

6

Escoamento transiente de uma gota num capilar com constrição. Resultados Numéricos.

6.1

Introdução

Apresentam-se neste capítulo os resultados numéricos obtidos para o escoamento transiente imiscível de uma gota infinita suspensa em outro fluido através de um capilar com constrição.

Existem alguns trabalhos na literatura estudando o escoamento imiscível através de um capilar com uma constrição. A maioria dos trabalhos estão relacionados ao estudo do mecanismo de “*snap-off*” para a quebra de gotas.

O trabalho de Tsai [31] apresenta resultados para o escoamento de uma gota finita através de uma constrição de forma cosenoidal. Usa-se o método de integral de contorno para resolver numericamente as equações de Stokes e são estudadas as condições nas quais se produz ou não a quebra de gotas.

Legait et al. [33] realizaram trabalho teórico e experimental estudando o escoamento de dois fluidos imiscíveis devido a um gradiente de pressão constante através de um capilar reto com uma constrição no meio. Utiliza-se uma equação generalizada obtida a partir de um balanço de energia e a

mesma é resolvida numericamente. Legait mostra que a queda de pressão necessária para forçar uma gota através de uma constrição depende de um número adimensional δ que expressa a razão entre o número de Reynolds e o número de capilaridade. Para altos valores de δ , a queda de pressão adimensional $\frac{\Delta PR}{\sigma}$ decresce. Para o caso de uma gota que não molha o capilar, a vazão decresce na medida que a frente da gota entra na constrição, e isto é dado para uma distância δx positiva em relação ao centro da constrição.

O trabalho de Westborg [30] apresenta a variação do perfil da gota durante a ocorrência do mecanismo de snap-off de uma gota finita através de uma constrição para o caso com razão de viscosidade $\lambda = 1$ e $Ca = 0.1$. A evolução da queda de pressão adimensional não é explorada neste caso.

6.2 Metodologia

Como no caso do escoamento permanente através do capilar reto, neste caso adota-se um referencial na ponta da gota. A parede do capilar move-se com uma velocidade U (velocidade da gota).

As soluções obtidas para o escoamento de uma gota num capilar reto são usadas como condições iniciais para obter a solução no tempo do escoamento da gota através do capilar com constrição. Inicialmente a gota encontra-se em escoamento permanente através de um capilar reto sem constrição. A constrição é colocada suficientemente longe da gota, e fora do domínio computacional da solução para o regime permanente. (Ver Fig. 6.1). Uma vez que a constrição entra no domínio, a mudança na geometria

altera os campos de velocidade e de pressão.

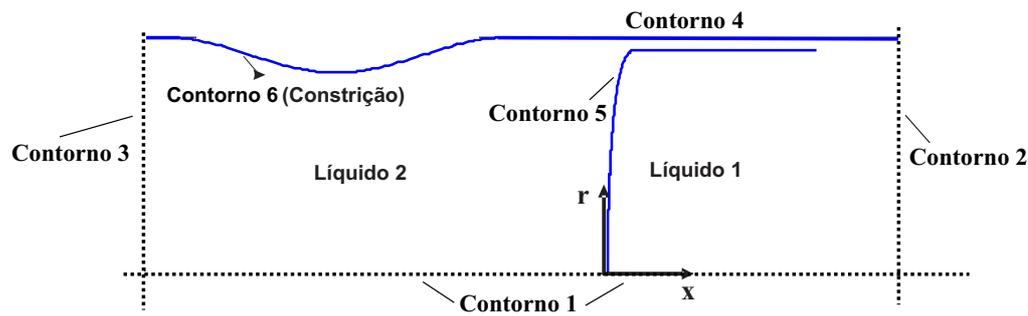


Figura 6.1: Diagrama esquemático para a solução do escoamento de uma gota infinita através de uma constrição.

O problema é resolvido impondo-se uma velocidade constante da gota e calculando-se o gradiente de pressão necessário para manter esta velocidade. Apesar deste problema não representar uma situação real, pois os experimentos são feitos controlando-se a vazão ou o gradiente de pressão, os resultados obtidos claramente indicarão o efeito de bloqueio do poro devido a passagem de uma gota através da sua garganta. Esta análise teórica irá determinar o efeito da viscosidade da gota, da tensão interfacial e da vazão do escoamento no aumento necessário do gradiente de pressão para empurrar a gota pela garganta do capilar.

A geometria da garganta escolhida foi cosenoidal. Além desta geometria ser similar à dos capilares utilizados nos experimentos apresentados anteriormente, ela não possui quinas, o que facilita a solução numérica do problema.

A equação que descreve a geometria da constrição usada apresenta-se a continuação:

$$r(x) = R_1 - \left(\frac{R_1 - R_2}{2} \right) \left[1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{Lc} \right) \right] \quad (6-1)$$

Na Eq. (6-1) R_1 é o raio do capilar reto, R_2 é o raio mínimo da constricção e Lc é o comprimento da constricção.

A malha utilizada foi a mesma da solução obtida em regime permanente. O domínio foi dividido em 651 elementos e o problema contém 12773 graus de liberdade. Uma malha representativa do problema é mostrada na Fig. 6.2.

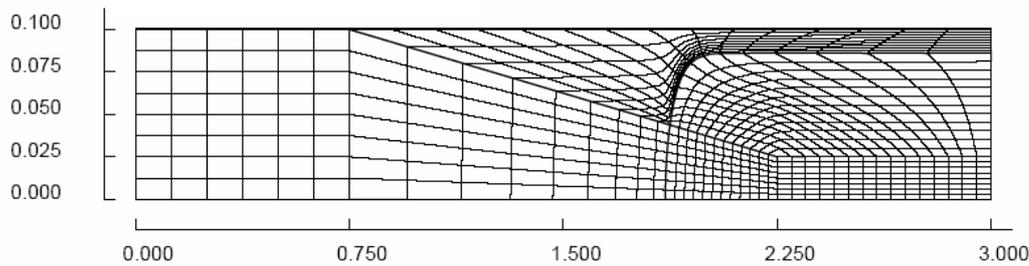


Figura 6.2: Malha representativa do problema resolvido.

6.3 Resultados

A Fig. 6.3 apresenta a variação do perfil da gota para o caso em que a razão de viscosidade $\lambda = 1$ e $Ca = 0.01$. Inicialmente, quando a gota encontra-se longe da constricção, conserva a forma que tinha no regime permanente. Quando a frente da gota entra na constricção é deformada na parte frontal, adotando uma forma similar à forma da constricção. A parte traseira da gota que está fora da constricção conserva a forma que mantém

no regime permanente. A deformação da gota acentua-se perto da metade da constricção, onde os gradientes de velocidades são muito maiores.

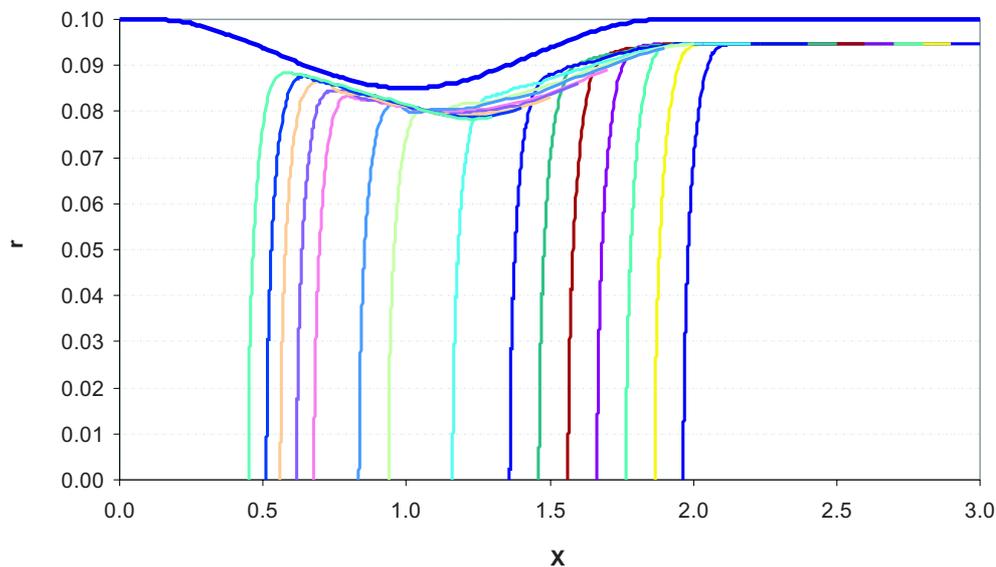


Figura 6.3: Evolução do perfil da gota passando através da constricção para $Ca=0.01$ e $\lambda=1$.

Algumas das malhas para as soluções a cada instante de tempo são apresentadas na Fig. 6.4 para o escoamento da gota antes e durante a passagem através da constricção.

A Fig. 6.5 apresenta a evolução do gradiente de pressão em função do tempo para o caso com $Ca = 0.01$ e razão de viscosidades $\lambda = 1$. Os resultados são apresentados em termos da razão adimensional da queda de pressão e a vazão $\frac{\Delta PR^3}{\mu_2 Q}$ em função da posição da interface ao longo do capilar. Inicialmente, quando a gota encontra-se suficientemente longe da constricção, a razão $\frac{\Delta PR^3}{\mu_2 Q}$ permanece constante e igual à solução em regime permanente. A medida que a gota aproxima-se da constricção a pressão aumenta gradualmente. Um pouco antes da frente da gota passar pela metade da constricção, a diferença de pressão atinge seu valor máximo. O

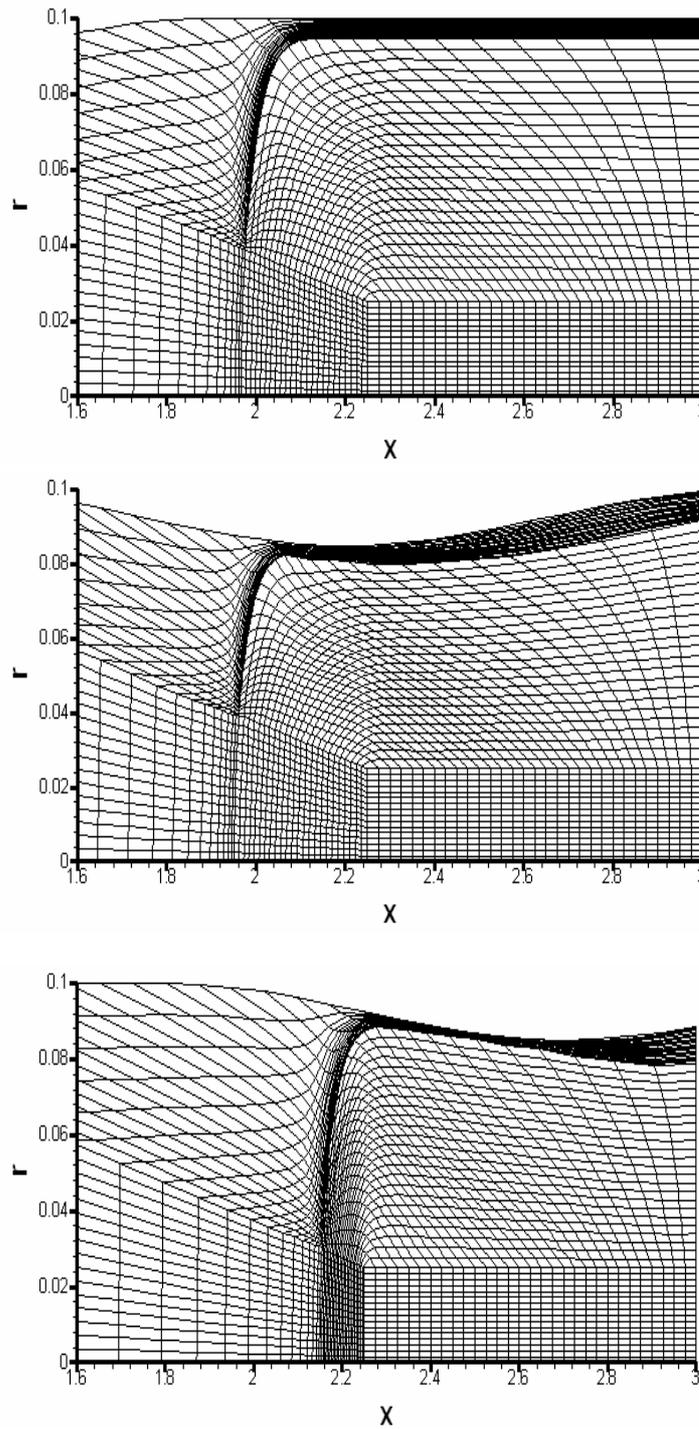


Figura 6.4: Malhas obtidas no escoamento transiente da gota através da constrição para $Ca=0.01$ e $\lambda=1$.

valor máximo é neste caso aproximadamente 30% maior do que o valor encontrado no escoamento da gota através de um capilar reto. Após este instante, a pressão cai atingindo valores menores do que o valor em regime

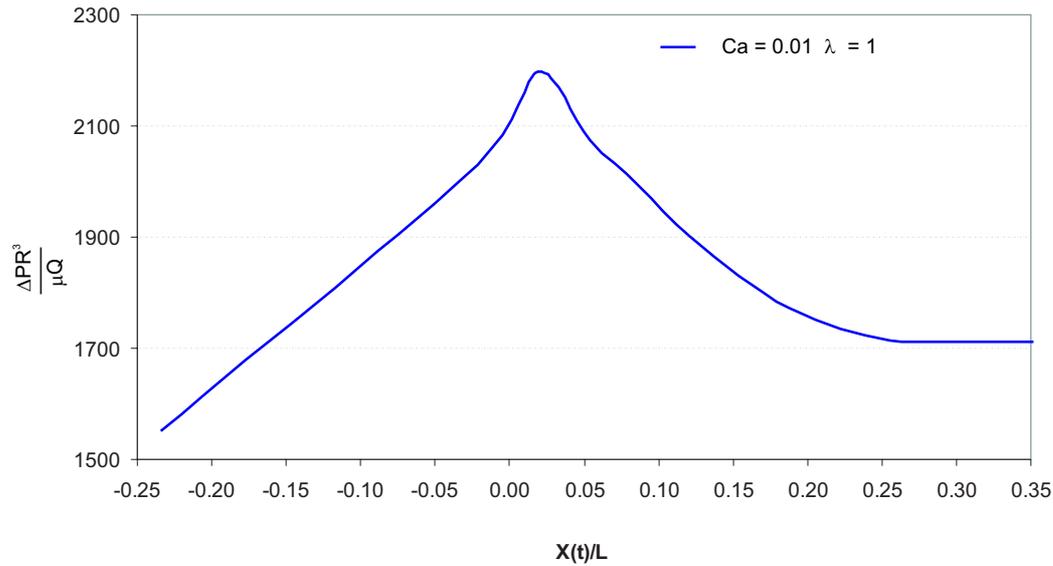


Figura 6.5: Evolução da razão entre a queda de pressão e a vazão em função da posição da gota para $Ca=0.01$ e $\lambda=1$.

permanente.

6.4 Efeito do número capilar

Analisa-se o efeito do número de capilaridade no gradiente de pressão extra necessário para a que a gota passe através da constricção. A Fig. 6.6 compara a evolução da queda pressão durante a passagem da gota pela garganta para diferentes números de capilaridade e razão de viscosidade $\lambda = 2$. Quando o número de capilaridade é aumentado, o valor decresce e aparentemente se aproxima assintoticamente de um valor constante. Se comparados a queda de pressão entre os casos extremos existe uma diminuição de 75% quando o número capilar é aumentado de $Ca = 0.01$ para $Ca = 0.08$. Isto pode ser observado com clareza na Fig. 6.7.

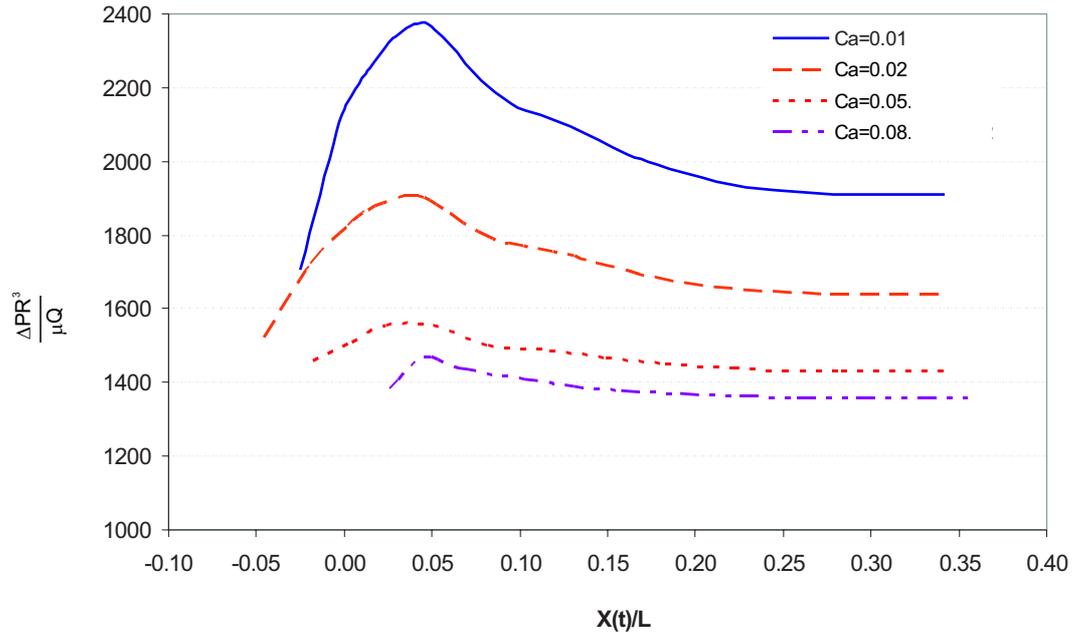


Figura 6.6: Evolução da razão entre a queda de pressão e a vazão em função da posição da gota para $\lambda = 2$ $Ca = 0.01, 0.02, 0.05, 0.08$.

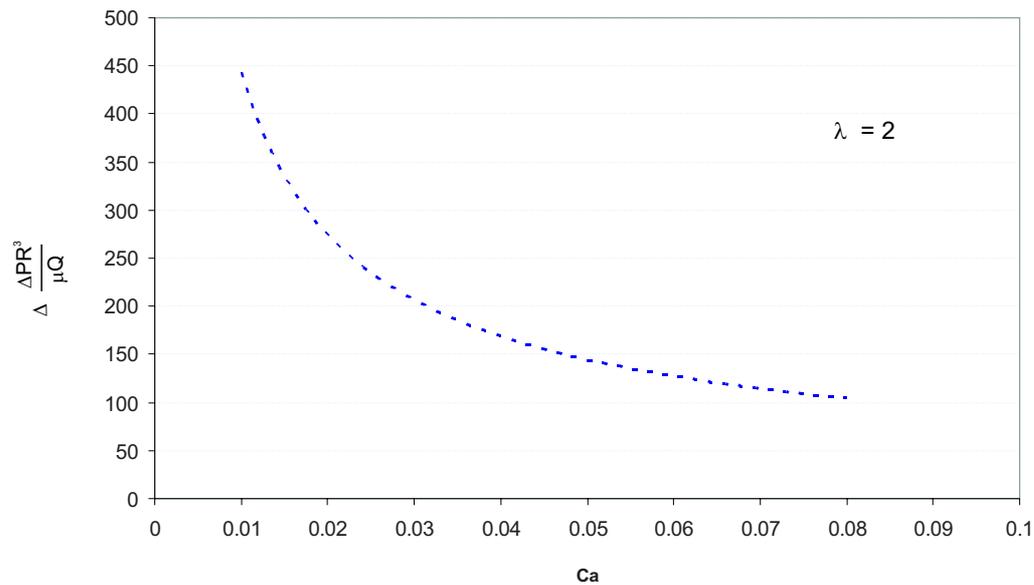


Figura 6.7: Comparação dos valores de $\frac{\Delta PR^3}{\mu Q}$ extra para o escoamento da gota através da constrição para $\lambda = 2$ em função do número de Ca

6.5 Efeito da razão de viscosidades

O efeito da razão de viscosidade no escoamento transiente pode ser analisado na Fig.6.8. Para os casos tomados, o número capilar é $Ca = 0.01$ e

os casos estudados correspondem a razões de viscosidade $\lambda = 1, 2, 4$ e 8 . Aqui a mudança da razão de viscosidade não causa uma mudança considerável na queda de pressão extra necessária para o escoamento da gota através da constricção. Não existe uma mudança considerável na queda de pressão extra necessária quando variada a razão de viscosidade dentro os valores estudados. Isto pode ser observado na Fig. 6.9 que mostra o gradiente de pressão extra necessário para o passo da gota através da constricção.

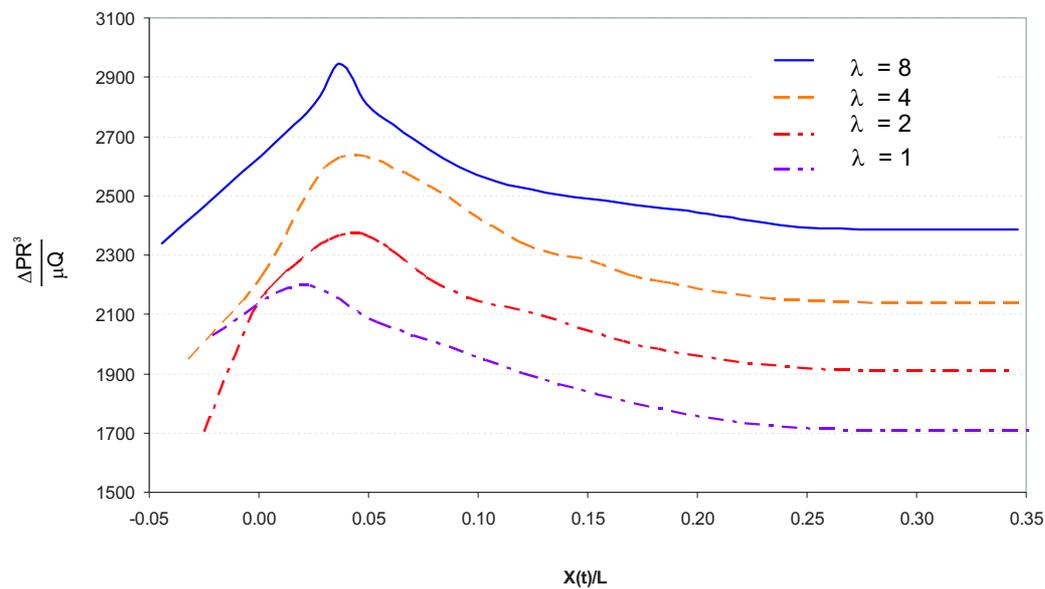


Figura 6.8: Evolução da razão entre a queda de pressão e a vazão em função da posição da gota para $Ca = 0.01$ $\lambda = 1, 2, 4$ e 8 .

Observasse que para os casos estudados a razão de viscosidade foi mudada entre $\lambda = 1$ e 8 para baixos números de capilaridade ($Ca = 0.01$). Para baixos números de capilaridade o efeito da mudança da razão de viscosidades no aumento da pressão quando a gota passa através da constricção é muito menos importante que o aumento obtido quando variado o número de capilaridade para uma razão de viscosidades fixa ($\lambda > 1$), como o caso discutido na 6.9, onde a variação de Ca ocorre na faixa de $Ca = 1E^{-2}$

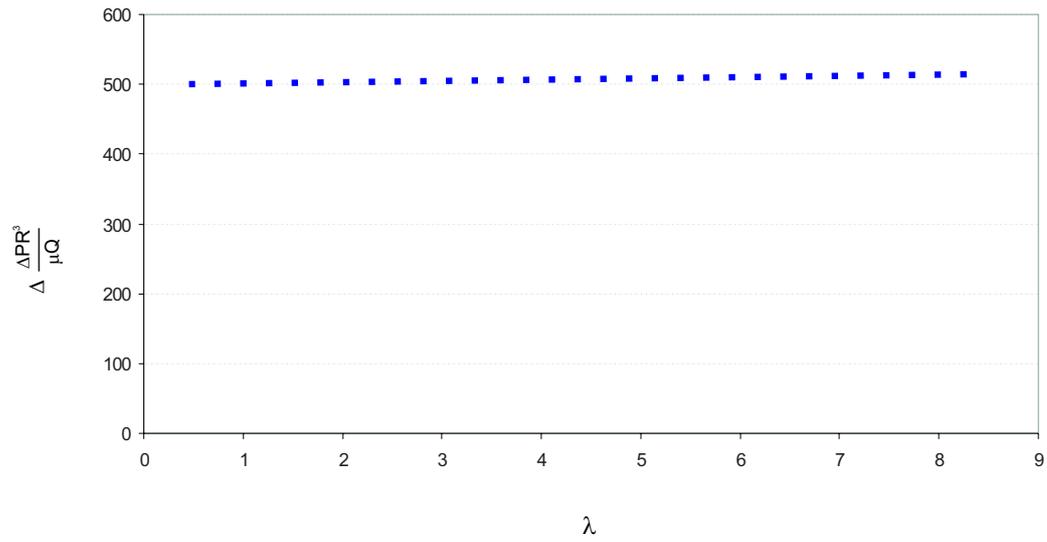


Figura 6.9: Comparação dos valores de $\frac{\Delta PR^3}{\mu_2 Q}$ extra para o escoamento da gota através da constrição para $Ca = 0.01$ e $\lambda = 1, 2, 4, 8$.

e $Ca = 1E^{-1}$.