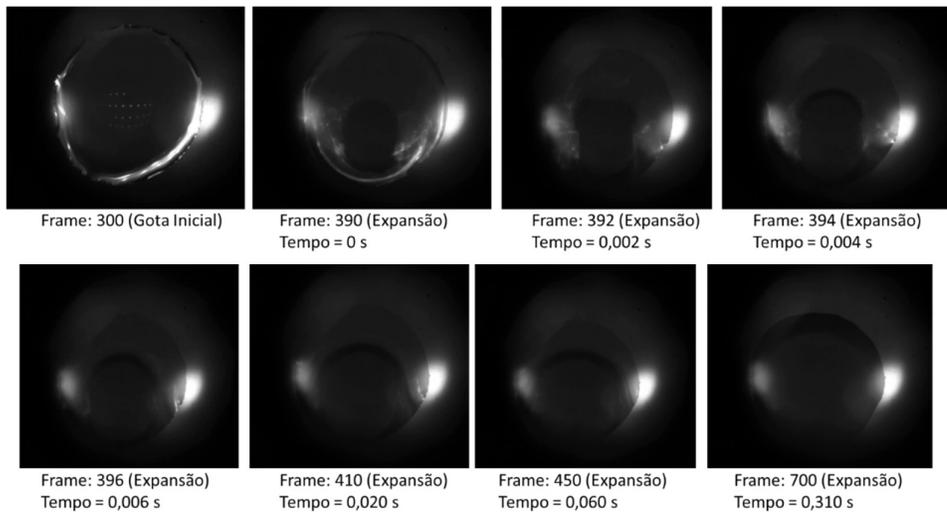


Figura 20: Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da água para altura  $H$  igual a 177,8 micrômetros.

As primeiras duas imagens da figura 21 mostram o período de constância, onde não ocorre alteração do tamanho da gota. Após este período inicia-se o período de contração, no qual a superfície do cilindro se afasta do plano, a gota é esticada e o diâmetro da gota se reduz gradualmente. É neste estágio que a ponte de líquido formada entre a superfície de vidro e o cilindro de borracha passa pelo processo de estrangulamento. A ponte de líquido formada entre as duas superfícies pode ser aproximada pela forma cilíndrica conforme proposto por Dodds et al. (2009). O diâmetro da ponte de líquido formada durante o período de expansão atinge o seu máximo, ou seja, o diâmetro da ponte de líquido é semelhante ao diâmetro da gota.

O diâmetro da ponte de líquido permanece estagnado durante o período de constância. Podemos notar que nos quadros 1100 e 1200, o diâmetro da gota é igual ao diâmetro da ponte de líquido e que a partir do quadro 1700, o diâmetro da ponte de líquido é reduzido motivado pelo movimento rotacional do cilindro até que a ponte seja totalmente interrompida e que reste apenas uma gota residual na superfície vítrea apresentada na figura 22.

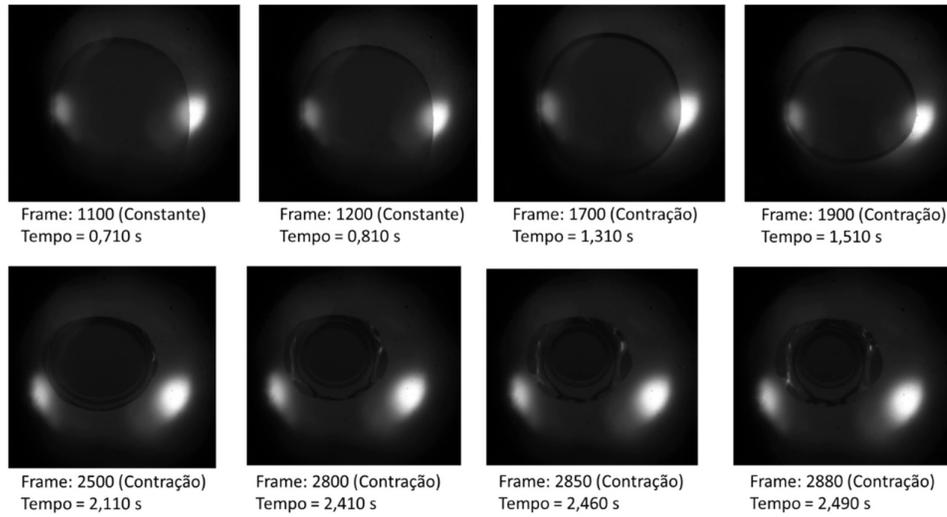


Figura 21: Sequência de imagens captadas desde o período de constância e parte do período de contração da ponte de água para altura  $H$  igual a 177,8 micrômetros.

A partir do quadro 1700, podemos notar que o diâmetro da ponte de líquido foi reduzido gradativamente durante todo o período de contração. Este período possui 1,682 segundos de duração, em média, e é caracterizado pela diminuição do diâmetro da ponte de líquido que neste caso é a água. A redução do diâmetro se dá até o momento do rompimento da ponte de líquido.

No intervalo dos quadros 1700-2931, pode-se notar claramente que o diâmetro da ponte é menor que o diâmetro da base da gota. Este comportamento sugere que a ponte de líquido está sendo estirada. A figura 22 apresenta a sequência final do período de contração e a formação da gota residual mostrado no quadro 2990 (última imagem à direita). A gota residual possui um diâmetro menor que a gota inicialmente depositada sobre a lâmina de vidro comprovando visualmente que houve a transferência de uma parcela do volume de líquido para o cilindro.

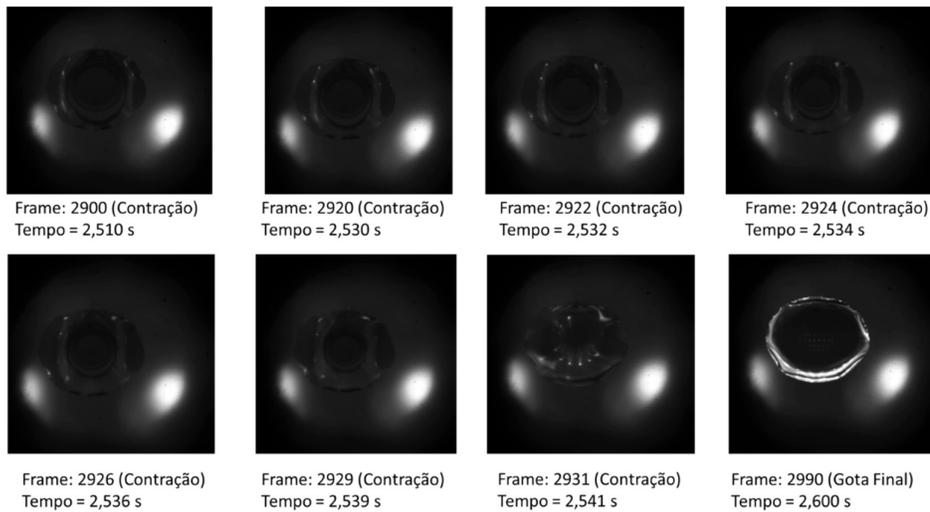


Figura 22: Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual de água para altura H igual a 177,8 micrômetros.

Foram analisados as imagens da solução de glicerina 90% e os períodos de expansão, constância e contração em comparação a água. É possível comparar qualitativamente a relação dos diâmetros destes líquidos. Na figura 23, são apresentadas as imagens obtidas na formação da gota inicial e o período de expansão da solução de glicerina 90%.

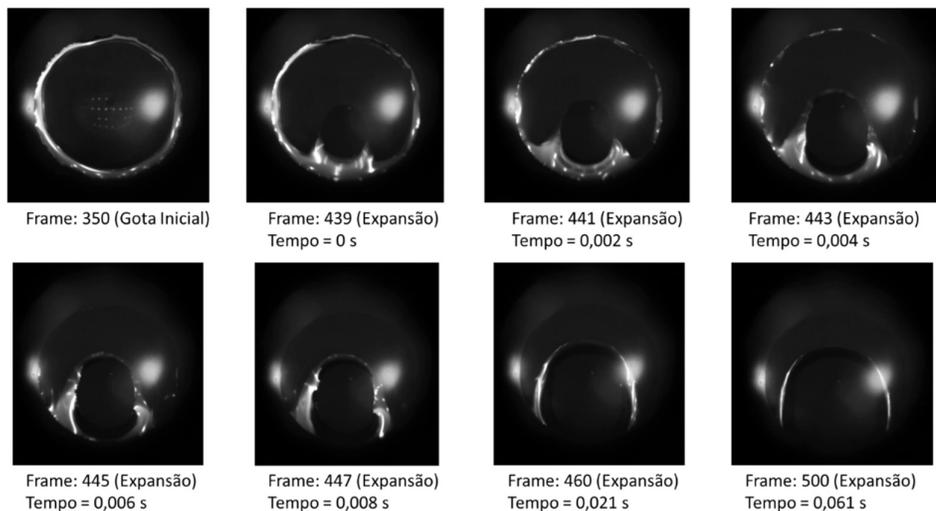


Figura 23: Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da solução de glicerina 90% para altura H igual a 177,8 micrômetros.

Assim como visto nas imagens relativas a água, na primeira imagem da figura 23 é mostrada a gota inicial da solução de glicerina 90% (quadro 350). O período de

expansão possui 0,649 segundos mostrando uma redução de 13% em comparação com o período de expansão da água. Claramente, é possível inferir que as características viscosas impactam no espalhamento do líquido sobre a superfície do cilindro uma vez que o tempo de expansão foi reduzido nesta comparação. Este comportamento foi visto na figura 18, quando se observam líquidos com características mais viscosas transferindo menos volume de líquido. Uma das razões pelas quais a transferência seja menor, é o fato de que o líquido mais viscoso (0,174 Pa.s) demora mais para se espalhar sobre a superfície do cilindro. O período de constância da solução de glicerina 90% é semelhante ao período de constância da água: 0,100 segundos.

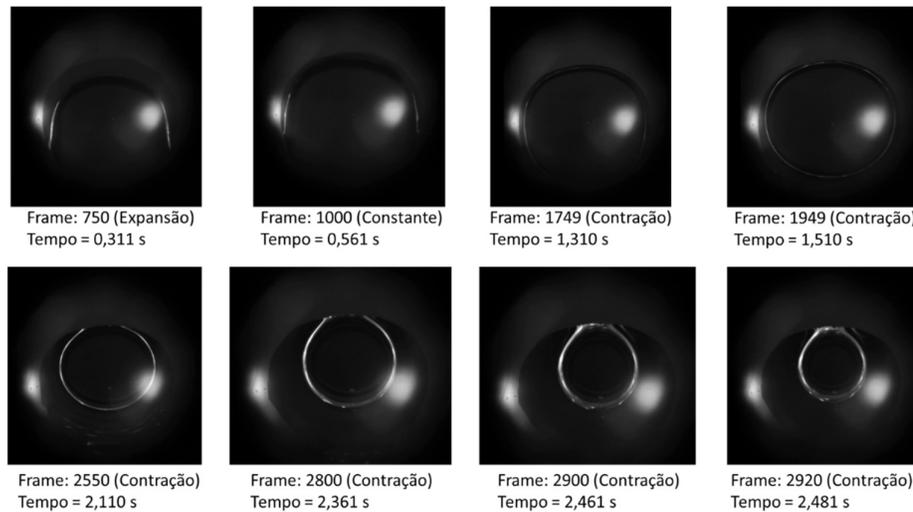


Figura 24: Sequência de imagens captadas desde o período de expansão e parte do período de contração da ponte da solução de glicerina 90% para altura H igual a 177,8 micrômetros.

O período de contração tem seu início no quadro 1749 como mostrado na figura 24 de forma que novamente há uma redução no diâmetro das imagens subsequentes culminando no rompimento da ponte de líquido formada entre cilindro de borracha e superfície de vidro, restando apenas a gota residual.

As figuras 21 e 22, mostram o período de contração da água. Durante este período, é possível notar que a posição da ponte de líquido em relação a base da gota é concêntrica, ou seja, o estiramento formado pela ponte de líquido entre as duas superfícies é paralelo ao diâmetro formado pela base da gota. No entanto, se observarmos

a figura 24, onde é apresentado o início do período de contração da solução de glicerina 90%, podemos perceber que a posição da ponte de líquido formada pela solução não é concêntrica. A partir do quadro 2550 até o quadro 2989, a posição da ponte de líquido em relação a base formada pela gota é diferente. A posição da ponte de líquido está mais próxima da parte superior da base da gota.

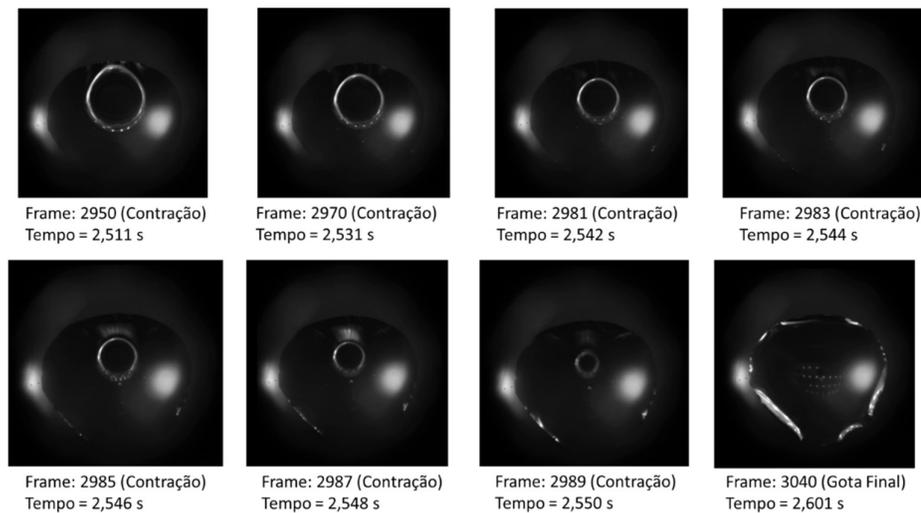


Figura 25: Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual da solução de glicerina 90% para altura H igual a 177,8 micrômetros.

O período de contração da solução de glicerina 90% (1,771 segundos) é, em média, 5% maior que o período de contração da água, dessa forma podemos inferir que a ponte de líquido formada pelo líquido mais viscoso é prolongada devido à maior resistência ao escoamento da solução mais viscosa. Entretanto, apesar deste prolongamento ocorrer, ele não favorece uma maior transferência de líquido da superfície vítrea para o cilindro como pode ser visto na figura 18.

É possível notar, qualitativamente, que o diâmetro da gota residual sobre a superfície de vidro da solução de glicerina 90% apresentada na figura 25 mais especificamente no quadro 3040 é menor que o diâmetro da gota inicial apresentada no quadro 350 da figura 23. Isso mostra que o líquido foi parcialmente transferido da superfície vítrea para o cilindro. Além do mais, comparando o quadro 3040 da figura 23 e o quadro 2990 da figura 22, podemos verificar que o diâmetro formado pela gota residual da solução de glicerina é maior que o diâmetro da gota residual formada pela água. Isso corrobora com os resultados qualitativos apresentados na figura 18

mostrando que a fração de líquido transferido quando se utiliza a água (0,812) é maior que a fração de líquido transferida quando se utiliza a solução de glicerina 90% (0,19 a 0,40).

### 3.2 Diferentes Alturas de Cilindro

Uma outra configuração utilizada nos ensaios experimentais, foi a alteração da altura H do cilindro com relação a lâmina de vidro. Na seção 3.1, a altura H empregada foi de 177,8 micrômetros. Nesta seção, a altura H do cilindro em relação a lâmina de vidro será dobrada, ou seja, terá 355,6 micrômetros. O objetivo neste momento é a comparação da fração volumétrica transferida da superfície vítrea para o cilindro em uma nova condição de altura. A Tabela 4 apresenta a configuração utilizada na seção 3.2.

Tabela 4: Configuração utilizada na seção 3.2

Velocidade (mm/s)	Altura H ( $\mu\text{m}$ )	Tratamento do Cilindro
4,327	355,6	Não

A figura 26 apresenta a relação da fração volumétrica de líquido transferido da superfície de vidro para o cilindro conforme gráfico apresentado na seção 3.1, porém utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 4. Nesta seção foi utilizada apenas uma única velocidade que foi igual a 4,327 mm/s.

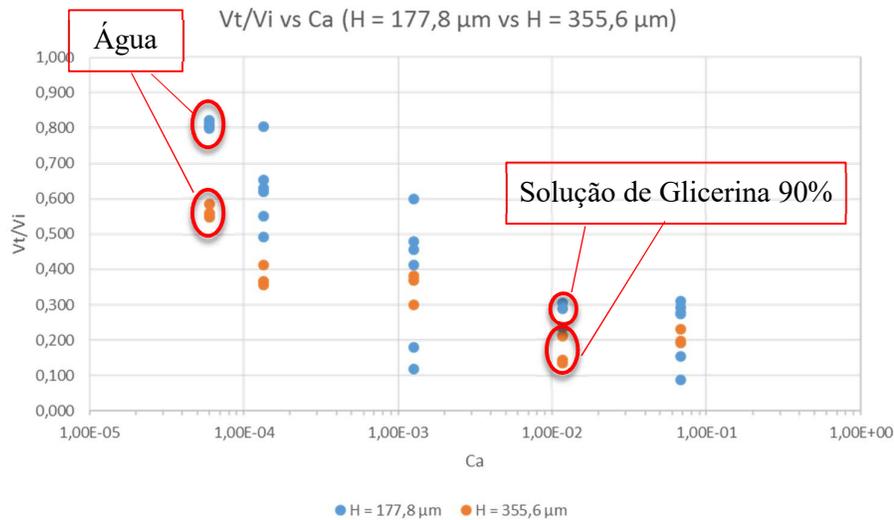


Figura 26: Comparativo da fração de líquido transferido ( $V_t/V_i$ ) em relação ao número de capilaridade ( $Ca$ ) em diferentes alturas  $H$ .

A altura  $H$  igual a 355,6 micrômetros proporcionou uma redução na fração de líquido transferida em comparação com a altura  $H$  igual a 177,8 micrômetros para baixos valores de capilaridade, assim o comportamento em ambas as alturas foi semelhante. Para números de capilaridades superiores a  $1 \times 10^{-3}$ , a fração de líquido transferida se manteve mais ou menos constante, de forma que as soluções de glicerina de 70% e 100% apresentaram frações de líquido transferidas semelhantes em ambas as alturas.

Uma das primeiras impressões a respeito desse comportamento é o fato do cilindro estar em uma distância maior da superfície de vidro e, portanto, tem menos área de contato superficial com a gota depositada. Desse modo, a quantidade de líquido que entra em contato com o cilindro é menor e assim a quantidade transferida também passa a ser menor. Nesta seção, a distância entre o cilindro e a superfície de vidro foi dobrada, de modo que o cilindro passa a tocar a gota em uma altura que representa 46% da altura da gota. Esta mesma relação para a seção 3.1 foi de 23%, ou seja, a distância entre cilindro e superfície utilizada naquela seção foi muito inferior do que a altura utilizada nesta, promovendo um maior contato do cilindro com a gota.

Conforme executado na seção 3.1, foi feito o mesmo gráfico para mostrar a relação do tempo de rompimento em função do número de capilaridade e o comparativo com as alturas H.

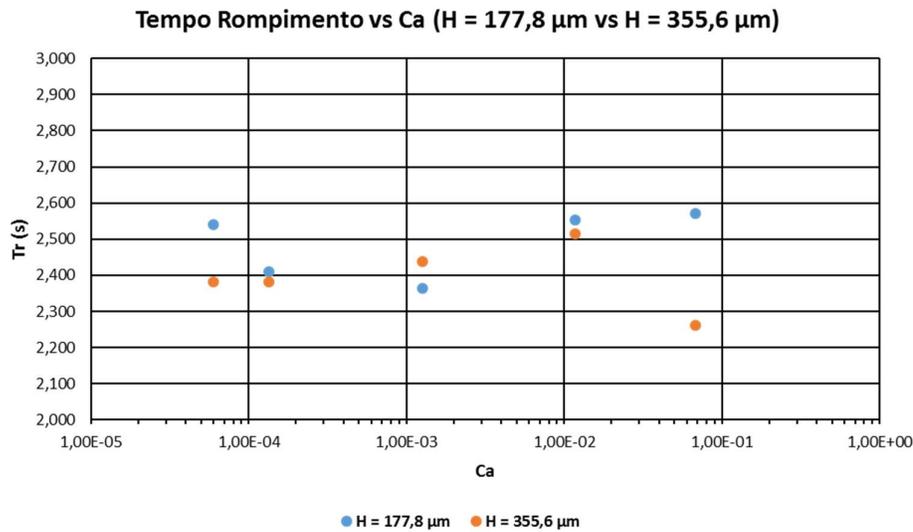


Figura 27: Comparativo do Tempo de Rompimento (Tr) medido desde o contato inicial do cilindro de borracha com a gota até o rompimento da ponte de líquido em relação ao número de capilaridade (Ca) em diferentes alturas H.

É possível notar que ocorre o aumento do tempo de rompimento com a altura H 355,6 micrômetros conforme ocorre o aumento do número de capilaridade até que este alcance o valor de  $1 \times 10^{-2}$  atingindo o máximo de tempo de rompimento. A partir deste número ocorre a redução no tempo de rompimento. A solução de glicerina 100%, nas condições de operação do ensaio, apresentou o menor tempo de rompimento. O comportamento tempo de rompimento nesta seção não apresentou semelhança em comparação com a seção 3.1.

Com a definição do novo valor de altura H apresentado na Tabela 4, foi possível avaliar comparativamente o período de cada segmento conforme mostrado na figura 28. Avaliando a água, o período de Expansão foi 14% inferior se compararmos à altura 355,6 micrômetros com a altura 177,8 micrômetros. O que mostra que dobrando a distância entre cilindro e superfície onde a gota está depositada, o período em que ocorre o contato inicial entre cilindro e superfície é consideravelmente menor promovendo uma quantidade menor de líquido em contato com o cilindro. A

figura 28 apresenta a sequência inicial de imagens obtidas com a altura  $H$  igual a 355,6 micrômetros para a água.

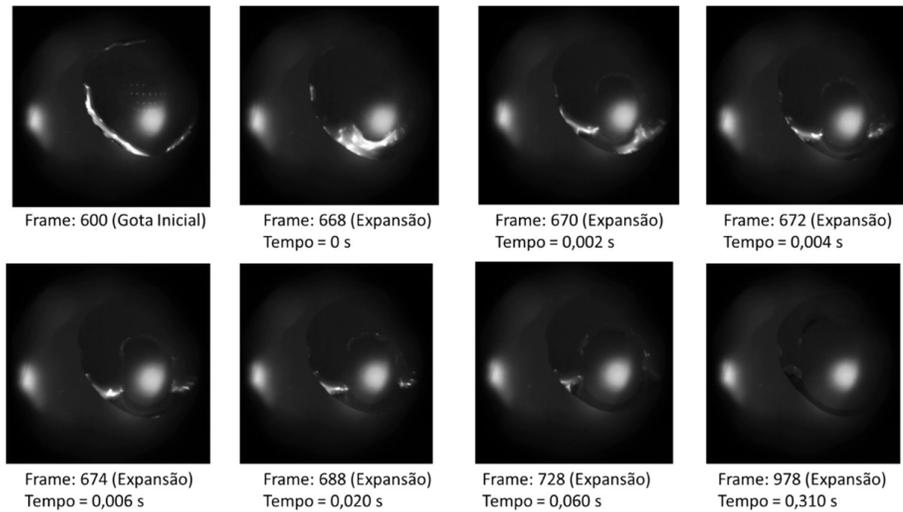


Figura 28: Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da água para altura  $H$  igual a 355,6 micrômetros.

Além da redução do período de expansão, os períodos de constância e contração também foram 3% e 2% menores, respectivamente, o que corrobora com a hipótese de que o menor contato inicial causado pela distância ter sido aumentada gera uma transferência menor de líquido da superfície. Vale destacar que em baixos números de capilaridade, inferiores que  $10^{-4}$ , para altura  $H$  igual a 177,8 micrômetros a fração de água transferida é maior que a fração de água transferida para a altura  $H$  igual a 355,6 micrômetros.

A figura 29 apresenta o início do período de contração entre os quadros 1478-3001 e podemos observar que o estiramento da ponte de líquido quando a altura  $H$  é 355,6 micrômetros é muito semelhante ao comportamento encontrado quando a altura  $H$  é 177,8 micrômetros em termos de posição da ponte com relação a base da gota. A sequência de imagens demonstra que a ponte de líquido não está muito bem definida, aparentemente, o estiramento é mais fraco nesta configuração do que na configuração apresentada na seção 3.1.

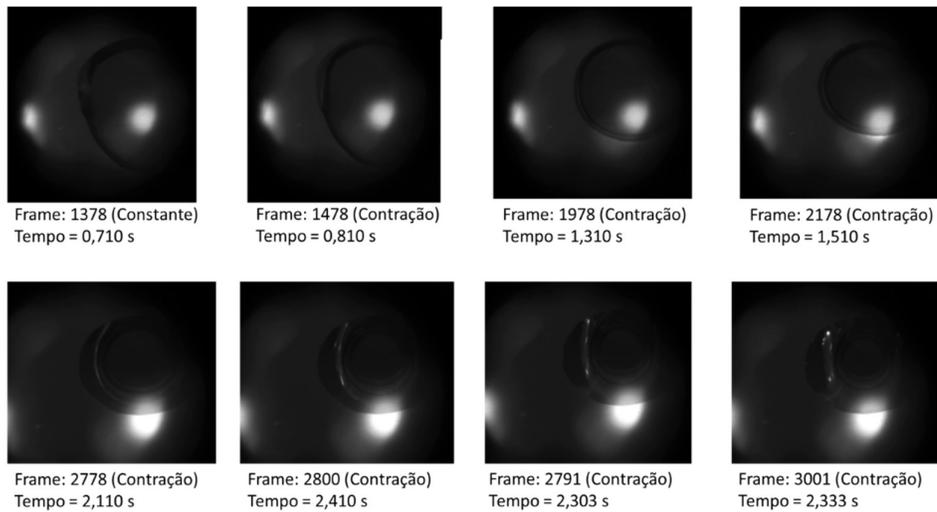


Figura 29: Sequência de imagens captadas desde o período de constância e parte do período de contração da ponte de água para altura  $H$  igual a 355,6 micrômetros.

A água não é capaz de sustentar a ponte de líquido por um longo período, como o contato inicial foi reduzido justamente pelo incremento de altura do cilindro em relação à superfície vítrea, a ponte de líquido ficou ainda mais enfraquecida dificultando a transferência de líquido para o cilindro. A figura 30 apresenta o período de contração e a formação da gota residual sobre a superfície vítrea para a água.

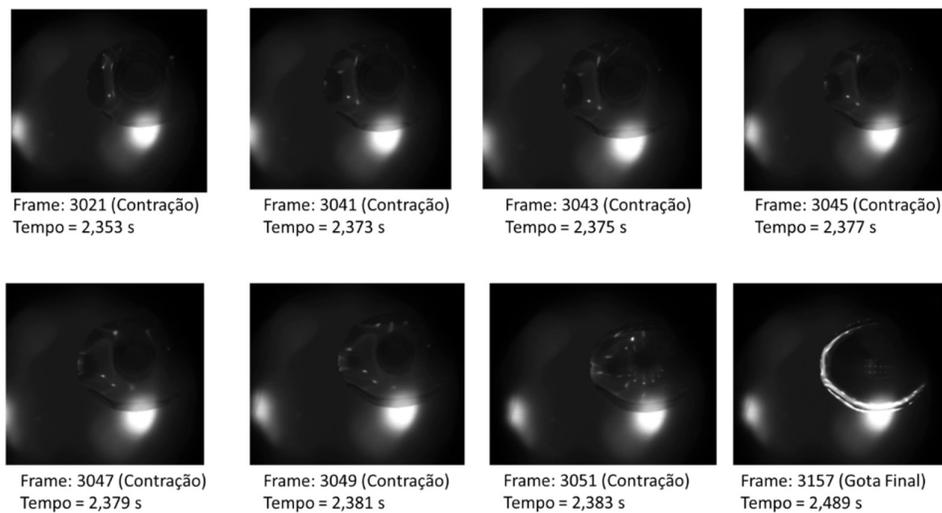


Figura 30: Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual de água para altura  $H$  igual a 355,6 micrômetros.

A figura 31 apresenta a sequência inicial de imagens capturadas utilizando a solução de glicerina 90% quando a altura  $H$  do cilindro foi igual a 355,6 micrômetros.

Avaliando o período de expansão, constatou-se que houve uma redução neste período em 8% (0,598 segundos) em relação aos dados obtidos na seção 3.1 para este líquido.

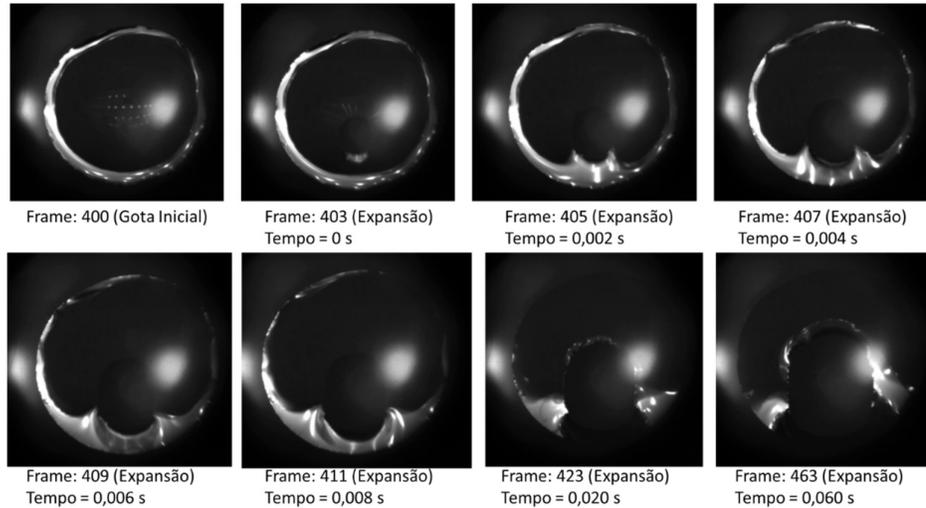


Figura 31: Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da solução de glicerina 90% para altura H igual a 355,6 micrômetros.

Por outro lado, o período de constância se manteve inalterado. O período de contração teve um aumento de 3% em relação à altura H igual a 177,8 micrômetros. Isso demonstra que a solução de glicerina 90% foi capaz de estender a ponte de líquido formada entre o cilindro e a superfície mesmo quando o contato do cilindro com a gota de líquido foi reduzido. Entretanto, mesmo com a extensão da ponte de líquido, não foi possível aumentar a transferência de líquido.

A ponte de líquido, formada pela solução de glicerina 90% mostrada na figura 32, é bem definida tal qual a ponte formada por esta mesma solução na seção anterior (3.1). É possível notar que a formação da ponte de líquido não é concêntrica com a base da gota, este comportamento também foi observado na figura 24.

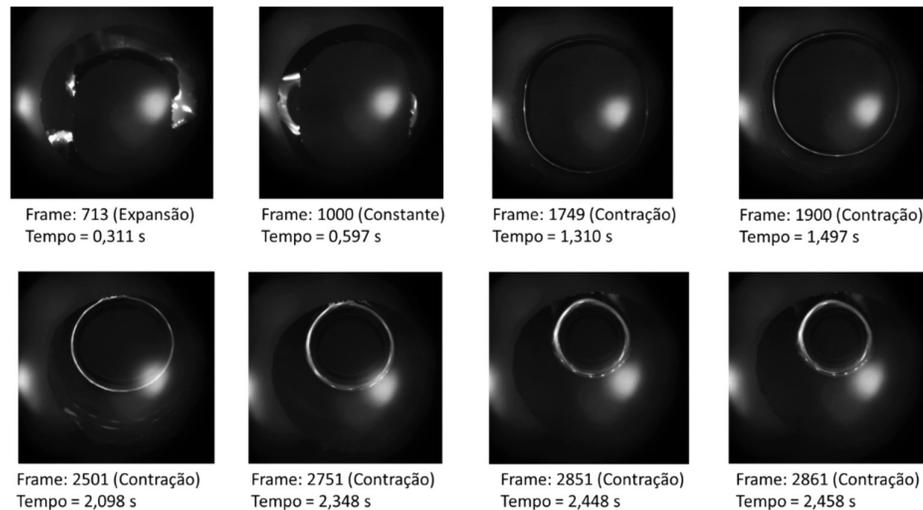


Figura 32: Sequência de imagens captadas desde o período de expansão e parte do período de contração da ponte da solução de glicerina 90% para altura H igual a 355,6 micrômetros.

Outro aspecto interessante, que podemos observar na figura 33, é o fato de que o maior período de contração não favorece a transferência de líquido. As frações da solução de glicerina 90% (solução destacada nesta figura) nas alturas 177,8 micrômetros e 355,6 micrômetros são praticamente similares, de 23% a 30% para o primeiro caso e de 13% a 21% no segundo.

Se compararmos a redução na fração de água (líquido destacado na figura 33) transferida em ambas as alturas H e a redução na fração da solução de glicerina 90% transferida também em ambas as alturas H, podemos inferir que com o aumento da viscosidade proporcionou uma maior redução de transferência. Ou seja, isso quer dizer que a fração de água transferida em ambas as alturas H teve uma redução 30% (fração de 0,812 para 0,564 em média) enquanto que a fração de solução de glicerina 90% nas mesmas condições teve uma redução de 40% (fração de 0,277 para 0,164 em média).

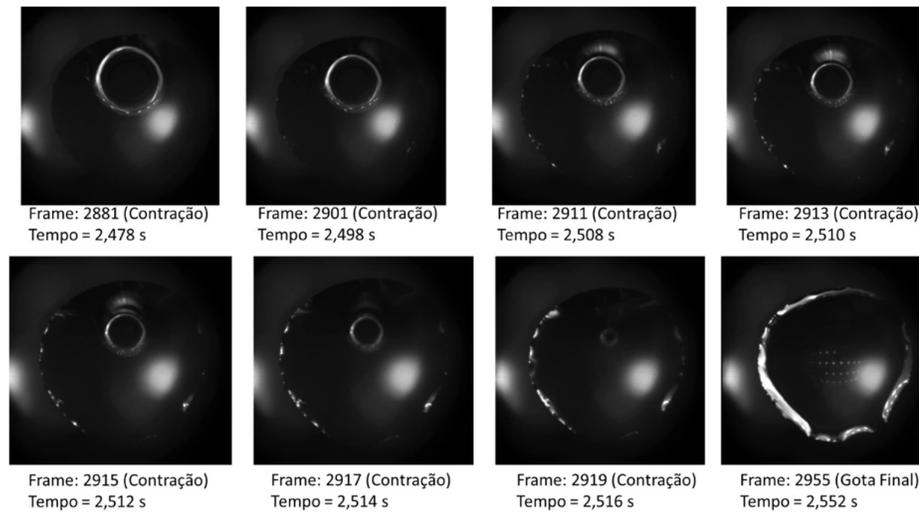


Figura 33: Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual da solução de glicerina 90% para altura H igual a 355,6 micrômetros.

Analisando a figura 26, podemos perceber que há redução na fração de líquido transferida quando a distância entre o cilindro e a superfície é dobrada independentemente do número de capilaridade. Em alguns casos, como nas soluções de glicerina a 70% e a 100%, a fração de líquido transferida foi semelhante independente da altura do cilindro. Vale lembrar que, na composição deste gráfico, foi utilizado uma única velocidade no cilindro e que, portanto, a tensão superficial e viscosidade dos líquidos são os parâmetros que diferem o número de capilaridade.

### 3.3 Cilindro com Tratamento Superficial

Afim de avaliar o efeito do ângulo de contato na transferência de líquido, o cilindro foi recoberto com um filme de polipropileno. O tratamento aplicado ao filme foi feito com uma solução de poliácridamida e cloreto de sódio em água. Esta solução foi aplicada sobre o filme e aguardou-se a secagem da solução em temperatura ambiente por cerca de 15 minutos.

Assim como no item 3.2, foi utilizada apenas a velocidade mínima (4,327 mm/s) nos ensaios, portanto as variações no número de capilaridade são provenientes da

viscosidade e tensão superficial de cada líquido. A Tabela 5 apresenta a configuração dos ensaios experimentais utilizados nesta seção.

Tabela 5: Configuração utilizada na seção 3.3

Velocidade (mm/s)	Altura H ( $\mu\text{m}$ )	Tratamento do Cilindro
4,327	177,8	Sim

Após a secagem da solução de poliacrilamida sobre o filme de polipropileno, este foi fixado no cilindro de borracha conforme é mostrada na figura 34.

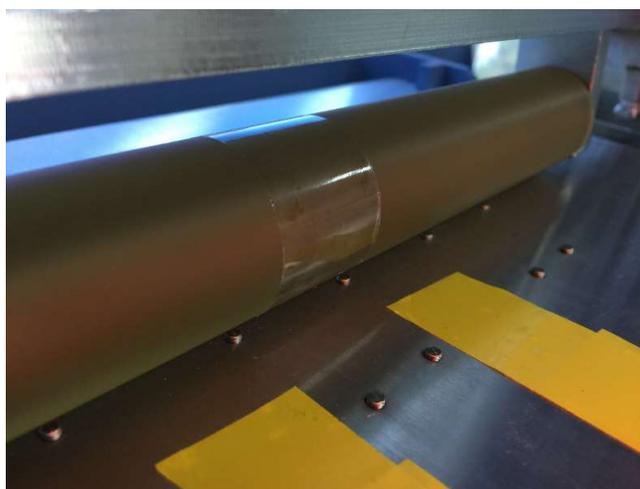


Figura 34: Filme de polipropileno tratado e fixado no cilindro de borracha.

O tratamento no filme de polipropileno visa alterar a condição da tensão superficial do cilindro a fim de obter um novo perfil de transferência de líquido. Desta forma é possível inferir se a mudança de determinadas características como substrato, rugosidade, ângulo de contato, molhabilidade poderiam afetar de forma significativa a transferência de líquido de uma superfície para a outra.

Para avaliar o tratamento superficial feito sobre o filme, foi analisado o ângulo de contato formado entre a água e o cilindro sem tratamento e também o ângulo de contato formado entre a água e a superfície vítrea. Conforme mencionado na seção 3.1, o ângulo de contato formado pela água com a superfície vítrea era  $38^\circ$ . O ângulo de contato formado pela água sobre a superfície de filme tratado que estava fixado sobre o cilindro foi  $44^\circ$ . Em comparação com o ângulo de contato obtido na superfície cilíndrica sem tratamento, a redução foi de 44% (de  $79^\circ$  para  $44^\circ$ ). Isso

significa que o tratamento feito sobre o filme, tornou o cilindro mais molhante que na seção 3.1.

Novamente, foram feitos ensaios experimentais com todos os líquidos já relatados neste estudo, fazendo-se a devida correlação da fração em volume de líquido transferida da superfície de vidro para o filme tratado sobre o cilindro de borracha com o número de capilaridade.

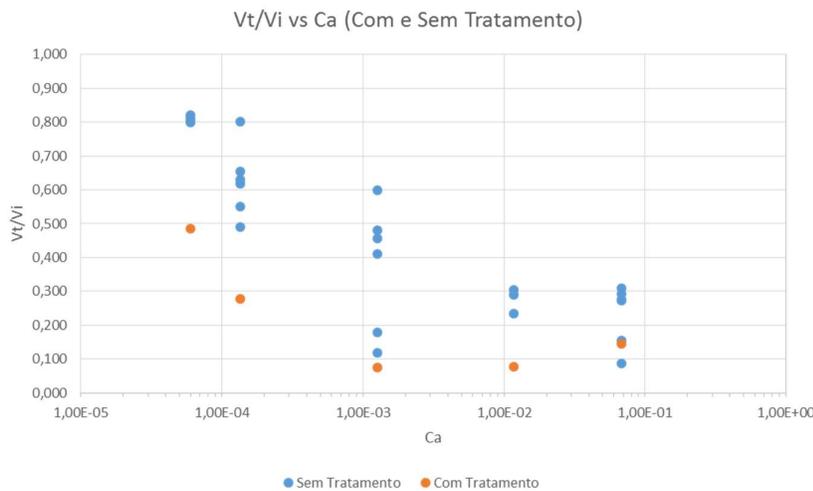


Figura 35: Comparativo da fração de líquido transferido ( $V_t/V_i$ ) em relação ao número de capilaridade ( $Ca$ ) em diferentes tratamentos do cilindro.

A figura 35 apresenta a correlação entre a fração de líquido transferida sobre o filme tratado e o número de capilaridade. É possível observar que o filme tratado sobre o cilindro de borracha contribuiu negativamente para a transferência de líquido se comparado com a superfície sem tratamento independentemente do líquido que foi utilizado. Isso quer dizer que a fração de líquido transferida para o cilindro com filme tratado foi menor que a fração obtida nos ensaios sem tratamento.

Do ponto de vista do ângulo de contato, os ângulos formados entre água e as superfícies vítrea e cilíndrica com tratamento foram semelhantes,  $38^\circ$  e  $44^\circ$ , respectivamente. Esta semelhança não favoreceu a transferência de líquido entre as superfícies. Assim, a redução do ângulo de contato da água no cilindro com e sem tratamento não aumentou a fração de água transferida, pelo contrário, transferiu-se uma quantidade inferior de líquido quando as superfícies apresentaram um ângulo de

contato semelhante. Este comportamento não era esperado, porque o ângulo de contato do cilindro tratado é menor que o ângulo de contato do cilindro de borracha sem tratamento. Dodds et al. (2009) fizeram um comparativo dos ângulos de contato formado pelo líquido na cavidade e também na superfície de transferência, os resultados obtidos por eles foram contrários aos resultados obtidos neste trabalho. Para Dodds et al. (2009), à medida que o ângulo de contato da superfície de transferência aumenta, ocorre uma maior transferência de líquido. Este resultado pode ter ocorrido devido ao modelo computacional utilizado por Dodds et al. (2009) que não leva em consideração a cinemática completa do movimento de rotação. Trabalhos mais recentes, publicados por Campana & Carvalho (2014) e Campana et al. (2016), apresentaram um modelo computacional capaz de simular a cinemática da transferência de líquido entre superfícies de uma maneira mais completa. Entretanto, estes autores consideraram um único valor para ângulo de contato ( $70^\circ$ ) em ambas as superfícies não sendo possível uma comparação.

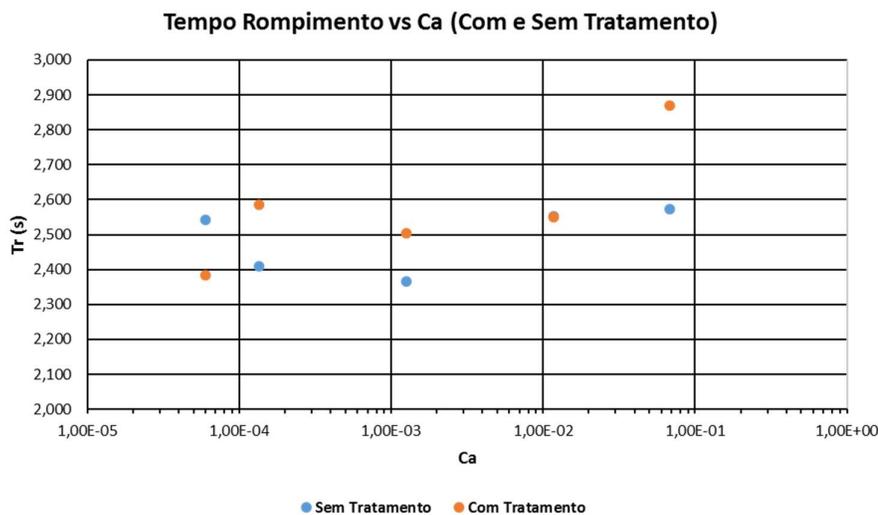


Figura 36: Comparativo do Tempo de Rompimento ( $T_r$ ) medido desde o contato inicial do cilindro de borracha com a gota até o rompimento da ponte de líquido em relação ao número de capilaridade ( $Ca$ ) em diferentes tratamentos do cilindro.

A figura 36 apresenta o comparativo do tempo de rompimento em relação número de capilaridade em diferentes tratamentos superficiais sobre o cilindro. É interessante destacar que o tempo de rompimento da ponte sobre a superfície tratada possui comportamento diferente em relação ao tempo de rompimento da ponte sobre a

superfície não tratada. É possível notar que com o incremento do número de capilaridade, ocorre o aumento do tempo de rompimento para a superfície tratada para números baixos de capilaridade até o atingimento de um platô entre os números de capilaridade de  $1 \times 10^{-4}$  a  $1 \times 10^{-2}$  e que após este platô ocorre um aumento no tempo de rompimento. Provavelmente, este comportamento ocorre devido as características da solução de glicerina 100% que é mais concentrada.

Da mesma forma que foram analisadas as sequências de imagens nas seções anteriores, nesta não se faz diferente. A figura 37 apresenta a gota de água inicialmente depositada sobre a superfície de vidro no quadro 800 e a partir do quadro seguinte passa a mostrar o período de expansão. Este período possui 0,613 segundos de duração, sendo 18% menor que o período de expansão da água na mesma condição, porém sem tratamento superficial no cilindro. Aparentemente, o líquido não adere a superfície de vidro promovendo uma fraca interação neste sistema líquido-superfície. Este comportamento influencia totalmente a transferência de líquido como mostrado na figura 35, a fração de líquido transferido de água da superfície de vidro para o cilindro foi reduzido de 0,812 para 0,486 em comparação com a superfície tratada e sem tratamento, respectivamente.

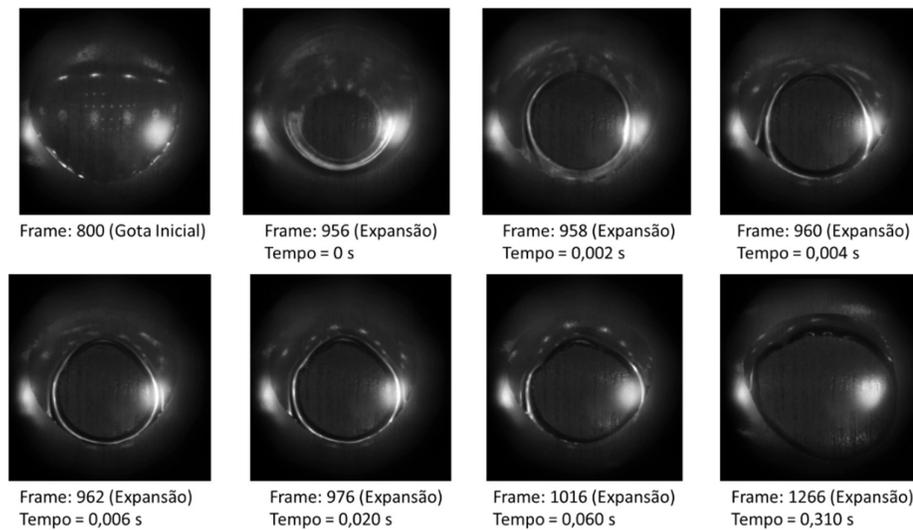


Figura 37: Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da água com filme tratado aplicado sobre o cilindro.

As sequências de imagens captadas nesta seção para a água são muito semelhantes as sequências das seções anteriores em termos da posição da ponte de líquido e a posição da base da gota depositada sobre a lâmina de vidro. O período de constância entre as duas configurações (com tratamento e sem tratamento) também são muito similares.

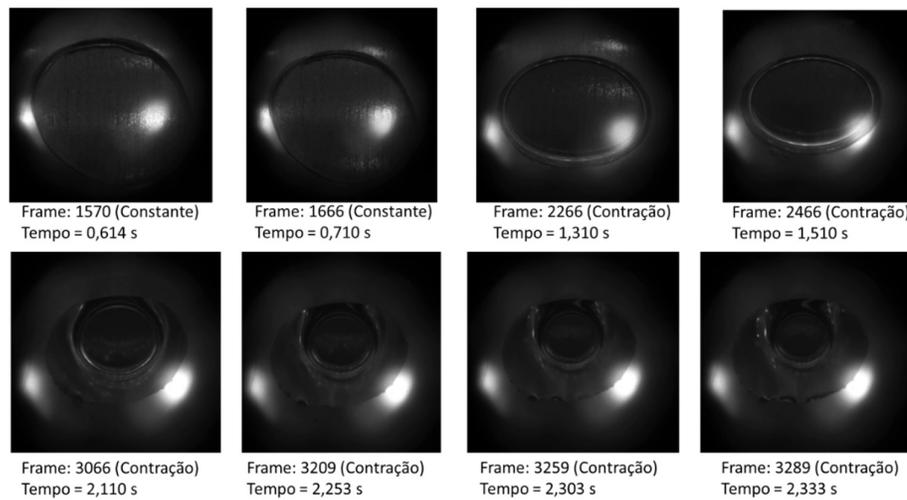


Figura 38: Sequência de imagens captadas desde o período de constância e parte do período de contração da ponte de água com filme tratado aplicado sobre o cilindro.

A figura 39 mostra a sequência final do estiramento da ponte de água do período de contração culminando na formação da gota residual. O período de contração possui 1,659 segundos, sendo praticamente o mesmo valor obtido no período de contração da ponte de água para uma superfície sem tratamento conforme mostrado na figura 22. Apesar do comportamento neste período ser semelhante em ambas as configurações (com e sem tratamento), a molhabilidade foi afetada devido à baixa energia superficial que o filme foi submetido quando aplicado o tratamento. Dessa forma, o período de expansão, como já comentado, foi reduzido drasticamente desfavorecendo a aderência do líquido na superfície do cilindro que estava com o filme tratado. Assim, a transferência de líquido foi impactada negativamente pois na figura 35 mostra a fração de água transferida para o cilindro com filme tratado ser 0,486 enquanto que a fração de água transferida para o cilindro sem o filme foi 0,814.

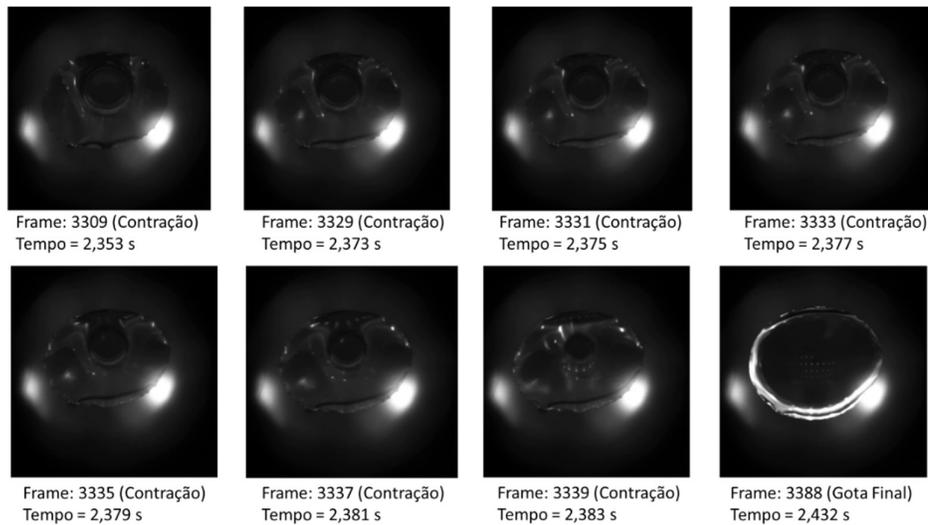


Figura 39: Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual de água com filme tratado aplicado sobre o cilindro.

Na figura 40 apresenta a sequência inicial das imagens capturadas utilizando a solução de glicerina 90%. O período de expansão possui 0,767 segundos sendo 18% maior que a configuração sem o filme tratado. Isso mostra que, apesar do tratamento não oferecer a aderência necessária para o molhamento da superfície pela água, a viscosidade elevada da solução promoveu um ângulo de contato mais favorável a tal ponto de não repelir o líquido, aumentando assim o tempo de contato do líquido com a superfície do cilindro.

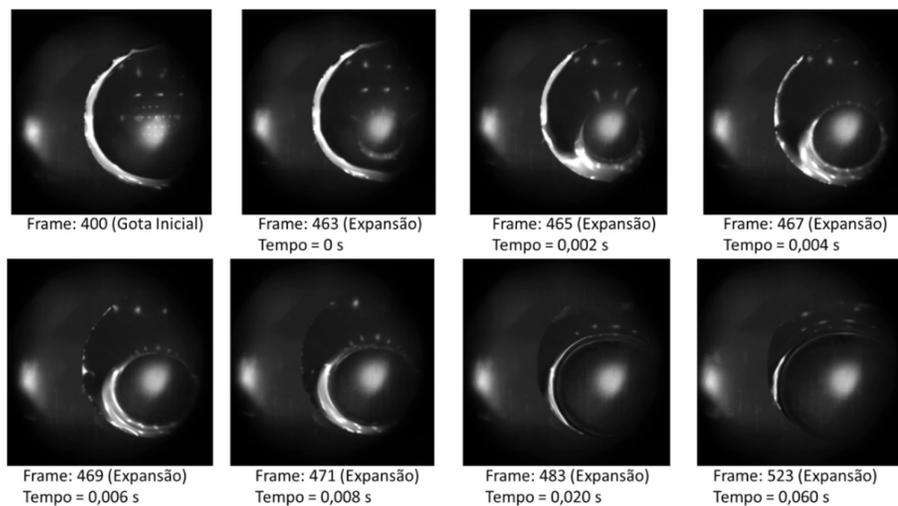


Figura 40: Sequência de imagens da gota inicial e do período de expansão da solução de glicerina 90% com filme tratado aplicado sobre o cilindro.

A figura 41 apresenta o período de constância e também a sequência inicial do período de contração. Este período teve seu tempo reduzido se comparado com o período de contração mostrado na figura 20 em 6% resultando em um tempo total de 1,664 segundos.

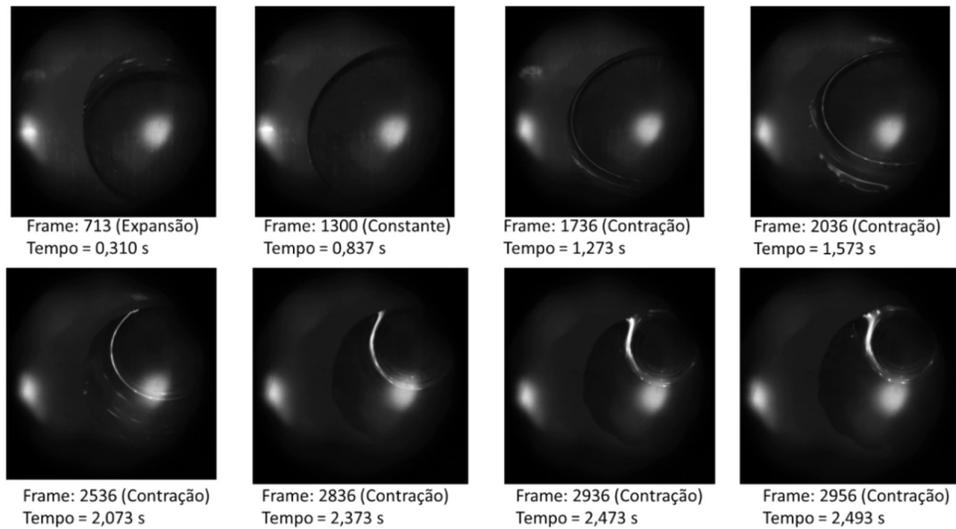


Figura 41: Sequência de imagens captadas desde o período de constância e parte do período de contração da ponte da solução de glicerina 90% com filme tratado aplicado sobre o cilindro.

É possível notar que a ponte de líquido formada em ambas as configurações (com e sem tratamento) são semelhantes. Embora seus efeitos na fração de líquido transferido para a superfície cilíndrica sejam diferentes. A redução no período de contração mostra que a ponte de líquido foi interrompida antes que um maior volume fosse capaz ser transferido dado o tratamento utilizado ter funcionado como antiaderente.

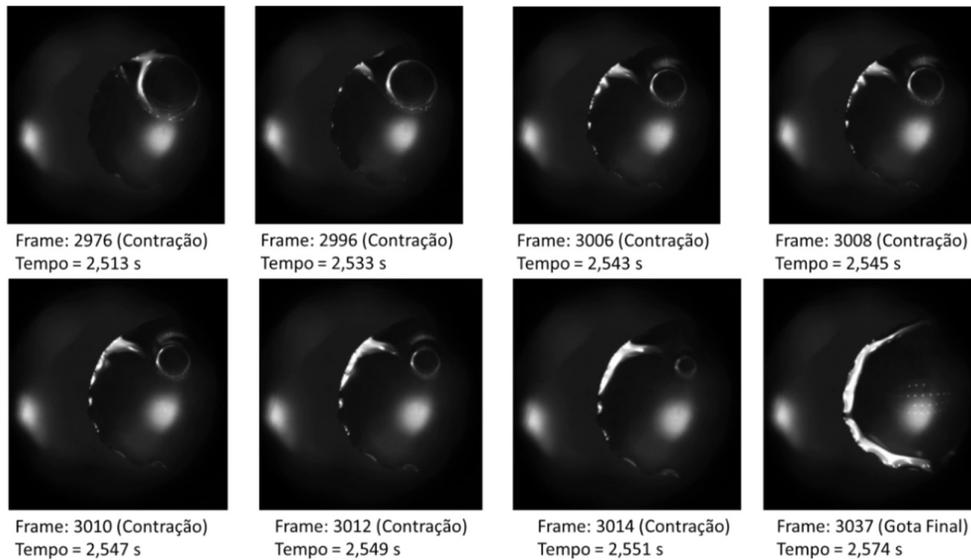


Figura 42: Sequência de imagens captadas do período de contração até a formação da gota residual de solução de glicerina 90% com filme tratado aplicado sobre o cilindro.

Como consequência, a fração de solução de glicerina 90% transferida da superfície de vidro para o cilindro com filme tratado foi 0,079 enquanto que a fração do mesmo líquido, porém com cilindro sem tratamento foi 0,277.